



Gobierno
de Chile

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

SECTORIZACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO LOA

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

S.I.T. N° 358

Santiago, Diciembre 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Miguel Ángel Caro Hernández

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Civil Julio Faúndes S.
Ingeniero Civil Felipe Orellana M.
Ingeniero Civil Marcelo Allende B.
Geólogo Mesay Mamo
Geólogo Marta Llorente C.
Ingeniero Civil Francisco Chavarría V.
Ingeniero Civil Andrea Morlans L.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Cartógrafo Lorena Torres M.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1-1
1.1. General.....	1-1
1.2. Objetivos.....	1-2
1.3. Alcance.....	1-3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2-1
2.1. Estudios Revisados	2-1
2.1.1. REF#1: Embalse Conchi. Absalón Monsalve M. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969	2-3
2.1.2. REF#2: Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977	2-4
2.1.3. REF#3: Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Embalse Conchi – Río Loa. MOP, Dirección de Riego. 1979	2-5
2.1.4. REF#4: Balance Hidrológico Nacional: II Región. DGA. 1986	2-5
2.1.5. REF#5: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores. 1987	2-6
2.1.6. REF#6: Catastro de Usuarios de Aguas de la Subcuenca del Río Salado, Afluente del Río Loa: II Región. DGA. 1991	2-7
2.1.7. REF#7: Análisis de la Oferta y Demanda de Recursos Hídricos en Cuencas Críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Figuereido Ferraz Consultoría e Ingeniería de Proyecto.1996	2-8
2.1.8. REF#8: Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles BROS. 1999.....	2-8
2.1.9. REF#9: Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu-Chiu. 2000.....	2-10
2.1.10. REF#10: Estudio Hidrológico del Río Loa – Sector Yalquincha junta con Río San Salvador. Fernando Peralta y Cía. Ltda. 2002	2-10
2.1.11. REF#11: Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP. 2003.....	2-11
2.1.12. REF#12: Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta. MOP. 2003.....	2-13
2.1.13. REF#13: Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles a Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003	2-14
2.1.14. REF#14: Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cade-Idepe. 2004	2-15
2.1.15. REF#15: Estudio de Impacto Ambiental Suministro, Construcción y Operación de Aducción Pampa Puno. Codelco Chile – División Codelco Norte. 2004	2-16
2.1.16. REF#16: Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa. DARH. 2005	2-19
2.1.17. REF#17: Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama. DGA. 2005	2-21
2.1.18. REF#18: Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informes Finales de los Sectores de Calama – Pampa Llalqui y Pedro de Valdivia - María Elena. DGA. 2005	2-22
2.1.18.1. Sector Pedro de Valdivia - María Elena.....	2-22
2.1.18.2. Sector Calama – Pampa Llalqui.	2-26

2.1.19.	REF#19: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Cambio Tecnológico María Elena. SQM Nitratos. 2005	2-28
2.1.20.	REF#20: El Río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006	2-29
2.1.21.	REF#21: Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007.....	2-30
2.1.22.	REF#22: Optimización Operativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama. Declaración de Impacto Ambiental. TRATACAL. 2007.....	2-30
2.1.23.	REF#23: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Pramir Ambiental Consultores. 2008	2-32
2.1.24.	REF#24: Resumen de los Resultados del Desarrollo y Aplicación de un Modelo de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Loa. Minera El Tesoro - Montgomery & Associates. 2009	2-35
2.1.25.	REF#25: Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009. Errol L. Montgomery & Associates, Ltda. 2009	2-37
2.1.26.	REF#26: Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010	2-40
2.1.27.	REF#27: Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012	2-42
2.1.28.	REF#28: Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012	2-45
2.1.29.	REF#29: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013.....	2-49
2.1.29.1.	Geología del Área.....	2-49
2.1.29.2.	Hidrogeología	2-49
2.1.29.3.	Prospección Geofísica	2-55
2.1.29.4.	Interpretación y Análisis de Resultados.....	2-55
2.1.30.	REF#30: Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas. DGA. 2014.....	2-57
2.1.31.	REF#31: Análisis Integrado Río Loa, Región de Antofagasta. DGA – Knight Piésold S.A. 2014	2-58
2.1.31.1.	Modelo Integrado MAGIC	2-58
2.1.31.2.	Modelo Subterráneo MODFLOW	2-60
2.1.32.	REF#32: Metodología para la Delimitación y Sectorización de Acuíferos a Nivel Nacional. DGA – GCF Ingenieros Limitada. En Desarrollo.	2-61
2.2.	Información Facilitada por la DGA	2-66
2.2.1.	Información SIG de la Cuenca.....	2-67
2.2.2.	Estadísticas Pluviométricas y Fluvimétricas de Estaciones DGA	2-67
2.2.3.	Derechos de Aguas Superficiales y Subterráneas	2-69
2.2.4.	Estadística de Caudales en Captaciones Superficiales.....	2-74
2.2.5.	Niveles Subterráneos en Pozos DGA	2-74
2.2.6.	Expedientes Zonas de Exploración	2-76
2.2.7.	Embalse Conchi.....	2-76
2.3.	Resumen de Información Relevante para la Sectorización de los Acuíferos	2-77
2.3.1.	Geofísica.....	2-77
2.3.2.	Estratigrafía	2-78
2.3.3.	Constantes Elásticas	2-81
3.	CAMPAÑA DE TERRENO GEOFÍSICA	3-1
3.1.	Marco Geológico	3-1

3.2. Campaña de Perfiles TEM	3-1
3.3. Interpretación de los Resultados.....	3-3
4. PROPUESTA DE SECTORES HIDROGEOLÓGICOS	4-1
4.1. Metodología	4-1
4.2. Propuesta de Sectorización	4-1
4.2.1. Identificación de Zona de Estudio	4-2
4.2.2. Base Topográfica y Red de Drenaje	4-2
4.2.3. Sectorización Preliminar según Sub-Cuencas	4-5
4.2.4. Hidrogeología	4-5
4.2.4.1. Geomorfología	4-7
4.2.4.2. Geología Regional	4-8
4.2.4.3. Información Geofísica y Estratigráfica	4-16
4.2.4.4. Información Hidrogeológica	4-18
4.2.5. Captaciones Subterráneas	4-26
4.2.6. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común	4-28
4.2.6.1. SHAC Pampa Puno	4-28
4.2.6.2. SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi.....	4-28
4.2.6.3. SHAC San Pedro Inacaliri	4-29
4.2.6.4. SHAC Río Salado	4-29
4.2.6.5. SHAC Calama	4-29
4.2.6.6. SHAC Pampa Llalqui	4-29
4.2.6.7. SHAC Salar de Miraje.....	4-30
4.2.6.8. SHAC Salar de Llamara	4-30
4.2.6.9. SHAC Loa desde María Elena hasta Quillagua	4-30
4.2.6.10. SHAC Loa desde Quillagua hasta Desembocadura	4-31
4.2.7. Vínculos	4-31
4.2.8. Interpretación de la Profundidad de Basamento	4-34
5. ACTUALIZACIÓN MODELO INTEGRADO	5-1
5.1. Modelo Integrado 2013	5-1
5.1.1. Nodos	5-1
5.1.2. Tramos de Río	5-5
5.1.3. Acuíferos.....	5-6
5.1.4. Zonas de Riego	5-6
5.1.5. Canales de Regadío	5-8
5.1.6. Embalse Conchi	5-9
5.1.7. Pozos de Bombeo	5-10
5.1.8. Captaciones Puntuales	5-12
5.1.9. Descargas Puntuales.....	5-13
5.1.10. Estaciones Fluviométricas de Calibración	5-14
5.2. Modificaciones Asociadas a la Actualización del Modelo	5-15
5.2.1. Acuíferos.....	5-15
5.2.2. Tramos de Río.....	5-16
5.2.3. Zonas de Riego	5-16
5.2.4. Pozos de Bombeo	5-17
5.2.5. Estadísticas	5-19

5.3.	Calibración del Modelo Integrado	5-20
5.4.	Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluviométricas	5-34
5.5.	Análisis de la Calibración Obtenida	5-35
5.6.	Análisis de los Resultados del Modelo.....	5-37
5.6.1.	Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados	5-37
5.6.2.	Satisfacción de la Demanda Hídrica en Zonas de Riego	5-39
5.6.3.	Análisis Volumétrico Embalse Conchi	5-39
6.	ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO	6-1
6.1.	Modelo Hidrogeológico 2013.....	6-1
6.2.	Modificaciones Asociadas a la Actualización del Modelo	6-4
6.3.	Calibración del Modelo Hidrogeológico	6-7
6.3.1.	Calibración Régimen Permanente	6-7
6.3.2.	Calibración Régimen Transiente	6-15
6.3.2.1.	Niveles Observados	6-18
6.3.2.2.	Pozos de Bombeo	6-22
6.3.2.3.	Coeficiente de Almacenamiento y Almacenamiento Específico	6-23
6.3.2.4.	Resultados Calibración.....	6-23
6.3.3.	Curvas Equipotenciales	6-29
6.3.4.	Comparativa Caudales de Afloramiento	6-31
7.	EVALUACIÓN DE ESCENARIOS	7-1
7.1.	Determinación de la Oferta Hídrica	7-1
7.1.1.	Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua	7-1
7.1.2.	Evaluación de la Oferta Hídrica mediante MAGIC	7-1
7.1.3.	Evaluación de la Oferta Hídrica mediante Visual MODFLOW	7-4
7.2.	Determinación del Volumen Embalsado.....	7-8
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	8-1
8.1.	Conclusiones Generales.....	8-1
8.2.	Recomendaciones.....	8-3

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-1	Ubicación de la Cuenca	1-1
Figura 2.1-1	Unifilar Río Loa	2-9
Figura 2.1-2	Curvas Isofreáticas Sector Pampa Puno: Febrero 2001	2-20
Figura 2.1-3	Curvas Isofreáticas Sector María Elena.....	2-25
Figura 2.1-4	Niveles Freáticos Sector Calama – Pampa Llalqui.....	2-29
Figura 2.1-5	Puntos con Información Estratigráfica y Sondeos TEM en Sector Salar de Llamara	2-33
Figura 2.1-6	Puntos de la Red de Monitoreo de MET.....	2-38
Figura 2.1-7	Ubicación de Perfiles TEM Y GEM-2	2-41
Figura 2.1-8	Zonificación de Principales Acuíferos según REF#27.....	2-43
Figura 2.1-9	Ubicación de Perfiles Gravimétricos Realizados en REF#28	2-47
Figura 2.1-10	Ubicación de los Perfiles TEM y Puntos Gravimétricos Realizados en REF#29	2-56
Figura 2.1-11	Extensión del Modelo Hidrogeológico Tridimensional	2-57
Figura 2.1-12	Esquema de Sectorización Acuífera.....	2-65
Figura 2.2-1	Ubicación de los Expedientes de Derechos Subterráneos Recopilados para la Cuenca del Río Loa	2-73
Figura 2.2-2	Pozos DGA de Medición de Niveles Subterráneos en la Cuenca del Río Loa	2-75
Figura 2.2-3	Volumen Embalsado Embalse Conchi	2-77
Figura 2.3-1	Resumen de la Información Geofísica Recopilada.....	2-79
Figura 2.3-2	Resumen de la Información Estratigráfica Recopilada.....	2-80
Figura 3.2-1	Ubicación Puntos TEM Campaña Geofísica	3-2
Figura 3.3-1	Perfil Interpretado Parque Eólico Calama (L-1).....	3-6
Figura 3.3-2	Perfil Interpretado Santa Isabel (L-4)	3-7
Figura 3.3-3	Perfil Interpretado Quillagua (L-5A).....	3-8
Figura 4.2-1	Identificación de la Zona de Estudio.....	4-3
Figura 4.2-2	Topografía y Red de Drenaje	4-4
Figura 4.2-3	Sectorización Preliminar	4-6
Figura 4.2-4	Geomorfología de la II Región de Antofagasta.....	4-7
Figura 4.2-5	Geología Cuenca Río Loa	4-9
Figura 4.2-6	Cronoestratigrafía de la Cuenca de Calama en el Terciario.....	4-15
Figura 4.2-7	Materiales Detríticos de Media a Alta Permeabilidad	4-17
Figura 4.2-8	Separación de Zonas por Pendiente del Terreno	4-20
Figura 4.2-9	Información de Profundidad de Basamento.....	4-21
Figura 4.2-10	Delimitación Sector Acuífero Cuenca Río Loa.....	4-22
Figura 4.2-11	Información de Parámetros Hidrogeológicos	4-24
Figura 4.2-12	Información de Niveles Freáticos.....	4-25
Figura 4.2-14	Sistemas Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común	4-32
Figura 4.2-16	Profundidad de Basamento	4-35
Figura 5.1-1	Variación Superficie Cultivable Modelación MAGIC 2013	5-7
Figura 5.1-2	Curva Cota v/s Volumen Embalsado	5-9
Figura 5.1-3	Curva Superficie Inundada v/s Volumen Embalsado.....	5-9
Figura 5.1-4	Descarga Puntual Modelación MAGIC 2013	5-13
Figura 5.1-5	Variación Mensual Descarga Puntual Modelación MAGIC 2013	5-13
Figura 5.2-1	Variación Superficie Cultivable	5-17
Figura 5.2-2	Variación de Caudal por Pérdidas Sector Urbano	5-19
Figura 5.2-3	Variación de Caudal de Descarga PTAS	5-19
Figura 5.3-1	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Vado Santa Bárbara	5-21
Figura 5.3-3	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa Salida Embalse Conchi .	5-22

Figura 5.3-4	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa Salida Embalse Conchi	5-22
Figura 5.3-5	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Toconce antes Represa SENDOS 5-23	
Figura 5.3-6	Serie de Volumen Acumulado; Río Toconce antes Represa SENDOS....	5-23
Figura 5.3-7	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Salado en Sifón Ayquina.....	5-24
Figura 5.3-8	Serie de Volumen Acumulado; Río Salado en Sifón Ayquina.....	5-24
Figura 5.3-9	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Yalquincha	5-25
Figura 5.3-10	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Yalquincha	5-25
Figura 5.3-11	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Escorial.....	5-26
Figura 5.3-12	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Escorial.....	5-26
Figura 5.3-13	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Finca	5-27
Figura 5.3-14	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Finca	5-27
Figura 5.3-15	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	5-28
Figura 5.3-16	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua ..	5-28
Figura 5.3-17	Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Desembocadura ...	5-29
Figura 5.3-18	Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Desembocadura	5-29
Figura 5.3-19	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Vado Santa Bárbara ...	5-30
Figura 5.3-20	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa Salida Embalse Conchi	5-30
Figura 5.3-21	Caudal Calculado v/s Observado; Río Toconce antes Represa SENDOS	5-31
Figura 5.3-22	Caudal Calculado v/s Observado; Río Salado en Sifón Ayquina.....	5-31
Figura 5.3-23	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Yalquincha	5-32
Figura 5.3-24	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Escorial.....	5-32
Figura 5.3-25	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Finca	5-33
Figura 5.3-26	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	5-33
Figura 5.3-27	Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Desembocadura	5-34
Figura 5.6-1	Balance Volumétrico Embalse Conchi	5-40
Figura 6.1-1	Condiciones de Borde Nivel Conocido.....	6-2
Figura 6.1-2	Condiciones de Borde Río	6-3
Figura 6.1-3	Condiciones de Borde Dren.....	6-3
Figura 6.1-4	Calibración Modelo REF#31	6-4
Figura 6.3-1	Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Superior	6-10
Figura 6.3-2	Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Intermedio.	6-11
Figura 6.3-3	Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Inferior..	6-12
Figura 6.3-4	Calibración Ajuste en Régimen Permanente	6-13
Figura 6.3-6	Distribución Espacial de Zonas de Infiltración Tranque Talabre.....	iError!
Marcador no definido.		
Figura 6.3-7	Curvas Equipotenciales Proyectadas para los Pozos MET en los Estratos Superior e Inferior a Enero de 2003.....	6-21
Figura 6.3-9	Evolución del Error Cuadrático Medio RMS en Período de Modelación Transiente	6-25
Figura 6.3-10	Calibración Modelo Actual en Régimen Transiente en Términos de Niveles. Pozos MET Acuífero Superior	6-25
Figura 6.3-14	Curvas Equipotenciales para Unidad Acuífera Superior	6-29
Figura 6.3-15	Curvas Equipotenciales para Unidad Acuífera Inferior.....	6-30
Figura 6.3-16	Gráfico Temporal Comparativo de Caudales de Afloramientos Observados versus Calculados por el Modelo.....	6-31

Figura 7.1-1	Oferta Hídrica SHAC Calama – Pampa Llalqui	7-2
Figura 7.1-2	Oferta Hídrica SHAC Río San Pedro	7-2
Figura 7.1-3	Oferta Hídrica SHAC Salar de Miraje	7-3
Figura 7.1-5	Gráfico Afección sobre Aguas Superficiales	7-6
Figura 7.1-6	Afección de los SHAC de Pampa Llalqui y Calama según Criterio 2	7-7
Figura 7.2-1	Zonas Acuíferas Secas	7-9

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1-1	Relaciones de Embalse Conchi	2-3
Cuadro 2.1-2	Parámetros Hidráulicos en Sectores Ojos de San Pedro y Turi	2-4
Cuadro 2.1-3	Balance Hídrico por Subcuenca del Río Loa	2-6
Cuadro 2.1-4	Parámetros Hidráulicos en Pozos de San Pedro de Inacaliri	2-7
Cuadro 2.1-5	Balance Hídrico de Derechos de Agua Río Loa (l/s)	2-10
Cuadro 2.1-6	Resumen de Derechos y Usos Efectivos en REF#11	2-12
Cuadro 2.1-7	Parámetros Hidráulicos Modelo Llalqui	2-13
Cuadro 2.1-8	Coordenada y Nivel Estático de Pozos	2-18
Cuadro 2.1-9	Pruebas de Bombeo Pozos Pampa Puno	2-19
Cuadro 2.1-10	Estimación de Pérdidas por Infiltración Río Loa	2-22
Cuadro 2.1-11	Parámetros Elásticos sector María Elena	2-26
Cuadro 2.1-12	Coordenadas y Nivel Estático de los Pozos	2-27
Cuadro 2.1-13	Parámetros Elásticos Obtenidos de las Pruebas de Bombeo	2-27
Cuadro 2.1-14	Balance Hídrico por Acuífero (l/s)	2-28
Cuadro 2.1-15	Balance de la Distribución y Participación en el Aprovechamiento de Aguas en Cuenca Río Loa	2-31
Cuadro 2.1-16	Caudales de Diseños Proyectados para Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama	2-32
Cuadro 2.1-17	Resultados de Pruebas de Bombeo en Sector de Salar de Llamara ...	2-34
Cuadro 2.1-18	Transmisividad (m ² /día) en Sector de Salar de Llamara	2-35
Cuadro 2.1-19	Coefficiente de Almacenamiento (%) en Sector de Salar de Llamara.	2-35
Cuadro 2.1-20	Resultados de Pruebas de Bombeo Realizadas por MET en Acuífero de Calama	2-36
Cuadro 2.1-21	Resumen con los Puntos de Monitoreo de MET y Extensión de Registros de Niveles Subterráneos y Caudales	2-39
Cuadro 2.1-22	Parámetros Hidrogeológicos en Unidades Acuíferas	2-40
Cuadro 2.1-23	Rangos y Valores de Parámetros Hidráulicos del Acuífero según REF#27	2-44
Cuadro 2.1-24	Balance Oferta-Demanda Hídrica en Cuenca Río Loa	2-44
Cuadro 2.1-25	Unidades Geológicas Identificadas en Acuífero de Calama	2-46
Cuadro 2.1-26	Resumen con los Rangos de Valores de Parámetros Hidráulicos en Acuífero Calama	2-48
Cuadro 2.1-27	Niveles Estáticos en Pozos de Pampa Puno	2-50
Cuadro 2.1-28	Transmisividades Obtenidas en Pozos de Pampa Puno	2-51
Cuadro 2.1-29	Niveles Estáticos en Pozos del Sector Polapi	2-52
Cuadro 2.1-30	Transmisividad en Sector Polapi	2-52
Cuadro 2.1-31	Niveles Estáticos en Sector San Pedro de Inacaliri	2-53
Cuadro 2.1-32	Parámetros Hidráulicos del Acuífero en Sector Llalqui	2-54
Cuadro 2.1-33	Características Modelo Calama	2-61
Cuadro 2.2-1	Resumen de la Información Pluviométrica en Registros de Estaciones DGA	2-68

Cuadro 2.2-2	Resumen de la Información Fluviométrica en Registros de Estaciones DGA	2-69
Cuadro 2.2-3	Resumen de la Información de Derechos Superficiales y Subterráneos Otorgados	2-70
Cuadro 2.2-4	Resumen Expedientes de Derechos Subterráneos.....	2-70
Cuadro 2.2-5	Información Hidrogeológica en Expedientes.....	2-72
Cuadro 2.2-6	Resumen de la Información de Caudales en Captaciones Superficiales de la Cuenca del Río Loa.....	2-74
Cuadro 2.2-7	Resumen de la Información de Niveles Subterráneos en Pozos DGA	2-76
Cuadro 2.3-1	Resumen Transmisividad y Permeabilidad.....	2-81
Cuadro 2.3-2	Resumen Coeficiente de Almacenamiento.....	2-81
Cuadro 3.2-1	Perfiles TEM Geodatos.....	3-3
Cuadro 3.3-1	Interpretación de Unidades.....	3-4
Cuadro 4.2-1	Parámetros Hidráulicos por Sector Acuífero.....	4-23
Cuadro 5.1-1	Nodos Definidos en Modelación MAGIC 2013.....	5-1
Cuadro 5.1-2	Parámetros Tramos de Río Modelación MAGIC 2013.....	5-5
Cuadro 5.1-3	Acuíferos Modelación MAGIC 2013.....	5-6
Cuadro 5.1-4	Conectividad Acuíferos Modelación MAGIC 2013.....	5-6
Cuadro 5.1-5	Zonas de Riego Modelación MAGIC 2013.....	5-7
Cuadro 5.1-6	Canales Modelación MAGIC 2013.....	5-8
Cuadro 5.1-7	Pozos Modelación MAGIC 2013.....	5-10
Cuadro 5.1-8	Pozos Representativos Modelación MAGIC 2013.....	5-11
Cuadro 5.1-9	Captaciones Puntuales Modelación MAGIC 2013.....	5-12
Cuadro 5.1-10	Retorno de Captaciones Modelación MAGIC 2013.....	5-12
Cuadro 5.1-11	Retorno de Captaciones Modelación MAGIC 2013.....	5-14
Cuadro 5.2-1	Parámetros Hidrogeológicos Acuíferos.....	5-15
Cuadro 5.2-2	Parámetros Geométricos Acuíferos.....	5-15
Cuadro 5.2-3	Parámetros Tramos de Río.....	5-16
Cuadro 5.2-4	Zonas de Riego.....	5-17
Cuadro 5.2-5	Pozos Representativos.....	5-18
Cuadro 5.4-1	Estadígrafos Calibración.....	5-35
Cuadro 5.6-1	Balance Subterráneo MAGIC (m ³ /s).....	5-38
Cuadro 5.6-2	Satisfacción Demanda Hídrica.....	5-39
Cuadro 6.1-1	Características Modelo Numérico REF#31.....	6-1
Cuadro 6.2-1	Balance Hídrico Modelo REF#31.....	6-5
Cuadro 6.3-1	Parámetros Estadísticos y Residuales obtenidos de la Calibración en Régimen Permanente.....	6-13
Cuadro 6.3-2	Balance Hídrico en Régimen Permanente.....	6-14
Cuadro 6.3-3	Serie de Recarga por Infiltración del Tranque Talabre Ingresada al Modelo	iError! Marcador no definido.
Cuadro 6.3-4	Pozos de Observación considerados para Calibración en Régimen Transiente	6-18
Cuadro 6.3-5	Pozos de propiedad de MET con sus respectivos Estratos Acuíferos Captantes	6-19
Cuadro 6.3-6	Pozos de Bombeo con algún grado de Información.....	6-22
Cuadro 6.3-7	Derechos Subterráneos Considerados en la Modelación.....	6-22
Cuadro 6.3-8	Balance Hídrico en Régimen Transiente. Valores Promedio (2003-2014)	6-28
Cuadro 7.1-1	Oferta Hídrica SHAC Calama.....	7-4
Cuadro 7.1-2	Oferta Hídrica SHAC con Derechos Subterráneos.....	7-4
Cuadro 7.1-3	Pozos con Derechos Subterráneos en Acuífero Calama.....	7-5

Cuadro 7.1-4	Pozos con Derechos Subterráneos en Acuífero Calama	7-6
Cuadro 7.2-1	Volumen Embalsado	7-10
Cuadro 8.1-1	Oferta Hídrica MAGIC; SHAC Calama	8-3
Cuadro 8.1-2	Oferta Hídrica MAGIC; SHAC con Derechos Subterráneos	8-3
Cuadro 8.1-3	Oferta Hídrica MAGIC; SHAC con Derechos Subterráneos	8-3

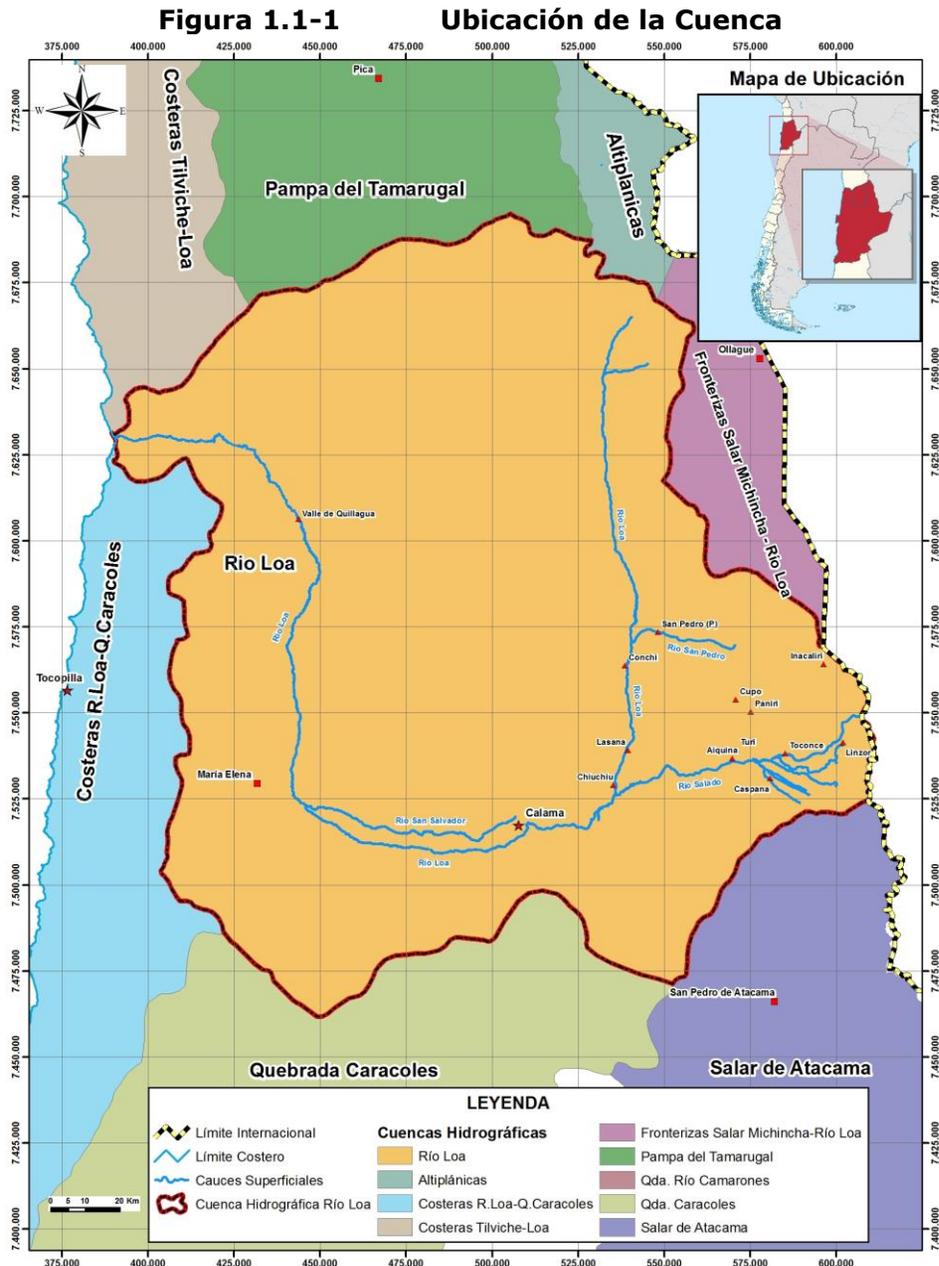
ANEXOS (en formato digital)

ANEXO A	Información Estratigráfica
ANEXO A1	Estratigrafía Sector Pampa Puno
ANEXO A2	Estratigrafía Sector Salar de Llamara
ANEXO A3	Estratigrafía Informe Minera El Tesoro
ANEXO A4	Estratigrafía Informe Tranque Talabre
ANEXO A5	Estratigrafía Expedientes DGA de Exploraciones
ANEXO B	Información Geofísica
ANEXO B1	Geofísica Sector Pampa Puno
ANEXO B2	Geofísica Sector María Elena
ANEXO B3	Geofísica Sector Salar de Llamara
ANEXO B4	Geofísica Expediente DGA de Exploraciones
ANEXO C	Gravimetría Sector Pampa Puno
ANEXO D	Antecedentes DGA
ANEXO E	Antecedentes DOH
ANEXO F	Informe Geofísica Geodatos, Campaña 2014
ANEXO G	Geología General

1. INTRODUCCIÓN

1.1. General

La cuenca hidrográfica del río Loa, con una extensión de 33.081 km², está ubicada en la II Región de Antofagasta, en la zona norte de Chile (Figura 1.1-1). El río Loa nace a los pies del volcán Miño y posee una dirección sur en su primer tramo hasta aproximadamente la localidad de Chiu-Chiu, donde comienza a doblar en dirección oeste hasta la junta con el río San Salvador. En este punto, el río Loa toma una dirección norte hasta el poblado de Quillagua, donde continúa hacia el oeste para finalmente desembocar en el Océano Pacífico.



Fuente: Elaboración Propia

En la cuenca se presentan 3 tipos climáticos: el de estepa de altura en la parte más alta (3.500 m s.n.m.) y oriental de la cuenca, subtipo climático desértico interior en la parte intermedia de la cuenca y el desértico costero con nublados abundantes en el plano occidental.

Los aportes de agua al río Loa son generados principalmente por las decenas de vertientes a lo largo de su trayecto, principalmente en su zona alta, mientras que sus afluentes principales corresponden a los ríos San Pedro, Salado y San Salvador junto a la quebrada Amarga. De los cauces anteriores, el río San Pedro es captado en su totalidad por la industria minera mediante extracciones superficiales y subterráneas, por lo que en la actualidad su aporte al río Loa es nulo.

A pesar de su gran longitud y área aportante, los recursos hídricos de la cuenca del río Loa son escasos debido a las condiciones desérticas y escasa precipitación. La estación pluviométrica Lequena, ubicada en la parte alta de la cuenca, muestra un promedio anual de 47,5 mm/a durante la última década. Dentro del mismo periodo, la parte media, representada por la estación Calama, presenta una precipitación anual de 2,72 mm/a y la parte baja en Quillagua 0,26 mm/a. Por lo tanto, el uso del agua en la zona es de gran importancia para el desarrollo de la región, principalmente para la industria minera que posee la mayor parte de los derechos de agua otorgados en la cuenca.

En particular, el recurso subterráneo posee un papel preponderante en el desarrollo de la cuenca, por lo que últimamente se han desarrollado una serie de estudios con el objeto de mejorar el conocimiento de los acuíferos y su interacción con el río Loa. El presente estudio permite complementar la información hidrogeológica existente en la cuenca, de manera tal de definir sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común y actualizar las herramientas de modelación para evaluar la oferta hídrica en cada sector acuífero.

El presente estudio surge ante la necesidad de la autoridad de administrar adecuadamente los recursos hídricos de una de las cuencas con mayor desarrollo minero del país, en la que a pesar de existir varios estudios hidrogeológicos, de disponibilidad de aguas y de gestión, no se dispone de una sectorización acuífera que permita administrar y determinar la oferta hídrica.

En este contexto, se han desarrollado 2 modelos numéricos que representan la dinámica del recurso hídrico superficial y subterráneo. Estos modelos fueron desarrollados, en plataforma MAGIC (Año 2013) y Visual MODFLOW (Año 2013), y constituyen un elemento central del presente estudio.

1.2. Objetivos

El objetivo general del estudio es la revisión y análisis de antecedentes y la generación de información para realizar una propuesta de sectorización hidrogeológica para la cuenca del río Loa. Se actualizará tanto el modelo integrado como el modelo hidrogeológico, en base a los cuales se determinará la oferta hídrica.

Como objetivos específicos se identifican los siguientes:

- Recopilación y revisión de antecedentes.
- Obtener información geofísica a través de nuevas prospecciones, que complementarán la existente.
- Análisis e interpretación de la nueva información y de los antecedentes ya existentes.

- Preparación de propuesta de sectores hidrogeológicos.
- Actualización del modelo MAGIC.
- Actualización del modelo MODFLOW y calibración en régimen transiente.
- Evaluación de oferta hídrica según criterios de la DGA.
- Determinación del volumen embalsado en el acuífero.
- Desarrollo de una base de datos consolidada, representada en un SIG.

1.3. Alcance

El presente estudio se enfoca en la sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa y su utilización en la actualización de los actuales modelos MAGIC y MODFLOW de la cuenca. De este modo, el alcance del estudio abarca la revisión de los antecedentes disponibles, realización de una campaña de geofísica, la sectorización de los acuíferos y la actualización de los modelos numéricos.

La revisión de los antecedentes se realizó en función de aquellos documentos proporcionados por la DGA, así como también de los antecedentes recopilados por este consultor. Temas considerados relevantes para la actualización de los modelos son la geología, hidrogeología, variables hidrométricas, geofísica y parámetros asociados al comportamiento de la cuenca y usos del agua. En relación al modelo MAGIC, la recopilación de antecedentes se enfocará en la actualización de la información desde el año 2013 al 2014.

En cuanto a la campaña geofísica, este estudio contempló la realización de 80 estaciones TEM distribuidas en la cuenca del río Loa, cuya ubicación ha sido definida en conjunto con la DGA, con el fin de estudiar los sectores de mayor importancia hidrogeológica y que posean poca información en la actualidad.

La sectorización de acuíferos se definió en base a la información recopilada, incluyendo la nueva información geofísica, basándose en la metodología de sectorización de acuíferos que se encuentra actualmente en desarrollo por parte de GCF Ingenieros Limitada. Para esto, se tomará en consideración la geología de la cuenca, topografía, información geofísica, sondajes y derechos actualmente otorgados. Esta sectorización se utilizará para el mejoramiento de los modelo MAGIC y MODFLOW existentes.

La mejora del modelo MAGIC estuvo enfocada a la actualización de la información hidrogeológica, es decir, la nueva información generada en el presente estudio en relación a la sectorización de los acuíferos. De este modo, la información asociada a la hidrología, sectores de riego, bombes, descargas y otros, no será modificada, ya que no se ha generado nueva información en relación a esos temas, y sólo será actualizada hasta el año 2014.

Finalmente, se realizó la calibración en régimen transiente del modelo MODFLOW disponible para la cuenca, en base a información de niveles disponibles en estudios o proporcionados por la Dirección General de Aguas, limitándose la calidad de la calibración a la disponibilidad de información.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estudios Revisados

A continuación se presentan los estudios relacionados con los recursos hídricos de la cuenca del río Loa que fueron revisados con motivo de la realización del presente informe. Parte de estos estudios fueron proporcionados por la DGA como parte de los antecedentes base asociados al estudio, mientras que otros fueron obtenidos desde entidades como el SEA, SISS, CORFO, etc.

REF#1: Embalse Conchi. Absalón Monsalve M. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

REF#2: Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977

REF#3: Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Embalse Conchi – Río Loa. MOP, Dirección de Riego. 1979

REF#4: Balance Hidrológico Nacional: II Región. DGA. 1986

REF#5: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores. 1987

REF#6: Catastro de Usuarios de Aguas de la Subcuenca del Río Salado, Afluente del Río Loa: II Región. DGA. 1991

REF#7: Análisis de la Oferta y Demanda de Recursos Hídricos en Cuencas Críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Figuereido Ferraz Consultoría e Ingeniería de Proyecto. 1996

REF#8: Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles BROS. 1999

REF#9: Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu-Chiu. 2000

REF#10: Estudio Hidrológico del Río Loa – Sector Yalquincha junta con Río San Salvador. Fernando Peralta y Cía. Ltda. 2002

REF#11: Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP. 2003

REF#12: Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta. MOP. 2003

REF#13: Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles a Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003

REF#14: Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cade-Idepe. 2004

REF#15: Estudio de Impacto Ambiental Suministro, Construcción y Operación de Aducción Pampa Puno. Codelco Chile – División Codelco Norte. 2004

REF#16: Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa. DARH. 2005

REF#17: Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama. DGA. 2005

REF#18: Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informes Finales de los Sectores de Calama – Pampa Llalqui y Pedro de Valdivia - María Elena. DGA. 2005

REF#19: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Cambio Tecnológico María Elena. SQM Nitratos. 2005

REF#20: El Río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006

REF#21: Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007

REF#22: Optimización Operativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama. DIA. TRATACAL. 2007.

REF#23: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Pramar Ambiental Consultores. 2008

REF#24: Resumen de los Resultados del Desarrollo y Aplicación de un Modelo de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Loa. Minera El Tesoro - Montgomery & Associates. 2009

REF#25: Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009. Errol L. Montgomery & Associates, Ltda. 2009

REF#26: Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010

REF#27: Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012

REF#28: Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012

REF#29: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

REF#30: Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas. DGA. 2014

REF#31: Análisis Integrado Río Loa, Región de Antofagasta. DGA – Knight Piésold S.A. 2014

REF#32: Metodología para la Delimitación y Sectorización de Acuíferos a Nivel Nacional. DGA – GCF Ingenieros Limitada. En Desarrollo.

REF#33: Informe Final, Etapa 1: Actualización Modelo de Flujo Estudio Infiltración Tranque Talabre. CODELCO-HIDROMAS. 2014

Cabe destacar que como base para el presente estudio se utilizó la REF#31, correspondiente al estudio inmediatamente anterior al presente y que, como parte de su análisis, posee un completa recopilación de información hasta el año 2013 de diferentes variables necesarias para la modelación de la cuenca, asociado tanto a hidrología e hidrogeología, como también a las diferentes obras existentes (embalse, canales, drenes, pozos, etc.).

2.1.1. REF#1: Embalse Conchi. Absalón Monsalve M. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1969

Este estudio presenta las bases teóricas y técnicas del proyecto de construcción del embalse Conchi, considerando estudios hidrológicos del sector de emplazamiento, futuras pérdidas de caudal en el embalse y la demanda hídrica de la cuenca con el fin de generar un balance de agua que permite diseñar la capacidad del embalse y las obras asociadas.

Se considera relevante la información de las curvas que relacionan el volumen embalsado a la altura de agua y superficie abarcada (Cuadro 2.1-1), la cual se utilizó en el actual modelo MAGIC de la cuenca. Esta información será nuevamente utilizada en la actualización del modelo MAGIC, permitiendo simular el comportamiento correcto del embalse en función del caudal entrante y la demanda de agua.

Cuadro 2.1-1 Relaciones de Embalse Conchi

Cota (m s.n.m.)	Altura (m)	Superficie (m ²)	Volumen Embalsado (m ³)	Volumen Embalsado (Hm ³)
2.922	0	0	0	0
2.925	3	3.200	0	0
2.930	8	11.900	38.000	0
2.935	13	24.900	130.000	0
2.940	18	53.900	327.000	0
2.945	23	92.400	692.000	1
2.950	28	150.300	1.299.000	1
2.955	33	208.300	2.195.000	2
2.960	38	298.000	3.461.000	3
2.965	43	404.000	5.216.000	5
2.970	48	536.500	7.567.000	8
2.975	53	719.200	10.707.000	11
2.980	58	956.000	14.895.000	15
2.985	63	1.245.600	20.399.000	20
2.990	68	1.691.800	27.742.000	28

Fuente: REF#1

2.1.2. REF#2: Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO. 1977

Este estudio lo conforman 19 volúmenes de informes técnicos, los cuales presentan un análisis detallado de tópicos como meteorología, hidrología, hidrogeología, geología, entre otros, enfocándose en la zona del Norte Grande de Chile. En concreto, el área de estudio lo componen las cuencas de los ríos Loa y sus tributarios, los ríos San Pedro de Inacaliri, Salado y San Salvador, y la cuenca endorreica del Salar de Atacama.

De todos los informes técnicos desarrollados en el Proyecto CHI-535, para el presente estudio resulta de relevancia la información geológica e hidrogeológica que se generó para los sectores de Ojos de San Pedro en la cuenca del río San Pedro Inacaliri y el sector de Turi localizada en la cuenca del río Salado.

Se comienza con una descripción general de la geología en las zonas de interés, unidades geológicas más importantes y las principales fallas detectadas. Como resultado se confeccionaron mapas geológicos de cada sector. Análogamente se mencionó la realización de estudios geofísicos del tipo refracción sísmica y sondeo eléctrico vertical, los que fueron explicados muy a grandes rasgos. El detalle de los resultados de estos estudios geofísicos no se adjuntó en dicho documento. Finalmente, se presentan datos de litologías y estratigrafías de pozos construidos en ambos sectores (Ojos de San Pedro y Turi) así como también resultados de pruebas de bombeo que permitieron la determinación de los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos identificados. El Cuadro 2.1-2 muestra los valores de transmisividad, permeabilidad y coeficientes de almacenamiento para los sectores de Ojos de San Pedro y Turi.

Cuadro 2.1-2 Parámetros Hidráulicos en Sectores Ojos de San Pedro y Turi

Pozo Bombeo	Transmisividad (m ² /día)	Permeabilidad (m/día)	Coficiente Almacenamiento
B1	37.565	380	0,32
B1	1.409	18	0,14
	2.690	34	0,22
	4.530	57	0,12
B2	51.610	1.000	$8,3 \times 10^{-2}$
	85.436	1.700	$7,6 \times 10^{-4}$
B3	4.595	65	0,14
	3.272	46	0,34
	1.775	25	6×10^{-3}
B4	4.000	69	0,136
	3.456	76	-
	3.431	76	-
	2.021	45	-
Turi N° 1 II	565	12	$1,7 \times 10^{-2}$
Turi N° 2	973	6	$1,8 \times 10^{-2}$
Turi N° 5 III	1.780	18	$6,1 \times 10^{-4}$
Turi N° 7 I	2.710	31	$5,8 \times 10^{-3}$
Chiu-Chiu N° 1	744	-	-

Cupo N° 1	2.213	14	$4,6 \times 10^{-3}$
-----------	-------	----	----------------------

Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#2.

Todos los antecedentes, en especial aquellos que guardan relación con la interpretación hidrogeológica de los sectores de Ojos de San Pedro y Turi, serán utilizados en el presente estudio para la definición de el o los sectores acuíferos en dichos lugares de la parte alta de la cuenca del río Loa. Para ello se utilizarán los mapas geológicos elaborados para cada sector, así como la zonificación general que se realizó en la zona de Turi.

2.1.3. REF#3: Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Embalse Conchi – Río Loa. MOP, Dirección de Riego. 1979

Este estudio analiza el sistema hídrico conformado por el embalse Conchi, construido en el año 1975, y el río Loa y sus principales afluentes, mediante la elaboración de un modelo matemático de simulación que permitió representar las variaciones que experimenta el caudal del río Loa en determinados puntos. Para lograr reproducir lo anterior se incluyeron fenómenos naturales hidrológicos tales como pérdidas y recuperaciones de caudal; las entregas del embalse Conchi y las extracciones de agua para fines tanto agrícolas como no agrícolas (industriales y agua potable). Este modelo permitió además la estimación de las entregas requeridas desde el embalse, los déficit de riego en cada una de las zonas agrícolas consideradas de Lasana, Chiu-Chiu, Calama y Quillagua, las extracciones efectivas de riego en cada una de ellas, los estados del embalse, los porcentajes de superficies cultivadas posibles de regar y un índice de calidad del agua a la entrada de la zona de riego de Calama.

Este estudio fue particularmente útil en el desarrollo del actual modelo MAGIC de la cuenca para entender en detalle el funcionamiento del embalse Conchi y la manera en que realiza sus entregas dependiendo de las demandas de la cuenca. Esas mismas consideraciones seguirán siendo adoptadas en la actualización del modelo MAGIC.

2.1.4. REF#4: Balance Hidrológico Nacional: II Región. DGA. 1986

El balance hídrico nacional es un documento indispensable en el estudio de cualquier cuenca en el territorio chileno. Realizado por la DGA en 1986, cuenta con los principales componentes del balance hídrico por cuencas, a nivel anual. En particular, para la segunda región se consideran los años hidrológicos entre 1961/62 y 1980/81.

Debido a su antigüedad, este estudio se utiliza como referencia de las principales componentes hídricas de la cuenca, tomando siempre en cuenta que actualmente se dispone con cerca de 30 años adicionales de información.

A modo de resumen, se presenta el Cuadro 2.1-3 con el balance hídrico de las distintas subcuencas asociadas a la cuenca del río Loa, entregado por la REF#4.

Es importante destacar la componente de evapotranspiración del balance mostrado anteriormente, la cual está compuesta de evapotranspiración de cultivos, superficies de agua y cauces. Particularmente para esta última se presenta una estimación para 3 tramos de río en la cuenca, las cuales se presentan a continuación y que fueron tomadas en consideración para la elaboración del modelo MAGIC de la REF#31.

- Tramo río Loa entre Chintoraste y la confluencia con el río San Salvador

L = 59 Km

ETR (cauce) = 136 l/s

- Tramo río San Salvador

L = 56 Km

ETR (cauce) = 129 l/s

- Tramo río Loa entre la confluencia con el río San Salvador y la desembocadura al mar

L = 163 Km

ETR (cauce) = 375 l/s

Cuadro 2.1-3 Balance Hídrico por Subcuenca del Río Loa

Subcuenca	Sección Control		Precipitación l/s	Escorrentía l/s	Evapotranspiración l/s	Error l/s
	Aguas Abajo	Aguas Arriba				
San Pedro	Parshall 1	Siloli + Inacaliri	2,849	412	2,438	-1
	Antes Loa	Siloli + Inacaliri	4,019	461	3,562	-4
Salado	(1)	-	5,232	1,280	3,995	-43
	Antes Loa	(1)	5,425	540	4,938	-53
	Antes Loa	-	10,667	1,820	8,930	-83
Loa Alto	Loa en Lequena	-	8,833	533	8,212	+88
	(2)	-	23,527	3,164	20,710	-347
Loa Intermedio	Loa después Junta con San Salvador	(2)	8,744	-404	9,261	-113
	Loa después Junta con San Salvador	-	32,584	2,760	29,985	-161
Loa Bajo	Loa en Desembocadura	Loa después junta con San Salvador	9,975	580 (4)	9,029	+432 (4)
	Loa en Desembocadura	-	42,559	3,268 (3)	39,014	+277

Fuente: REF#4

(1) Secciones de Control: Toconce + Hojalar + Caspana + Curti + Salado Chico.

(2) Secciones de Control: Loa en Lequena + San Pedro de Inacaliri antes Loa + Salado Antes de Loa.

(3) Calculado restando la evapotranspiración estimada a la precipitación.

(4) La escorrentía según la fórmula de Turc es de 940 l/s, la cual se divide en 508 l/s generados en la cuenca y 432 l/s como error de cierre.

2.1.5. REF#5: Estudio de la Hidrogeología del Alto Loa: Contrato N° 218412-021. Agua Ingenieros Consultores. 1987

Este estudio hidrogeológico se desarrolló en un área acotada correspondiente a la cuenca del río San Pedro y tuvo como objetivo principal la evaluación de los recursos hídricos

subterráneos en las zonas de San Pedro-Inacaliri y quebrada Perdiz-Pampa Perdiz para poder así estimar las cantidades de agua que pueden ser captadas de forma permanente y segura en dicho sector por CODELCO.

Esta referencia entrega información tanto geológica como hidrogeológica a partir de prospecciones geofísicas, levantamientos geológicos de superficie y la construcción de varios sondajes estratigráficos y ejecución de un sin número de pruebas de bombeo. Todos estos antecedentes permitieron la elaboración de un sólido marco hidrogeológico que permitió una adecuada caracterización de las unidades acuíferas identificadas en el área de estudio, se definieron valores de parámetros hidráulicos para el sistema acuífero analizado y se determinó la extensión y potencia de los distintos acuíferos encontrados. En el Cuadro 2.1-4, se adjunta los valores de transmisibilidades y coeficientes de almacenamiento estimados a partir de pruebas de bombeo llevados a cabo en sondajes.

Cuadro 2.1-4 Parámetros Hidráulicos en Pozos de San Pedro de Inacaliri

Sondaje	Transmisibilidad (m ² /día)	Coefficiente Almacenamiento
CHU-1	40.000	-
CHU-6	3.000	0,0029
CHU-10	10.000	0,0014
CHU-10B	3.000	-
CHU-17	85.000	0,0031
CHU-18	100.000	0,0022
B-2	105.000	-

Fuente: REF#5

Paralelamente se obtuvieron muestras de aguas en el sector estudiado, a las cuales se les realizó un análisis químico y sólo a un conjunto de ellas se les efectuó un análisis isotópico para determinar contenidos de Oxígeno-18, Deuterio (H-2), Carbono-14 y Azufre-34. Lo anterior con la finalidad de establecer interconexiones de los flujos subterráneos entre la zona de interés y cuencas vecinas, así como también chequear la existencia de flujos regionales.

Finalmente, se realizó una estimación de los caudales subterráneos entrantes y salientes del área de estudio, los cuales resultaron ser iguales a 1.000 l/s y 110 l/s, respectivamente. Análogamente, se determinó un volumen de agua subterránea almacenada cercano a los 860 Mm³.

Este estudio proporciona información relevante para la caracterización hidrogeológica de la zona alta de la cuenca, además de parámetros necesarios para la representación de los acuíferos en el modelo MAGIC.

2.1.6. REF#6: Catastro de Usuarios de Aguas de la Subcuenca del Río Salado, Afluente del Río Loa: II Región. DGA. 1991

Este catastro ofrece un recabado análisis sobre la infraestructura de riego existente en la cuenca del río Salado, detallando la red de canales de regadío (a nivel matriz, derivado, subderivado y subderivado), la superficie asociada a cada uno, longitudes, diagramas unifilares, descripción de las obras de captación, etc.

Esta información fue considerada en el actual modelo MAGIC de la cuenca al momento de definir la red de canales dentro del Modelo Conceptual e Integrado en MAGIC focalizado en el sector de la cuenca del río Salado, así como también en las labores de terreno que permitieron identificar la ubicación de cada uno de los canales en uso.

Esta información será nuevamente utilizada para la actualización del modelo MAGIC del presente estudio.

2.1.7. REF#7: Análisis de la Oferta y Demanda de Recursos Hídricos en Cuencas Críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Figuereido Ferraz Consultoría e Ingeniería de Proyecto.1996

Este estudio tuvo como objetivo general efectuar un análisis de los recursos hídricos en la cuenca del río Loa, con el fin de entregar herramientas a la autoridad de la época para declarar el agotamiento de los recursos hídricos superficiales de la cuenca. Para esto, se evaluó la disponibilidad de recursos hídricos y se efectuó un estudio de la demanda asociada, así como un análisis del aprovechamiento de los recursos hídricos basado en la infraestructura de canales existente.

Este trabajo presenta para la cuenca del río Loa, y en particular para cada una de las subcuencas conformantes (río San Pedro, San Salvador y Salado), un análisis de la infraestructura de canales, su dimensionamiento, caudal máximo de explotación y de derechos, junto a la situación jurídica de sus usuarios. Además, elaboró un diagrama unifilar de la red hídrica del río Loa, el cual se presenta en la Figura 2.1-1 y fue de gran importancia para la definición de la red de canales a implementar en el actual modelo MAGIC.

2.1.8. REF#8: Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles BROS. 1999

Este documento corresponde al informe técnico de construcción y prueba de bombeo de los sondajes PUNO-314B y PUNO-6B, los cuales forman parte de la solicitud de aprovechamiento de aguas subterráneas de ambos.

La prueba de bombeo de gasto constante para el sondaje PUNO-314B se realizó en repetidas ocasiones, logrando finalmente un caudal de explotación de 5 l/s con un descenso de 81,29 m. En cuanto al sondaje PUNO-6B, éste mostró una mayor potencia del acuífero, logrando un caudal de 50 l/s con un descenso máximo de 60,16 m. Además, este documento presenta la habilitación y estratigrafía de ambos pozos, los cuales se presentan en el Anexo A1 y cuyo detalle será de gran importancia para identificar las características del acuífero de Pampa Puno.

2.1.9. REF#9: Solicitud de Declaración de Agotamiento del Cauce Natural del Río Loa y sus Afluentes. Comunidad Atacameña San Francisco Chiu-Chiu. 2000

Este informe presenta toda la documentación asociada y presentada para la solicitud de declaración de agotamiento del cauce natural del río Loa y sus afluentes desde el año 1998 hasta principios del año 2000, cuando esta solicitud fue aceptada.

Como parte de la documentación disponible, se presenta un informe técnico complementario que realiza un análisis de la disponibilidad de agua en la cuenca en régimen natural y un análisis de los derechos de agua otorgados y en trámite a 1998, con lo cual se realiza un balance hídrico que refleja el agotamiento de la cuenca (Cuadro 2.1-5). En particular, este balance proporciona información de la situación de derechos al año 1998, previo a que la cuenca fuera declarada agotada, lo que permite corroborar la información de derechos obtenidos por parte de la DGA. Además, proporciona una estimación del caudal ecológico para distintos tramos de los cauces de la cuenca, información relevante en caso de considerarse estos caudales en la modelación.

Cuadro 2.1-5 Balance Hídrico de Derechos de Agua Río Loa (l/s)

Río/Estación	Subcuenca/Sector	Q85%	Qec	Qot	Qtr	D
Siloli	San Pedro	80	9	162	0	-91
Inacaliri	San Pedro	740	84	119	0	537
Colana	San Pedro	180	21	60	0	99
S.P. Parshall N°1	San Pedro	990	113	879	0	-2
Caspana	Salado	370	40	66	0	264
Cupo	Salado	280	32	117	0	131
Panire	Salado	290	33	4	0	253
Toconce a/Salado	Salado	990	111	660	100	219
Salado en Sifón	Salado	1.300	141	1.292	100	-133
Q. Opache	San Salvador	60	7	0	0	53
Q. Quetena	San Salvador	90	11	0	0	79
San Salvador a/Loa	San Salvador	150	18	90	230	42
Loa	Lequena	490	57	587	126	-154
Loa	Conchi	1.760	195	1.766	126	-201
Loa	Yalquincha	3.990	426	4.414	259	-850
Loa	Quillagua	520	77	144	273	299

Fuente: REF#9

2.1.10. REF#10: Estudio Hidrológico del Río Loa – Sector Yalquincha junta con Río San Salvador. Fernando Peralta y Cía. Ltda. 2002

Este estudio fue realizado como parte del proceso de tramitación de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas por 719,1 l/s en 14 pozos del acuífero de Calama en el sector comprendido entre el río Loa, Calama, río San Salvador y vertiente Ojos de Opache.

La principal utilidad de este informe, para efectos del estudio, corresponde a valores de caudal que pueden ser contrastados con las simulaciones realizadas en MAGIC. En el tema de crecidas, menciona que se han observado caudales en el río Loa de hasta 90 m³/s. En cuanto a los afloramientos, se estima un caudal entre 530 y 580 l/s en el sector de Vertiente Ojos de Opache, mientras que en el río Loa entre Yalquincha y Finca se estiman valores entre 100 y 200 l/s.

Esta información ya fue utilizada como referencia tanto en el actual modelo MAGIC como MODFLOW para una correcta representación de los caudales de afloramiento.

2.1.11. REF#11: Evaluación de los Recursos Hídricos Sectores Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa. MOP. 2003

Este estudio tuvo como principal objetivo evaluar la disponibilidad de agua subterránea en sectores específicos de la cuenca del río Loa y los efectos de una explotación subterránea intensificada sobre los recursos superficiales, ya que entre los años 1999 a 2002 se presentó un gran número de solicitudes de derechos de agua subterránea en ciertos sectores específicos de la cuenca del río Loa. Estas solicitudes se concentran principalmente en el acuífero de Calama, en quebrada de León o sector de las vegas de Turi y en Pampa Llalqui.

Para dar cumplimiento al objetivo, se integró la información existente hasta la fecha del estudio y se abordaron temas geológicos, hidroquímicos, hidrológicos y de balance hídrico a nivel cuenca.

Por otro lado, se realizaron mejoras a un modelo hidrogeológico preliminar presentado para respaldar la solicitud de derechos por parte de un particular. Este modelo hidrogeológico mejorado considera el área comprendida desde el río Loa en Yalquincha por el Este, el sector La Finca por el Oeste, el cerro La Cruz por el Norte y un límite ficticio por el sur representado por una línea horizontal definida en la coordenada UTM 7.508.000 Norte. Posteriormente, se utilizó dicho modelo para determinar la magnitud de los eventuales caudales subterráneos a extraer del acuífero en el sector de Calama.

Este estudio parte inicialmente con una descripción geológica general de la cuenca del río Loa. Continúa con un análisis hidroquímico global que estudia la composición química de las aguas superficiales, subterráneas y la interacción entre ambas, así como el origen de éstas. Más adelante, se realizó un análisis hidrogeoquímico enfocado en los sectores de Calama y Pampa Llalqui, con el objetivo de establecer un marco geoquímico general de los principales acuíferos y su interacción con las aguas superficiales. Todo lo anterior, se llevó a cabo con datos de parámetros físico-químicos procedentes de otros estudios.

Luego se desarrolló un balance hidrológico en régimen natural, abarcando toda la cuenca del río Loa e incluyendo sus tributarios. Se estimaron valores de precipitación y evapotranspiración en la cuenca, para obtener una escorrentía total disponible de 6,41 m³/s.

De manera análoga, este estudio determinó un balance de escorrentía y usos del agua en la cuenca a modo de tener una visión global sobre la disponibilidad de recursos hídricos. Para lo anterior, se recopiló información de derechos superficiales y subterráneos existentes, los que fueron ordenados de acuerdo a su ubicación dentro de la cuenca. Luego a modo de hacer una estimación del uso efectivo de los derechos ya constituidos,

se determinaron los factores de uso para riego, agua potable y minería. En el Cuadro 2.1-6 se adjunta un resumen con los derechos y usos efectivos estimados.

Mediante el análisis de un balance global de la cuenca que se generó para determinar la disponibilidad hídrica, fueron considerados para tales efectos los valores de escorrentías renovables estimadas y los usos efectivos. De este análisis se concluyó lo siguiente:

- La escorrentía total renovable del río San Pedro se encuentra totalmente comprometida y no se generan caudales excedentes hacia el río Loa, lo que es un punto importante de considerar en la interacción de los acuíferos de la cuenca.
- La disponibilidad hasta esa fecha en la cuenca del río Loa es de 300 l/s efectivos.
- La disponibilidad hasta esa fecha de constituir derechos en la cuenca del Salar de Llamara es sólo hasta un máximo de 80 l/s.

Cuadro 2.1-6 Resumen de Derechos y Usos Efectivos en REF#11

Tipo	Zona	Superficiales (l/s)			Subterráneos (l/s)		
		Riego	Min / Ind	AP	Riego	Min / Ind	AP
Derechos	Loa Alto	13,3	16,6	850,0	-	300,0	-
	San Pedro	10,0	868,5	-	-	1.623,0	-
	Lasana - ChiuChiu	203,0	-	-	-	-	-
	Salado	131,6	509,0	760,9	-	31,0	-
	Calama	1.025,7	6,0	-	-	244,0	-
	Loa - San Salvador	100,0	436,5	-	-	34,0	-
	Quillagua	60,0	84,0	-	-	-	-
	Q. Amarga	-	60,0	-	-	245,0	-
	TOTAL	1.543,6	2.061,6	1.610,9	-	2.477,0	-
Uso Efectivo	Loa Alto	13,3	12,5	557,6	-	225,0	-
	San Pedro	10,0	1.050,0	-	-	1.217,3	-
	Lasana - ChiuChiu	116,8	-	-	-	-	-
	Salado	25,4	580,0	499,2	-	23,3	-
	Calama	559,6	4,5	-	-	183,0	-
	Loa - San Salvador	100,0	251,0	-	-	25,5	-
	Quillagua	60,0	119,0	-	-	-	-
	Q. Amarga	-	45,0	-	-	183,8	-
	TOTAL	885,1	2.062,0	1.056,8	-	1.857,8	-

Fuente: REF#11

Toda esta información sirve para obtener un panorama completo y global de la cuenca, particularmente el marco referencial geológico y el modelo hidrogeológico enfocado al sector de Calama. Cabe precisar que esta información también se utilizó en la generación del Modelo Conceptual llevado a cabo en el actual modelo MAGIC.

2.1.12. REF#12: Modelación Hidrogeológica Sector Pampa Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región de Antofagasta. MOP. 2003

Este estudio fue desarrollado con la finalidad de evaluar los posibles efectos asociados a extracciones de agua subterránea en el sector de Pampa Llalqui que se traducirían en impactos tanto en el caudal superficial del río Loa y en los flujos subterráneos hacia el acuífero de Calama.

Para ello, se elaboró primeramente un modelo conceptual de la zona de Llalqui, el cual integró información hidrogeológica procedente de estudios anteriores y aquellas relacionadas con el proyecto Mansa Mina de CODELCO, donde en esta última se disponía de información geológica tanto en planta como perfiles, una batimetría del fondo rocoso y datos hidroquímicos.

Posteriormente, considerando el modelo conceptual, se elaboró y calibró un modelo hidrogeológico numérico de la zona, el cual fue operado tanto en régimen permanente como transiente, donde para este último se evaluaron diferentes escenarios de explotación.

El modelo numérico comprende toda el área que va desde el río Loa en junta con el río Salado hasta el río Loa en Angostura y aquellos pozos con derechos en trámite emplazados en Pampa Llalqui. El modelo considera tres estratos o layers designados como: acuífero superior, acuitardo y acuífero inferior, donde el primero representa a las formaciones geológicas Opache y Loa. El estrato confinante acuitardo, lo conforma la formación Sifón mientras que el acuífero inferior, lo componen las formaciones Yalquincha y Gravas de Calama.

Los valores de permeabilidad adoptados en el modelo corresponden a aquellos obtenidos desde antecedentes disponibles y corregidos debido a la unificación de algunas formaciones en su representación numérica. En el caso particular del acuífero inferior, el valor de permeabilidad adoptado proviene de pruebas de bombeo practicadas en pozos del lugar. En el Cuadro 2.1-7, se presenta un resumen con los valores de permeabilidad y coeficientes de almacenamiento ingresados al modelo numérico junto con las formaciones geológicas que conforman los respectivos estratos.

Cuadro 2.1-7 Parámetros Hidráulicos Modelo Llalqui

Estrato	Formación Geológica	Permeabilidad Adoptada Modelo (m/día)	Coefficiente Almacenamiento
Acuífero Superior	Opache	5	0,15
	Loa		
Acuitardo	Sifón	1×10^{-5}	0,1
Acuífero Inferior	Yalquincha	1	0,1
	Gravas de Calama		

Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#12.

Para las condiciones de borde del modelo numérico, se adoptó como condición de entrada un valor de caudal conocido. Para la salida se consideró un valor de nivel constante y por último una condición tipo río para representar el cauce del río Loa y su interacción con el acuífero.

En base a los resultados, se concluye la factibilidad de extraer solamente 264 l/s del sistema, lo que permite mantener el aporte del almacenamiento en un 5% y valores razonables de disminución del caudal subterráneo de salida, baja significancia del caudal aportante desde el acuífero al río Loa y de disminución de niveles freáticos.

No obstante lo anterior, tal como lo señala la DGA, los resultados obtenidos corresponden sólo a una evaluación en términos generales del sistema, cuyo modelo se generó por medio de una caracterización más bien de carácter regional y no tan específica ni de detalle. Por consiguiente y dado los actuales estudios que se disponen del sector de Llalqui, se considera útil desde el punto de vista de entregar un panorama global del comportamiento hidrogeológico del acuífero en el área de interés. Además se mencionan valores esperables de flujos subterráneos de entrada, como también rangos de recuperaciones del río Loa entre el río Salado y Angostura, los que se tendrán presentes en la etapa de calibración del modelo subterráneo en régimen transiente cuando se realice el balance de flujo por componente hídrica.

2.1.13. REF#13: Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles a Constituir en los Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región. DARH. 2003

Este estudio contiene una evaluación hidrogeológica preliminar de los sectores de Calama y Llalqui, junto con analizar las componentes hidrológicas e hidroquímicas de la zona. Además, presenta el estado de situación de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas que recaen en estos sectores.

Este documento aborda el tema geológico de subsuperficie, partiendo por dar a conocer las distintas unidades geológicas identificables en las zonas de interés, las que se infirieron en base a información estratigráfica de sondajes y de algunos otros trabajos. Más adelante, se mencionan las unidades acuíferas reconocidas en el área de estudio, unidades superior e inferior y además se realiza una breve descripción de las principales características de cada una de éstas.

Se presenta también un análisis hidrogeoquímico de las aguas de la cuenca del río Loa que proviene en su totalidad de la REF#11. Dentro de las conclusiones más importantes se estableció que la recarga del acuífero inferior de Calama no tiene una dependencia directa ni significativa con el acuífero inferior de Llalqui, mientras que los acuíferos superiores de ambos sectores si poseen una clara afinidad.

Por otra parte, se realizó un balance global de la cuenca integrando la explotación prevista en el largo plazo de los derechos de aprovechamiento y la escorrentía total renovable generada, donde esta última se estimó en el estudio de la REF#11. De este balance se desprendió que la escorrentía total, tanto superficial como subterránea del río San Pedro, está totalmente comprometida, no existiendo caudales excedentes hacia el río Loa. A nivel promedio, en la cuenca entera existe escorrentía renovable del orden de los 400 l/s.

A partir del análisis global de los recursos hídricos, se abordó el tema del recurso subterráneo mediante su evaluación en los sectores de Calama y Llalqui por medio de la operación de los modelos numéricos específicos para cada uno e implementados por la DGA. En el caso particular de Calama se simularon escenarios que permitieron evaluar la sustentabilidad de los niveles de explotación en el largo plazo mediante los indicadores: estabilización de niveles, porcentaje de extracción desde el almacenamiento, efectos en

los cauces superficiales y vertientes y expansión del cono de isodescensos. La evaluación anterior, arrojó que es posible el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento subterráneo por un caudal máximo de 370 l/s en el sector de Calama. En cambio, en el sector de Llalqui, la evaluación de los recursos hídricos subterráneos determinó, en base a la modelación hidrogeológica realizada en otros estudio de la DGA (REF#12), que sólo es factible la constitución de derechos subterráneos por un caudal máximo de 319 l/s, los que deberán ser extraídos sólo desde el acuífero inferior.

2.1.14. REF#14: Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cade-Idepe. 2004

Este trabajo se encuentra inserto dentro del marco de una serie de estudios desarrollados por la empresa consultora CADE-IDEPE para la DGA, donde se define una propuesta técnica en términos de asignación de la calidad objetivo para los cursos y cuerpos de agua prioritarios del país. En concreto, analiza el caso de la cuenca del río Loa y su objetivo general fue conocer la calidad natural y actual de las aguas; en particular, tipificar y segmentar los cursos y cuerpos de agua superficial para luego identificar aquellas aguas que presentan una calidad idónea para diversos usos: in situ, extractivos y para la preservación de la biodiversidad.

Dentro de las actividades para la elaboración de este estudio se reunieron antecedentes relacionados principalmente con: datos vectoriales (cartografía), clima, geología y vulcanismo, hidrogeología, geomorfología, suelos y usos de éstos, flora y fauna, asentamientos humanos, etc., con la meta de caracterizar y describir lo más general posible la cuenca del río Loa.

En particular, en lo que respecta a geología e hidrogeología, se presenta un resumen más bien macro y general de la cuenca del río Loa. En el caso de la geología, se entrega un listado y una descripción de cada una de las formaciones rocosas identificadas en la cuenca, las que provienen del Mapa Geológico de Chile a Escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN. Por otra parte, en lo que se refiere al tema hidrogeológico, se menciona la composición de los materiales que conforman el relleno acuífero desde su nacimiento en el Volcán Miño hasta su descarga al océano Pacífico. Entre los materiales de rellenos acuíferos se encuentran: rocas volcánicas fracturadas formadas por coladas, brechas y tobas andesíticas detectadas en la falda occidental del volcán Miño, rocas no consolidadas hasta el sector de San Pedro, rocas carbonatadas en el sector de Calama y rocas no consolidadas conformados por sedimentos fluviales, aluviales, aluvionales y eólicos entre en la zona geomorfológica de desierto en la depresión intermedia (Pedro de Valdivia-Maria Elena - Quillagua - Desembocadura).

Análogamente, se creó una base de datos integrada que toma en consideración información fluviométrica, proporcionada por la DGA, y datos de calidad de aguas, recopilados de diversas fuentes. La información fluviométrica analizada en este estudio, permitió la estimación de curvas de variación estacional para distintas probabilidades de excedencia, a saber: 5, 10, 20, 50, 85 y 95%.

Entre las fuentes de calidad revisadas y anexadas a la base de datos realizado por CADE-IDEPE, es posible citar los siguientes: monitoreos de la DGA que van desde los años 1981 al 2002, el programa de muestreo del SAG entre los años 1997 y 2000 y el programa de muestreo puntual llevado a cabo por la misma empresa consultora, entre otros estudios más.

Como se mencionó anteriormente, en este documento existen datos condensados de parámetros físico-químicos, inorgánicos, metales esenciales, metales no esenciales, microbiológicos, entre otros más, que fueron recopilados por monitoreos tanto de la DGA como del SAG y por un muestreo puntual ejecutado por CADE-IDEPE.

Esta referencia permite obtener una visión general dentro del marco geológico e hidrogeológico de toda la cuenca del río Loa, lo que será útil en la etapa posterior de sectorización de acuíferos.

2.1.15. REF#15: Estudio de Impacto Ambiental Suministro, Construcción y Operación de Aducción Pampa Puno. Codelco Chile – División Codelco Norte. 2004

Este proyecto se encuentra ubicado en la comuna de Calama, perteneciente a la Segunda Región de Antofagasta, específicamente en el área denominada Pampa Puno y en la cuenca del río San Pedro. El objetivo principal de este proyecto, es la construcción y operación de una aducción que permita transportar el agua extraída desde el campo de pozos en Pampa Puno hasta la represa San Pedro.

A continuación se presenta la información relevante encontrada dentro de este EIA.

i. Hidrología

Se realizó un análisis de las pérdidas y recuperaciones del río Loa, asociadas a distintos tramos desde 15 km aguas abajo del nacimiento del río Loa hasta 1,5 km aguas abajo de su junta con el río San Pedro. A modo de resumen, se mencionan a continuación 3 tramos de interés:

- Tramo 15 km aguas abajo nacimiento Loa – Lequena: Pérdidas de 175 l/s.
- Tramo Lequena – Quinchamale: Recuperaciones de 602 l/s.
- Tramo Quinchamale – 1.5 km aguas abajo junta con río San Pedro: Recuperaciones de 299 l/s.

Además, se realizó una estimación de las recargas de las aguas subterráneas en Pampa Puno. Se estimó que un valor de infiltración de la precipitación efectiva equivalente a 50% es adecuado para caracterizar la cuenca. La recarga producto de esta infiltración es de 172,8 l/s.

ii. Hidrogeología

Para este sector, se definieron las siguientes unidades hidrogeológicas:

- Unidad 1 – Ignimbritas: Corresponde a Ignimbritas fracturadas, compuestas principalmente por tobos de ceniza volcánica. Esta unidad presenta porosidad secundaria debido a las fracturas.

Esta unidad se extiende a lo largo y ancho de la cuenca, presentando una potencia máxima de 44 metros en los alrededores del pozo PUNO 88 y en el sector donde se ubica el pozo PUNO 3148 se observa una potencia de sólo 6 metros. Al norte de Pampa Yocas esta unidad se encuentra cubierta por aluvios, con potencias que varían desde 6 a 9 metros. Hacia el sur esta unidad se acuña.

- Unidad 2 – Sedimentaria: Corresponde a material detrítico sedimentario, compuesto principalmente por gravas con fragmentos volcánicos y frecuentes intercalaciones de capas limo – arenosas.

El espesor de esta unidad es variable, su potencia promedio es del orden de los 350 metros y su mayor espesor está en la parte central de la cuenca, donde alcanza valores cercanos a los 700 metros.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta unidad presenta cualidades favorables para el almacenamiento y flujo de las aguas. Esta unidad acuífera se extiende en casi toda el área de estudio. No obstante lo anterior, esta unidad se acuña hacia el sector de la Quebrada Sacapunta, donde desaparece. En otros sectores, esta unidad se ha reconocido en superficie, situación que se observa en la parte central occidental de la cuenca donde el acuífero aflora.

- Unidad 3 – Basamento: Rocas que conforman las laderas y la base de la cuenca. En el sector occidente de la cuenca, esta unidad está formada principalmente por lavas, tobas y brechas, además de areniscas grises con intercalaciones de conglomerados. Asimismo, al oriente de la cuenca, el basamento lo componen mayoritariamente lavas y tobas cristalinas dacíticas - riolíticas e intrusivos subvolcánicos de similar composición.

Desde el punto de vista hidrogeológico, corresponde a la unidad impermeable de la cuenca.

La potencia del relleno, asociado a las unidades 1 y 2, presenta hasta 700 metros en la parte central de la cuenca, mientras que en los bordes decrece a cerca de 100 metros.

En la salida de la Quebrada Sacapunta, el basamento presenta una fuerte disminución de su profundidad alcanzando valores aproximados de 30 metros. Por otro lado, en las inmediaciones de Pampa Yocas, el basamento presenta profundidades mayores a 400 metros.

En este estudio se construyeron 14 pozos, los cuales se presentan en el Cuadro 2.1-8. La estratigrafía de cada uno, se puede observar en el Anexo A1.

Cuadro 2.1-8 Coordenada y Nivel Estático de Pozos

Pozo	Norte (m)	Este (m)	Cota (m s.n.m.)	Nivel Estático (m)
PUNO -1E	7.641.129	519.747	4.141	96,87
PUNO -2B	7.461.335	521.016	4.117	74,12
PUNO-2E	7.641.348	520.956	4.119	74,89
PUNO-3E	7.641.251	522.105	4.090	50,08
PUNO-4B	7.646.475	521.530	4.098	67,68
PUNO-4E	7.646.523	521.505	4.101	68,20
PUNO-5E	7.646.431	519.036	4.143	87,81
PUNO-6B	7.644.159	521.208	4.098	54,17
PUNO-7B	7.642.805	521.010	4.100	56,58
PUNO-8B	7.645.239	521.930	4.078	47,67
PUNO-9B	7.648.171	521.027	4.142	109,83
PUNO-10B	7.647.216	521.968	-	-
PUNO-11B	7.646.180	520.417	-	-
PUNO-314B	7.641.281	518.457	4.201	54,96

Fuente: REF#15

En los pozos anteriores se realizaron pruebas de bombeo. Los resultados se presentan en el Cuadro 2.1-9.

En base a la información disponible, se trazaron las curvas isofreáticas de la zona de interés (Figura 2.1-2). Se observa que el agua subterránea fluye hacia el norte y oriente de la cuenca y que la descarga del acuífero se produce hacia el norponiente de la cuenca, hacia Pampa Yocas. Esta condición diverge del sentido de escurrimiento y descarga superficial de la cuenca, la que se realiza por la Quebrada Sacapunta hacia el oriente. Esto se debe a que el acuífero presenta un estrechamiento bajo la Quebrada Sacapunta, en donde la potencia del acuífero es inferior a los 30 m. y la elevación del basamento está por sobre la cota del basamento hacia el sector de Pampa Yocas.

En cuanto a información geofísica, se encuentran 3 perfiles TEM realizados en la zona de estudio. La información asociada a estos perfiles se presenta en el Anexo B1.

Cuadro 2.1-9 Pruebas de Bombeo Pozos Pampa Puno

Pozo Bombeo	Fecha Prueba	Caudal (l/s)	Pozo Observación	Nivel Estático (m)	Transmisividad	
					Jacob (m ² /d)	Recuperación (m ² /d)
2B	oct-98	12	2B	74,5	80	130
			2E	74,9	270	220
	oct-98	18	2B	75,7	85	-
			2E	75,2	300	670
	mar-99	35	2B	74,1	60	93
			2E	73,2	370	600
4B	ene-99	60	4B	67,9	180	500
	may-99	110	4B	66,9	190	-
			4E	68,2	7500	-
6B	feb-99	50	6B	56,7	80	90
			4B	67,5	5600	-
			7B	56,2	340	420
7B	feb-99	50	7B	56,7	47	460
			6B	54,2	380	1100
8B	mar-99	8,5	8B	47,1	12	-
9B	abr-99	50	9B	109,9	30	250
10B	abr-00	30	10B	74,6	85	-
11B	may-00	60	11B	77,0	27	-
314B	sep-98	5	314B	54,9	3	7
	jul-99	5	314B	54,9	2	-

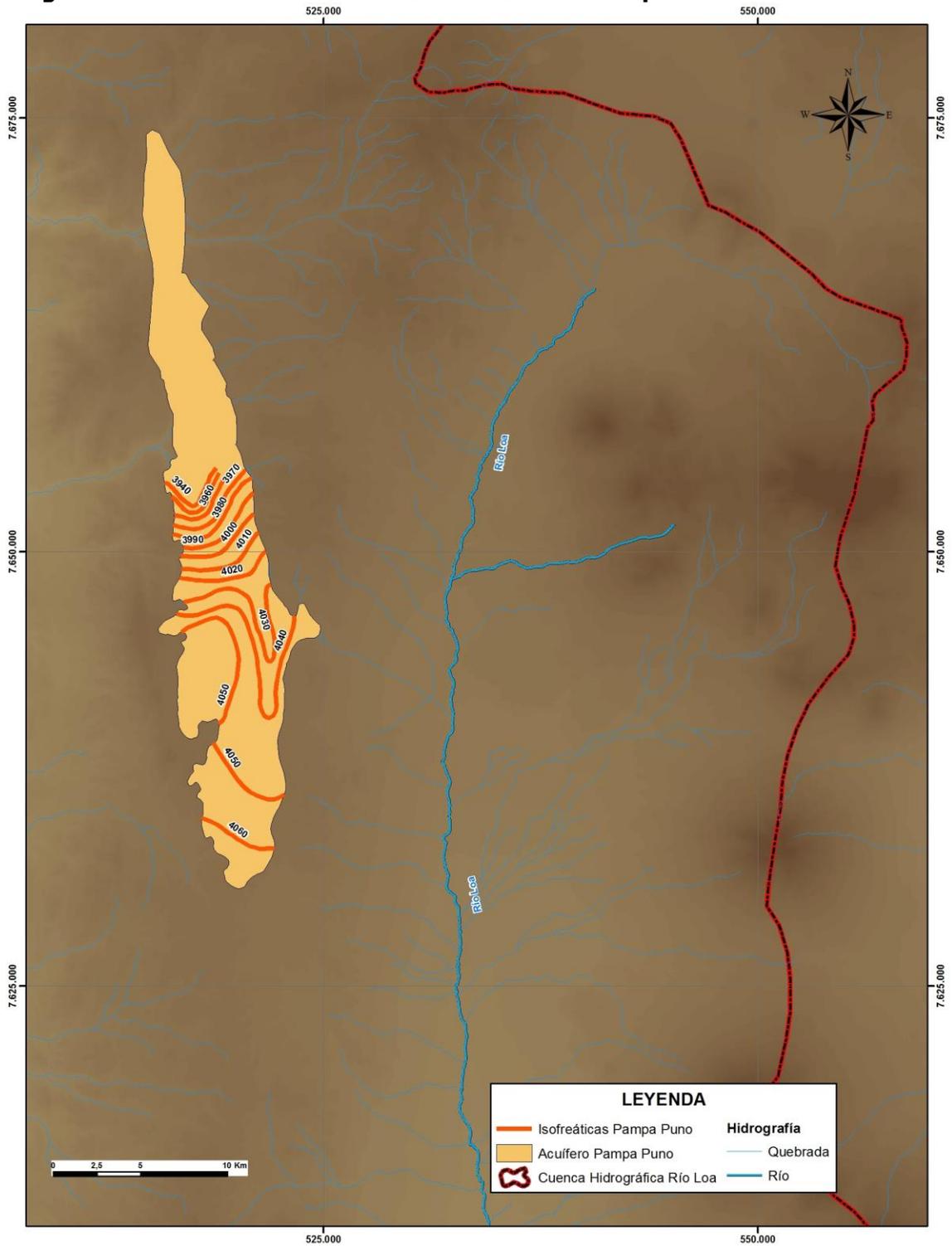
Fuente: REF#15

2.1.16. REF#16: Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa. DARH. 2005

Este estudio tuvo como finalidad la evaluación de manera global y detallada, a nivel de cuenca y subcuenca, de la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Loa. La determinación de la demanda se basó en trabajos realizados en la Dirección Regional DGA II, y en el Departamento de Administración de Recursos Hídricos, y considera el levantamiento de solicitudes presentadas en la Dirección General de Aguas hasta Septiembre de 2002.

El alcance de este estudio fue determinar la disponibilidad de recursos hídricos de ejercicio eventual en la cuenca de río Loa y servir como herramienta de apoyo en la resolución de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

Figura 2.1-2 Curvas Isofreáticas Sector Pampa Puno: Febrero 2001



Fuente: Elaboración Propia en base a curvas presentadas en REF#15

El estudio enfatiza que tanto el río Loa como sus afluentes fueron declarados agotados mediante Resolución DGA N° 197 de fecha 24/01/2000. Por esto, sólo existe disponibilidad para constituir derechos de aprovechamiento consuntivos de ejercicio eventual. Además se definió, tanto para el río Loa como sus afluentes, el caudal ecológico asociado para cada uno de los tramos considerados, cuya estimación se efectuó en base a probabilidades de excedencia procedentes de la información fluviométrica de carácter mensual en estaciones DGA ubicadas en la cuenca.

Esta referencia proporciona una lista de derechos superficiales constituidos en la cuenca del río Loa, junto con un listado de derechos pendientes ingresados hasta junio de 2002 (tanto permanentes como eventuales). Incorpora además un balance de derechos eventuales en la cuenca, en particular en cada uno de los tramos analizados, como por ejemplo en Yalquincha, río Loa antes junta río San Salvador, en Desembocadura río Loa, entre otros.

La información relativa al listado de derechos constituidos y aquellos de carácter pendiente a junio de 2002, se utilizó en el actual modelo MAGIC al momento de analizar la demanda de recursos hídricos en la totalidad de la cuenca del río Loa.

2.1.17. REF#17: Análisis de los Posibles Impactos por Extracción de Agua en el Acuífero de Calama. DGA. 2005

En este documento se evaluó la situación del acuífero de Calama para el año 2005, con el objetivo de dilucidar si las extracciones de agua subterránea autorizadas por la autoridad, y que para esa fecha se encontraban vigentes, han provocado una reducción de los caudales en las vertientes del área.

La evaluación del estado del acuífero de Calama consideró en primer lugar un análisis estadístico para correlacionar los aforos mensuales de la DGA registrados en la vertiente Opache y los niveles piezométricos mensuales monitoreados en pozos de observación cercanos a pozos de explotación de Compañía Contractual Minera Leonor. Este último análisis mostró que efectivamente existía una fuerte correlación entre el caudal de la vertiente y los descensos piezométricos del pozo de observación, por lo que se descartó la hipótesis de que la disminución de los caudales en Opache fuese producto de un período transiente entre la recarga y descarga del acuífero mayor al propio período de registro disponible.

Posteriormente, se llevó a cabo una modelación en Visual MODFLOW tanto en régimen permanente como transiente, demostrando que extracciones subterráneas en el acuífero superior generan modificaciones en las descargas y por ende, se tiene una reducción de los caudales en las vertientes del sector cuyo efecto también repercute hacia aguas abajo.

Esta referencia no entrega mayores antecedentes que podrían servir para el presente estudio.

2.1.18. REF#18: Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos. Informes Finales de los Sectores de Calama – Pampa Llalqui y Pedro de Valdivia - María Elena. DGA. 2005

Este estudio fue desarrollado en el marco de un convenio de asesoría técnica entre la Dirección General de Aguas y la División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental del DICTUC. El convenio consideró la ejecución de dos etapas: Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos.

Los informes citados presentan los resultados de la caracterización hidrogeológica de 2 de los 10 principales sistemas acuíferos de la II Región; sector Calama – Pampa Llalqui y sector Pedro de Valdivia – María Elena. Cada caracterización está compuesta por antecedentes geomorfológicos, geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, los cuales permitieron desarrollar un modelo conceptual del acuífero de cada sector.

Los antecedentes relevantes para este estudio se presentan a continuación.

2.1.18.1. Sector Pedro de Valdivia - María Elena.

El antecedente más relevante de la caracterización hidrológica es la estimación de las pérdidas por infiltración en distintos tramos del río Loa, que podrían ser una recarga significativa para los potenciales acuíferos. El Cuadro 2.1-10 presenta la estimación de las infiltraciones y los sectores donde se producen.

Cuadro 2.1-10 Estimación de Pérdidas por Infiltración Río Loa

Tramo	Pérdidas por Infiltración (l/s)	Observaciones
Chintoraste – La Finca	279	Recarga río San Salvador (Ojos de Opache) y vegas
La Finca – Confluencia con río San Salvador	144,6	Entre Bomba Vergara y confluencia de los ríos San Salvador y Loa
Confluencia con río San Salvador - María Elena	100,9	Recarga los acuíferos este y oeste del río
María Elena - Quillagua	103	Entre Bocatoma María Elena y tranque Sloman
Quillagua - Desembocadura	100	

Fuente: REF#18

La caracterización hidrogeológica se realizó utilizando información de pozos, tanto de exploración como de bombeo y utilizando información de una serie de sondajes geofísicos con el método TEM. En el Anexo B2 se presenta la información de los pozos y de los sondajes geofísicos utilizados.

iii. Geometría acuífero y tipo de rellenos

En el estudio se estimaron los límites físicos del acuífero:

- Límite este: Constituido por los afloramientos de rocas que se ubican al norte y sur de los cerros de Chug-Chug y que formarían una franja norte-sur hasta llegar al río San Salvador y al río Loa.

- Límite oeste: Estaría constituido por rocas que también se disponen con una orientación norte-sur y formarían el límite occidental de la Depresión Intermedia, caracterizada por cerros pertenecientes al borde oriental de la Cordillera de la Costa.

Los tipos de rellenos presentes en la Zona 1 y en la Zona 2 son los que se presentan a continuación:

Zona 1 - Sector María Elena:

- Unidad 1: Arenas y gravas limosas no saturadas, con espesores entre 10 y 50 m. Corresponden a depósitos aluviales y al miembro superior de la Fm. El Loa.
- Unidad 2: Sedimentos finos de forma lenticular en sentido norte sur y como un cuerpo continuo en dirección este-oeste. Alcanza potencias del orden de 10 a 20 m.
- Unidad 3: Arenas y gravas con poco fino. Se dispone bajo la unidad anterior con espesores entre 20 y 150 m y sobreyace al basamento. A esta unidad se le asocia un interesante potencial hídrico subterráneo.
- Unidad 4: Arenas con contenido de limos y arcillas variable. Presenta una potencia de 40 m aproximadamente.
- Unidad 5: Gravas y arenas sin finos, con alta permeabilidad. Sobreyace al basamento, con espesores entre los 100 y 250 m. A esta unidad se asocian los acuíferos reconocidos en el sector.
- Unidad 6: Roca basal. Lavas con alto grado de meteorización y fracturamiento moderado, las cuales serían asociadas a la Fm. La Negra.

Zona 1- Sector Miraje

- Capa sedimentaria superficial hasta los 12 m, la cual se podría correlacionar con la unidad 1 de la zona de María Elena.
- Entre los 12 y 32 m de profundidad, se tienen arcillas húmedas, correlacionables con la unidad 2 de María Elena.
- Entre los 32 y 170 se tienen arenas saturadas, las que corresponderían a las unidades 3, 4 y 5 de María Elena.
- Luego se reconoce el basamento, desde los 170 m hacia abajo.

Los sondeos de exploración junto con la prospección geofísica realizada permitieron reconocer 2 sectores acuíferos de importancia ubicados en la zona de la Oficina María Elena, los que se encontrarían interconectados

Zona 1- Sector Suroeste

- Suroeste del TEM ME-15: Presencia de la unidad 5, la cual abarca una gran extensión. El espesor saturado medio va desde unos 150 m. y sobrepasa los 400 m. En este último espesor, la roca basal se ubica a más de 500. m de profundidad.
- Sector del TEM ME-7: Presencia de la unidad 4. En este sector se mantiene la roca basal profunda (sobre 500 m).

- Sector de los TEM ME-3 y ME-4: Presencia de la unidad 3. El basamento se ubica a una profundidad inferior a 200 m.
- Sector de los TEM EM-2 y ME-1: La roca basal se ubica próxima a la superficie, entre los 70-90 m.
- Sector el pozo de explotación EX-14A: Este sector presenta potencial hidrogeológico. Las secciones captantes se emplazan en la unidad 3.

Zona 1- Sector Noreste

- Sector del TEM ME-16: Hacia el norte del sondaje EX-2, se presenta la unidad 5, que posee una potencia superior a los 400 m, ubicando la roca basal a una profundidad mayor a los 500 m.
- Oeste del TEM LT-1 y al este del río Loa: La unidad 5 tiene una potencia mayor a los 400 m y el basamento se encontraría a una profundidad mayor a los 500 m.
- Sector del sondaje T-2 y TEM T-1T: El basamento se encuentra a 90 m y la unidad 5 tiene una potencia de 80 m, aproximadamente.
- Sector de falla geológica en TEM ME-15: El límite con el sector Suroeste corresponde a una falla geológica que es un bloque alzado de basamento, de alrededor de 2 km. En este sector, la roca basal se ubica alrededor de 200 m de profundidad y sobre ella se encuentra la unidad 3, la que se presenta saturada y conectada hidráulicamente con el sector Suroeste.

Zona 2

- Sector del TEM G-UN0-3: La roca basal está a los 440 m de profundidad y el relleno, correspondiente a capas de arena y grava, comprende desde los 34 a los 314 m, lo que hace este sector un punto importante como potencial acuífero.
- Sector de los sondajes S-G1-2 y 3: El basamento se encuentra somero, a una profundidad cercana a los 60 m y el relleno está constituido por litologías correlacionables a las unidades 3 y 5.
- Sector de los pozos S-G1-1 y los TEM G-UN0-1 y G-UN0-2: El relleno está constituido por material fino y presenta una potencia menor a los 60 m. Este sector no presenta interés hidrogeológico.

iv. Profundidad de la napa y sentido de escurrimiento

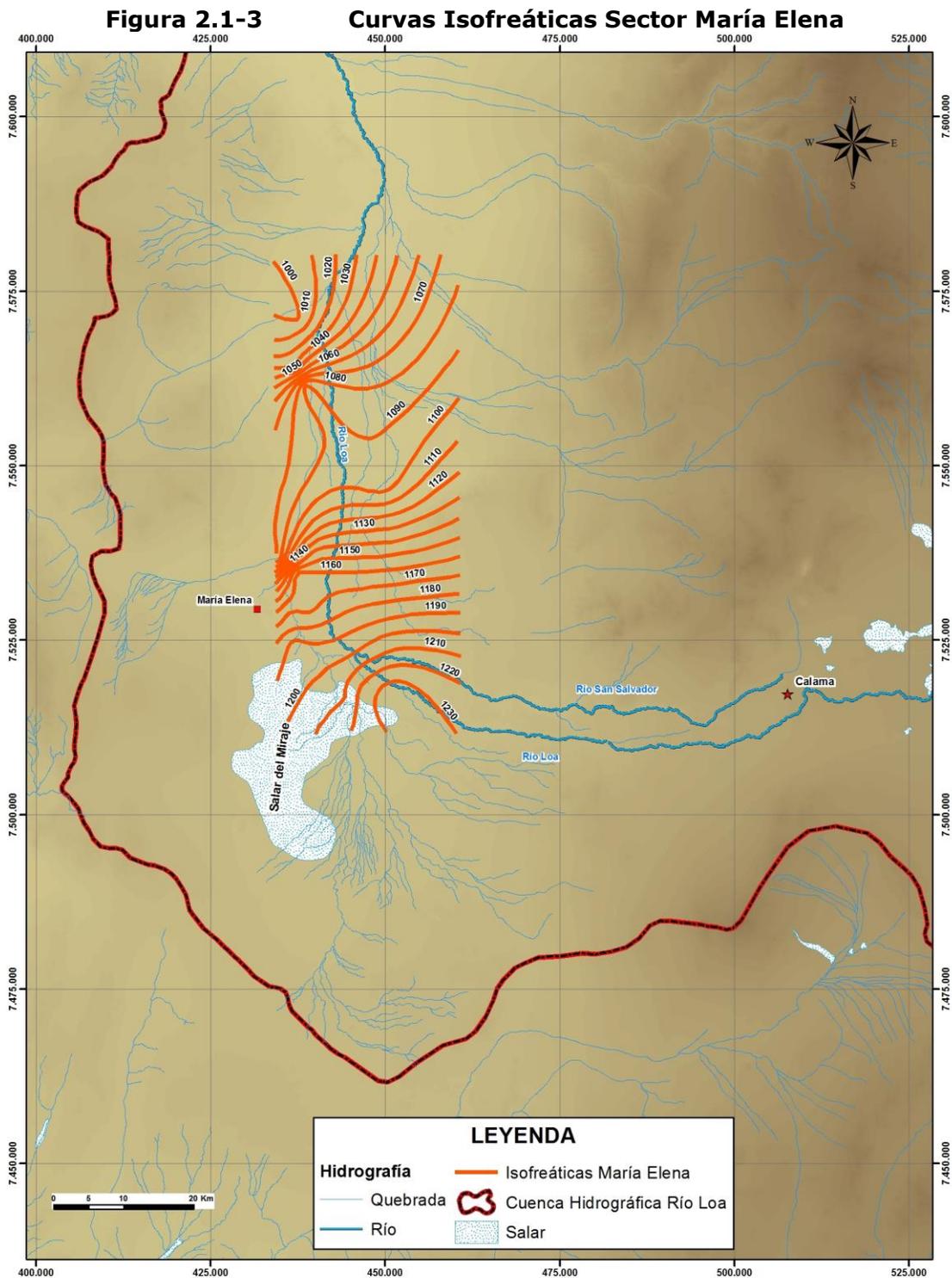
En la Figura 2.1-3 se presentan las curvas de isonivel de la napa subterránea.

Según se observa en la figura, el nivel de la napa varía aproximadamente entre la cota 1240 m s.n.m. hasta la cota 1140 m s.n.m., con profundidades que van desde los 30 a 55 m., aproximadamente. También se observa que las isopiezas se orientan en forma perpendicular al río Loa, tanto en el extremo occidental como oriental, lo cual indica un flujo paralelo al río.

v. Constantes elásticas

En el Cuadro 2.1-11 se presentan las constantes elásticas que fueron calculadas en esta referencia.

Los coeficientes de transmisividad varían entre 13 y 155 m²/d, mientras que los coeficientes de almacenamiento de largo plazo han sido estimados entre 1 y 8 %, predominando los valores entre 1 y 5%.



Fuente: Información Digitalizada en base a REF#18

Cuadro 2.1-11 Parámetros Elásticos sector María Elena

Pozo	Sy Largo Plazo (%)	T (m²/d)	Espesor Saturado (m)
EX-14A**	1 - 5*	40 -45	150
EX-11A**	4 - 8	36	52
EX-13A**	4 - 8	115 - 155	113
Las Torres	1 - 5	120	30
EX-18	1 - 5*	s/i	127,5
EX-25	1 - 5*	s/i	44,5
EX-27	1 - 5*	s/i	110
EX-28	1 - 5*	s/i	115,5
EX-29	1 - 5*	30*	35
EX-30	1 - 5*	55*	65
EX-31	1 - 5*	35*	65
EX-32	1 - 5*	13*	15
EX-33	1 - 5*	30*	35
EX-34	1 - 5*	43*	50

(*) Estimaciones en base a las características del relleno sedimentario.

(**) Pozos con pruebas de bombeo.

Fuente: REF#18

2.1.18.2. Sector Calama – Pampa Llalqui.

Esta referencia presenta un catastro de pozos con antecedentes de pruebas de bombeo, lo cual permitió conocer los parámetros elásticos de los acuíferos. El Cuadro 2.1-12 presenta las coordenadas y los niveles estáticos de los pozos utilizados, mientras que el Cuadro 2.1-13 presenta los parámetros elásticos estimados de las pruebas de bombeo.

Además, se realizó un balance hídrico con el fin de modelar el sistema de la zona. El Cuadro 2.1-14 presenta los resultados del balance realizado en el acuífero superior y el acuífero inferior.

Cuadro 2.1-12 Coordenadas y Nivel Estático de los Pozos

Pozo	Coordenadas		Cota (m s.n.m.)	Profundidad Nivel Estático (m)	Profundidad Total del Pozo (m)	Fecha Medición
	Norte (m)	Este (m)				
	E2	7.512.629	530.295	2.484	13,60	
E3	7.518.293	545.064	2.558	1,60	336	25-09-2000
P1	7.520.852	539.663	2.526	28,70	120	08-09-2000
P2	7.517.917	534.716	2.494	13,30	120	18-09-2000
Px	7.523.061	542.237	2.545	18,70	180	30-11-2000
E1	7.525.516	543.655	2.552	20,49	190	05-10-2000
W1	7.515.374	532.641	2.488	10,79	200	15-01-2002
W2	7.519.133	537.591	2.616	19,55	210	05-02-2002
W3	7.524.522	550.015	2.629	93,57	190	10-12-2001
W5	7.516.119	537.638	2.512	26,12	195	22-01-2002
W6	7.514.189	535.387	2.412	16,96	200	01-02-2002

Fuente: REF#18

Cuadro 2.1-13 Parámetros Elásticos Obtenidos de las Pruebas de Bombeo

Acuífero	Pozo	Método	K (m/d)	S (%)	S (1/m)	T (m ² /d)	Espesor Saturado (m)
Superior	P1	Jacob	-	0,12	$1,50 \times 10^{-4}$	100	90
		Rec. Theis Jacob	2,4	-	-	220	
	P2	Jacob	-	0,083	$7,50 \times 10^{-5}$	59	90
		Rec. Theis Jacob	1,4	-	-	125	
	Px	Jacob	-	0,1	-	5.200	80
		Rec. Theis Jacob	120,0	-	-	10.000	
Inferior	E1	Jacob	1,8	0,071	-	164	90
		Rec. Theis Jacob	3,1	-	-	283	
	E2	Jacob	-	-	$4,30 \times 10^{-4}$	87	172
		Rec. Theis Jacob	1,3	-	-	224	
	E3	Jacob	-	-	$1,10 \times 10^{-4}$	96	267
		Rec. Theis Jacob	0,6	-	-	165	
	W1	Jacob	12	0,69	-	577	50
		Rec. Theis Jacob	13	-	-	640	
	W2	Jacob	0,8	0,013	-	78	100
		Rec. Theis Jacob	1,3	-	-	134	
	W3	Jacob	2,8	2,1	-	140	50
		Rec. Theis Jacob	4,3	-	-	213	
	W5	Jacob	0,8	0,012	-	58	75
		Rec. Theis Jacob	1,4	-	-	104	
W6	Jacob	2,5	0,046	-	148	60	
	Rec. Theis Jacob	3,5	-	-	212		

Fuente: REF#18

Cuadro 2.1-14 Balance Hídrico por Acuífero (l/s)

Recargas	Ac. Superior	Ac. Inferior
Infiltración desde las Precipitaciones	21	-
Flujo Subterráneo Entrante	34	677
Desde río Loa	230	-
Infiltración desde relave	32	-
Entrada desde Acuífero Sup o Inf	32	-
Total	349	677

Descargas	Ac. Superior	Ac. Inferior
Evaporación	161	-
Extracción	100	-
Flujo Subterráneo Saliente	96	642
Salida hacia Acuífero Sup o Inf	-	32
Total	357	674

Balance	8	3
----------------	----------	----------

Fuente: REF#18

i. Profundidad de la Napa y Sentido de escurrimiento

En la Figura 2.1-4 se muestran las líneas isofreáticas estimadas en la REF#18 para los acuíferos superior e inferior de la zona. Se puede observar que en el caso del acuífero superior, las aguas escurren generalmente desde el este hacia el oeste, con un leve cambio de sentido en los bordes nororiental y suroriental. En el caso del acuífero inferior, muestra un sentido de escurrimiento desde el noreste hacia el sureste, que luego cambia a este – oeste al acercarse al centro de la cuenca.

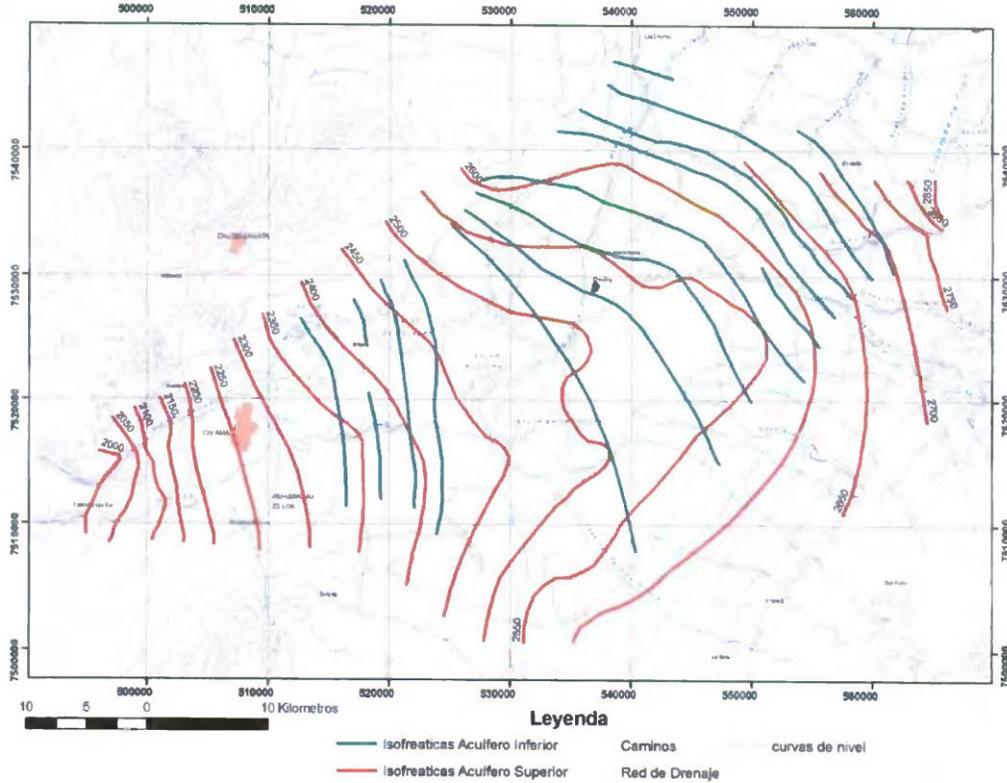
2.1.19. REF#19: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Cambio Tecnológico María Elena. SQM Nitratos. 2005

Esta referencia forma parte del EIA del proyecto "Cambio Tecnológico María Elena", de propiedad de la empresa SQM Nitratos. Se ubica en la comuna de María Elena, perteneciente a la Segunda Región de Antofagasta y tiene como objetivo principal la explotación de cuatro nuevas zonas calicheras.

Dentro de la información relevante de este EIA, se presentan las caracterizaciones de las Líneas Base de geología, geomorfología, hidrología e hidrogeología. Esta información no se detallará dado que es muy breve y similar a la ya presentada en otras referencias.

Finalmente, dentro de los antecedentes relevantes se encuentra el Anexo F, el cual forma parte de la ADENDA I. Este anexo contiene información hidrogeológica del sector de María Elena, la cual corresponde a un resumen de la información contenida en la REF#18. Por esta razón no se especificarán mayores detalles.

Figura 2.1-4 Niveles Freáticos Sector Calama – Pampa Llalqui



Fuente: REF#18

2.1.20. REF#20: El Río Loa: Usos y Conflictos por el Agua en el Desierto de Atacama. Comunidades Indígenas, Mineras, Ciudades y Pueblos. Raúl Molina. 2006

Este trabajo aborda la distribución de las aguas del río Loa para los principales usos disponibles en la cuenca: Agricultura, Agua Potable y Minería-Industrial, junto con los conflictos por su aprovechamiento e impactos que han ocurrido principalmente en las comunidades indígenas de la zona.

Se partió por una descripción de las características hidrográficas del río Loa y sus tributarios más importantes, tales como los ríos San Pedro de Inacaliri, Salado y San Salvador. Estas descripciones introductorias permiten comprender tanto la distribución y usos de las aguas de la cuenca como de los intereses asociados. Lo anterior, confluye subsiguientemente en la identificación espacial de los potenciales focos de conflictos sociales, territoriales, económicos y ambientales por la utilización de los recursos hídricos superficiales del río Loa y sus afluentes.

En este documento además, se analizó la relación entre los derechos de aprovechamiento otorgados, sus usos asociados y sus respectivos titulares, lo que permite disponer de un marco hídrico-económico de la cuenca completa y de las presiones que se han desarrollado o eventualmente podrían desencadenarse. Análogamente, se presenta un balance integrado de la distribución y participación en el aprovechamiento de las aguas por los distintos usuarios identificados, el cual se adjunta en el Cuadro 2.1-15. Por otra

parte, se señala el proceso de recuperación de los derechos de aguas ancestrales demandados por las comunidades indígenas de la zona en el río Toconce, en desmedro de la ex Empresa de Servicios Sanitarios de Agua Potable de Antofagasta (ESSAN) el cual contó con la aprobación de la corte Suprema, fallando a favor de los pueblos originados de dicho sector.

2.1.21. REF#21: Estimaciones de Demanda de Agua y Proyecciones Futuras. Zona I Norte. Regiones I a IV. Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2007

Este estudio fue desarrollado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. para la Dirección General de Aguas con la finalidad de que la autoridad disponga de información de la situación actual y futura de las demandas de los recursos hídricos para las distintas cuencas dentro del país. En particular se estimaron demandas futuras contemplando horizontes de 10 y 15 años. Las demandas tanto actuales como futuras, se enfocaron en diversos usos, siendo los principales el Agropecuario, Forestal, Agua Potable, Industrial, Generación de Energía, Minero, Turismo, Acuícola, Receptor de Contaminantes y Caudal Ecológico.

La mayor parte de esta información fue utilizada en la elaboración del actual modelo MAGIC, sobre todo en lo que respecta a valores de referencia para variables como la evapotranspiración, usos de suelo, coeficientes de cultivo, entre otros, así como también estimaciones de consumos de agua para ganadería y cultivos, usos de agua potable, consumos dentro del sector minero y descargas de aguas servidas e industriales en quebrada Quetena al oeste de Calama.

Cabe señalar que las mismas estimaciones que entregó el estudio de esta referencia, serán consideradas en la actualización del modelo ya implementado en la plataforma MAGIC.

2.1.22. REF#22: Optimización Operativa de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama. Declaración de Impacto Ambiental. TRATACAL. 2007

Este documento correspondiente a la declaración de impacto ambiental asociado al proyecto de Optimización Operativa de la Planta de Aguas Servidas de Calama, fue elaborado con el objetivo de resolver los problemas de tratamiento de estas aguas en función de las cargas y caudales generados en esa ciudad, así como también delinear los procesos de tratamiento y manejo de lodos para cumplir con la reglamentación y dar solución a la problemática de olores percibido.

De este DIA, se extrajo la información de caudales de diseño proyectados en relación al cálculo de la población para los años 2007, 2017, 2021 y 2033. En el Cuadro 2.1-16, se adjunta dicha información.

Cuadro 2.1-15 Balance de la Distribución y Participación en el Aprovechamiento de Aguas en Cuenca Río Loa

Tipo de Uso	Captada por	Caudal (l/s)	Porcentaje Participación del Uso (%)	Porcentaje del Total Cuenca (%)	Ríos
Agrícola	Comunidades Atacameñas: Lasana, Chiu-Chiu, Calama y Quillagua	1.330	81,7%	34,3	Loa
	Comunidades Atacameñas; Toconce, Caspana, Ayquina, Turi y Cupo	296,6	18,3%		Toconce, Caspana y otras fuentes
	<i>Subtotal</i>	1.626,6	100%		
Agua Potable	Sendos/Aguas Antofagasta	1.330	77,3%	36,2	Loa en Lequena y Quinchamale (850 l/s) Toconce (480 l/s)
	CODELCO División Chuquicamata	240	14%		Siloli, Colana y Linzor
	Ferrocarriles Antofagasta Bolivia	150	8,7%		Loa y Siloli
	<i>Subtotal</i>	1.720	100%		
Minería e Industria	SOQUIMICH (156,5 l/s) Compañía de Sud Explosivos (6 l/s)	162,5	11,6	29,5	Loa en sección media y baja
	CODELCO (505 l/s) Azufrera Cabana (10 l/s)	515	36,9		San Pedro
	CODELCO	590	42,2		Salado y sus Afluentes
	SOQUIMICH (80 l/s) Soc. Minera Quetena (50 l/s)	130	9,3		San Salvador
	<i>Subtotal</i>	1.397,5	100%		
TOTAL		4.744,1		100%	

Fuente: REF#20.

Cuadro 2.1-16 Caudales de Diseños Projectados para Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama

Descripción	Unidad	Año			
		2007	2017	2021	2033
		Máximo Diario	Máximo Diario	Máximo Diario	Máximo Diario
Población Total	Personas	146.700	161.635	169.933	189.748
Caudal de Diseño	l/s	287	317	333	372
	m ³ /día	24.835	27.363	28.768	32.122

Fuente: Modificado de REF#22.

Esta referencia se empleó para determinar la serie de caudales de descarga de esta planta de tratamiento en la quebrada de Quetena, tributario del río San Salvador, mediante una relación funcional entre los caudales y el censo poblacional realizado en años anteriores.

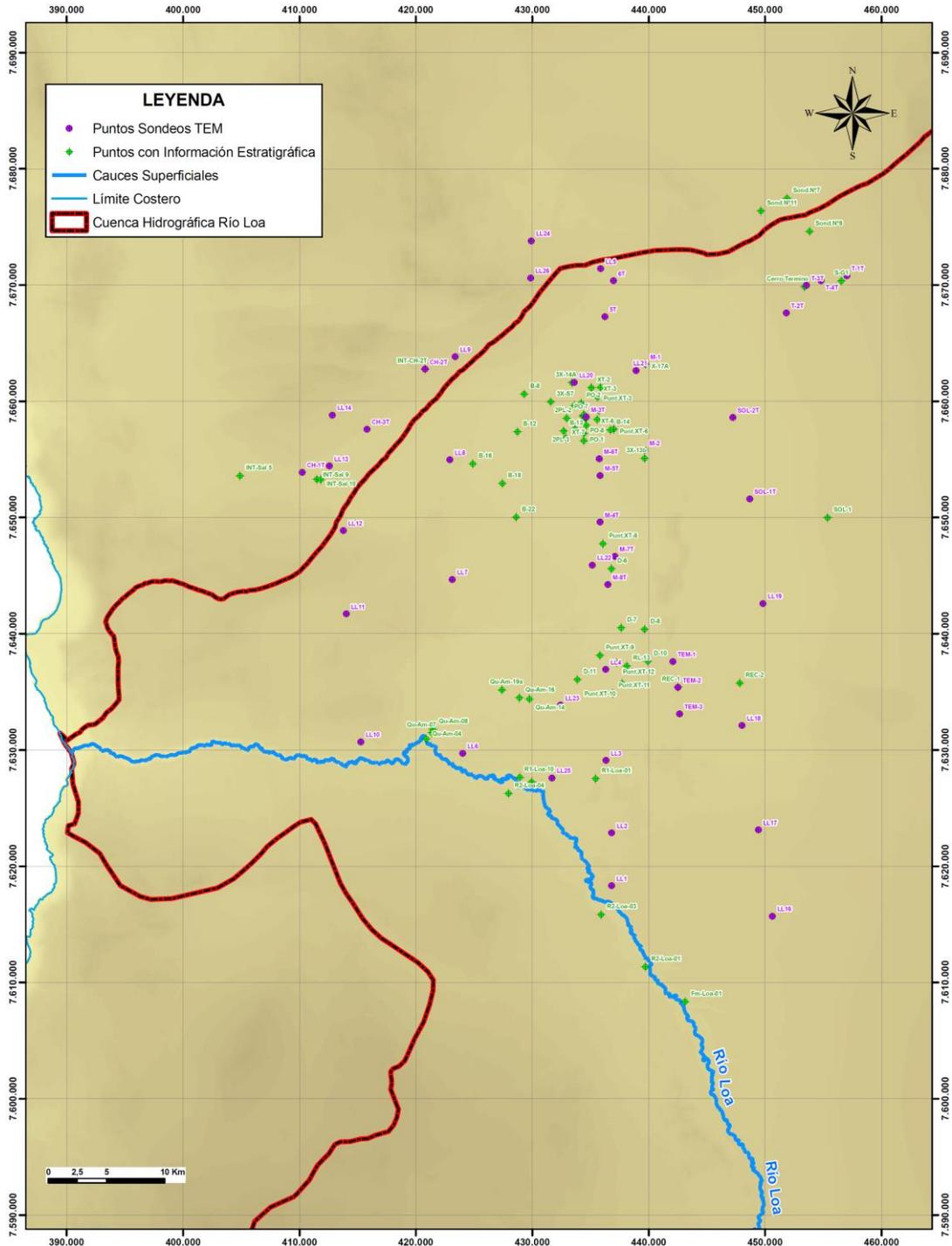
2.1.23. REF#23: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. Pramar Ambiental Consultores. 2008

Esta referencia forma parte del EIA del proyecto de desarrollo minero llamado Pampa Hermosa ubicado en la región de Tarapacá, en el cual la empresa SQM tiene por objeto aumentar la producción de yodo y la construcción de una nueva planta para producir nitrato de sodio y nitrato de potasio. En particular, busca evaluar la respuesta del acuífero del Salar de Llamara frente a la extracción de agua subterránea por medio de pozos de bombeo emplazados hacia el norte de este acuífero.

Para ello se realizó una completa caracterización hidrogeológica del sector del Salar de Llamara. Primero se desarrolló un modelo conceptual geológico integrando nuevos antecedentes e información ya disponible, para así representar la geometría del acuífero como las unidades geológicas de relevancia. Lo anterior implicó el uso de herramientas computacionales para interpretar y confeccionar perfiles geológicos, empleando información de sondajes de exploración, pozos de producción, columnas estratigráficas y sondeos TEM. En el Anexo A2 se presentan los 70 pozos y sondajes con información estratigráfica. Del mismo modo, en el Anexo B3 se adjunta la información de los 47 puntos considerados para la ejecución de los TEM.

En la Figura 2.1-5, se muestra la ubicación de los puntos tanto con estratigrafía como aquellos donde se llevaron a cabo sondeos TEM.

Figura 2.1-5 Puntos con Información Estratigráfica y Sondeos TEM en Sector Salar de Llamara



Fuente: Elaboración Propia en base a información de REF# 23. Se asumen coordenadas en datum PSAD-56.

Además, se definieron para el acuífero del Salar de Llamara las correspondientes unidades hidrogeológicas y los sectores de permeabilidades y almacenamientos, tanto para el estrato superior como inferior, que fueron complementados con la información proveniente de pruebas de bombeo realizadas en pozos del sector. Los resultados de estas pruebas, referentes a estimación de parámetros hidráulicos como transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, se presentan en los Cuadros 2.1-17 a 2.1-19.

Cuadro 2.1-17 Resultados de Pruebas de Bombeo en Sector de Salar de Llamara

Pozo	Coordenadas UTM(*)		Tipo Prueba	K (m/día)	T (m ² /día)
	Este (m)	Norte (m)			
TC-10	440.297	7.663.037	Gasto Constante	0,5	28,8
			Gasto Constante	0,5	33
			Recuperación	4	250,6
2PL-2	433.145	7.658.924	Gasto Constante	4,3	263,5
			Gasto Constante	2,1	131,8
			Recuperación	2,7	167
3X-14A	433.595	7.661.977	Gasto Constante	0,3 / 1,1	20,2 / 66,4
			Gasto Constante	1,6	97,5
			Recuperación	2,7	165,6
2 HENOC	433.787	7.660.012	Gasto Constante	8,8	529,9
			Gasto Constante	6,1	367,2
			Recuperación	10	606,2
X-17A	439.902	7.663.593	Gasto Constante	4,1	204,5
			Gasto Constante	2,1	103,1
			Recuperación	4	201,6
2PL-3	433.844	7.657.992	Gasto Constante	6,8	371,5
			Gasto Constante	5,1	276,5
			Recuperación	7,5	410,4
3X-S7	431.762	7.660.337	Gasto Constante	0,1 / 0,7	3,5 / 35,7
			Gasto Constante	0,4	18,7
			Recuperación	0,6	28,4
3X-16A	434.560	7.659.096	Gasto Constante	11,2	508,3
			Gasto Constante	7,4	337
			Recuperación	11,6	527
RL-13	438.300	7.637.600	Gasto Constante	0,2 / 0,7	6 / 22
XT-3	435.765	7.660.749	Gasto Constante	4,2	291
			Gasto Constante	4,4	310
XT-6	437.165	7.657.981	Gasto Constante	0,3 / 2,9	6 / 70
			Gasto Constante	1,7	41
XT-7	433.044	7.657.230	Gasto Constante	1,3	33
XT-2	435.246	7.661.522	Gasto Constante	2,1	77

Nota: (*) No se indica el datum de las coordenadas UTM. Este consultor cree que se encuentran en PSAD-56.
Fuente: Elaboración Propia a partir de REF#23.

Cuadro 2.1-18 Transmisividad (m²/día) en Sector de Salar de Llamara

Pozo	Pruebas Individuales	Prueba Simultánea/Pozo Observación		
		2PL-2	XT-3	XT-7
2 HENOC	367 a 606	1.500	1.200	1.500
3X-16A	337 a 508	1.500	1.200	1.500
2PL-3	276 a 410	1.500	1.200	1.500

Fuente: REF#23.

Cuadro 2.1-19 Coeficiente de Almacenamiento (%) en Sector de Salar de Llamara

Pozo	Prueba Simultánea/Pozo Observación		
	2PL-2	XT-3	XT-7
2 HENOC	0,2	0,12	0,3
3X-16A	0,2	0,12	0,3
2PL-3	0,2	0,12	0,3

Fuente: REF#23.

Asimismo, se identificaron y cuantificaron las componentes de recarga y descarga del sistema acuífero, como por ejemplo: evaporación, transpiración desde árboles, recargas subterráneas, entre otras más. En el caso de la evaporación, se estimaron tasas en los sectores de Pampa El Tamarugal y del Salar de Llamara, en base a campañas llevadas a cabo en terreno y se estudió su correspondiente relación con los niveles subterráneos registrados.

Finalmente, todo lo anterior fue volcado a un modelo numérico que se implementó con el motor MODFLOW dentro de la interfaz gráfica Groundwater Vistas, donde el acuífero quedó representado por 177.600 celdas de tamaño de 200 x 200 metros, de las cuales 62.212 corresponden a celdas activas que simulan los flujos subterráneos. Este modelo fue calibrado en régimen permanente y posteriormente en régimen transiente considerando el período comprendido entre los años 2006 a 2007.

La interpretación hidrogeológica realizada en el sector de Salar de Llamara se utilizará directamente en este estudio, ya que dicha interpretación incorporó levantamientos de información geofísica de detalle en toda el área, lo que finalmente derivó en la elaboración de un modelo hidrogeológico numérico enfocado precisamente al Salar de Llamara. Por consiguiente, toda la información anterior permitirá delimitar el o los sectores acuíferos asociados a este sector.

2.1.24. REF#24: Resumen de los Resultados del Desarrollo y Aplicación de un Modelo de Flujo de Agua Subterránea en la Cuenca del Río Loa. Minera El Tesoro - Montgomery & Associates. 2009

Este estudio consistió en la entrega de los resultados que se generaron a partir del desarrollo y posterior empleo de un modelo de flujo de agua subterránea que simuló el comportamiento hidráulico del sistema acuífero de la cuenca de Calama, siendo el objetivo principal, la evaluación de la factibilidad de un bombeo a largo plazo en la Formación Calama y la identificación de los potenciales impactos de este bombeo.

Además se proporciona una descripción de la hidrogeología de la cuenca de Calama, realizando inicialmente una revisión de antecedentes proporcionados por diversos estudios tanto de carácter público como de propiedad de Minera El Tesoro (MET). Dentro de los antecedentes consultados, destaca la realización de levantamientos geofísicos y geológicos de detalle en el área de pozos que abastecen a MET, así como también perfiles estratigráficos de pozos que se construyeron y datos de pruebas de bombeo. En el Cuadro 2.1-20, se adjuntan los valores de transmisividad, permeabilidades y coeficientes de almacenamiento obtenidos desde las pruebas de bombeo realizadas en algunos pozos.

Cuadro 2.1-20 Resultados de Pruebas de Bombeo Realizadas por MET en Acuífero de Calama

Pozo	Coordenadas UTM		Año Prueba	Tipo Prueba	Transmisividad (m ² /día)	Conductividad Hidráulica (m/día)	Coeficiente Almacenamiento ()
	Este (m)	Norte (m)					
PPR-1	504.582(*)	7.515.527(*)	1993	Constante	3.431	90	0,0008
PPR-2	505.546(**)	7.516.089(**)	1993	Constante	14.244	309	0,0074
PPR-3	503.224(**)	7.516.369(**)	1993	Constante	12.490	299	0,0038
PPR-4	504.051(**)	7.515.081(**)	1993	Constante	1.592	30	0,0019
PPR-5	502.772(**)	7.515.863(**)	1993	Constante	1.196	33	0,016
PPR-6	504.059(*)	7.515.624(*)	1996	Constante	795	22	-
PBC-1	503.081(*)	7.515.095(*)	2001	Constante	108	12	-
PBC-2	502.513(*)	7.514.927(*)	2001	Constante	69	0.5	0,00012
PPR-2	505.546(**)	7.516.089(**)	2007	Constante	128	1.8	0,00041

Nota: (*) No se indica a qué datum corresponden las coordenadas UTM. Este consultor cree que están en PSAD-56.

(**) Coordenadas UTM obtenidas de REF#25, no obstante tampoco se precisan a qué datum corresponden. Este consultor cree que están en PSAD-56

Fuente: Modificado de REF#24.

El modelo conceptual de esta referencia se generó a partir del procesamiento de todos los datos estratigráficos disponibles, modelando espacialmente las unidades geológicas identificadas en pozos, sondajes y norias. Dentro del ámbito geológico, se determinó que en el área de interés prevalecen dos formaciones de relevancia: la Formación Calama en la base y la Formación El Loa en el techo de la columna estratigráfica general. La primera está constituida por arenas, gravas y conglomerados limo-arcillosos, mientras que la otra, de calizas y areniscas calcáreas, arcillas y limos.

En cuanto al modelo numérico implementado a partir de la geología conceptual, fueron ingresadas a este modelo las cotas basales de cada uno de los estratos considerados. También, se entrega una descripción pormenorizada en el cual se menciona el diseño de la malla de modelación, las condiciones de borde impuestas en los distintos estratos considerados, los parámetros hidráulicos del acuífero adoptados, recargas procedentes desde sectores de riego y la infiltración de redes de agua.

Como resultado del proceso de modelación, en los que fueron simulados tanto un régimen permanente como uno transiente, se obtuvieron balances de agua preliminares en ambos regímenes, mapas de niveles freáticos y piezométricos para el estrato superior e inferior respectivamente y los descensos proyectados productos de los bombeos en el área de análisis en los diferentes estratos acuíferos después de 10 años de extracción continua.

Esta información será utilizada en el presente estudio en la calibración en régimen transiente del modelo subterráneo que dispone la DGA para el acuífero de Calama, ya que se tendrán en cuenta por ejemplo, los pozos que posee MET y los caudales de bombeo asociados, así como también aquellas consideraciones empleadas en el modelo numérico tales como, distribución de permeabilidades, coeficientes de almacenamiento, condiciones de borde, caudales de recarga, etc. En particular, las condiciones de borde definidas en el modelo de MET podrían ser relevantes a la hora de fijar límites de posibles sectores hidrogeológicos en la zona media del acuífero de Calama.

2.1.25. REF#25: Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009. Errol L. Montgomery & Associates, Ltda. 2009

Este informe tuvo como finalidad presentar los resultados del monitoreo efectuado al campo de pozos de propiedad de Minera El Tesoro (MET), emplazado al oeste de la ciudad de Calama y a secciones de cauces superficiales específicos. Este informe fue emitido a la autoridad pertinente para cumplir con los compromisos adquiridos.

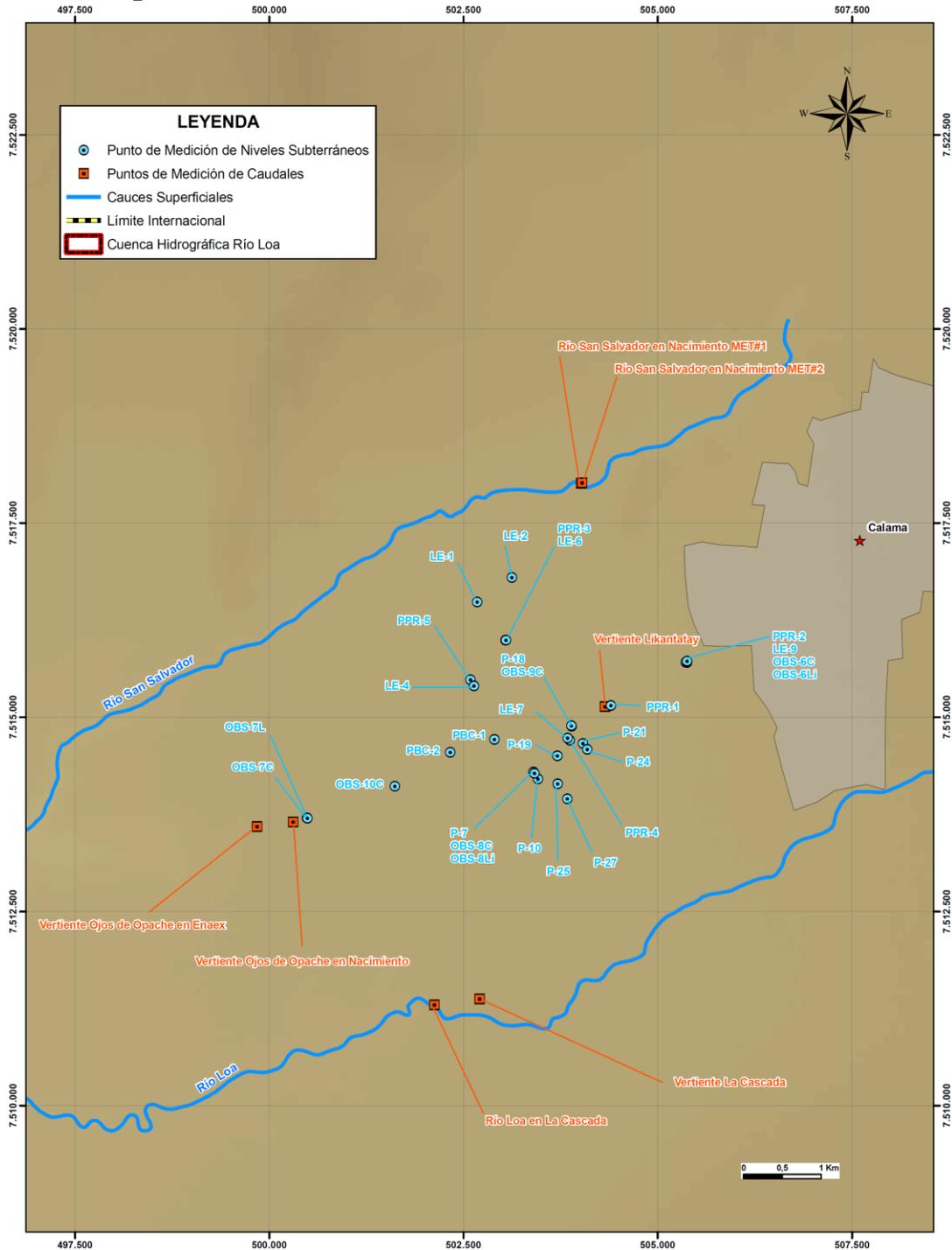
En particular, se presentan registros de aforos efectuados en las vertientes Ojos de Opache, Likantatay, La Cascada y en algunas secciones de cauces superficiales como río Loa en La Cascada y río San Salvador en San Salvador, además de sus respectivos valores de parámetros fisicoquímicos medidos en terreno (conductividad eléctrica, temperatura, pH, potencial óxido-reducción y sólidos disueltos totales). Asimismo se tienen registros históricos de niveles de aguas subterráneas en 29 pozos de MET, los que incluyen los denominados "PPR", "LE", "P", "OBS" y "PBC". En la Figura 2.1-6, se muestra la ubicación de los puntos de aforos y medición de niveles subterráneos, mientras que en el Cuadro 2.1-21 se adjunta un resumen con las coordenadas de los puntos de medición de niveles y caudales considerados en el monitoreo de MET junto con las fechas de inicio y término de los registros correspondientes.

Además, se incluyen los diagramas esquemáticos de construcción de cada uno de los pozos que componen la red de monitoreo junto con la descripción estratigráfica de las unidades identificadas, información que varía de un pozo a otro. En el Anexo A3 se adjuntan cada uno de los diagramas presentados en esta referencia.

Toda esta información será utilizada en el desarrollo del modelo numérico de flujo subterráneo, en especial los registros de niveles informados por MET en relación a la red de pozos que maneja. Además, dado que el modelo numérico presentado a la DGA fue calibrado en régimen permanente a Enero de 2003, se emplearán los datos de niveles subterráneos de los pozos de MET desde esa fecha en adelante, para así representar la condición transiente del acuífero. De la misma forma, se considerarán los registros de aforos que se manejan en las distintas vertientes ubicadas en el área de estudio para posteriormente ser calibrados en el modelo.

Por otra parte, los diagramas esquemáticos de construcción de cada pozo de propiedad de MET que muestran la información estratigráfica, serán utilizados para complementar la información hidrogeológica que se maneja en la zona media del acuífero de Calama para estimar la geometría de los espesores de las unidades hidrogeológicas. También permitirá la validación y/o correlación con eventuales perfiles geofísicos TEM proyectados en el presente estudio.

Figura 2.1-6 Puntos de la Red de Monitoreo de MET



Fuente: Elaboración Propia, bajo el supuesto que coordenadas informadas por MET están en datum PSAD-56.

Cuadro 2.1-21 Resumen con los Puntos de Monitoreo de MET y Extensión de Registros de Niveles Subterráneos y Caudales

Punto	Coordenadas UTM(*)		Variable Medida	Extensión Registros	
	Este (m)	Norte (m)		Inicio	Término
Vertiente Ojos de Opache en Nacimiento	500.490	7.514.026	Caudal	26-11-1994	25-03-2009
Vertiente Ojos de Opache en Enaex	500.028	7.513.965	Caudal	28-04-2000	25-03-2009
Vertiente Likantatay	504.506	7.515.511	Caudal	15-09-1994	29-05-2005
			Altura de Agua	21-01-2008	25-03-2009
Vertiente La Cascada	502.890	7.511.748	Caudal	15-09-1994	25-03-2009
Río Loa en la Cascada	502.311	7.511.672	Caudal	15-09-1994	25-03-2009
Río San Salvador en Nacimiento	504.198 ⁽¹⁾	7.518.387 ⁽¹⁾	Caudal	09-08-1994	25-03-2009
	504.214 ⁽²⁾	7.518.394 ⁽²⁾			
PPR-1	504.582	7.515.527	Nivel de Agua	22-05-1993	28-03-2009
PPR-2	505.546	7.516.089	Nivel de Agua	22-05-1993	28-03-2009
PPR-3	503.224	7.516.369	Nivel de Agua	22-05-1993	28-03-2009
PPR-4	504.051	7.515.081	Nivel de Agua	22-05-1993	28-03-2009
PPR-5	502.772	7.515.863	Nivel de Agua	30-05-1993	28-03-2009
P-7	503.592	7.514.664	Nivel de Agua	15-01-2005	22-03-2009
P-10	503.645	7.514.581	Nivel de Agua	15-01-2005	28-03-2009
P-18	504.075	7.515.259	Nivel de Agua	07-08-2007	28-03-2009
P-19	503.891	7.514.882	Nivel de Agua	15-01-2005	22-03-2009
P-21	504.219	7.515.039	Nivel de Agua	21-12-1998	28-03-2009
P-24	504.277	7.514.962	Nivel de Agua	15-01-2005	22-03-2009
P-25	503.896	7.514.520	Nivel de Agua	15-01-2005	22-03-2009
P-27	504.023	7.514.329	Nivel de Agua	15-01-2005	22-03-2009
LE-1	502.861	7.516.861	Nivel de Agua	09-05-1993	28-03-2009
LE-2	503.306	7.517.179	Nivel de Agua	09-05-1993	28-03-2009
LE-4	502.817	7.515.785	Nivel de Agua	30-05-1993	28-03-2009
LE-6	503.231	7.516.371	Nivel de Agua	09-05-1993	28-03-2009
LE-7	504.025	7.515.108	Nivel de Agua	09-05-1993	28-03-2009
LE-9	505.562	7.516.084	Nivel de Agua	22-05-1993	28-03-2009
PBC-1	503.081	7.515.095	Nivel de Agua	07-08-2007	28-03-2009
PBC-2	502.513	7.514.927	Nivel de Agua	07-08-2007	28-03-2009
OBS-6C	505.564	7.516.093	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-6Li	505.560	7.516.100	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-7C	500.670	7.514.080	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-7L	500.675	7.514.075	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-8C	503.585	7.514.673	Nivel de Agua	sep-07	mar-09
OBS-8Li	503.600	7.514.655	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-9C	504.072	7.515.269	Nivel de Agua	jul-07	mar-09
OBS-10C	501.801	7.514.492	Nivel de Agua	jun-08	mar-09

Nota: (*) No se indica a que datum corresponden las coordenadas UTM. Este consultor cree que están en PSAD-56.

⁽¹⁾ Coordenadas asociadas al punto de medición Río San Salvador en Nacimiento MET#1.

⁽²⁾ Coordenadas asociadas al punto de medición Río San Salvador en Nacimiento MET#2.

Fuente: Elaboración Propia en base a información de REF#25.

2.1.26. REF#26: Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold. 2010

Este estudio realizado por Knight Piésold para CODELCO, tuvo como principal objetivo conocer el sistema acuífero en las cercanías del tranque Talabre, de forma tal de identificar las medidas necesarias para preservar la calidad tanto de las aguas superficiales como subterráneas del entorno. Además se busca estudiar la relación hidráulica del sistema conformado por el tranque Talabre, propiedad de CODELCO, y los acuíferos y cauces superficiales del sector analizado. Con estos propósitos, se implementó un modelo conceptual y numérico que integró las entradas y salidas de este sistema, los procesos de infiltración de las aguas contenidas en los relaves, la forma y velocidad de dispersión de los eventuales contaminantes y la vulnerabilidad de los acuíferos.

Se partió con la recopilación y análisis de numerosos antecedentes dentro de los cuales se incluyó información geológica e hidrogeológica, de modelación hidrogeológica, hidroquímica e hidrogeoquímica y por último el plan de operación y descriptivo del propio tranque de relaves.

Se interpretó y validó información geofísica proveniente de campañas TEM en su mayoría, así como también de GEM-2. La Figura 2.1-7, muestra la distribución espacial de los perfiles TEM y GEM-2.

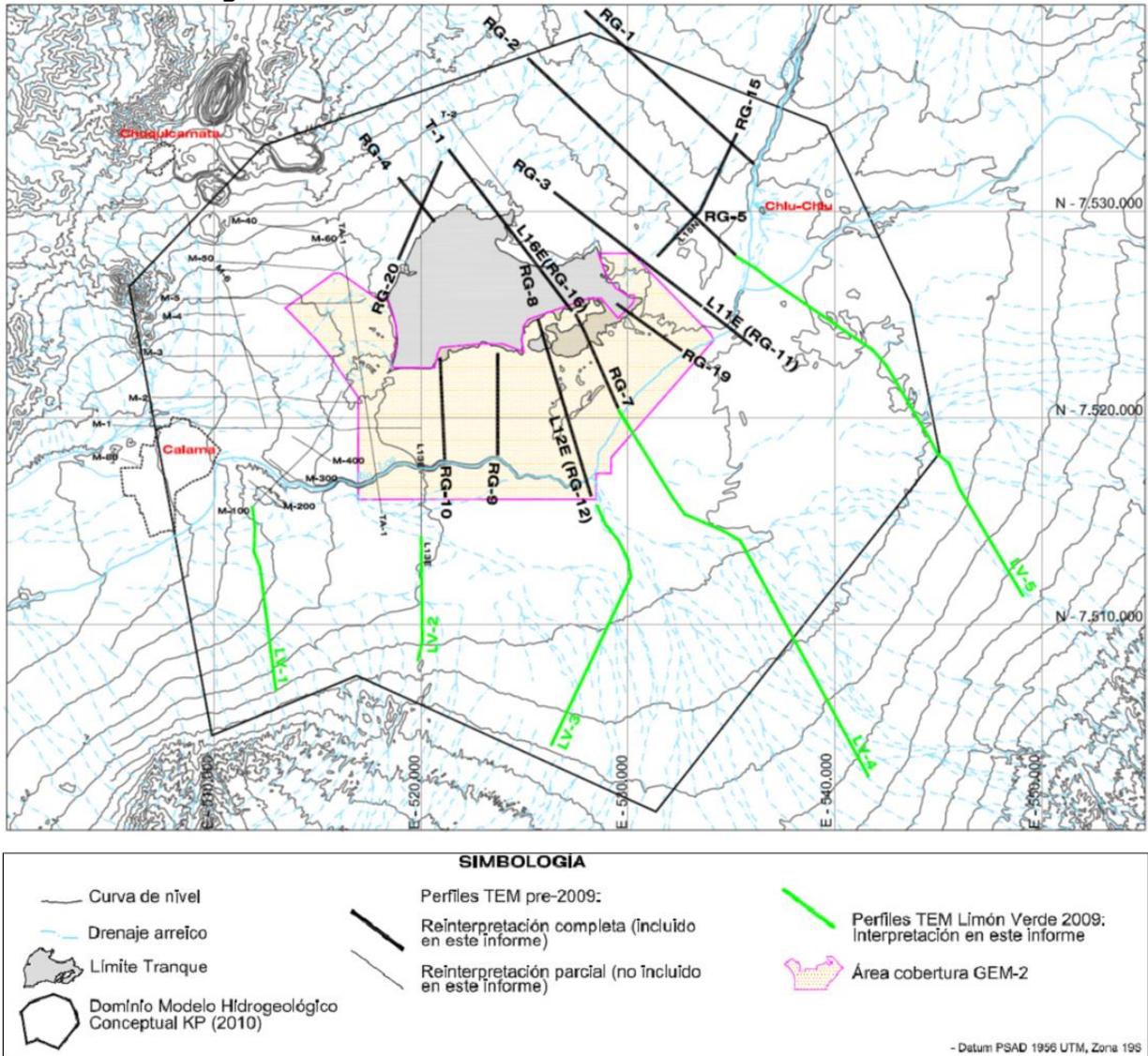
Por otra parte, se realizó una compilación de datos de parámetros hidrogeológicos procedentes de estudios previos realizados en el área, junto con la interpretación de resultados de pruebas de bombeo obtenidos en pozos que se construyeron especialmente con el objeto de determinar dichos parámetros. Subsiguientemente, estos parámetros fueron contrastados con aquellos estimados en estudios anteriores, observándose bastante similitud entre ambos. En el Cuadro 2.1-22 se presenta un resumen con los rangos de permeabilidades y coeficientes de almacenamiento para las unidades acuíferas superior e inferior de la zona de interés.

Cuadro 2.1-22 Parámetros Hidrogeológicos en Unidades Acuíferas

Acuífero	Permeabilidad (m/día)	Coficiente Almacenamiento
Superior	0,017 - 2,6	$2 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$
Inferior	0,03 - 41	$2 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$
		$1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-2} (*)$

Nota: (*) Rango de valores de S detectados pozos ubicados en el sector de Pampa Llalqui.
Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#26.

Asimismo se efectuó un análisis hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas en el área del tranque Talabre con el objeto de evaluar posibles infiltraciones hacia el sistema acuífero circundante. Para ello se utilizó información de muestreos químicos e isotópicos en puntos ubicados en pozos aledaños al sector del tranque y también en el río Loa. Dentro de los elementos químicos analizados se tiene datos de HCO_3 , SO_4 , Cl, NO_3 , Na, K, Ca y Mg. En lo referente al análisis isotópico se disponen de mediciones de ^{18}O , ^2H , ^{34}S y ^{13}C .

Figura 2.1-7 Ubicación de Perfiles TEM Y GEM-2

Fuente: REF#26.

Posteriormente, se procesó toda la información obtenida de las interpretaciones geológicas e hidrogeológicas, las que derivaron de perforaciones de sondajes, perfiles geofísicos y geológicos y estudios anteriores. Como consecuencia de lo anterior, se confeccionó un modelo hidrogeológico conceptual que permitió la definición de las unidades hidrogeológicas, la geometría del sistema acuífero, la distribución espacial, estimaciones para los distintos parámetros hidráulicos del acuífero y condiciones de borde para el modelo de flujo. El resultado de esta conceptualización se materializó en mapas geológicos a escala regional y local, columnas geológicas representativas de pozos dentro del área de estudio, curvas de iso-elevación de los pisos de las unidades hidrogeológicas (acuífero superior, acuitardo y acuífero inferior) y un mapa de la distribución espacial de las permeabilidades tanto en el acuífero superior como inferior. En el Anexo A4 del presente estudio, se adjunta la información de estratigrafía y permeabilidades. La interpretación hidrogeológica llevada a cabo se utilizará de manera directa en el presente

estudio dada la calidad y cantidad de información utilizada en toda la zona aledaña al tranque Talabre.

El modelo numérico implementado se desarrolló en la plataforma Visual MODFLOW y fue calibrado usando los registros de niveles subterráneos medidos por CODELCO dentro de la zona de estudio y cuya estadística se extiende entre Enero de 2003 a Octubre de 2009. El resultado del proceso de calibración tanto el régimen permanente como transiente, permitió la elaboración de balances hídricos para cada régimen y la proposición de algunas medidas de mitigación ambiental tendientes a proteger el sistema acuífero y los cauces superficiales de los ríos Loa y San Salvador.

Este estudio de referencia proporciona gran cantidad de información del tipo geofísico, geológico e hidrogeológico, lo que permitirá y facilitará una adecuada sectorización hidrogeológica definitiva en la zona media del acuífero de Calama. En particular, serán de utilidad los mapas geológicos, las columnas geológicas, la interpretación hidrogeológica que se hizo a partir de perfiles TEM y GEM-2, así como también el mapa de distribución espacial de permeabilidades por unidad acuífera. Además los resultados hidroquímicos de las aguas subterráneas y superficiales entregarán información de calidad físico-química para estudiar posibles vínculos y relaciones entre los sectores hidrogeológicos delimitados, que complementen el proceso de delimitación definitivo.

En cuanto a los registros de niveles subterráneos utilizados en el modelo numérico de flujo, estos serán empleados en la etapa de calibración en régimen transiente del modelo que se dispone.

2.1.27. REF#27: Diagnóstico Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos, Región Antofagasta. Arrau Ingenieros Consultores. 2012

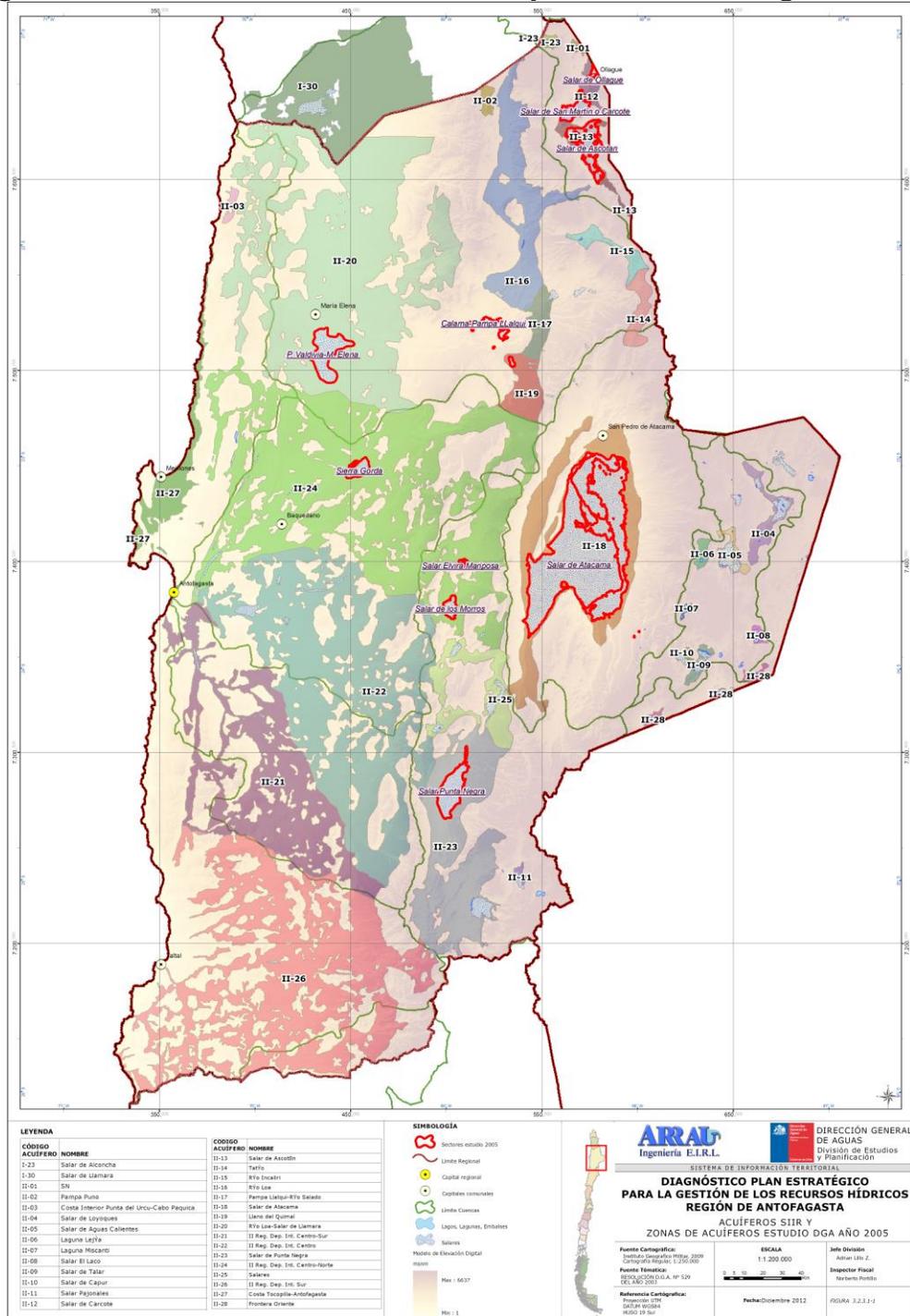
Este estudio tuvo como objetivo principal la elaboración de un diagnóstico del Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos para la Región de Antofagasta, donde fueron evaluados la cantidad y la calidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la región, para posteriormente realizar una caracterización tanto de la oferta como de la demanda hídrica. Por otra parte, se identificaron aquellos factores limitantes del desarrollo productivo regional mirado desde la perspectiva del recurso hídrico y factores que afectan al patrimonio ambiental o social. Por último, se propusieron lineamientos para la respectiva Evaluación Ambiental Estratégica.

Dentro de las actividades desarrolladas, se realizó una identificación de los principales acuíferos de la región de acuerdo a estudios que posee la DGA. En la Figura 2.1-8, se presenta un mapa con los principales acuíferos identificados. En particular, se caracterizaron los acuíferos sedimentarios de Calama, Ojos de San Pedro y Vegas de Turi, donde se abordaron de forma muy general aspectos geológicos y geomorfológicos, así como también hidrogeológicos. Paralelamente se entregan valores y rangos de parámetros hidráulicos tales como transmisividad y almacenamiento, los cuales fueron recopilados de estudios previos. Esto último se presenta en el Cuadro 2.1-23. De cualquier manera, se aprecia que la sectorización presentada es muy amplia, sobretodo en la zona media-baja.

En cuanto a recursos hídricos superficiales, se analizaron datos pluviométricos y fluviométricos registrados en las estaciones hidrometeorológicas de la DGA ubicadas en la región de Antofagasta. El análisis pluviométrico generó series de datos entre los años

1960/61 a 2010/11, a los que posteriormente se les realizó un análisis de frecuencia para ciertas probabilidades de excedencia, que en definitiva sentaron las bases para la elaboración de curvas de duración.

Figura 2.1-8 Zonificación de Principales Acuíferos según REF#27



Fuente: REF#27.

Cuadro 2.1-23 Rangos y Valores de Parámetros Hidráulicos del Acuífero según REF#27

Cuenca Hidrogeológica	Parámetros Hidráulicos	
	Transmisividad (m ² /día)	Coef. Almacenamiento
Ojos de San Pedro	2.000 - 4.500	0,15 - 0,20
Vegas de Turi	565 - 2.710	-
Calama	170 (Acuif. Superior)	10 ⁻¹ - 10 ⁻²
	250 (Acuif. Inferior)	

Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#27.

Por otro lado, se analizaron datos fluviométricos que permitieron la generación de estadística que fue sometida a un análisis temporal, considerando sólo aquellas estaciones que disponían un amplio y completo registro.

Análogamente, se efectuó una caracterización de las demandas hídricas para los usos destinados a agua potable, sector agrícola, producción de energía eléctrica, minería, industrial, paisajístico-turístico y recreacional.

Se determinaron caudales ecológicos para ciertos tramos de los principales cauces superficiales de la cuenca como el río Loa y los ríos tributarios Salado y San Salvador.

Asimismo se determinó un balance hídrico a nivel cuenca del río Loa entre la oferta y demanda hídrica, el cual se adjunta en el Cuadro 2.1-24.

Cuadro 2.1-24 Balance Oferta-Demanda Hídrica en Cuenca Río Loa

Ítem	Caudal (m ³ /s)
Oferta	4,8
Demanda Agrícola	0,51
Demanda Agua Potable	1,09
Demanda Minera	2,76
Evaporación Cuerpos de Agua	1,59
Caudal en Desembocadura	0,29
Reúsos de Agua Potable	Desconocido
Reúsos en Riego	Desconocido
Reúsos en Minería	Desconocido

Fuente: Modificado de REF#27.

También se realizó una caracterización de la infraestructura hídrica existente en la región de Antofagasta, principalmente aquellas que guardan relación al agua potable, riego, redes de monitoreo hidrometeorológico e infraestructuras de control de crecidas.

Por último, se efectuó una evaluación de la calidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos para las cuencas más importantes de la II Región. En el caso de las aguas superficiales de la cuenca del río Loa, se analizaron sus calidades a partir de los resultados de análisis físico-químicos existentes en la base de datos de la DGA asociadas a las respectivas estaciones de medición. Se elaboró un mapa espacial con diagramas de

Stiff, gráficos de barras con los valores promedios de ciertos elementos y gráficos circulares de pH en estaciones de calidad DGA y gráficos relacionales entre la distancia y la calidad medida en los puntos de medición ubicados desde aguas arriba hacia aguas abajo. Dentro de los parámetros estudiados destacan: pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Arsénico, Boro, Carbonato, Calcio, Cloruro, Cobre, Magnesio, Mercurio, Nitrato, Sodio y Sulfato.

Análogamente para las aguas subterráneas de la cuenca del Loa, el análisis se centró en el acuífero superior de Calama debido a la cantidad de datos disponibles y por el mayor riesgo de contaminación antrópica. Se presentó un mapa con la distribución espacial del índice de calidad general para este acuífero, seguido de una caracterización de las posibles fuentes u orígenes de la calidad química de este sector acuífero.

Cabe señalar que la información relativa a la caracterización de las demandas e infraestructuras hídricas, fueron incluidas en el modelo MAGIC actual. Por otro lado, esta información entrega para el presente estudio, una perspectiva general de la hidrogeología de la cuenca del río Loa y asimismo proporciona una zonificación tentativa y muy general de acuíferos estudiados previamente.

2.1.28. REF#28: Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Matraz. 2012

Este estudio se elaboró para la DGA con la finalidad de construir un modelo hidrogeológico del acuífero de Calama en base a la integración de la información disponible que incluya la materialización tanto de un modelo conceptual como numérico, junto con la ejecución de una campaña de prospección geofísica en el área de estudio.

Para la implementación del modelo hidrogeológico se llevaron a cabo actividades previas que incluyen ámbitos como la geología, geofísica e hidrogeología, los cuales permitieron en una etapa siguiente, la realización de los modelos conceptual y numérico. Para efectos del presente estudio, será de principal interés centrarse en las actividades previas relacionadas con la geología, geofísica e hidrogeología.

El tema geológico analizado comprendió en un comienzo la compilación geológica existente a través de estudios anteriores para identificar las principales unidades y en una revisión de pruebas geofísicas realizadas previamente. En el Cuadro 2.1-25, se presenta un resumen con las principales unidades geológicas del acuífero de Calama.

Cuadro 2.1-25 Unidades Geológicas Identificadas en Acuífero de Calama

Unidad	Formación Geológica	Descripción Geológica
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

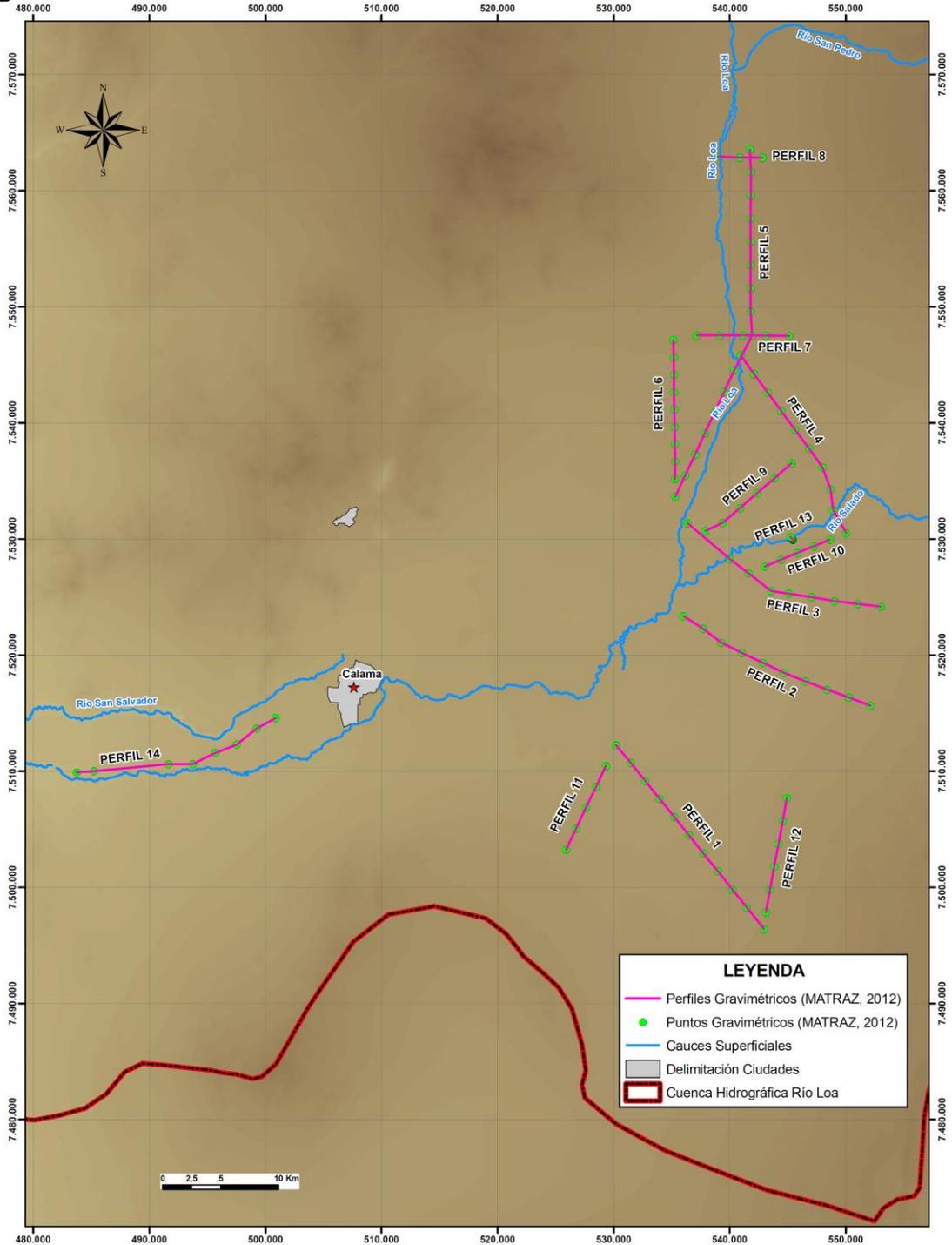
Fuente: REF#28.

Continuando con la geología, se realizó además una campaña de prospección geofísica en la cual se efectuaron 14 perfiles gravimétricos con el objeto de estimar la profundidad a la que se encontraría el basamento rocoso, con especial interés en lugares menos explorados como los límites Este y Oeste. El total de perfiles gravimétricos lo componen 112 puntos. En la Figura 2.1-9, se presenta la ubicación de los perfiles gravimétricos realizados, mientras que en el Anexo C se adjuntan los resultados de los puntos gravimétricos ensayados con sus respectivas coordenadas y cotas tanto de terreno como de basamento.

Con datos litológicos de sondeos dentro del área de estudio, mapas geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, los que se obtuvieron de trabajos anteriores, y sumado a los modelos geológicos de CODELCO y Minera El Tesoro, se desarrolló un nuevo modelo geológico que integra todos los antecedentes. En este último modelo geológico, se analizaron, correlacionaron e interpretaron para finalmente conseguir la delimitación y modelación en 3D de los principales estratos, correspondientes al acuífero superior, acuitado, acuífero inferior y basamento. Como resultado de este modelo, se obtuvo un mapa geológico para el sector de Calama y cortes geológicos longitudinales y transversales dentro de la zona de interés.

En lo referente a hidrogeología, se definieron seis unidades hidrogeológicas las cuales se agruparon en 4 macro unidades, a saber, acuífero superior, acuitado, acuífero inferior y basamento. Además, se recopilieron datos de parámetros hidráulicos del acuífero tales como permeabilidad y coeficientes de almacenamiento, lo que permitió condensar dicha base y entregar rangos de valores para cada unidad hidrogeológica en particular. En el Cuadro 2.1-26, se adjunta una síntesis de los rangos de valores de parámetros hidráulicos del acuífero obtenidos.

Figura 2.1-9 Ubicación de Perfiles Gravimétricos Realizados en REF#28



Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#28.

Cuadro 2.1-26 Resumen con los Rangos de Valores de Parámetros Hidráulicos en Acuífero Calama

Unidades Hidrogeológicas		Permeabilidad (m/día)	Coefficiente Almacenamiento
Acuífero Superior	Cobertura aluvial (UH-1a)	1×10^2 a 1×10^{-1}	$1,2 \times 10^{-4}$ a $1,6 \times 10^{-2}$
	Cobertura detrítico-evaporítica (UH-1b)	1×10^2 a 1×10^{-3}	
	Calizas (UH-2a)	1×10^1 a 1×10^{-2}	
	Depósitos limo-arcillosos (UH-2b)	1×10^{-1} a 1×10^{-3}	
	Depósitos de arenas negras (UH-2c)	3×10^2 a 1×10^{-2}	
Acuitardo	Acuitardo ignimbrítico (UH-3)	1×10^{-6}	-
	Acuitardo detrítico (UH-4)	$< 5 \times 10^{-3}$	
Acuífero Inferior	Depósitos de gravas (UH-5a)	1×10^2 a 5×10^{-2}	3×10^{-5} a 3×10^{-1}
	Depósitos limo-arcillosos (UH-5b)	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	
Basamento	Basamento (UH-6)	1×10^{-5} a 1×10^{-9}	-

Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#28.

Por lo demás, se efectuó también un análisis hidroquímico. Esta actividad proporcionó como resultado diagramas de Piper para puntos de muestreo localizados a lo largo del cauce del río Loa y en el río Salado antes de su confluencia con el Loa. Análogamente, se graficaron diagramas de Piper para aguas subterráneas procedentes tanto del acuífero superior como inferior. Para finalizar, se elaboraron mapas de la distribución espacial de parámetros de calidad como conductividad eléctrica y sulfatos, donde este último es utilizado como indicador de infiltración desde depósitos de relaves.

El modelo conceptual del sector de Calama realizado en esta referencia, que tuvo como origen la base de información geológica, hidrológica e hidrogeológica compilada anteriormente, fue la etapa previa a la realización del modelo numérico. En esta etapa conceptual se definieron aspectos como el dominio de la zona de interés, condiciones de borde y flujos de entrada y salida. Lo anterior permitió la estimación de un balance de aguas preliminar y del tipo conceptual.

Finalmente el modelo numérico que se implementó no se encontraba calibrado, aun cuando en el informe se explicaron los procesos de definición de la malla, asignación de los parámetros hidráulicos del acuífero como permeabilidad y almacenamiento y condiciones de borde. Sin embargo, esta explicación no es lo suficientemente precisa como para entender la configuración del modelo en sí.

Por lo tanto, para efectos del desarrollo del presente estudio, esta referencia será relevante por cuanto entrega información geofísica, geológica e hidrogeológica que complementa y contribuye al proceso de sectorización acuífera ya que proporciona elementos de mayor detalle. En especial serán de utilidad datos como mapa geológico del sector, resultados de las prospecciones gravimétricas, información de parámetros hidráulicos del acuífero y cortes geológicos. De la misma forma, los datos hidroquímicos permitirán establecer posibles vínculos o asociaciones con sectores acuíferos semejantes.

2.1.29. REF#29: Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013

Este estudio corresponde a un levantamiento de información hidrogeológica de sector Alto de la cuenca. Específicamente, el objetivo del estudio es la revisión y análisis de antecedentes geofísicos, geológicos, estratigráficos e hidrogeológicos, para definir y materializar una campaña de prospección geofísica complementaria y, a partir de esto, generar una base de datos consolidada de la información de las características y geometría del acuífero ubicado aguas arriba de la ciudad de Calama.

En esta referencia se identificaron las siguientes etapas que contienen información relevante que será utilizada en el presente estudio:

- Geología del Área
- Hidrogeología
- Prospección Geofísica
- Interpretación y Análisis de Resultados

A seguir, se detallan cada una de las cuatro etapas.

2.1.29.1. Geología del Área

En este capítulo, se abordó la geología del área de estudio a través de una perspectiva regional para luego continuar con una reseña de la evolución tectono-sedimentaria detallando los episodios paleográficos desarrollados en cada una de las edades desde el Eoceno hasta el Cuaternario junto con una descripción de las distintas formaciones de las unidades depositacionales identificadas. Posteriormente, se abordó la geología estructural de la zona de interés, la que se encuentra afectada por el sistema de Falla de Domeyko, para finalizar con estimaciones de la geometría interna de la cuenca en términos de espesor del relleno y de las estructuras involucradas desde el punto de vista geológico. Todo esto se efectuó en base a estudios anteriores sismoestratigráficos desarrollados en la cuenca de Calama y con correlaciones con las unidades litoestratigráficas expuestas en superficie.

2.1.29.2. Hidrogeología

En este capítulo se analizó la hidrogeología enfocada en 4 sectores con información existente en base a estudios anteriores realizados por diferentes entidades. Los sectores considerados fueron: Pampa Puno, Polapi, San Pedro de Inacaliri y Llalqui.

En particular, para cada uno de los sectores se entregó una descripción de las unidades hidrogeológicas identificadas, niveles estáticos, parámetros elásticos del acuífero, recarga, descarga, dirección de flujo y volumen del acuífero, siempre que esa información estuviera disponible en alguno de los antecedentes revisados. La información hidrogeológica anterior presentada para cada uno de los sectores y que puede ser relevante para el presente estudio, se sintetiza a continuación.

i. Pampa Puno**• Unidades Hidrogeológicas**

En base a la información de estratigráfica y de habilitación en 23 pozos ubicados en este sector, se detectaron 3 unidades hidrogeológicas:

- Unidad N° 1 – Ignimbritas. Corresponde a depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos fracturado. Se extiende a lo largo y ancho del sector con espesores que varían entre los 6 y 44 m. Además presenta una porosidad secundaria originada por fracturamiento.
- Unidad N° 2 – Sedimentaria. Se compone de material detrítico sedimentario asociado principalmente a gravas y con frecuentes intercalaciones de estratos limo-arenosos. Se extiende de forma importante en casi toda el área y su espesor es variable, con una potencia promedio de 350 m y un espesor máximo en la parte central de la cuenca de casi 700 m. Esta unidad constituye un acuífero.
- Unidad N° 3 – Roca de Basamento. Está constituido de areniscas, lavas, brechas, tobas dacíticas - riolíticas e intrusivos subvolcánicos. Esta unidad se asocia al basamento impermeable.

• Niveles Estáticos

De acuerdo a lo señalado en el estudio de Ingeorec del 2001, los niveles estáticos se encontraban a una profundidad entre los 45 a 100 m aproximadamente, lo que equivale a elevaciones entre los 3.940 y 4.146 m s.n.m. En el Cuadro 2.1-27, se presentan los niveles estáticos registrados en algunos pozos del sector de Pampa Puno.

Cuadro 2.1-27 Niveles Estáticos en Pozos de Pampa Puno

Pozo	Profundidad Agua (m)	Elevación Nivel Estático (m s.n.m.)
PUNO 1E	96,87	4.044
PUNO 2B	74,12	4.043
PUNO 2E	74,89	4.044
PUNO 3E	50,08	4.040
PUNO 4B	67,68	4.030
PUNO 4E	68,2	4.033
PUNO 5E	87,81	4.056
PUNO 6B	54,17	4.044
PUNO 7B	58,68	4.043
PUNO 8B	47,67	4.031
PUNO 9B	109,83	4.032
PUNO 314B	54,96	4.146
YOC-8	85	3.986
YOC-9	97,5	3.962
YOC-10	110	3.940

Fuente: REF#29.

- **Parámetros Hidráulicos**

De acuerdo a los resultados de pruebas de bombeo y de recuperación llevados a cabo en 9 pozos del sector, se tienen transmisividades entre 200 y 1.000 m²/día en la zona central. Por su parte, hacia el lado oeste de este sector, se tiene una transmisividad de 7 m²/día tal como indican los resultados obtenidos en un pozo emplazado en la ladera oeste del valle. En el Cuadro 2.1-28, se presentan los valores de transmisividad obtenidos en pozos de Pampa Puno de acuerdo a las pruebas de bombeo y recuperación realizadas.

Cuadro 2.1-28 Transmisividades Obtenidas en Pozos de Pampa Puno

Pozo	Fecha	Transmisividad (m ² /día)	
		Prueba Bombeo	Recuperación
PUNO 2B	Octubre 1998 y Marzo 1999	60 - 370	93 - 670
PUNO 4B	Enero 1999 y Mayo 1999	180 - 7.500	500
PUNO 6B	Febrero 1999	80 - 5.600	90
PUNO 7B	Febrero 1999	47 - 380	460 - 1.100
PUNO 8B	Marzo 1999	12	
PUNO 9B	Abril 1999	30	250
PUNO 10B	Abril 2000	85	
PUNO 11B	Mayo 2000	27	
PUNO 314B	Septiembre 1998 y Julio 1999	2 - 3	7

Fuente: Modificado de REF#29.

- **Recarga y Descarga**

La recarga del acuífero en el sector de Pampa Puno se asocia principalmente a infiltraciones por precipitaciones nivales y pluviales. La precipitación efectiva media anual se estimó 97 mm/año, según Ingeorec en 2001. En cuanto a la descarga de este acuífero, éste se produce hacia Pampa Yocas.

- **Volumen Embalsado**

Se estimó un volumen igual a 2.395.000 considerando como supuesto un coeficiente de almacenamiento de 10%.

ii. **Polapi**

- **Unidades Hidrogeológicas**

De acuerdo a resultados de prospecciones geofísicas, así como también de estratigrafías en pozos construidos en el área Polapi, se advierten cinco unidades. De techo a basamento:

- Unidad N° 1. Constituida por arenas y gravas dentro de una matriz limo-arenosa asociados a depósitos aluviales, fluvioaluviales, glaciales y piroclásticos. Esta unidad se identifica en quebradas, llanuras y pampas con espesores que varían entre los 20, 50 y 100 m. Dado el escaso desarrollo de esta unidad, no representa un acuífero de importancia.

- Unidad N° 2. Conformada por coladas de lavas andesíticas, presenta un intenso fracturamiento con espesores que pueden superar los 400 m en las partes altas de este sector.
- Unidad N° 3. Formada por tobas riolíticas y dacíticas con potencias entre los 150 y 200 m. Esta unidad actúa como un estrato semiconfinante que desconecta el acuífero de las unidades superiores.
- Unidad N° 4. Está compuesta de arenas gruesas y gravas con matriz arenosa y se detecta en general bajo los 150 m de profundidad con una potencia media de 200 hasta 300 m. Se la reconoce esta unidad por constituir un acuífero.
- Unidad N° 5. Esta unidad representa al basamento impermeable.

- **Niveles Estáticos**

Según el estudio de FCAB de 2003, los niveles subterráneos se encontraban entre los 124 a 171 m, lo que equivale a elevaciones entre 3.320 a 3.750 m s.n.m. En el Cuadro 2.1-29, se resume la información correspondiente a niveles subterráneos detectados en pozos del sector de Polapi.

Cuadro 2.1-29 Niveles Estáticos en Pozos del Sector Polapi

Pozo	Elevación Terreno (m s.n.m.)	Profundidad Agua (m)	Elevación Nivel Estático (m s.n.m.)
PPE-2	3.839	171,0	3.668
PPE-3	3.461	142,0	3.320
PPE-4	3.790	149,0	3.642
SEP-1	3.461	141,2	3.320
PLE-1	3.873	123,9	3.749
PLE-2	3.885	135,6	3.750

Fuente: REF#29.

- **Parámetros Hidráulicos**

En base a resultados obtenidos de pruebas de bombeo en pozos del área se obtienen valores para los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. En el Cuadro 2.1-30, se adjuntan los valores de transmisividad obtenidos en pozos del sector Polapi.

Cuadro 2.1-30 Transmisividad en Sector Polapi

Pozo	Transmisividad (m²/día)
SEP-1	223,2 - 266,4
PPE-3	221,76

Fuente: Modificado de REF#29.

Por otro lado, para el coeficiente de almacenamiento se obtuvo un valor de 0,00024.

- **Recarga y Descarga**

La recarga hacia el acuífero se asocia principalmente a: infiltraciones de precipitaciones pluviales y nivales estimadas en 445,1 l/s, flujos subterráneos en la parte alta del sector y aportes provenientes desde otros sectores por caudal pasante. Por otro lado, la descarga del acuífero se produce hacia el río Loa.

- **Volumen Almacenado**

Se estimó un volumen de 2.447 millones de m³, considerando un coeficiente de almacenamiento de 5%.

iii. San Pedro de Inacaliri

- **Unidades Hidrogeológicas**

Según la estratigrafía de pozos de extracción en área de San Pedro de Inacaliri, se distingue la presencia de una unidad acuífera de características libres. Esta unidad acuífera se compone de gravas, arenas y limos asociados a abanicos y depósitos aluviales.

- **Niveles Estáticos**

Mediciones efectuadas en este sector arrojaron que los niveles subterráneos se sitúan entre los 2 a 24 m de profundidad, lo que equivale a elevaciones entre los 3.800 y 3.803 m s.n.m. En el Cuadro 2.1-31, se adjuntan los niveles subterráneos registrados en los pozos de San Pedro de Inacaliri.

Cuadro 2.1-31 Niveles Estáticos en Sector San Pedro de Inacaliri

Pozo	Elevación Terreno (m s.n.m.)	Profundidad Agua (m)	Elevación Nivel Estático (m s.n.m.)
1	3.810,2	9,2	3.801,0
1I	3.810,4	9,3	3.801,1
2	3.825,0	23,9	3.801,1
2I	3.825,1	23,9	3.801,2
3	3.811,5	10,1	3.801,4
3I	3.811,6	10,9	3.800,7
3II	3.812,2	9,6	3.802,6
3III	3.811,0	9,9	3.801,2
4	3.803,2	3,0	3.800,2
4I	3.802,4	2,4	3.800,0
4II	3.802,0	2,0	3.800,0
4III	3.803,0	2,0	3.801,0

Fuente: REF#29.

- **Parámetros Hidráulicos**

Los valores para los distintos parámetros hidráulicos del sector San Pedro de Inacaliri presentados en la REF#29 corresponden a los mismos contenidos en la REF#2 y mostrados en el Cuadro 2.1-2.

iv. Llalqui

- **Unidades Hidrogeológicas**

De acuerdo a los resultados de los diversos estudios llevados a cabo en este sector, se identifican 3 unidades acuíferas las que se disponen sobre el basamento ígneo-metamórfico.

- Unidad Acuífera Superior. Está constituida por calizas y areniscas con un espesor variable entre los 30 a 70 m.
- Acuitardos Ignimbríticos y Detrítico. Está conformado por arcillas y limos de potencia variable cuyo rango va desde los 80 y 150 m y que dependiendo de su disposición estratigráfica puede generar semiconfinamiento a confinamiento en la unidad acuífera inferior.
- Unidad Acuífera Inferior. Lo componen básicamente gravas procedentes de depósitos aluviales y de piedemonte, los que se disponen en su mayor parte bajo los acuitardos ignimbrítico y detrítico presentando además un comportamiento entre semiconfinado a confinado.

El espesor de esta unidad varía entre los 30 y 130 m.

- **Niveles Estáticos**

Resultados de mediciones en más de 50 pozos ubicados en el área de Llalqui, muestran que para el acuífero superior el nivel subterráneo se desarrolla a elevaciones entre los 2.150 y 2.600 m s.n.m. Asimismo, los niveles piezométricos asociados al acuífero inferior se sitúan entre las elevaciones 2.100 y 2.600 m s.n.m.

- **Parámetros Hidráulicos**

Los parámetros hidráulicos de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento asociados a las unidades acuíferas superior e inferior, provienen de estudios anteriores. En el Cuadro 2.1-32 se presenta un resumen con los rangos esperables para estos parámetros.

Cuadro 2.1-32 Parámetros Hidráulicos del Acuífero en Sector Llalqui

Unidad Acuífera	Permeabilidad (m/día)	Coficiente Almacenamiento ()
Superior	0,0015 - 309,3	0,00012 - 0,016
Inferior	0,01- 120,1	0,00003 - 0,69

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de REF#29.

2.1.29.3. Prospección Geofísica

Se realizó para efectos del estudio de esta referencia, una campaña de prospección geofísica que consistió en trabajos de levantamiento de transiente electromagnético (TEM) y gravimétrico dentro del área de estudio.

En el caso de los TEM proyectados, se utilizaron 105 puntos los que se distribuyeron en 5 perfiles, mientras que la gravimetría proyectada consideró un total de 400 puntos. En la Figura 2.1-10, se muestra los perfiles TEM y los puntos gravimétricos proyectados para ese estudio.

2.1.29.4. Interpretación y Análisis de Resultados

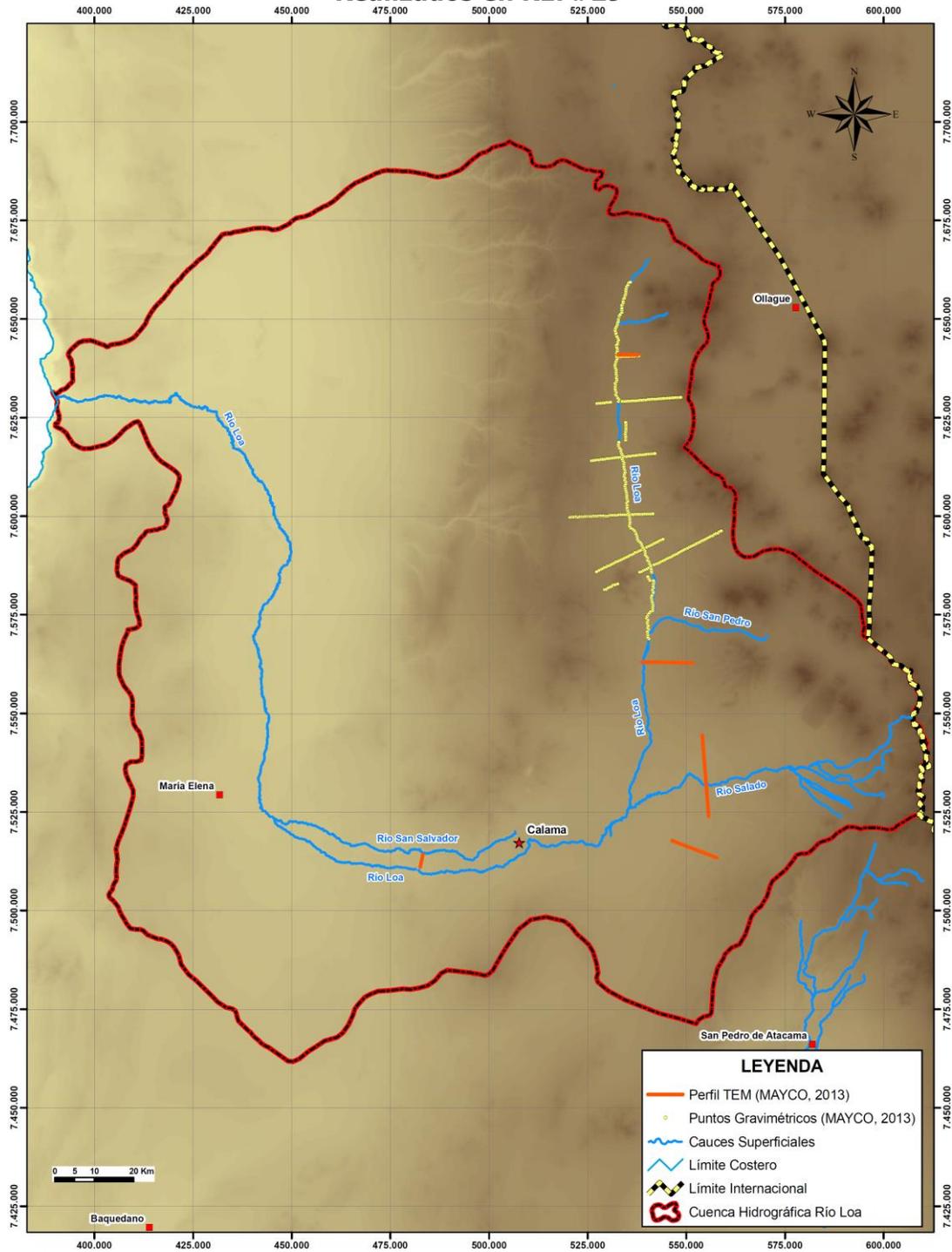
Los resultados de la prospección geofísica provenientes de la campaña de terreno anterior, fueron calibrados con datos existentes de estratigrafía de sondajes y pozos, estudios geofísicos previos e interpretaciones anteriores, para luego ser correlacionados con aquellos obtenidos por MATRAZ en 2012 (Ref#28).

Además, se realizó una modelación hidrogeológica tridimensional de las unidades acuíferas en el área de estudio empleando como base la geometría definida por Matraz, los resultados de las prospecciones geofísicas y la distribución de las unidades geológicas en superficie. Análogamente con la información que se generó a partir de los TEM proyectados por MAYCO en sectores fuera del área definida por MATRAZ y sumado a los antecedentes geológicos e hidrogeológicos que se manejan de la zona, se extendió dicha área tanto hacia el Norte como hacia el Este por el valle del río Loa. En la Figura 2.1-11, se muestra la extensión del modelo hidrogeológico tridimensional desarrollado por MAYCO junto con el cuadrilátero que define los límites del modelo elaborado por MATRAZ.

De esta forma, la definición de la geometría de cada una de las unidades acuíferas se realizó a partir de la generación de superficies de contacto entre estratos: basamento-acuífero inferior, acuífero inferior-acuitardo y acuitardo-acuífero superior. Con lo anterior, se estimó el volumen almacenado tanto para el acuífero superior como inferior, considerando rangos de coeficientes de almacenamiento. Para el acuífero superior con coeficientes de almacenamiento de 0,00012 a 0,016, se obtuvo un volumen entre 6.720.000 896.000.000 m³. Por otro lado, para el acuífero inferior con un rango de coeficientes de almacenamiento de 0,00003 a 0,69 se estimó un volumen entre 204.000.000 y 1.170.000.000.000 m³.

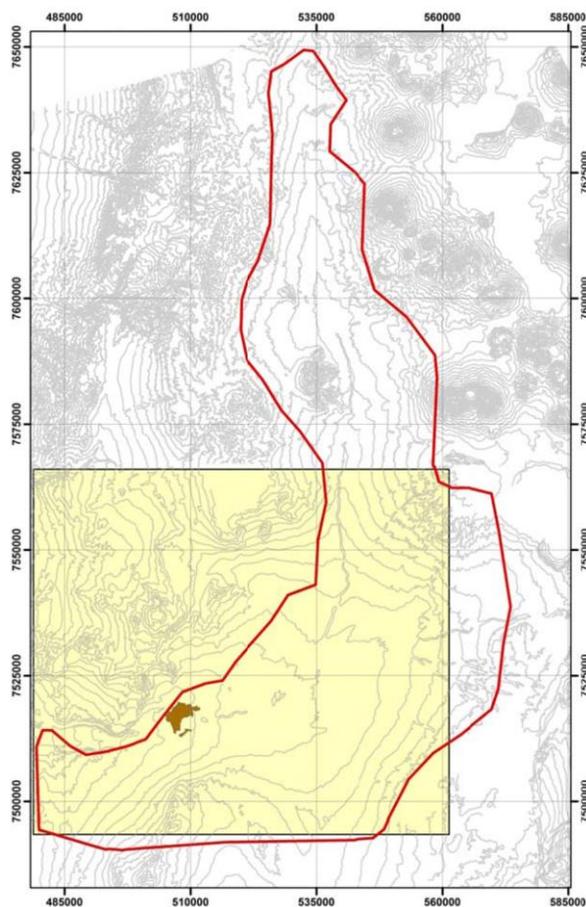
En particular para el presente estudio será de utilidad la caracterización geológica e hidrogeológica mostrada en esta referencia ya que permitirá la delimitación de el o los sectores acuíferos a considerar, sobre todo en la parte alta de la cuenca del río Loa donde se realizó una interpretación hidrogeológica que para efectos de este estudio se utilizarán también de forma directa. Además se considerarán las estimaciones de los volúmenes de almacenamiento realizadas por MAYCO como referenciales, las que luego serán contrastadas con las propias estimaciones obtenidas en este estudio tanto para las unidades acuíferas superior e inferior.

Figura 2.1-10 Ubicación de los Perfiles TEM y Puntos Gravimétricos Realizados en REF#29



Fuente: Elaboración Propia a partir de información de REF#29.

Figura 2.1-11 Extensión del Modelo Hidrogeológico Tridimensional



Fuente: REF#29.

2.1.30. REF#30: Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas. DGA. 2014

Este documento corresponde a un nuevo reglamento aprobado por la Dirección General de Aguas con el objeto de otorgar certeza técnica y jurídica a los usuarios, en un marco de sustentabilidad del recurso subterráneo, sin la afectación de terceros ni de zonas hidrogeológicamente sensibles para el medio ambiente.

El documento se encuentra compuesto por 54 artículos, que contemplan la exploración y explotación de las aguas subterráneas.

En términos de exploración, se definen las normas que regulan los procedimientos y pasos a seguir durante la etapa de exploración de aguas subterráneas, diferenciando los casos en que los terrenos de exploración pertenezcan a privados o a Bienes Nacionales.

En términos de explotación, se definen las disposiciones generales de solicitud y constitución de derechos de aguas subterráneas, así como también las comprobaciones que deben realizarse para justificar la sustentabilidad del recurso. Además, se define la normativa en términos de áreas de protección, limitaciones a la explotación de aguas subterráneas, comunidades de aguas subterráneas, cambio de punto de captación y/o

restitución, cambio de fuente de abastecimiento, puntos alternativos de captación y/o restitución y recarga artificial.

2.1.31. REF#31: Análisis Integrado Río Loa, Región de Antofagasta. DGA – Knight Piésold S.A. 2014

El objetivo de este estudio fue desarrollar una herramienta de análisis y planificación que permitiese evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca, transformándose en una ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento integral y multisectorial de los recursos hídricos de la cuenca, tanto superficial como subterráneo.

Para cumplir este objetivo, se desarrolló una modelación integral de la cuenca del río Loa mediante el programa MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas), que es una herramienta desarrollada por la DGA para la planificación de uso de recursos hídricos, representando elementos de la cuenca mediante una red de nodos y conectores enlazados, a los cuales se les asignan parámetros representativos de las condiciones físicas de la cuenca. Los nodos son elementos puntuales y se unen entre sí mediante los conectores que representan vectores de transporte de aguas entre los nodos. Esta herramienta determina todos los flujos involucrados en cada uno de estos elementos a escala media mensual; los cálculos son realizados mediante balances hídricos entre los elementos.

Además, en el mismo estudio se realizó la calibración en régimen permanente del modelo MODFLOW del acuífero de Calama, iniciado por Matraz en la REF#28.

Previo al desarrollo de ambos modelos, se realizó una completa recopilación de antecedentes de la cuenca que permitiesen la estimación de todos los flujos y parámetros relevantes en el balance hídrico. De este modo, se recopiló información pluviométrica, fluviométrica (DGA y privados), niveles de pozos, embalses y su funcionamiento, descargas a los cauces, explotación superficial y subterránea, etc.

A continuación se detallan los puntos relevantes asociados a las dos modelaciones mencionadas anteriormente.

2.1.31.1. Modelo Integrado MAGIC

El desarrollo del modelo integrado MAGIC consistió en completar, en base a la información recopilada, las 56 tablas utilizadas en la definición de los 14 elementos que componen el programa. A continuación se detallan los elementos modelados para la cuenca del río Loa y una breve descripción de los parámetros involucrados.

- **Cauces Superficiales:** Corresponden a los principales cauces de la cuenca y que son relevantes para su modelación. Entre ellos destacan los ríos Loa, San Pedro, Salado, San Salvador y la vertiente Ojos de Opache.

En los cauces fueron distribuidos 119 nodos, los que representan puntos singulares dentro de la red hídrica como bocatomas, puntos de descarga, estaciones fluviométricas, embalses y en general cualquier aporte o pérdida de agua. En los nodos es donde se realiza el balance hídrico.

Del mismo modo, se definieron tramos de ríos que conectan los nodos de acuerdo a la dirección de flujo y que poseen una conexión con el acuífero, permitiendo pérdidas por infiltración.

- **Estaciones de Calibración:** Corresponden a estaciones fluviométricas distribuidas en la cuenca del río Loa. Se utilizaron 9 estaciones de calibración, correspondientes a aquellas que poseían una mayor calidad de información en cuanto a su extensión y estado estructural. Estas estaciones corresponden a Río Loa en Vado Santa Bárbara, Río Loa en Salida Embalse Conchi, Río Toconce antes Represa SENDOS, Río Loa en Sifón Ayquina, Río Loa en Yalquincha, Río Loa en Escorial, Río Loa en Finca, Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua y Río Loa en Desembocadura.
- **Cuencas No Controladas:** Se definieron 10 cuencas de cabecera como "Aporte Natural" y 13 "Cuencas Laterales". El caudal aportante asociado a cada una de ellas se obtuvo mediante un análisis de precipitación-escorrentía, utilizando las estadísticas de precipitación disponibles y aplicando el método de la curva número. Esto se realizó en todas las cuencas, a excepción de Río Loa antes Represa Lequena, en que se utilizó directamente el caudal de la estación fluviométrica de aquel punto, ya que ésta se encuentra en régimen natural.
- **Acuíferos:** Se definieron 8 acuíferos en función de la información disponible, debido a que no existe en la actualidad una delimitación oficial de los sectores acuíferos de la cuenca. Esta delimitación se realizó en función de información geológica, geofísica, pozos y modelos conceptuales y numéricos existentes en diferentes sectores de la cuenca. Sin embargo, se considera que esta información puede ser mejorada en base a nuevos estudios disponibles y a la campaña de geofísica realizada para el presente estudio, lo que permitirá definir en forma más precisa la geometría acuífera de la cuenca.

La definición de acuíferos involucra además la definición a grandes rasgos de sus constantes elásticas, en base a pruebas de bombeo, estratigrafía y la hidrogeología general de los sectores.

- **Canales:** Se definieron 29 canales principales en la cuenca de acuerdo a los antecedentes disponibles y una visita a terreno, en la cual se ubicó la bocatoma de los canales y se definió su geometría y revestimiento en base a observación.
- **Zonas de Riego:** Se definieron 16 zonas de riego en base a información obtenida de censos agropecuarios y una visita a terreno. De este modo se definieron superficies, métodos de riego, cultivos, etc., y se estimaron las necesidades netas mensuales, las pérdidas y derrames.
- **Embalses:** Se simuló el embalse Conchi como el único embalse de la cuenca, cuya función es satisfacer la demanda de las zonas de riego. Para ello se dispuso de las curvas de embalse y la evaporación del espejo de agua. Sin embargo, el principal problema es que MAGIC no permite ingresar una regla de operación para el embalse, por lo que para simular la operación se creó un nodo a los pies del embalse cuya

demanda de agua era igual al de las zonas de riego. De este modo se pudo realizar una satisfactoria calibración del caudal entregado por el embalse.

- **Pozos de Bombeo:** Se simularon un total de 59 pozos de bombeo, de los cuales 53 corresponden a pozos en uso con derechos otorgados. Del resto, 1 pozo representa los drenes de la cuenca del río San Pedro, en funcionamiento hasta el año 1990, ya que MAGIC no permite la representación de drenes. Los otros 5 pozos representan afloramientos, debido a que en algunos sectores se necesita una cantidad mayor a los 4 puntos de afloramiento permitidos por MAGIC en cada acuífero.

Este manejo de los caudales mediante la utilización de pozos de bombeo responde a una debilidad del programa MAGIC, por lo que el modelador requiere usar las herramientas disponibles para representar estos flujos.

- **Captaciones Puntuales:** Se definieron 25 captaciones puntuales, de las cuales 19 corresponden a las principales extracciones de agua superficial de la cuenca (Codelco, SQM, ADASA y FCAB). El resto corresponde a captaciones ficticias que permiten simular la evaporación de los cauces, trasvases de agua y la demanda al embalse Conchi.

Al igual que en el caso de los pozos de bombeo, se utilizaron algunas captaciones puntuales para representar flujos que no son posibles de representar actualmente en MAGIC.

- **Descargas Puntuales:** Se representó una única descarga puntual, correspondiente a la descarga de la planta de tratamiento de aguas servidas de Calama hacia el río San Salvador. El caudal se definió mediante la capacidad de diseño de la planta y estimaciones asociadas a la población, por lo que el caudal es variable estacional y temporalmente de acuerdo al crecimiento de la ciudad.

La calibración del modelo resultó satisfactoria, ya que fue posible representar la estacionalidad y tendencia de los caudales en los diferentes cauces. Sin embargo, los parámetros de ajuste en algunos puntos no son altos debido a que la baja magnitud del caudal en los ríos hace que cualquier diferencia entre los valores observados y calculados genere porcentualmente un mayor error. Por ejemplo, en los ríos de la zona central y sur del país es posible obtener mejores parámetros de ajuste debido a que un error de pocos metros cúbicos es pequeño al lado de las decenas de metros cúbicos que transporta el río, mientras que en la zona desértica de Chile unos cuantos litros por segundo son un porcentaje significativo del caudal total del río.

2.1.31.2. Modelo Subterráneo MODFLOW

El modelo MODFLOW del acuífero de Calama comprende desde aguas abajo del embalse Conchi por el Norte y aproximadamente 10 km al poniente de la estación Río Salado en Sifón Ayquina por el Este, hasta unos 25 km al poniente de la ciudad de Calama en su extremo Oeste. Sus características se muestran en el Cuadro 2.1-33.

Cuadro 2.1-33 Características Modelo Calama

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Límite Norte (UTM)	m	7.566.206
Límite Sur (UTM)	m	7.493.206
Límite Oeste (UTM)	m	478.635
Límite Este (UTM)	m	561.490
Nº Filas	-	200
Nº Columnas	-	227
Nº Estratos	-	3
Nº Celdas	-	136.200
Tamaño Celdas	m x m	365 x 365

Fuente: REF#31

El modelo fue desarrollado como una mejora al modelo asociado al estudio de la REF#28 y recopila información tanto de este estudio, como de las REF#24, REF#25 y REF#26.

El modelo consta, a grandes rasgos, de 5 condiciones de borde de nivel constante, condiciones de río para representar los ríos Loa y Salado y condiciones dren para representar el río San Salvador y las vertientes Ojos de Opache, Likantatay y La Cascada.

No se cuenta con bombes en la cuenca, ya que la calibración se realizó en régimen permanente para el mes de Enero de 2003, tiempo en que se desconoce la existencia de bombes.

En cuanto a la recarga, se diferenciaron los aportes por precipitación, riego, pérdidas de agua potable, pérdidas desde el tranque Talabre, aporte subterráneo y pérdidas desde los cauces. En este punto es donde existe una mayor interacción con el modelo MAGIC, ya que los resultados obtenidos de éste fueron utilizados como dato de entrada para el modelo subterráneo.

Los resultados de la calibración muestran un ajuste aceptable de los niveles, representado por un valor RMS normalizado de 3,91%, mientras que el balance volumétrico es igual a 0,41%, ambos por debajo de lo recomendado en la "Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA" (5% y 1%, respectivamente).

Además de lo anterior, el modelo fue ajustado en cuanto a la interacción existente entre el río y el acuífero, por lo que tanto las descargas del río como los afloramientos se encuentran cercanos en magnitud a lo entregado por el modelo MAGIC.

2.1.32. REF#32: Metodología para la Delimitación y Sectorización de Acuíferos a Nivel Nacional. DGA – GCF Ingenieros Limitada. En Desarrollo.

Este estudio elaborado por GCF Ingenieros Consultores para la Dirección General de Aguas tuvo por objetivo proponer una metodología para delimitar sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común que tenga una base objetiva y científica y

que preste aplicabilidad en la administración y gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Inicialmente se realizó una recopilación de aquellos informes técnicos realizados por o para la DGA y que guardan relación con la delimitación de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común. Estos informes fueron filtrados de acuerdo a su relevancia en cuanto al grado de aporte información. Junto con lo anterior, se analizó región por región del país si es que se han efectuado sectorizaciones acuíferas y cuál ha sido el método implementado, así como también se estudió la experiencia extranjera en este tema. En cuanto a esto último se analizaron casos de ejemplo y trabajos publicados en países como España, Reino Unido, Irlanda y algunos lugares de Francia, Bélgica y Holanda, los cuales permitieron conocer cada una de las metodologías de identificación de acuíferos, en especial con mayor detalle en el caso español.

Por otra parte, se realizó un análisis técnico-legal del concepto de sector hidrogeológico de aprovechamiento común, el cual aparece tanto en el Código de Aguas, en el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos y como en el Decreto Supremo 203 Reglamento de Aguas Subterráneas. De la revisión de dichos documentos, se estableció una incompatibilidad entre la definición con fines administrativos que allí se señala y aquella de carácter netamente hidrogeológico, que a la luz de argumentos meramente técnicos, la delimitación impuesta podría ser cuestionable. Por consiguiente para subsanar lo anterior y evitar que esto genere una arista para propiciar conflictos legales, se propuso un concepto complementario denominado "Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Compartido", el cual se explica como un acuífero o parte de éste cuyas características hidrológicas espaciales y temporales son tales que pese a su delimitación física, desde el punto de vista hidrogeológico, mantiene vínculos o dependencia con sectores hidrogeológicos aledaños, lo que significa tener que tratarlo, tanto técnica como administrativamente, como un sistema dependiente de otros.

Posteriormente, fueron presentados antecedentes relativos a las sectorizaciones de acuíferos que han sido implementadas realizadas la fecha en Chile, especificando cada uno de los procedimientos aplicados y sus justificaciones. De esta forma se determinó que la sectorización acuífera chilena se basa en tres criterios:

- Sectorización mediante Cuencas Hidrológicas
- Sectorización por Contraste de Valores de Parámetros Elásticos
- Sectorización mediante Barreras Hidrogeológicas

El primer criterio de sectorización, se sustenta en la delimitación considerando cuencas y subcuencas hidrológicas ya sea tomando en cuenta confluencia de ríos cordilleranos que conforman uno mayor o como cuencas laterales de cursos secundarios que descargan sus recursos a un cauce principal. El segundo criterio, corresponde a la demarcación de límites basado en la identificación de sectores hidrogeológicos de similar permeabilidad, mientras que el tercer y último criterio, guarda relación con el reconocimiento principalmente de afloramientos de aguas subterráneas en los lechos de cauces superficiales, los cuales fijan límites entre sectores que confluyen a estos puntos.

De acuerdo a todo lo anterior, se desarrolló finalmente la propuesta metodológica de sectorización acuífera, la cual requiere contar con un mínimo de información base en el área a delimitar. El método establece los siguientes pasos:

1. *Identificación de la Zona de Estudio*

El área a delimitar se debe realizar mediante un rectángulo envolvente en el que se deben definir al menos las 4 coordenadas UTM de los vértices que lo conforman y utilizando el datum WGS84.

2. *Base Topográfica*

Se debe contar con una base topográfica para el área de interés, la que podría contener datos de curvas de nivel del IGM, levantamiento topográfico de detalle, topografía satelital, entre otros. En el caso de no disponer de los antecedentes anteriores, es posible emplear topografía satelital SRTM o ASTER y en menor medida utilizar información de cotas de Google Earth.

3. *Red de Drenaje*

Una vez que se cuenta con la base topográfica, es necesario realizar el trazado de la red hídrica de drenaje superficial, la que puede complementarse de igual forma con la base cartográfica del IGM.

4. *Sectorización Preliminar*

Definidas la topografía y la red de drenaje, se debe efectuar una primera sectorización en base a la delimitación de subcuencas hidrográficas, de esta forma es posible desagregar flujos e individualizar aportes superficiales, los que se relacionan con flujos subterráneos que escurren en paralelo.

5. *Hidrogeología*

Se debe tener en cuenta aspectos hidrogeológicos tales como geología y prospecciones geofísicas, las cuales permiten determinar singularidades como afloramientos de roca, elementos que conforman fronteras o condiciones de borde, geometría de las unidades saturadas detectadas (espesores y estratificación) y profundidad del basamento rocoso.

Asimismo, es necesario disponer de parámetros hidráulicos del acuífero como permeabilidades y almacenamientos en distintos puntos de éste, ya que la detección de diferencias importantes de estos parámetros en distintas zonas podría ameritar una subdivisión.

6. *Captaciones Subterráneas*

Es necesario contar con información de captaciones o en su defecto información de derechos solicitados, otorgados y denegados en el área, ya que la relativa independencia entre sectores depende en gran medida de los niveles de extracción. Por lo tanto la existencia de captaciones subterráneas, constituye un indicador de áreas marginales que podrían ser considerados al diferenciar un sector de otro.

7. Sectorización Acuífera

En esta etapa, se realiza la sectorización acuífera final, afinando o modificando la sectorización preliminar de subcuencas llevado a cabo anteriormente (Etapa 4). Para esta etapa, se deberá integrar toda la información anterior, básicamente, singularidades y fronteras hidrogeológicas, contacto relleno-basamento, cauces con escorrentía permanente, lagos, lagunas de embalse, descarga al mar, angostamientos con afloramientos de roca y distribución espacial de las captaciones subterráneas en el área de interés. Este proceso de integración permite conceptualizar el funcionamiento del sistema acuífero, por consiguiente, facilitará el procedimiento de encontrar aquella delimitación óptima que minimice las dependencias entre sectores hidrogeológicos.

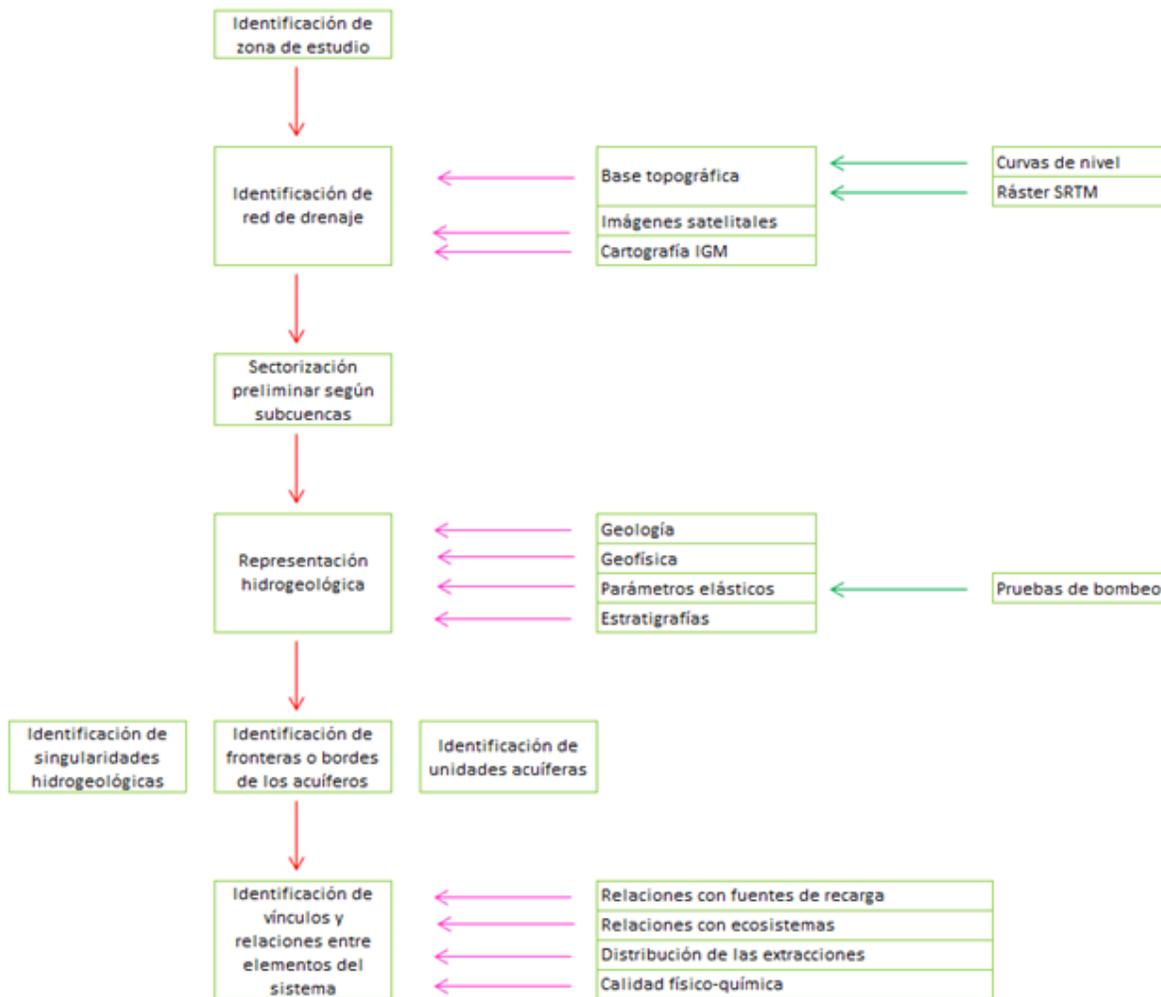
Adicionalmente se deberá individualizar otros factores, como por ejemplo, localización de extracciones importantes, protección de áreas ambientalmente sensibles y alimentadas por aguas subterráneas, la calidad físico-química de éstas, etc.

En la Figura 2.1-12, se presenta un diagrama de flujo esquemático que resumen las principales etapas de sectorización acuífera.

Este estudio recalca que la metodología propuesta de sectorización se desarrolló de forma tal que pueda ser aplicable a cualquier sistema hidrogeológico de nuestro país, ya que la conceptualización de este método fue de carácter genérico para abarcar un amplio espectro de posibilidades.

Por último se realizaron recomendaciones de estudios completos o complementarios en aquellas cuencas del país donde no es posible aplicar esta metodología dada la escasa información disponible en la actualidad.

La referencia de este estudio es muy importante por cuanto entrega las directrices metodológicas de sectorización que deberán aplicarse a la cuenca del río Loa, objetivo a cumplir en el presente estudio.

Figura 2.1-12 Esquema de Sectorización Acuifera

Fuente: REF#32

2.1.33. REF#33: Informe Final, Etapa 1: Actualización Modelo de Flujo Estudio Infiltración Tranque Talabre. CODELCO-HIDROMAS. 2014

Este estudio realizado por HIDROMAS para CODELCO tuvo como objetivo actualizar la información de niveles subterráneos y caudales de bombeo hasta el año 2013 del modelo de flujo de agua subterránea del acuífero de Calama desarrollado por Knight Piésold en el año 2010.

El documento comienza con una revisión y análisis de los datos históricos disponibles, la cual incluyó una recopilación de estudios previos realizados en la zona que aportan con información geológica, parámetros hidráulicos de las unidades acuíferas, catastro de las captaciones, registros de niveles estáticos y dinámicos de agua subterránea, etc. Asimismo, se analizaron los niveles piezométricos y caudales de extracción registrados por CODELCO, de modo de chequear la consistencia y eliminar datos incorrectos o no representativos.

Posteriormente se llevó a cabo una revisión y evaluación tanto del modelo conceptual como de los modelos numéricos existentes en la cuenca de Calama, principalmente a los realizados por Knight Piésold e HIDROMAS en los años 2010 y 2012, respectivamente.

La actualización definitiva del modelo subterráneo del acuífero de Calama consideró básicamente los siguientes aspectos:

- Modificación de la distribución espacial y temporal de las recargas por infiltración del Tranque Talabre hacia el acuífero, en base a los perfiles de filtraciones potenciales.
- Revisión de las condiciones de borde de nivel conocido impuestas en el modelo y en algunos casos éstas fueron corregidos en cuanto a valores y extensión temporal.
- Modificación de los parámetros hidráulicos del acuífero como permeabilidades y coeficientes de almacenamiento, tanto en sus valores como en su distribución espacial.
- Actualización de los niveles piezométricos y caudales de bombeo hasta Diciembre de 2013.

Finalmente, el modelo definitivo que incorpora todos los cambios antes descritos, fue calibrado tanto en régimen permanente como transiente. La calibración en este último régimen, se realizó considerando el período que va entre Enero 2003 a Diciembre 2008 y como complemento se efectuó una validación del modelo en fase transiente entre Enero 2009 y Diciembre 2013 con el objeto de cumplir con los requerimientos establecidos en la Guía de Modelación de Aguas Subterráneas del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2012).

Este documento resultó ser muy relevante para el presente estudio, por lo que tanto la información como el modelo numérico propiamente tal desarrollado por HIDROMAS, serán utilizados de manera directa como datos de entrada para la implementación del modelo subterráneo MODFLOW del acuífero del sector medio de Calama.

2.2. Información Facilitada por la DGA

La DGA facilitó a este consultor información hidrológica y cartográfica relevante para el desarrollo del proyecto y que se presenta en el Anexo D. Esta información será utilizada de manera directa en el estudio, indicándose cuando sea necesario, su procedencia. A continuación se menciona la información proporcionada:

- Información SIG en formato shape de elementos relevantes de la cuenca (geología, hidrografía, cuencas, estaciones, etc.).
- Estadísticas pluviométricas y fluviométricas de las estaciones DGA relevantes para el presente estudio.
- Derechos de aguas otorgados tanto superficiales como subterráneos.
- Estadísticas de caudales y volúmenes diarios para las principales captaciones de aguas superficiales de propiedad de las siguientes empresas privadas: ADASA, CODELCO, FCAB y SQM. Estas estadísticas comprenden un período total de tres meses que van entre Enero y Marzo de 2011.
- Niveles estáticos en pozos DGA en la cuenca.
- Expedientes de Zonas de Exploración de Aguas Subterráneas.

2.2.1. Información SIG de la Cuenca

Para el manejo de este tipo de información se armó una base de datos SIG, la cual cuenta con información cartografía IGM y DGA así como también del tipo geológica.

En lo referente a información cartográfica, se dispone específicamente de:

- Comunas, capitales provinciales y regionales y límites administrativos de éstas.
- Localidades y pueblos.
- Red vial.
- Red cartográfica completa la que incluye ríos, canales, lagos, lagunas, salares, etc.
- Áreas de restricción y zonas de prohibición de acuíferos.
- Delimitación de Cuencas, subcuencas y subsubcuencas de importancia para la DGA.
- Red hidrometeorológica de la DGA, las que incluyen estaciones pluviométricas, fluviométricas, de calidad de aguas, entre otras.

En cuanto a información geológica disponible se tiene en formato shape:

- Mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN.

2.2.2. Estadísticas Pluviométricas y Fluviométricas de Estaciones DGA

Se tienen los últimos datos a la fecha de los registros tanto de precipitaciones mensuales como de caudales medios mensuales que registra la DGA en sus respectivas estaciones. En los Cuadros 2.2-1 y 2.2-2, se presenta un resumen de la estadística actual que se dispone tanto para las estaciones pluviométricas como fluviométricas respectivamente, y que fueron consideradas para la modelación en MAGIC.

Tanto los últimos datos pluviométricos como fluviométricos correspondientes al último año, serán procesados de manera tal de poder efectuar la actualización de las series definitivas de precipitaciones y caudales, las que se ingresarán posteriormente como input al modelo MAGIC implementado para la cuenca del río Loa.

Cuadro 2.2-1 Resumen de la Información Pluviométrica en Registros de Estaciones DGA

Estación	Coordenadas UTM: WGS84		Vigencia	Año Inicio	Año Fin	Período Datos (años)	Pp Media (mm/año)
	Este (m)	Norte (m)					
Ayquina (1)	570.021	7.536.159	Vigente	1967	Actualidad	48	41,2
Calama (2)	509.626	7.517.036	Vigente	1965	Actualidad	50	4,3
Caspana (3)	580.918	7.529.311	Suspendida	1971	2008	38	82,2
Chiu-Chiu (4)	537.208	7.529.354	Vigente	1974	Actualidad	41	5,7
Conchi Embalse (5)	538.581	7.563.972	Vigente	1967	Actualidad	48	20,1
Conchi Muro Embalse (6)	538.925	7.563.787	Suspendida	1978	1991	14	20,8
Conchi Viejo (7)	528.304	7.572.296	Vigente	1973	Actualidad	42	40,8
Cupo (8)	570.273	7.553.931	Vigente	1978	Actualidad	37	70,9
El Tatio (9)	601.377	7.525.377	Vigente	1977	Actualidad	38	151,8
Inacaliri (10)	596.177	7.563.418	Vigente	1969	Actualidad	46	127,9
Lequena (11)	534.858	7.604.905	Vigente	1973	Actualidad	42	94,1
Linzor (12)	600.506	7.541.035	Vigente	1973	Actualidad	42	177,6
Ojos de San Pedro (13)	570.746	7.569.887	Vigente	1969	Actualidad	46	61,4
Parshall N°2 (14)	549.619	7.573.043	Vigente	1969	Actualidad	46	29,0
Quillagua (15)	444.352	7.604.294	Vigente	1970	Actualidad	45	0,2
Quinchamale (16)	541.483	7.577.217	Vigente	1995	Actualidad	20	26,2
Río Loa antes Represa Lequena (17)	534.949	7.605.229	Vigente	2002	Actualidad	13	65,7
Río Salado en Sifón Ayquina (18)	567.487	7.534.983	Vigente	2001	Actualidad	14	27,8
Salado Embalse (19)	581.921	7.534.963	Vigente	1975	Actualidad	40	74,1
San Pedro de Conchi (20)	547.672	7.574.094	Suspendida	1970	1993	24	37,7
Silala (21)	600.028	7.564.931	Vigente	2001	Actualidad	14	88,2
Toconce (22)	584.970	7.537.868	Vigente	1972	Actualidad	43	90,1
Turi (23)	573.159	7.539.958	Suspendida	1981	1993	13	37,2
Collahuasi (24)	520.379	7.677.884	Suspendida	1971	1991	21	162,3
Copaquire (25)	511.000	7.685.179	Suspendida	1977	2011	35	84,4
Guatacondo DGA (26)	495.056	7.685.520	Vigente	1977	Actualidad	37	22,4
San Pedro de Atacama (27)	581.811	7.466.358	Vigente	1959	Actualidad	56	30,1
Ujina (28)	538.515	7.680.588	Vigente	1974	Actualidad	41	170,7
Coposa (29)	531.640	7.709.684	Vigente	1982	Actualidad	33	91,7
Ollague (30)	577.684	7.652.565	Vigente	1971	Actualidad	44	85,5
Cebollar (31)	568.288	7.618.540	Suspendida	1975	2006	32	60,0
Ascotan (32)	574.717	7.597.020	Vigente	1974	Actualidad	41	71,6
Baquadano (33)	414.151	7.419.265	Vigente	1975	Actualidad	40	1,3
Antofagasta (34)	358.307	7.389.264	Vigente	1978	Actualidad	37	3,0
Toconao Reten (35)	601.168	7.434.317	Suspendida	1975	1991	17	41,1
Toconao Experimental (36)	602.365	7.434.832	Suspendida	1975	2009	35	34,3
Camara (37)	605.746	7.410.665	Vigente	1979	Actualidad	36	33,3
Socaire (38)	612.802	7.390.681	Vigente	1974	Actualidad	41	40,3
Peine (39)	595.837	7.380.038	Vigente	1974	Actualidad	41	20,3
Talabre (40)	613.518	7.421.064	Vigente	1995	Actualidad	20	70,8
Río Grande (41)	585.501	7.494.353	Vigente	1977	Actualidad	38	76,2

Fuente: Elaboración Propia a partir de información DGA.

Cuadro 2.2-2 Resumen de la Información Fluviométrica en Registros de Estaciones DGA

Estación	Coordenadas UTM: WGS84		Vigencia	Año Inicio	Año Fin	Período Datos (años)	Q Medio (m ³ /s)
	Este (m)	Norte (m)					
Canal Quillagua en Quillagua (1)	444.263	7.606.523	Suspendido	1977	2002	26	0,19
Río Loa antes Represa Lequena (2)	534.950	7.605.197	Vigente	1967	Actualidad	48	0,58
Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua (3)	446.559	7.598.875	Vigente	1998	2012	15	0,41
Río Loa D. J. San Salvador (Chacance) (4)	445.441	7.523.630	Vigente	1984	Actualidad	31	0,75
Río Loa D. J. San Salvador-(M. Elena) (5)	441.818	7.529.060	Vigente	1993	Actualidad	22	0,51
Río Loa en Alcantarilla Conchi N°2 (6)	540.523	7.569.795	Suspendido	1979	2006	28	0,77
Río Loa en Chintoraste (7)	502.342	7.511.488	Suspendido	1958	1972	15	1,04
Río Loa en Conchi (8)	540.605	7.568.412	Suspendido	1958	1975	18	1,70
Río Loa en Desembocadura (9)	390.803	7.630.449	Vigente	1989	2013	25	0,24
Río Loa en Escorial (10)	511.462	7.518.218	Vigente	1964	Actualidad	51	2,08
Río Loa en Finca (11)	501.142	7.511.120	Vigente	1971	Actualidad	44	0,65
Río Loa en Quillagua (12)	444.811	7.605.787	Suspendido	1958	1973	16	0,71
Río Loa en Salida Embalse Conchi (13)	539.132	7.564.018	Vigente	1976	Actualidad	39	0,74
Río Loa en Vado Santa Bárbara (DOH) (14)	540.438	7.570.195	Vigente	2006	Actualidad	9	0,50
Río Loa en Yalquincha (15)	512.605	7.517.664	Suspendido	1950	2009	60	1,84
Río Salado A. J. Curti (16)	578.012	7.536.045	Vigente	1975	Actualidad	40	0,23
Río Salado A. J. Loa (17)	536.865	7.526.665	Vigente	2002	2013	12	0,50
Río Salado en Sifón Ayquina (18)	567.504	7.534.956	Vigente	1975	Actualidad	40	0,46
Río San Pedro en Camino Internacional (19)	548.222	7.574.048	Suspendido	1979	1989	11	0,05
Río San Pedro en Parshall N°1 (20)	565.449	7.570.727	Vigente	1967	Actualidad	48	1,01
Río San Pedro en Parshall N°2 (BT. CHILEX) (21)	550.371	7.573.426	Vigente	1967	Actualidad	48	1,00
Río Toconce antes Represa Sendos (22)	588.204	7.536.667	Vigente	1982	Actualidad	33	0,45

Fuente: Elaboración Propia a partir de información DGA.

2.2.3. Derechos de Aguas Superficiales y Subterráneos

De la recopilación de información asociada a derechos de agua tanto superficiales como subterráneos, se encontró que hasta la fecha de la realización del presente estudio, no existen nuevos derechos constituidos, ya sean consuntivos o no consuntivos. Por consiguiente, se mantendrán los mismos derechos procesados y analizados en detalle en el estudio de la REF#31, ya que corresponden también a la versión actualizada a 2014.

En el Cuadro 2.2-3, se adjunta un resumen con la información de los derechos totales otorgados tanto superficiales como subterráneos.

Por otro lado se disponen de los expedientes de pozos asociados a derechos otorgados de carácter subterráneo. La información que entregan estos expedientes, según sea el caso, consisten en estratigrafía de el o los pozos proyectados, prueba de bombeo ejecutada con las respectivas estimaciones de permeabilidad o transmisividad y finalmente los caudales solicitados, los ensayados en las pruebas de bombeo y los otorgados en definitiva. Por ende, dicha información de carácter hidrogeológica, será de interés en la fase siguiente de definición de los sectores hidrogeológicos.

En el Cuadro 2.2-4, se presenta una tabla resumen con el listado de expedientes de derechos subterráneos recopilados y en Cuadro 2.2-5, se adjunta un detalle con la información hidrogeológica contenida en algunos de ellos. En tanto, en la Figura 2.2-1, se muestra la ubicación de dichos expedientes asociados a derechos subterráneos del tipo consuntivo y de ejercicio permanente y continuo.

Cuadro 2.2-3 Resumen de la Información de Derechos Superficiales y Subterráneos Otorgados

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente Anual (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Antofagasta	2.015,00	3,70	63,5	0,1
Calama	8.718,54	3.099,50	274,9	97,7
Maria Elena	527,72	48,76	16,6	1,5
Ollagüe	9,00	0,00	0,3	0,0
San Pedro de Atacama	18,00	265,42	0,6	8,4
Tocopilla	37,50	0,00	1,2	0,0
Sierra Gorda	0,00	0,31	0,0	0,0
Taltal	0,00	45,00	0,0	1,4
Pica	4,80	0,00	0,2	0,0
Pozo Almonte	60,00	330,96	1,9	10,4
Iquique	0,00	5,00	0,0	0,2
S/I	6.678,43	0,00	210,6	0,0
TOTAL	18.068,99	3.798,65	569,82	119,79

Fuente: Elaboración Propia a partir de información DGA.

Cuadro 2.2-4 Resumen Expedientes de Derechos Subterráneos

Código Exp.	Exp. Digital	Tipo Derecho	Ejercicio Derecho	Caudal (l/s)	Coordenadas UTM: WGS84	
					Este (m)	Norte (m)
ND-0202-1169	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	507.818	7.520.969
ND-0202-1191	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	2,0	508.861	7.525.280
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	572.582	7.562.782
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	58,0	589.206	7.563.703
ND-0202-723	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	40,0	571.368	7.568.304
ND-0202-466	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	60,0	573.913	7.568.384
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	233,0	579.979	7.568.562
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	90,0	569.508	7.568.800
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	200,0	569.498	7.568.812
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	220,0	576.937	7.568.841
ND-0202-692	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	150,0	571.359	7.569.303
ND-0202-466	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	100,0	574.480	7.569.864
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	7,0	565.338	7.570.073
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	200,0	574.972	7.571.317
ND-0202-466	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	135,0	575.000	7.571.328
ND-0202-215	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	220,0	574.634	7.571.623
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	5,0	518.273	7.640.906
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	35,0	520.832	7.640.960
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	520.832	7.642.411
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	521.023	7.643.784
ND-0202-2068	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	9,0	521.745	7.644.864
ND-0202-2068	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	60,0	520.264	7.645.845
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	110,0	521.346	7.646.100
ND-0202-2068	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	521.742	7.646.872

Cuadro 2.2-4 Resumen Expedientes de Derechos Subterráneos

Código Exp.	Exp. Digital	Tipo Derecho	Ejercicio Derecho	Caudal (l/s)	Coordenadas UTM: WGS84	
					Este (m)	Norte (m)
ND-0202-1880	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	520.816	7.647.750
ND-0202-800061	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	507.116	7.510.326
ND-0202-1864	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	65,0	503.839	7.513.955
ND-0202-1864	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	70,0	503.711	7.514.146
ND-0202-1864	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	73,2	503.460	7.514.207
ND-0202-1864	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	65,0	503.707	7.514.507
ND-0202-1864	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	46,8	504.093	7.514.588
VPC-0202-1832	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	65,8	504.034	7.514.665
ND-0202-800054	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	16,5	502.869	7.514.667
ND-0202-1057	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	49.0*	503.873	7.514.709
ND-0202-1059	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	18.0*	504.346	7.515.139
ND-0202-1058	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	502.587	7.515.490
ND-0202-1060	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	47,0	505.366	7.515.696
ND-0201-1596	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	7,0	447.028	7.515.830
ND-0202-1061	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	45,0	503.043	7.515.996
ND-0201-31	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	2,7	443.296	7.517.286
ND-0201-31	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	8,0	443.286	7.517.386
ND-0201-1735	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	5,0	442.252	7.518.729
ND-0201-1602	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	16,0	442.921	7.519.849
ND-0201-1819	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	9,5	440.695	7.520.707
ND-0202-896	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	31,0	535.117	7.522.612
ND-0103-703	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	19,0	433.660	7.657.617
ND-0103-702	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	31,0	432.961	7.658.549
ND-0103-696	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	65,0	434.376	7.658.721
ND-0103-693	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	60,0	433.603	7.659.637
ND-0103-698	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	4,7	431.578	7.659.962
ND-0103-699	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	35,0	433.411	7.661.602
ND-0103-701	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	439.718	7.663.218
ND-0103-800099	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	6,2	482.406	7.681.975
ND-0103-800100	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	5,8	482.406	7.681.975
ND-0201-1751	Si	Consuntivo	Permanente y Continuo	0,6	446.929	7.603.274
ND-0202-800051	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	30,0	530.111	7.512.255
ND-0202-800046	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	35,0	535.202	7.513.815
ND-0202-800045	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	532.456	7.515.000
ND-0202-800049	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	20,0	537.454	7.515.745
ND-0202-800052	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	50,0	544.879	7.517.919
ND-0202-800053	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	20,0	537.407	7.518.759
ND-0202-800050	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	34,0	539.478	7.520.478
ND-0202-800047	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	40,0	542.052	7.522.686
ND-0202-800048	No	Consuntivo	Permanente y Continuo	40,0	543.470	7.525.142

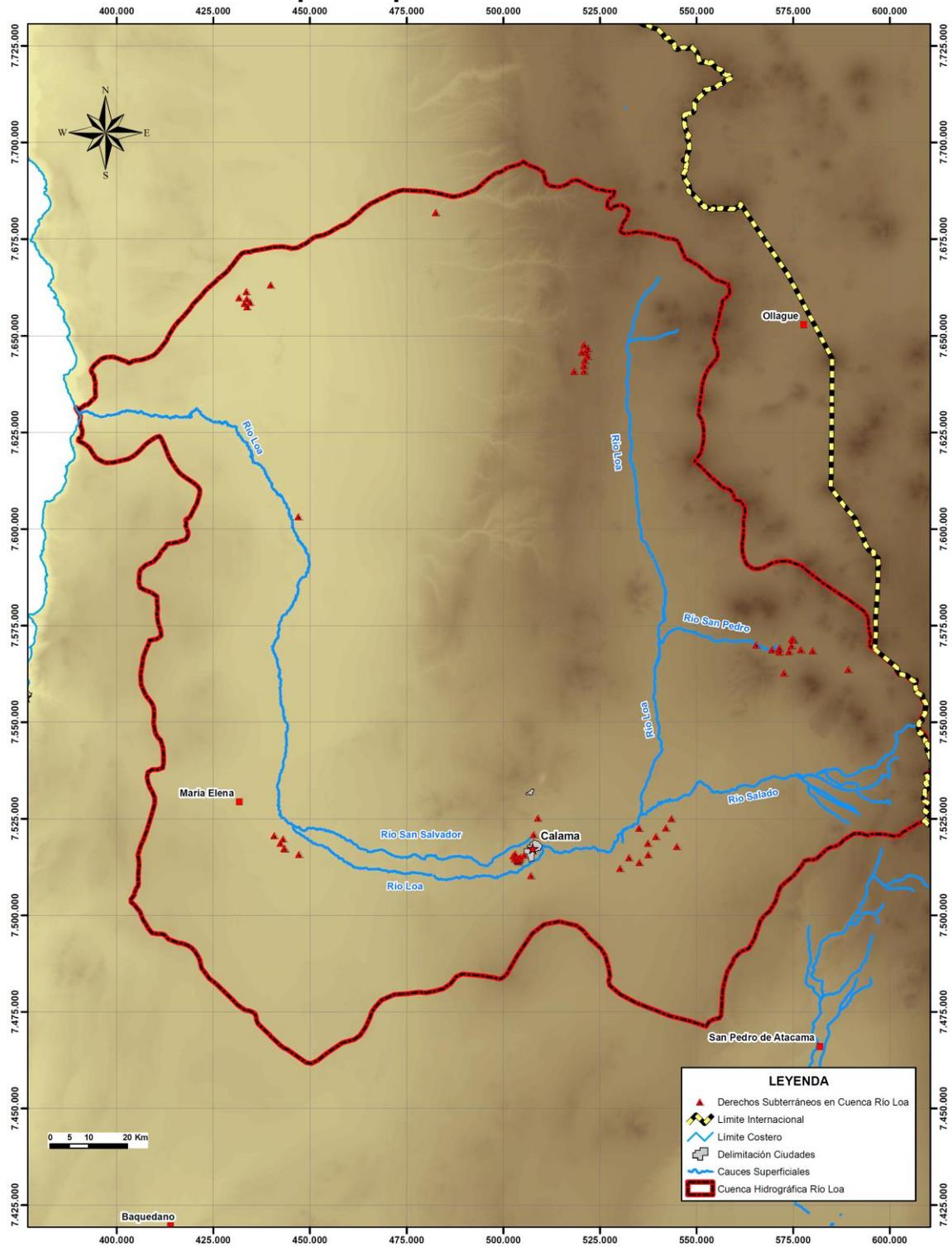
Nota: (*) Valor obtenido del expediente, el cual difiere de la tabla de derechos
Fuente: Elaboración Propia en base a información proporcionada por la DGA.

Cuadro 2.2-5 Información Hidrogeológica en Expedientes

Expediente	Pozo	Estratigrafía	Prueba Bombeo	K o T Estimado	S Estimado	Caudal (l/s)		
						Solicitado	Prueba Bombeo	Otorgado
ND-0201-0031	Pozo-2	NO	SI	NO	NO	10,0	8,0	8,0
ND-0201-0031	Pozo-1	NO	SI	NO	NO	10,0	2,7	2,7
ND-0201-1596	EX-11-A	NO	NO	NO	NO	80,0	7,0	7,0
ND-0201-1602	EX-13-A	NO	SI	NO	NO	80,0	16,0	16,0
ND-0201-1735	Melissa	SI	SI	SI	SI	80,0	5,0	5,0
ND-0201-1751	Julio I	NO	SI	NO	NO	10,0	0,6	0,6
ND-0201-1819	EX-14A	SI	SI	SI	SI	15,0	9,5	9,5
ND-0202-215	CHU-1B	NO	NO	NO	NO	233,0	-	233,0
ND-0202-215	CHU-2B	NO	NO	NO	NO	58,0	-	58,0
ND-0202-215	CHU-5B	NO	NO	NO	NO	7,0	-	7,0
ND-0202-215	CHU-6B	NO	NO	NO	NO	50,0	-	30,0
ND-0202-215	CHU-10B	NO	NO	NO	NO	90,0	-	90,0
ND-0202-215	CHU-10B(N)	NO	NO	NO	NO	200,0	-	200,0
ND-0202-215	CHU-17B	NO	NO	NO	NO	220,0	-	220,0
ND-0202-215	CHU-18B	NO	NO	NO	NO	220,0	-	220,0
ND-0202-215	B-2(N)	NO	NO	NO	NO	200,0	-	200,0
ND-0202-215	Drenes (7)	NO	NO	NO	NO	572,0	-	572,0
ND-0202-466	B1	NO	NO	SI	SI	60,0	60,0	60,0
ND-0202-466	B2	NO	NO	SI	SI	135,0	135,0	135,0
ND-0202-466	B3	NO	NO	SI	SI	100,0	100,0	100,0
ND-0202-466	B4	NO	NO	SI	SI	40,0	40,0	0,0
ND-0202-692	CHU-25B	SI	SI	SI	NO	150,0	150,0	150,0
ND-0202-723	B4	NO	NO	SI	SI	40,0	40,0	40,0
ND-0202-896	Paty N°1	NO	SI	NO	NO	80,0	32,0	31,0
ND-0202-896	Paty N°2	NO	NO	NO	NO	40,0	-	0,0
ND-0202-896	Paty N°3	NO	NO	NO	NO	40,0	-	0,0
ND-0202-1057	PPR-4	SI	SI	SI	SI	49,0	49,0	49,0
ND-0202-1058	PPR-5	SI	SI	SI	SI	50,0	50,0	50,0
ND-0202-1059	PPR-1	SI	SI	SI	SI	18,0	18,0	18,0
ND-0202-1060	PPR-2	SI	SI	SI	SI	47,0	47,0	47,0
ND-0202-1061	PPR-3	SI	SI	SI	SI	45,0	45,0	45,0
ND-0202-1169	CHUCA-6B	NO	SI	NO	NO	30,0	30,0	30,0
ND-0202-1191	CHUCA-10B	NO	SI	NO	NO	2,0	2,0	2,0
ND-0202-1864	Pozo 10	NO	NO	NO	NO	73,2	-	73,2
ND-0202-1864	Pozo 19	NO	NO	NO	NO	65,0	-	65,0
ND-0202-1864	Pozo 24	NO	NO	NO	NO	65,5	-	46,8
ND-0202-1864	Pozo 25	NO	NO	NO	NO	70,0	-	70,0
ND-0202-1864	Pozo 27	NO	NO	NO	NO	65,0	-	65,0
ND-0202-1880	PUNO-2B	NO	NO	NO	NO	35,0	-	35,0
ND-0202-1880	PUNO-4B	NO	NO	NO	NO	110,0	-	110,0
ND-0202-1880	PUNO-6B	NO	NO	NO	NO	50,0	-	50,0
ND-0202-1880	PUNO-7B	NO	NO	NO	NO	50,0	-	50,0
ND-0202-1880	PUNO-9B	NO	NO	NO	NO	50,0	-	50,0
ND-0202-1880	PUNO-314B	NO	NO	NO	NO	5,0	-	5,0
ND-0202-2068	PUNO-8B	NO	NO	NO	NO	9,0	-	9,0
ND-0202-2068	PUNO-10B	NO	NO	NO	NO	30,0	-	30,0
ND-0202-2068	PUNO-11B	NO	NO	NO	NO	60,0	-	60,0
VPC-0202-1832	Pozo N° 21	NO	NO	NO	NO	65,8	65,8	65,8

Fuente: Elaboración Propia en base a información proporcionada por la DGA.

Figura 2.2-1 **Ubicación de los Expedientes de Derechos Subterráneos Recopilados para la Cuenca del Río Loa**



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

2.2.4. Estadística de Caudales en Captaciones Superficiales

Se tienen registros de los caudales captados por las empresas: Aguas Antofagasta, CODELCO y FCAB, cuyas estadísticas respectivas abarcan 3 meses consecutivos desde Enero a Marzo de 2011.

Para el caso de la empresa SQM, se dispone de datos de caudales registrados en las captaciones de Pedro de Valdivia, Coya Sur y María Elena. La extensión de dichas estadísticas de caudales, en particular de las captaciones de Pedro de Valdivia y María Elena comprenden el período que va desde Enero-1997 hasta Agosto-2013, mientras que la captación Coya Sur va desde Enero-1997 a Agosto-2013.

En el Cuadro 2.2-6, se muestra un resumen de la información señalada anteriormente.

Cuadro 2.2-6 Resumen de la Información de Caudales en Captaciones Superficiales de la Cuenca del Río Loa

Captación	Río / Quebrada	Usuario	Período Registros	Derecho Otorgado (l/s)	Caudal Diario (l/s)		
					Máx.	Mín.	Prom.
Lequena	Loa	ADASA	Ene 2011 - Feb 2011	550,0	542,7	285,1	468,2
Quinchamale	Loa	ADASA	Ene 2011 - Mar 2011	300,0	294,7	141,4	282,4
Toconce	Toconce	ADASA	Ene 2011 - Mar 2011	470,0	462,5	391,2	445,8
Puente Negro	Loa	ADASA	Ene 2011.	66,0	131,8	0,2	79,5
San Pedro Inacaliri I y II	San Pedro	ADASA	-	90,0	-	-	-
Toconce (Linzor)	Linzor	ADASA	-	50,0	-	-	-
Toconce (Hojalar)	Hojalar	ADASA	-	140,0	-	-	-
Inacaliri	Inacaliri	Codelco	Ene 2011 - Mar 2011	160,0	161,6	130,2	145,1
Colana	Colana	Codelco	Ene 2011 - Mar 2011	50,0	50,3	41,3	43,8
Linzor	Linzor	Codelco	-	50,0	-	-	-
Parshall N° 2	San Pedro	Codelco	Ene 2011 - Mar 2011	87,5	1.630,0*	755,0*	1.131,2*
Salado Hojalar	Hojalar	Codelco	Ene 2011 - Mar 2011	540,0	459,7	246,3	369,7
Silala	Silala	FCAB	Ene 2011 - Mar 2011	121,0	145,0	108,0	124,0
Aguada Palpana	Palpana	FCAB	-	2,1	-	-	-
Polapi 1	Polapi	FCAB	-	16,2	-	-	-
Polapi 2	Polapi	FCAB	-	0,4	-	-	-
Pedro de Valdivia	Loa	SQM	Ene 1997 - Ago 2013	94,4	94,7**	28,3**	84,5**
Coya Sur	Loa	SQM	Ene 1997 - Ago 2012	90,0	89,2**	46,1**	83,2**
María Elena	Loa	SQM	Ene 1997 - Ago 2013	62,1	62,5**	25,9**	55,8**
Quebrada Amarga	Amarga	SQM	-	60,0	-	-	-

Nota: (*) Estos valores incluyen el caudal captado por drenes y pozos de bombeo.

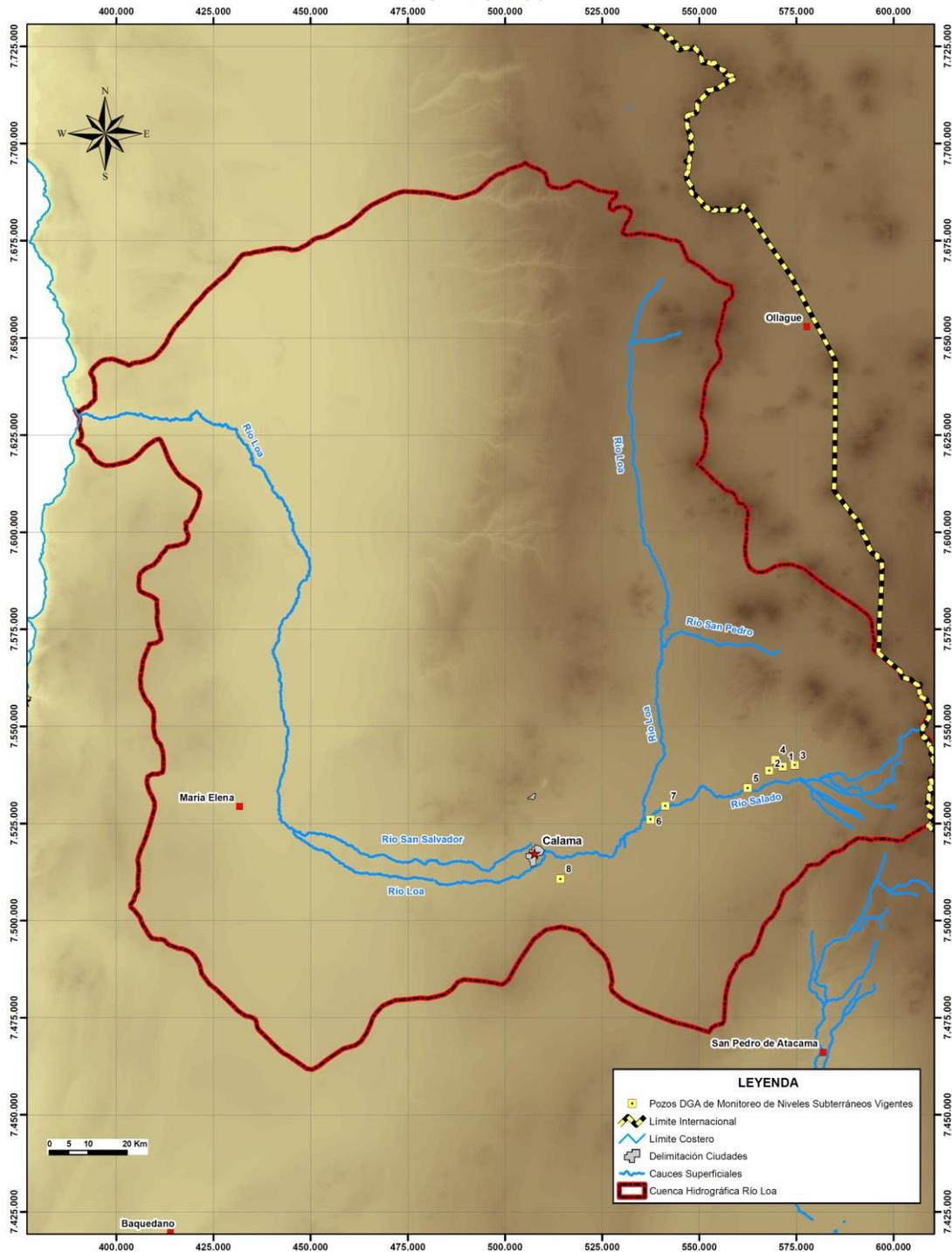
(**) Valores Medios Mensuales.

Fuente: Elaboración Propia en base a información proporcionada por la DGA.

2.2.5. Niveles Subterráneos en Pozos DGA

Se tienen los últimos datos de niveles subterráneos, hasta la fecha de realización de este estudio, en los correspondientes pozos de monitoreo de la DGA. Estos pozos se ubican en las subcuencas del río Salado, San Pedro de Inacaliri y Calama (Figura 2.2-2). En el Cuadro 2.2-7, se presenta un resumen con la información de los registros de niveles en los pozos DGA.

Figura 2.2-2 Pozos DGA de Medición de Niveles Subterráneos en la Cuenca del Río Loa



Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

Cuadro 2.2-7 Resumen de la Información de Niveles Subterráneos en Pozos DGA

Pozo DGA	Altitud (m s.n.m.)	Coordenadas UTM: WGS84		Estado	Período Registro	
		Este (m)	Norte (m)		Inicio	Término
Turi 1 (1)	3.007	571.440	7.539.689	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Turi 2 (2)	3.055	568.058	7.538.597	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Turi 7 (3)	3.091	574.591	7.540.074	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Turi 10 (4)	3.041	569.644	7.541.481	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Cupo 1 (5)	2.925	562.458	7.534.101	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Isla Grande 3 (6)	2.512	537.458	7.526.156	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Chiu-Chiu (7)	2.568	541.271	7.529.559	Vigente	14-05-1987	Actualidad
Aeropuerto (8)	2.389	514.250	7.510.760	Vigente	14-05-1987	Actualidad

Fuente: Elaboración Propia en base a información proporcionada por la DGA.

2.2.6. Expedientes Zonas de Exploración

La DGA proporcionó los expedientes asociados a 586 zonas de exploración dentro de la II región, de los cuales 87 se encontraban dentro de la cuenca del río Loa. Estos expedientes poseen variada información referente a geofísica (TEM, SEV y gravimetría), sondajes, pozos de bombeo (estratigrafía, litología, pruebas de bombeo y estimación de parámetros) y descripciones geológicas e hidrogeológicas.

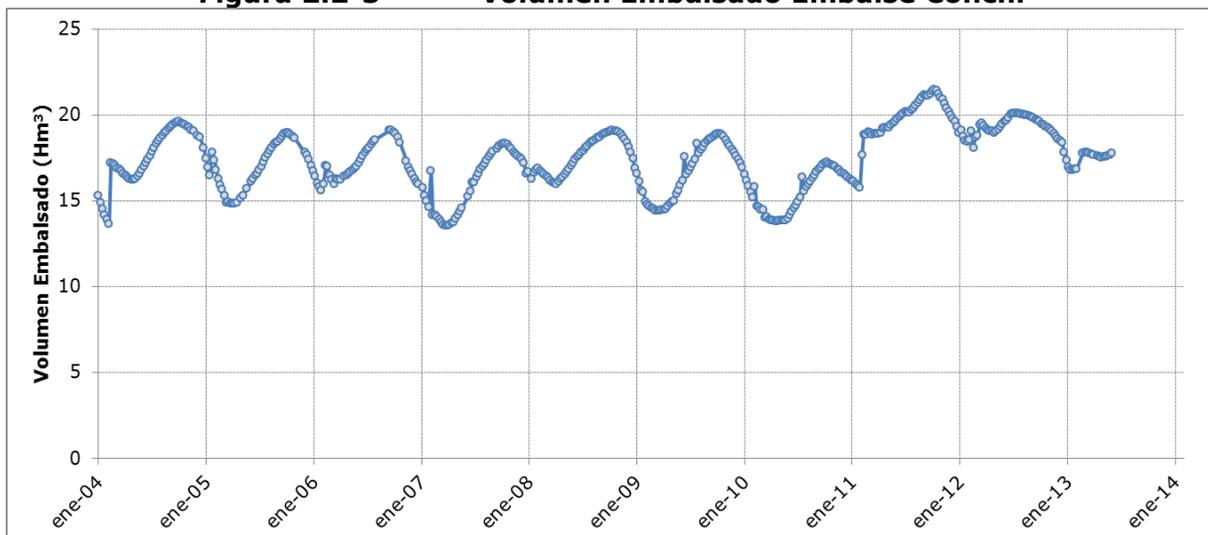
Sin embargo, mucha de esta información se entrega de manera tal que no es posible de utilizar, por ejemplo, geofísica sin coordenadas, interpretaciones poco legibles, etc. Debido a esto, se ha recopilado de los expedientes sólo la información utilizable, correspondiente a mediciones geofísicas con coordenadas y estimación de la profundidad de basamento y/o interpretación legible, y datos de sondajes con coordenadas, estratigrafía y estimación de parámetros.

La ubicación de la información de utilidad obtenida de estos expedientes se muestra en la Figura 2.2-5, mientras que la información asociada a estos puntos, dada su magnitud, se presenta en los Anexos B4 y A5, para los puntos TEM y estratigrafías, respectivamente.

2.2.7. Embalse Conchi

A través de la página web de la Dirección de Obras Hidráulicas se obtuvo el volumen embalsado del Embalse Conchi, el cual es registrado de manera semanal y actualizado en el documento asociado al "Estado de Embalses", el cual resume la información disponible desde el año 2004 hasta el año 2013. Esta información ha sido actualizada hasta el mes de Mayo 2013, de acuerdo a lo existente en la página web.

El detalle de esta información se presenta en el Anexo E, mientras que la Figura 2.3-3 muestra la información en un gráfico temporal.

Figura 2.2-3 Volumen Embalsado Embalse Conchi

Fuente: Elaboración Propia a partir de información disponible en sitio web de la DOH

2.3. Resumen de Información Relevante para la Sectorización de los Acuíferos

A continuación se resume la información de interés hidrogeológico que fue recopilada y sintetizada en los puntos anteriores del presente informe y que permitirá la realización de la propuesta de sectorización acuífera para la cuenca del río Loa.

El resumen de esta información contempla básicamente trabajos geofísicos ejecutados, estratigrafía de sondajes y pozos y por último, estimaciones de parámetros hidráulicos en pozos (permeabilidad o transmisividad y almacenamiento).

2.3.1. Geofísica

De los trabajos geofísicos ejecutados en la cuenca del río Loa y que disponen de sus interpretaciones, cabe señalar que éstos se localizan principalmente en 4 zonas: Loa Alto hasta antes de su confluencia con el río San Pedro Inacaliri, Loa Medio desde Conchi hasta Calama, María Elena-Pedro de Valdivia y Salar de Llamara. En particular, se ha realizado esta geofísica aplicando esencialmente los métodos TEM y gravimetría.

Los estudios donde se presenta información geofísica son los siguientes:

- Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudios de Evaluación de Recursos Hídricos: Sector Pedro de Valdivia – María Elena. DGA-DICTUC, 2005.
- Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. SQM-DICTUC, 2008 (REF#23).
- Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold, 2010 (REF#26).
- Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. DGA-Matraz Consultores, 2012. (REF#28).

En la Figura 2.3-1, se presenta un mapa esquemático con la información geofísica recopilada de trabajos efectuados en la cuenca del río Loa.

2.3.2. Estratigrafía

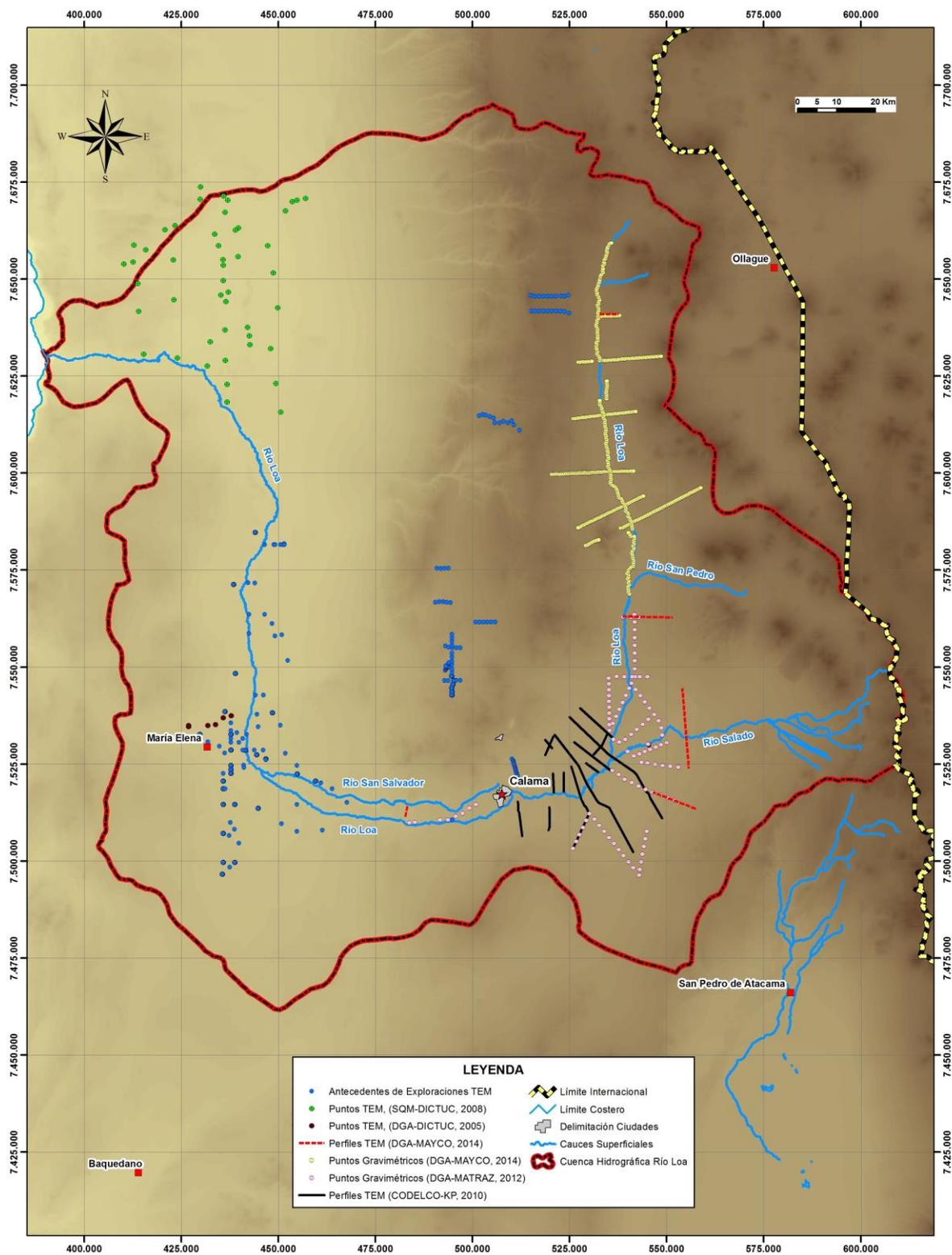
De acuerdo a la recopilación de antecedentes estratigráficos se tiene una mayor que se concentra principalmente en las zonas del Salar de Llamara y Calama. En menor medida se tiene en los sectores de San Pedro de Inacaliri y Vegas de Turi y en último lugar en Pedro de Valdivia – María Elena.

Dentro de la información estratigráfica compilada se encuentran datos de descripciones litológicas, columnas geológicas, litológicas y estratigráficas. Para ello se recurrió a las siguientes fuentes de información:

- Expedientes de solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.
- Proyecto CHI-535: Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. CORFO, 1977 (REF#2).
- Pampa Puno: Aguas Subterráneas. GEOTEC Boyles Bros, 1999 (REF#8).
- Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Anexo VIII Hidrogeología. SQM-DICTUC, 2008 (REF#23).
- Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009. MET-Montgomery & Associates, 2009 (REF#25).
- Modelamiento Hidráulico Tranque Talabre y su Relación con los Acuíferos y Cauces Superficiales. CODELCO-Knight Piésold, 2010 (REF#26).

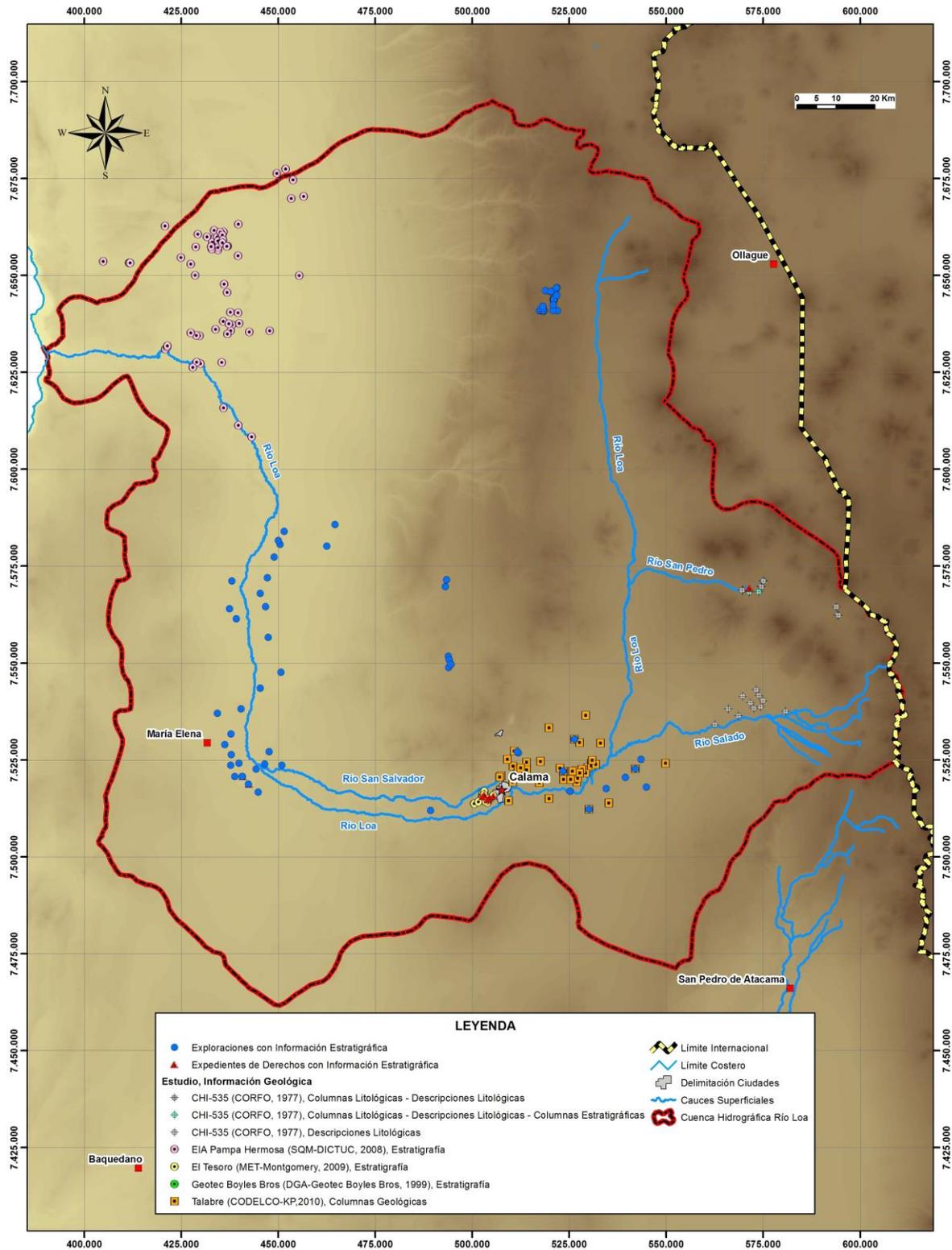
En la Figura 2.3-2, se presenta un mapa esquemático con la información estratigráfica compilada e integrada espacialmente para distintos puntos dentro de la cuenca del río Loa.

Figura 2.3-1 Resumen de la Información Geofísica Recopilada



Fuente: Elaboración Propia a partir de información de referencias respectivas.

Figura 2.3-2 Resumen de la Información Estratigráfica Recopilada



Fuente: Elaboración Propia a partir de información de referencias respectivas.

2.3.3. Constantes Elásticas

En términos generales, los antecedentes revisados dan cuenta de estimaciones de 3 parámetros hidráulicos: transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento. Los valores de todos ellos resultan muy variables, incluso dentro de un mismo sector acuífero, por lo que a modo de resumen se presenta en los Cuadros 2.3-1 y 2.3-2 el rango y el promedio de los valores para diferentes sectores.

Cuadro 2.3-1 Resumen Transmisividad y Permeabilidad

Acuífero	Transmisividad (m ² /d)		Permeabilidad (m/d)	
	Rango	Medio	Rango	Medio
Salar de Llamara	6 - 1.500	285	0,1 - 11,6	4,5
Río Salado (Turi)	565 - 2.710	1.497	6 - 31	16,2
Pampa Puno	2 - 7.500	1.556	-	-
Loa Alto (Polapi)	222 - 266	237	-	-
San Pedro Inacaliri	3 - 85.436	10.306	1 - 380	68,7
Llalqui (Acuífero Superior)	-	-	0,0015 - 309,3	5
Llalqui (Acuífero Inferior)	-	-	0,01 - 120,1	1
Calama (Acuífero Superior)	170	170	0,017 - 2,6	1
Calama (Acuífero Inferior)	250	250	0,03 - 41	20
Sector Opache	69 - 14.244	3.784	0,5 - 309	88,6
Sector Salar de Miraje	13 - 155	80	-	-

Fuente: Elaboración Propia en base a revisión de antecedentes.

Cuadro 2.3-2 Resumen Coeficiente de Almacenamiento

Acuífero	Coeficiente Almacenamiento	
	Rango	Medio
Salar de Llamara	0,12 - 0,30	0,2
Río Salado (Turi)	0,00061 - 0,018	0,009
Pampa Puno	-	-
Loa Alto (Polapi)	-	-
San Pedro Inacaliri	0,00076 - 0,34	0,11
Llalqui (Acuífero Superior)	0,00012 - 0,016	0,1
Llalqui (Acuífero Inferior)	0,00003 - 0,69	0,1
Calama (Acuífero Superior)	0,002 - 0,02	0,01
Calama (Acuífero Inferior)	0,0002 - 0,02	0,01
Sector Opache	0,00012 - 0,016	0,004
Sector Salar de Miraje	0,01 - 0,08	0,05

Fuente: Elaboración Propia en base a revisión de antecedentes.

3. CAMPAÑA DE TERRENO GEOFÍSICA

A continuación se presenta una descripción de la campaña geofísica realizada en la cuenca del río Loa con motivo del presente estudio. Previa a esto, se presenta una breve descripción de la geología general de la cuenca.

3.1. Marco Geológico

Desde el punto de vista geológico, la cuenca del río Loa engloba gran diversidad de materiales sedimentarios, volcanosedimentarios, volcánicos, rocas intrusivas y rocas metamórficas, cuyas edades geológicas resultan bastante dispares, desde Devónico-Carboníferas para los materiales metamórficos hasta los sedimentos holocenos.

El sistema morfoestructural de la Cordillera de la Costa está formado principalmente por secuencias volcánicas y materiales intrusivos de edad triásica, jurásica y cretácica, parcialmente recubiertos por depósitos sedimentarios aluviales, de piedemonte, coluviales, fluviales y eólicos de edades terciarias y cuaternarias. La Depresión Intermedia está conformada en su gran mayoría por sedimentos terciarios, fundamentalmente miocenos, sobre los que se disponen de manera discordante los depósitos cuaternarios, quedando los afloramientos rocosos mesozoicos, tanto jurásicos como cretácicos, reducidos a enclaves de escasa extensión, más abundantes hacia el Sur de la cuenca del río Loa. El Manto Andino está subdividido morfoestructuralmente en Precordillera y Cordillera prealtiplánica, conformados por subunidades que abarcan desde el Carbonífero-Pérmico hasta la actualidad y consisten tanto en materiales sedimentarios, como volcánicos e intrusivos, siendo los volcano-sedimentarios los menos frecuentes y los de menor envergadura de afloramiento.

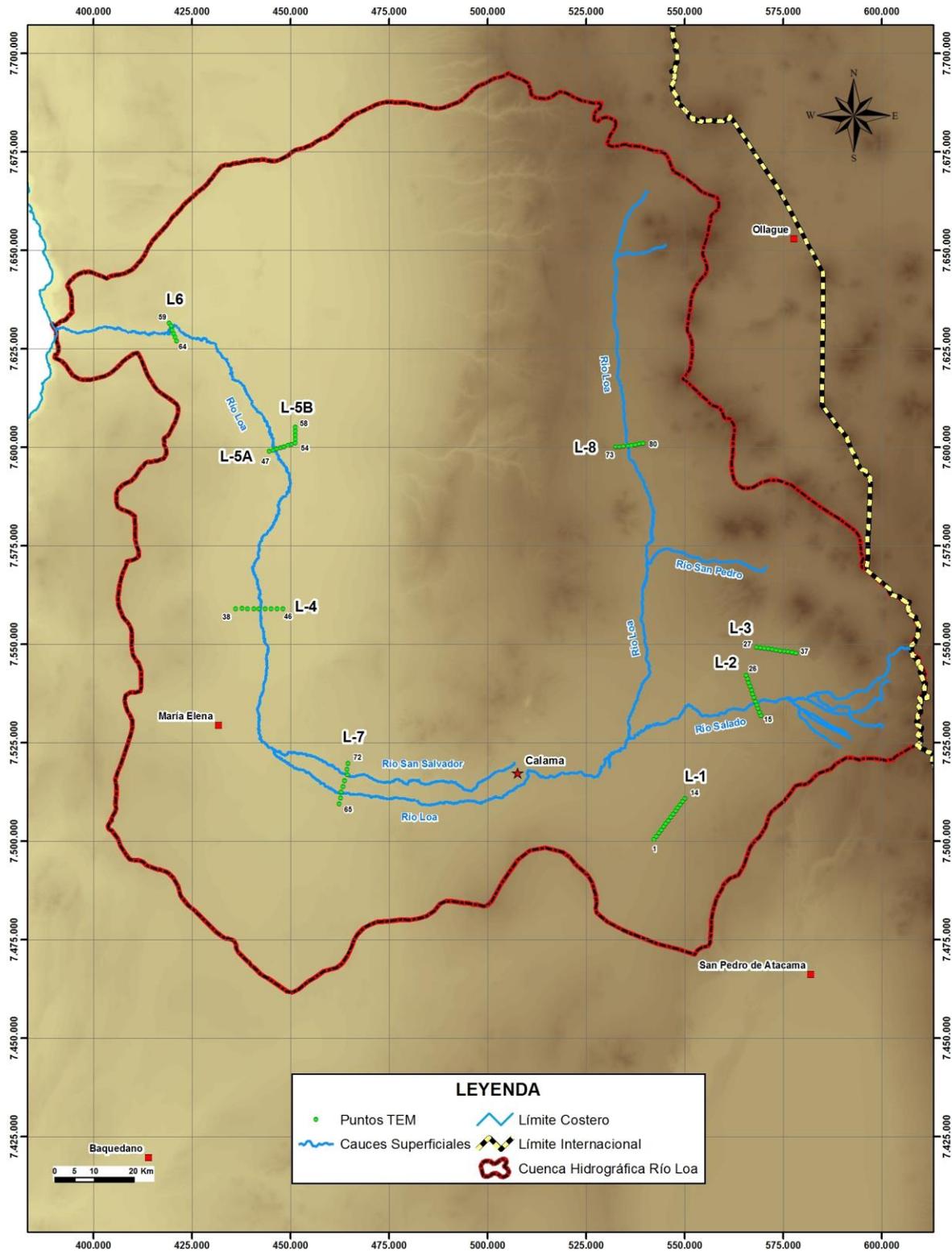
Se pueden establecer dos grandes dominios geológicos en la Cuenca del río Loa, uno correspondiente a los materiales rocosos de edad muy variada, desde el Precámbrico hasta el Eoceno e incluso Cuaternario, que configuran las principales cordilleras y sierras de la región, y otro correspondiente a aquellos rocas y sedimentos, cenozoicos y cuaternarios, que constituyen los rellenos de las principales cuencas, como son la Depresión Central, la cuenca de Atacama y la Cuenca del Alto Loa.

3.2. Campaña de Perfiles TEM

Con fecha 26 de Septiembre de 2014 se dio inició a la campaña geofísica de terreno realizada por Geodatos SAIC, la cual consistió en la medición de 80 estaciones TEM espaciadas aproximadamente cada 1000 a 1500 m y distribuidas en 8 perfiles dentro de la cuenca del río Loa. A continuación se describen de manera simple los 8 perfiles TEM, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.2-1:

1. Parque Eólico Calama: Ubicado aproximadamente a 40 km al Este-Sureste de Calama, en el sector de Pampa Llalqui y conformado por 14 estación en orientación Noreste-Suroeste.
2. Ayquina: Ubicado aproximadamente 1,5 km al Oeste de Ayquina y conformado por 12 estaciones en orientación Norte-Sur, con una leve inclinación Noroeste-Sureste.
3. Cupo: Ubicado aproximadamente 5 km al Sur de Cupo y conformado por 11 estaciones en orientación Oeste-Este, con una leve inclinación Noroeste-Sureste.

Figura 3.2-1 Ubicación Puntos TEM Campaña Geofísica



Fuente: Elaboración Propia

4. Santa Isabel: Ubicado aproximadamente 30 km al Norte de María Elena y conformado por 9 estaciones en orientación Oeste-Este.
5. Quillagua: Ubicado aproximadamente 6 km al Sur de Quillagua y conformado por 12 estaciones en configuración L, con 8 estaciones en orientación Suroeste-Noreste y 4 estaciones en orientación Norte-Sur.
6. Quebrada Amarga: Ubicado aproximadamente 1 km al Oeste de la desembocadura de Quebrada Amarga en el río Loa y conformado por 6 estaciones en orientación Norte-Sur, con una leve inclinación Noroeste-Sureste.
7. Camino Coya Sur: Ubicado aproximadamente 20 km al Este de la junta entre los ríos Loa y San Salvador y conformado por 8 estaciones en orientación Norte Sur, con una leve inclinación Noreste-Suroeste.
8. Lequena: Ubicado aproximadamente 4,5 km al Sur de la estación Río Loa antes Represa Lequena y conformado por 8 estaciones en orientación Este-Oeste.

Adicionalmente, se presenta en el Cuadro 3.2-1 un resumen de los perfiles, junto con las estaciones asociadas a cada uno de ellos.

Cuadro 3.2-1 Perfiles TEM Geodatos

Perfil	Estación Inicial	Estación Final	Nº Estaciones	Ubicación
L-1	1	14	14	Parque Eólico Calama
L-2	15	26	12	Ayquina
L-3	27	37	11	Cupo
L-4	38	46	9	Santa Isabel
L-5A	47	54	8	Quillagua
L-5B	54	58	4	Quillagua
L-6	59	64	6	Quebrada Amarga
L-7	65	72	8	Camino Coya Sur
L-8	73	80	8	Lequena

Fuente: Informe Geofísica realizado por Geodatos SAIC para el presente estudio.

Las estaciones TEM fueron medidas mediante una configuración denominada loop coincidente de 200 m de lado, la cual permite lograr una mayor profundidad de análisis en relación a un loop menor. Sin embargo, en sectores donde hubo problemas de espacio, se utilizó un loop coincidente de 100 m de lado.

3.3. Interpretación de los Resultados

La interpretación de las resistividades obtenidas en la campaña para cada estación TEM ha sido realizada por Geodatos de acuerdo a la geología de la cuenca, información estratigráfica y el amplio conocimiento que poseen de la cuenca, fruto de decenas de trabajos realizados para diferentes empresas en la zona. De este modo, el Cuadro 3.3-1 muestra la interpretación realizada en términos generales.

Cuadro 3.3-1 Interpretación de Unidades

Resistividad (Ωm)	Descripción
11 - 1.227	Sedimentos superficiales no saturados
< 5	Arcillas
5 - 15	Arenas arcillosas
15 - 30	Gravas, arenas y limos
30 - 50	Sedimentos compactos de baja permeabilidad
50 - 80	Roca alterada y/o meteorizada
> 80	Roca basal

Fuente: Informe Geofísica realizado por Geodatos SAIC para el presente estudio.

De acuerdo a la interpretación realizada, en la mayoría de las estaciones se identificó una unidad superficial correspondiente a sedimentos superficiales no saturados, con un rango que varía entre 26 y 165 m de espesor. Por otro lado, la identificación de unidades de roca alterada o roca basal se realizó en un amplio rango de profundidades, observándose incluso algunos casos de afloramiento rocoso, mientras que en otros no se pudo detectar. En términos medios, el rango de profundidad en que se detectó la roca oscila entre 86 y 512 m.

Entre las unidades superficiales y profundas mencionadas anteriormente, se identificaron unidades sedimentarias saturadas con permeabilidades variables. De este modo, las unidades de arcilla se asocian a estratos de baja permeabilidad, las arenas arcillosas con permeabilidad media a alta, y gravas, arenas y limos con permeabilidad media a alta y asociado a acuíferos de importancia.

Es importante mencionar que la unidad de grava, arenas y limos no fue detectada en los perfiles de Quillagua y Santa Isabel, explicando la inexistencia de derechos de agua otorgados en el tramo María Elena - Quillagua, debido a la baja importancia hidrogeológica que esto representa.

En el Anexo F se presenta el informe completo generado por Geodatos, el cual muestra toda la información relevante de las estaciones TEM y la interpretación de cada uno de perfiles para un mejor entendimiento.

En particular, a continuación se muestran los resultados de 3 perfiles geofísicos con gran importancia en el funcionamiento de la cuenca hidrogeológica: Parque Eólico Calama, Santa Isabel y Quillagua (Figuras 3.3-1 a 3.3-3).

En la Figura 3.3-1 se aprecian claramente las diferentes unidades existentes en el sector de Llalqui y Calama. En este perfil se observa que el acuífero superior se encuentra seco, mientras que el acuífero inferior de gravas se encuentra saturado y es el que define la condición de borde de entrada para el modelo hidrogeológico en MODFLOW. Entre ambos estratos se aprecia en ambos extremos un estrato de bajo espesor de arcillas, definiendo el acuitardo reconocido en este sector.

En cuanto a las figuras 3.3-2 y 3.3-3, éstas son representativas del tramo ubicado entre María Elena y Quillagua, sector en donde no existen derechos de aprovechamiento de agua subterránea debido al poco potencial acuífero obtenido en los estudios de

exploración. Esto se ve corroborado por ambos perfiles, en los que se identifican unidades de arcilla, arenas arcillosas y sedimentos compactos de baja permeabilidad, todos ellos de baja importancia hidrogeológica en cuanto a la asignación de derechos se refiere.

Figura 3.3-1 Perfil Interpretado Parque Eólico Calama (L-1)

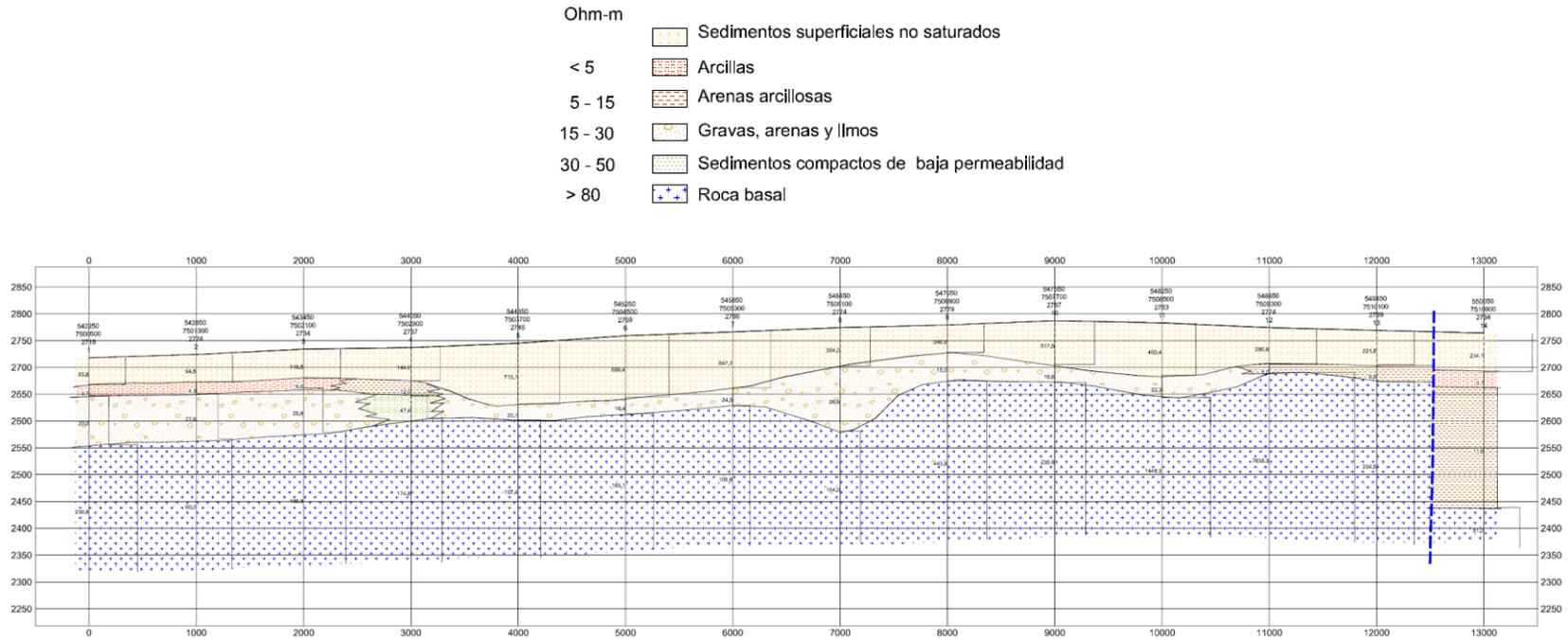


Figura 3.3-2 Perfil Interpretado Santa Isabel (L-4)

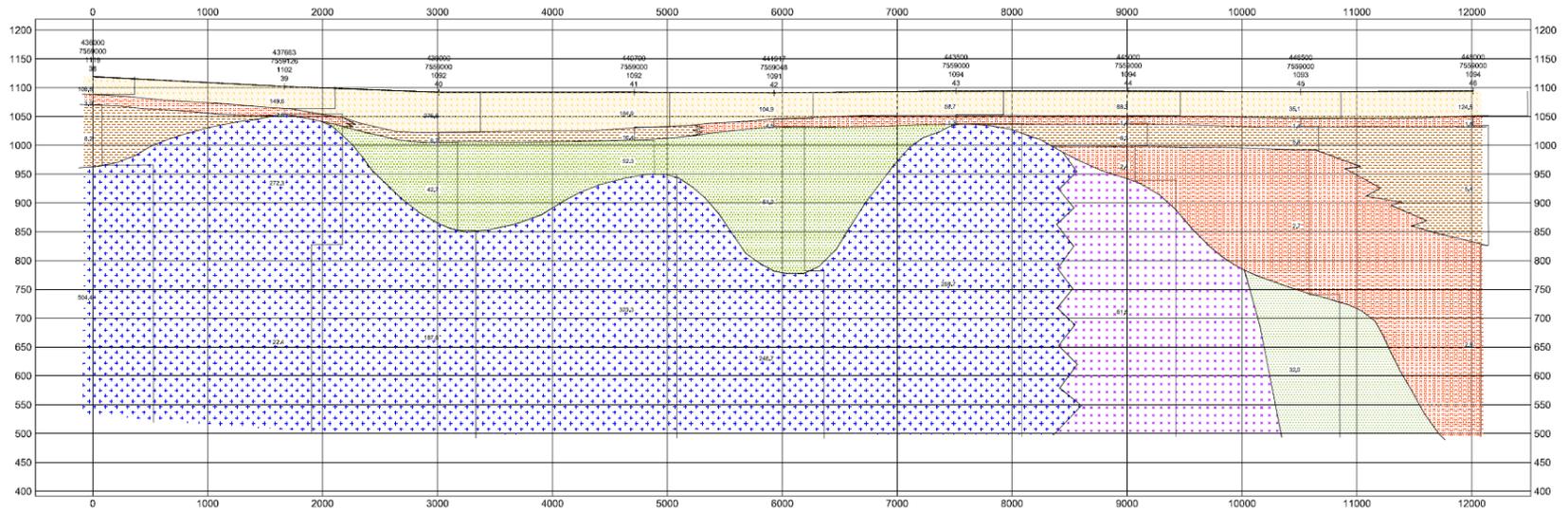
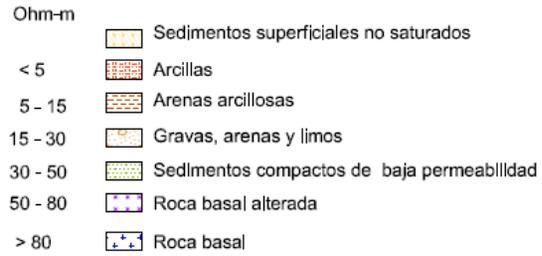
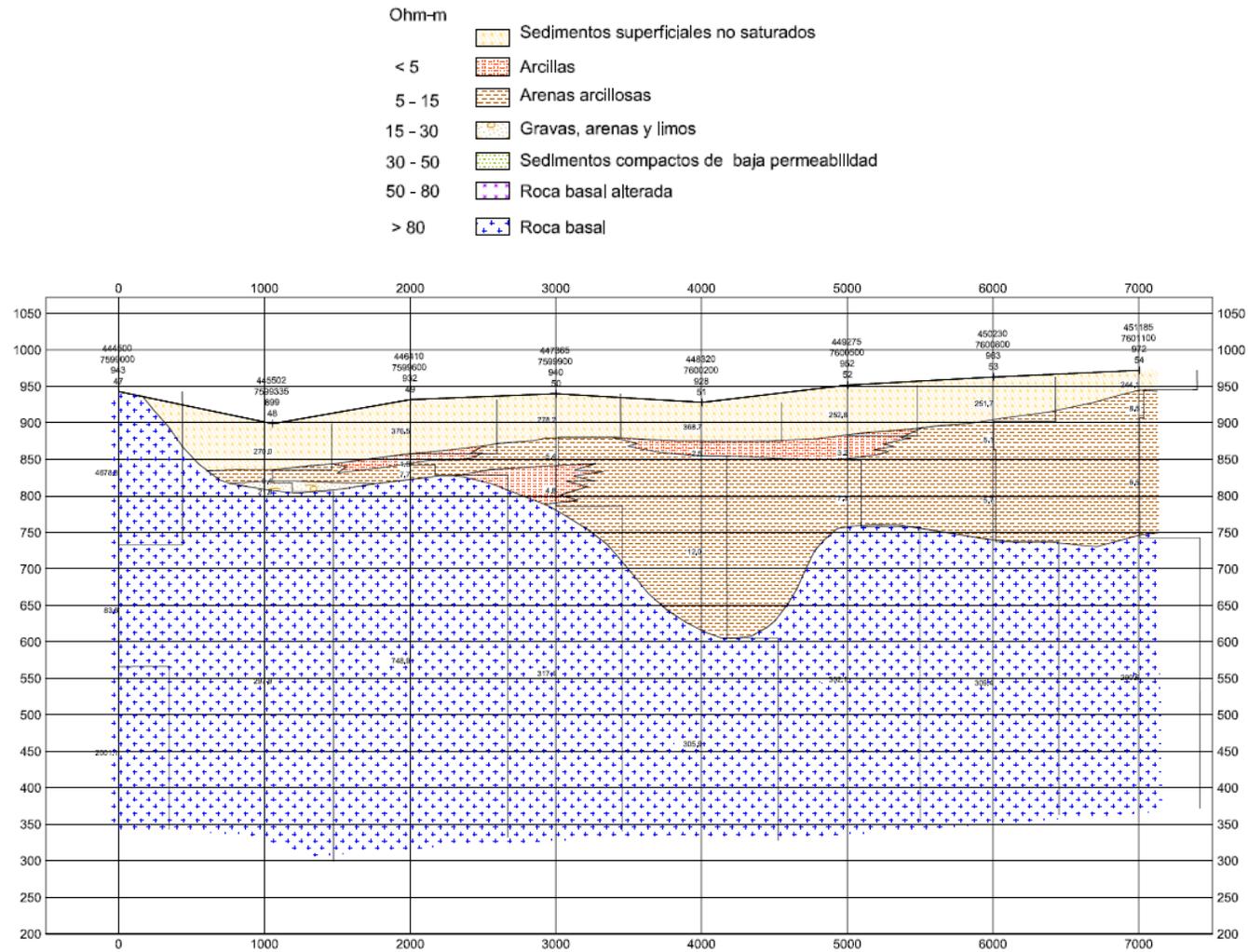


Figura 3.3-3 Perfil Interpretado Quillagua (L-5A)

4. PROPUESTA DE SECTORES HIDROGEOLÓGICOS

Basándose en la información topográfica, hidrológica e hidrogeológica recopilada en diferentes estudios públicos, así como también en la campaña geofísica realizada como parte del presente estudio, se ha elaborado una propuesta de sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa.

A continuación se presenta la metodología utilizada y la propuesta de sectorización realizada.

4.1. Metodología

Como base para la elaboración de la sectorización de los acuíferos, se ha utilizado el documento de la REF#32, el cual se desarrolla en forma paralela al presente estudio. En su Etapa I entrega una propuesta metodológica general aplicable a cualquier cuenca y que se resume de acuerdo a lo mostrado en la Figura 2.1-12.

De acuerdo a la REF#32, en la actualidad la sectorización acuífera se realiza en base a 3 criterios: existencia de subcuencas hidrológicas, de rellenos con diferente permeabilidad y de barreras hidrogeológicas. Sin embargo, el estudio ha propuesto seguir una serie de pasos que permiten definir una adecuada sectorización en base a una serie de criterios. En términos generales, se plantean dos fases dentro de la metodología: identificar los acuíferos en base a criterios hidrogeológicos y dividir en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, agregando elementos como uso del agua, calidad, interacción con cuerpos superficiales, etc.

Los pasos definidos para la elaboración de la sectorización son los siguientes:

- Identificación de la Zona de Estudio
- Base Topográfica
- Red de Drenaje
- Sectorización Preliminar
- Hidrogeología
- Captaciones Subterráneas
- Sectorización Acuífera
- Vínculos

Los pasos anteriormente mencionados se explicaron de manera detallada en el punto 2.1-32, por lo que a continuación se muestra su aplicación directa a la cuenca del río Loa.

4.2. Propuesta de Sectorización

A continuación se presenta en detalle todo el procedimiento desarrollado para la definición de la sectorización hidrogeológica de la cuenca del río Loa. Si bien muchas de las etapas pueden parecer innecesarias dado el nivel de información actual en la cuenca, se ha decidido desarrollar el procedimiento completo, mostrando todos los detalles envueltos, por muy básicos que éstos puedan resultar, dado el nivel de información existente.

4.2.1. Identificación de Zona de Estudio

La zona de estudio para efectos de la definición de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, corresponde a la totalidad de la cuenca del río Loa, la cual posee una superficie de 33.081 km² y se ubica en su mayoría en la II Región de Antofagasta.

La definición oficial de esta cuenca corresponde a la dispuesta por la DGA, es decir código cuenca 021 de nombre río Loa, la cual es la más grande de la región y limita con otras 7 cuencas hidrográficas:

- Costeras Tilviche – Loa (018) al nor-oeste
- Pampa del Tamarugal (017) al norte
- Altiplánicas (010) al nor-este
- Costeras R. Loa – Q. Caracoles (022) al oeste
- Fronterizas Salar Michincha – R. Loa (020) al este
- Quebrada Caracoles (027) al sur
- Salar de Atacama (025) al sur-este

De acuerdo a lo anterior, la Figura 4.2-1 muestra la ubicación de la zona de estudio, en conjunto con las cuencas hidrográficas que limitan con ella. Cabe hacer mención que, si bien existen zonas en las cuales la definición de la cuenca no se ajusta fielmente a la topografía del lugar, la REF#32 sugiere mantener la definición realizada por la autoridad, ya que cualquier modificación a ella podría traer consecuencias en los derechos de aguas constituidos.

4.2.2. Base Topográfica y Red de Drenaje

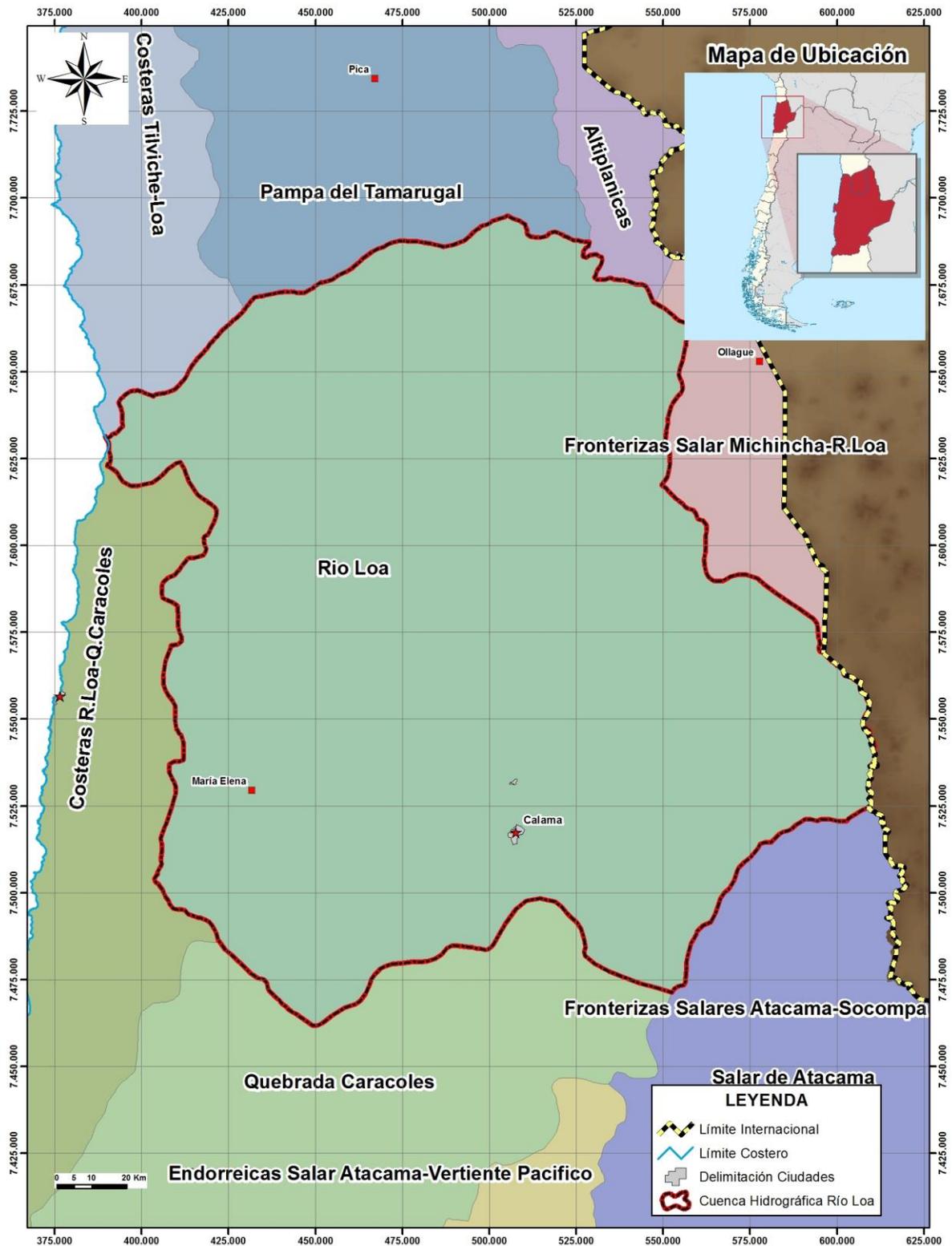
Como parte de la información proporcionada por la DGA, se dispone de curvas de nivel cada 100 m para todo el norte grande de Chile, correspondiente a información del IGM. Además, se cuenta con el RASTER de elevación asociado a gran parte de la zona norte y centro del país.

De manera tal de poseer una mejor representación topográfica de la cuenca, se utilizó la información contenida en el RASTER de elevación para generar nuevas curvas de nivel en toda la extensión de la zona de estudio cada 30 m.

En cuanto a la red de drenaje de la cuenca, esta también fue proporcionada por la DGA y cuenta con toda la información de ríos, esteros, quebradas, lagos y todo tipo de escurrimiento y cuerpo superficial dentro de la cuenca, por lo que no fue necesaria una nueva generación de esta información.

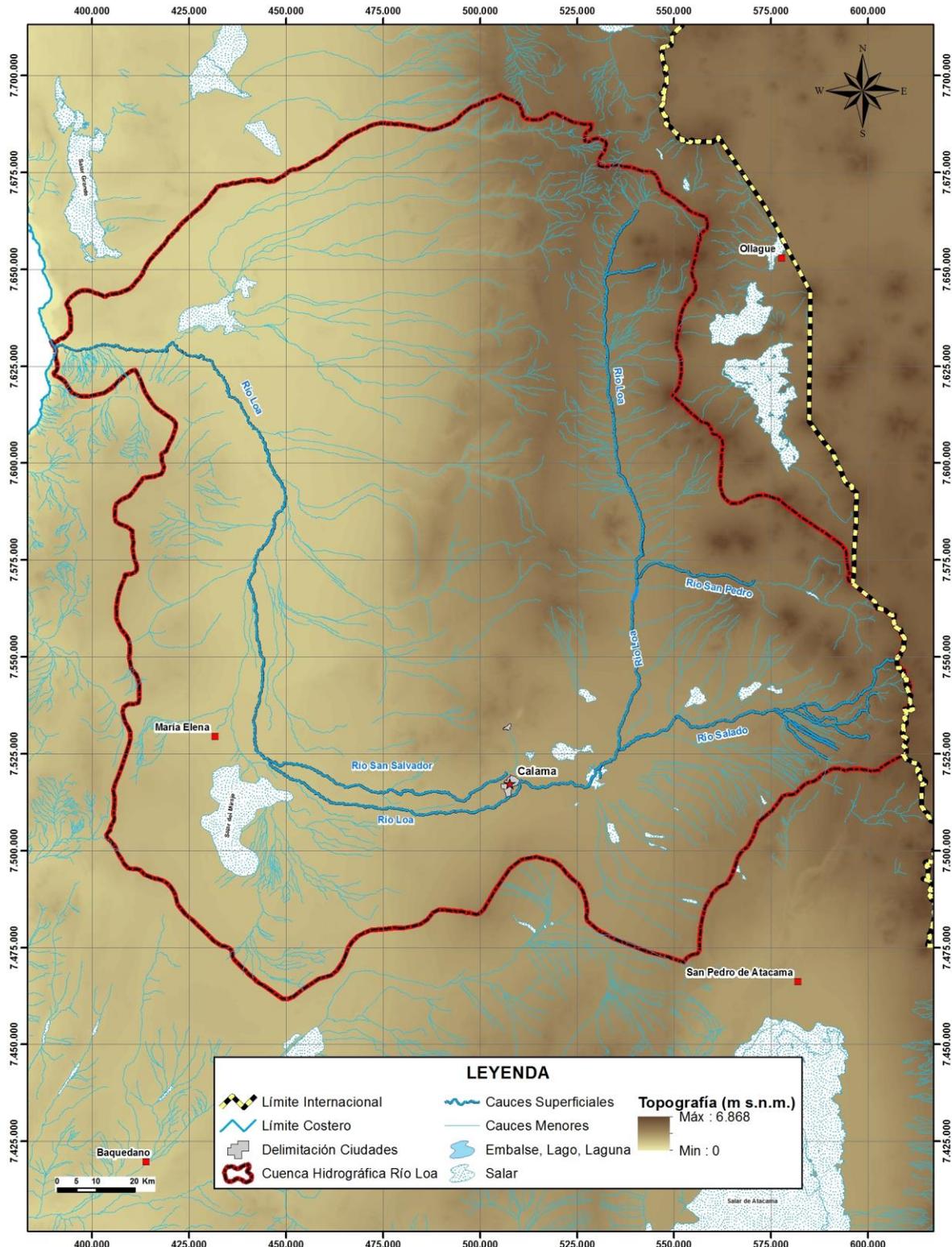
La Figura 4.2-2 muestra la topografía de la cuenca representada por el RASTER de elevación, en conjunto con su red de drenaje.

Figura 4.2-1 Identificación de la Zona de Estudio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2-2 Topografía y Red de Drenaje



Fuente: Elaboración Propia

4.2.3. Sectorización Preliminar según Sub-Cuencas

La sectorización preliminar consiste básicamente en la sub-división de la cuenca en sub-cuencas hidrográficas, en función de la información topográfica y red de drenaje descrita en el punto anterior, lo cual constituirá la base para la sectorización acuífera final de la cuenca.

Se ha decidido utilizar la definición de subsubcuencas de la DGA como punto de inicio a esta sectorización, ya que considera los cauces más relevantes de la cuenca, y además corresponde a una sub-división oficial, lo cual, para efectos de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca, es importante. Las siguientes son las subsubcuencas definidas por la DGA:

- Salar de Llamara (02113)
- Río Loa bajo junta Estero Chela (02100)
- Río Loa entre Quebrada Amarga y Desembocadura (02120)
- Río Loa entre Río San Salvador y Quebrada Amarga (02112)
- Río Loa Entre Estero Chela y Bajo Junta Quebrada de Hachas (02101)
- Río Loa entre Quebrada de Hachas y Río San Pedro (02102)
- Río San Pedro (02103)
- Río Loa entre Río San Pedro y Río Salado (02104)
- Río San Salvador (02111)
- Río Salado (02105)
- Río Loa entre Río Salado y Río San Salvador (02110)

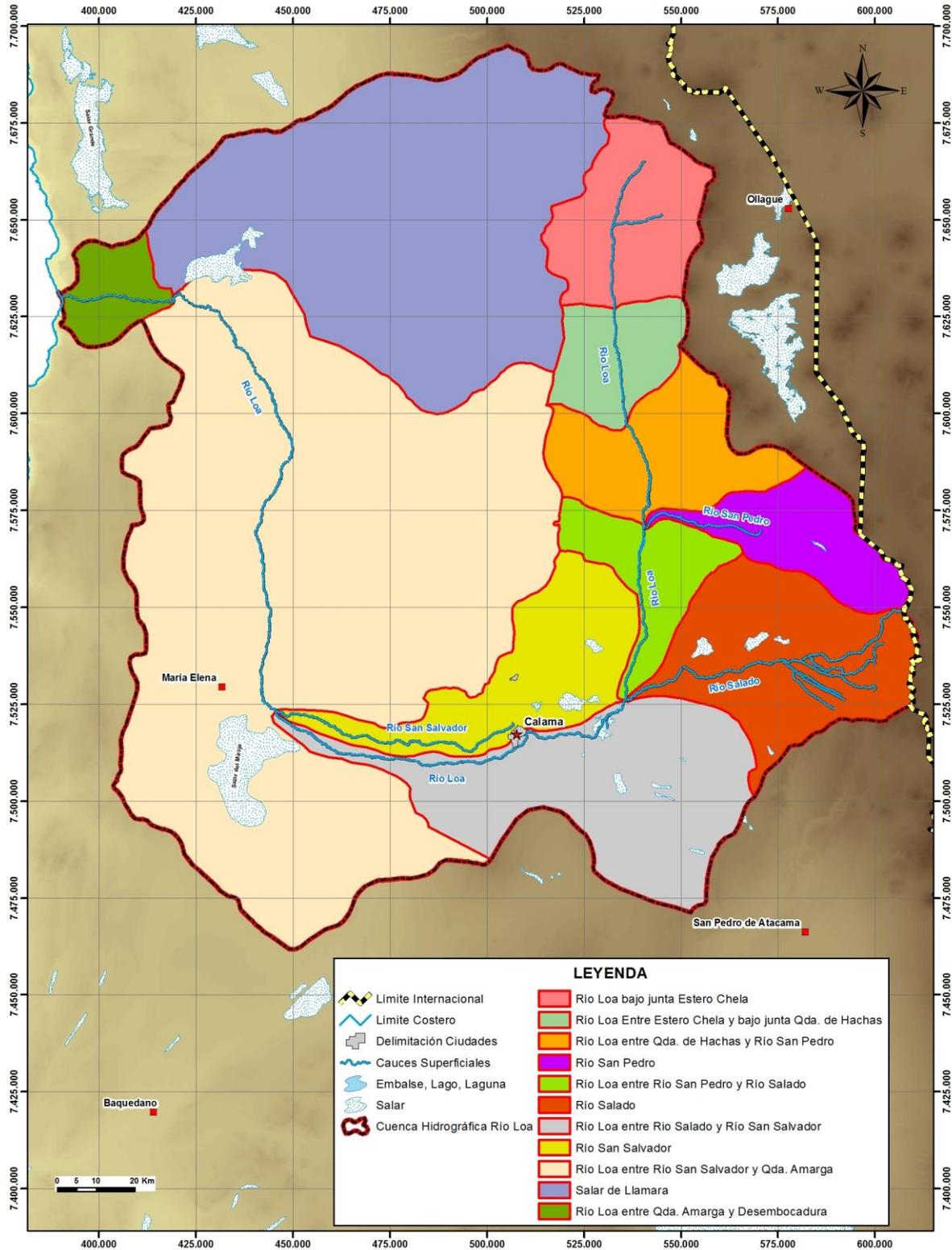
De cualquier modo, esta sectorización preliminar puede sufrir modificaciones dependiendo de la información adicional que se va tomando en consideración durante esta metodología. La Figura 4.2-3 muestra la sectorización preliminar de la cuenca.

4.2.4. Hidrogeología

La información hidrogeológica disponible en la cuenca de estudio es la que permite limitar la extensión de cada sector acuífero en función de datos duros, como es la información estratigráfica, mediciones de geofísica, detección de niveles de agua subterránea, etc. De este modo, la extensión de cada sector acuífero se ve reducida a una superficie en principio, menor a la superficie de la cuenca.

De manera tal de simplificar la comprensión de la información utilizada, esta se presenta a continuación separada entre geología, geofísica e hidrogeología, la cual en su conjunto permiten lograr la sectorización final de los acuíferos de la cuenca.

Figura 4.2-3 Sectorización Preliminar

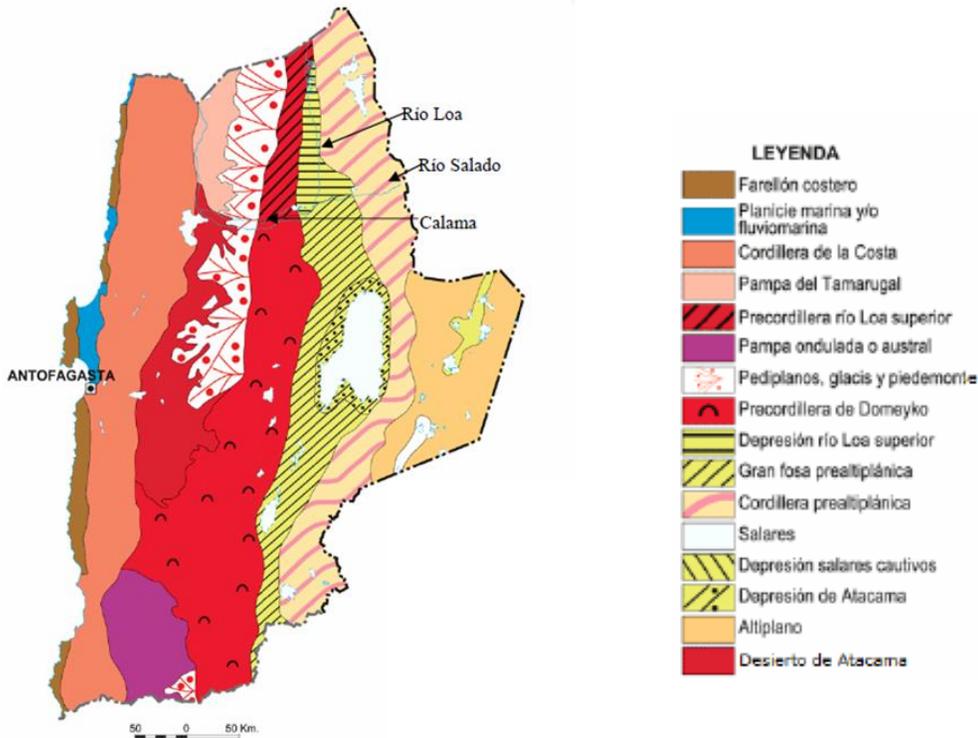


Fuente: Elaboración Propia

4.2.4.1. Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico se pueden distinguir, en la cuenca del río Loa, tres unidades morfoestructurales bien definidas que son el Macizo Andino, la Depresión Intermedia formada por sierras y pampas, y la Cordillera de la Costa (Figura 4.2-4).

Figura 4.2-4 Geomorfología de la II Región de Antofagasta



Fuente: Börgel, R. 1983. Geomorfología. In: Geografía de Chile. Santiago, Instituto Geográfico Militar. 182 p. Vol. 11.

El Macizo Andino se encuentra caracterizado por la Precordillera, que une moderadamente la Depresión Intermedia con la Cordillera de los Andes y asciende lentamente desde los 1.600 a los 3.000 metros de altitud, y por los relieves que forman la Cordillera prealtiplánica. El nacimiento del río Loa y el sector alto del mismo se encuentran enmarcados en esta unidad morfoestructural, entre medias de la Precordillera y la Cordillera prealtiplánica, en las denominadas depresión del río Loa superior y gran fosa prealtiplánica.

En la zona de su nacimiento en la falda occidental del volcán Miño, el río Loa está limitado por el relieve del Macizo Andino, concretamente por la Cordillera prealtiplánica, que alcanza importantes alturas, superando los 5.000 m s.n.m, como es el caso del volcán Miño (5.611 m s.n.m), el cerro Polán (5.425 m s.n.m.) y Cerro Gordo (5.194 m s.n.m).

En el primer tramo de su trazado o sector alto, hasta su confluencia con el río Salado en las proximidades de Chiu-Chiu, el río discurre en dirección Sur y su cauce presenta terrazas fluviales limitadas por cordones montañosos y pampas de escarpes muy pronunciados. Hacia poniente el límite del río lo conforman los relieves de la Precordillera, concretamente los de la Pampa de Puno y el Cordón del Milo, y hacia el

oriente, el límite lo configuran los de la Cordillera prealtiplánica como el Loma Alto de la Cueva donde destacan el cerro y Polpana de 5.644 y 6.023 m s.n.m respectivamente. El primer afluente de importancia interceptado es el río San Pedro, aunque actualmente no realiza aportes al río Loa al encontrarse totalmente captado por la industria minera del sector. Desde la confluencia del río Loa con el río San Pedro las características geomorfológicas de la zona cambian paulatinamente hasta llegar al siguiente afluente de importancia, el río Salado, pues el cauce del río Loa comienza a torcer hacia el Oeste hasta juntarse con el río San Salvador.

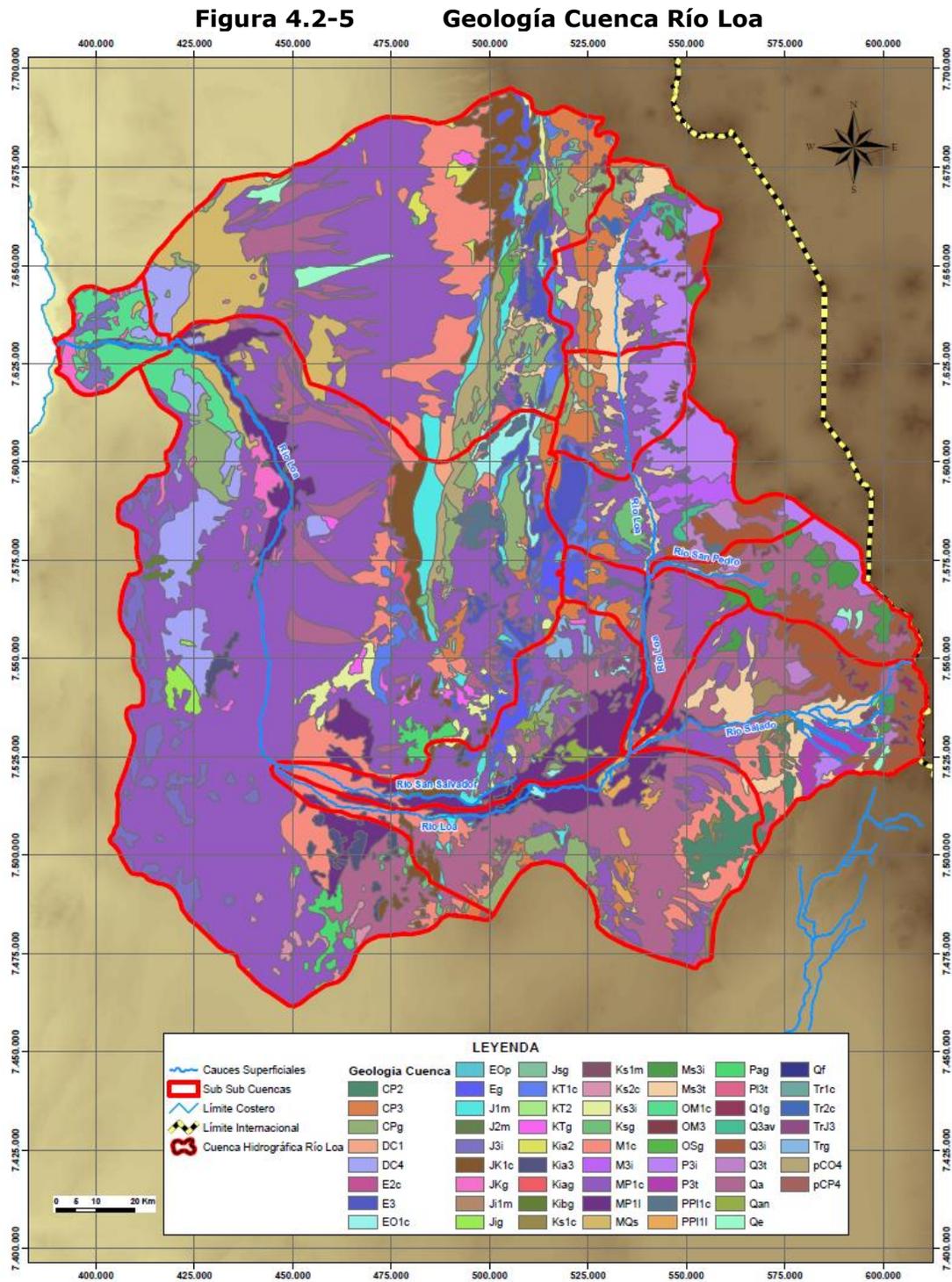
A partir de la unión del río Salado y el Loa y hasta la localidad de María Elena, el relieve va descendiendo hasta cotas próximas a los 2.000 m s.n.m. En este sector, el río Loa que discurre con dirección Oeste, está limitado por pampas de gran escarpe pertenecientes tanto a la Precordillera, situada en el sector al Norte del cauce del río Loa, como a la Cordillera de Domeyko, la cual es un cordón desmembrado de la Cordillera de Los Andes y se encuentra localizada al Sur del cauce de los ríos Loa y San Salvador. Los principales cerros de estas pampas son el Cerro del León (5.760 m s.n.m.) y el Cerro Toconce (5.419 m s.n.m.).

En los relieves de la Precordillera se distinguen formas terciarias y cuaternarias, señalando que las primeras corresponden principalmente a coladas de lava riolítica que aparecen por debajo de los centros volcánicos cuaternarios, tomando en el sector forma de abanico. Más al sur, en los relieves de la Cordillera de Domeyko, estas rocas aparecen en prolongados sectores del río Loa con abundantes sedimentos en superficie. A lo largo de este tramo, al igual que en el anterior, las terrazas fluviales del río se presentan escarpadas. Es en este recorrido en donde se encuentra inmerso el valle de Calama, formado por un amplio plano deposicional que sigue el mismo recorrido que el río, en dirección Este.

A partir de las inmediaciones de la población de María Elena y hasta llegar a Quillagua, el río Loa presenta dirección Norte, quedando emplazado en un amplio valle deposicional de la Depresión Intermedia, con terrazas de mayor amplitud que en los sectores anteriores. Su límite occidental lo conforman los relieves de la Cordillera de la Costa mientras que el límite oriental está formado por las propias pampas y sierras de la Depresión Intermedia, destacando la Pampa de Tamarugal situada en el Norte del sector, el Desierto de Atacama y los pediplanos, glaciares y piedemontes asociados a la vertiente occidental tanto de la Precordillera como de la Cordillera de Domeyko. La Cordillera de la Costa se presenta elevada y muy escarpada en su ladera poniente dando origen al farellón costero, siendo sus alturas más destacables en este sector las del Cerro de la Joya (1.287 m s.n.m.) y Cerros de la Angostura (1.259 m s.n.m.). En el último tramo desde la localidad de Quillagua hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, la dirección del río Loa vuelve a ser hacia el Oeste, quedando encajado entre medias de la Cordillera de la Costa.

4.2.4.2. Geología Regional

Geológicamente, la región de estudio engloba gran diversidad de materiales sedimentarios, volcanosedimentarios, volcánicos, rocas intrusivas y rocas metamórficas, cuyas edades geológicas resultan bastante dispares, desde Devónico-Carboníferas para los materiales metamórficos hasta los sedimentos holocenos (Figura 4.2-5).



Fuente: Elaboración Propia

Nota: Esta figura es sólo referencial, cuya leyenda, incluidos sus colores no corresponden a los estándares seguidos por la comunidad geológica. De todas maneras, para una visualización adecuada a los estándares mencionados, se presenta en el Anexo G el mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000.

El sistema morfoestructural de la Cordillera de la Costa está formado principalmente por secuencias volcánicas y materiales intrusivos de edad triásica, jurásica y cretácica,

parcialmente recubiertos por depósitos sedimentarios aluviales, de piedemonte, coluviales, fluviales y eólicos de edades terciarias y cuaternarias. Así mismo, en los sectores de Sierra de la Cruz, Sierra La Angostura y Sierra de las Coloradas, se detectan los únicos materiales metamórficos de prisma de acreción detectados, constituidos fundamentalmente por metareniscas, cuarcitas y lutitas de la Formación El Toco, que son además, los más antiguos de la región. Los materiales predominantes del jurásico inferior afloran en este sector como cuencas marinas hídridas de rift de antearco, con elevado volcanismo bimodal, mientras que los del Jurásico Medio-Superior conforman el arco andesítico de la Cordillera de la Costa, y los cretácicos representan depósitos de cuenca de intraarco.

La Depresión Intermedia está conformada en su gran mayoría por sedimentos terciarios, fundamentalmente miocenos, sobre los que se disponen de manera discordante los depósitos cuaternarios, quedando los afloramientos rocosos mesozoicos, tanto jurásicos como cretácicos, reducidos a enclaves de escasa extensión, más abundantes hacia el Sur de la cuenca del río Loa. Los depósitos cenozoicos corresponden a extensos flujos lávicos o piroclásticos o por gravas cenozoicas, asociadas, estas últimas, a intensa erosión por alzamiento de la cordillera Andina.

El Manto Andino está subdividido morfoestructuralmente en Precordillera y Cordillera prealtiplánica, aunque es la subunidad de Precordillera la más ampliamente representada, puesto que la Cordillera prealtiplánica o Cordillera Principal está ubicada únicamente en el sector más occidental de la región de estudio. Los materiales que conforman ambas subunidades abarcan desde el Carbonífero-Pérmico hasta la actualidad y consisten tanto en materiales sedimentarios, como volcánicos e intrusivos, siendo los volcano-sedimentarios los menos frecuentes y los de menos envergadura de afloramiento.

Los afloramientos carboníferos y triásicos aparecen de manera dispersa, pues están cubiertos por rocas mesozoicas y cenozoicas. Los materiales del jurásico inferior de la Precordillera corresponden a escasos afloramientos de cuencas trasarco, mientras que las rocas volcánicas, volcanoclásticas y marinas del Jurásico Medio-Superior constituyen el relleno de nuevos rifts en la Cordillera Principal central. Los materiales cretácicos representan los depósitos de cuencas de trasarco, como es el caso de la cuenca aconcagüina-neuquina. Durante el cenozoico, en la cordillera Principal, se depositaron grandes espesores de depósitos piroclásticos y sedimentarios en cuencas invertidas, contemporáneamente a la construcción de un potente arco volcánico mioceno, y durante el Cuaternario se desarrollan en el Altiplano numerosos aparatos volcánicos.

Entre ambas subunidades montañosas se localizan, al Norte, la depresión superior del Loa, y al Sur, la Gran Depresión Prealtiplánica. En estas depresiones se disponen, discordantemente sobre los materiales mesozoicos y paleozoicos, la mayoría de sedimentos aluviales, lacustres, fluviales, coluviales y de piedemonte de este sector, cuyas edades abarcan del Paleógeno al Cuaternario.

En base a lo expuesto en párrafos anteriores se pueden establecer dos grandes dominios geológicos en la Cuenca del río Loa, uno correspondiente a los materiales rocosos de edad muy variada, desde el Precámbrico hasta el Eoceno e incluso Cuaternario, que configuran las principales cordilleras y sierras de la región, y otro correspondiente a aquellas rocas y sedimentos, cenozoicos y cuaternarios, que constituyen los rellenos de las principales cuencas, como son la Depresión Central, la cuenca de Atacama y la Cuenca del Alto Loa. Desde el punto de vista hidrogeológico, los materiales rocosos del Paleozoico y Mesozoico, si bien configuran el basamento de las cuencas, no se consideran materiales con

permeabilidad suficiente como para constituir acuíferos, mientras que los materiales cenozoicos y cuaternarios que rellenan las cuencas sí son susceptibles de ser acuíferos explotables, dada la predominancia de los facies detríticas que los conforman.

Materiales Rocosos de Baja a Nula Permeabilidad

Así pues, los materiales más antiguos de la zona, de edad Precámbrica a Pérmica, son de origen metamórfico y constituyen el Complejo Metamórfico Limón Verde (pCP4), las Metamorfitas de Sierra Moreno (pCO4) y la Formación el Toco (DC4). Se trata de metaconglomerados, lutitas fisibles, metareniscas, pizarras, esquistos, anfibolitas, con algunas rocas de metamorfismo de mayor grado como gneises y metadioritas, que conforman gran parte de la Cordillera de la Costa, la Sierra de Limón Verde, parte de los cerros de Chuquicamata y Sierra Moreno en la Precordillera.

También son del paleozoico los granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas de hornblenda y biotita (CPg) que forman batolitos compuestos, stocks y cuerpos hipabisales en estas sierras y cordilleras, así como secuencias volcánicas continentales (CP3) formadas por lavas, domos, tobas y brechas andesíticas a riolíticas con intercalaciones de areniscas, conglomerados y calizas, que afloran principalmente en la Precordillera, en la margen derecha del cauce del Alto Loa y la Sierra de Limón Verde. Los últimos materiales paleozoicos aflorantes en la región constituyen la Formación Tuina (CP2), la cual comprende una secuencia volcánica y sedimentaria continental formada por rocas epiclásticas con intercalaciones de lavas andesíticas y tobas riolíticas, que afloran al Este y Sureste del Salar Talabre, así como al sur del río Salado donde configuran cerros isla.

Los materiales triásicos de la región corresponden a una secuencia volcánica, denominada Formación Agua Dulce (TrJ3), que está conformada por lavas riolíticas con intercalaciones de sedimentos continentales de cuarcitas y conglomerados que aflora en los relieves occidentales de la Depresión Central y al Norte y Noroeste del Salar de Talabre, conformando cerros islas en el relleno sedimentario cenozoico y cuaternario.

En cuanto a las rocas intrusivas Jurásicas que constituyen las sierras y cordilleras de la región, forman parte en su gran mayoría de la Cordillera de la Costa y afloran de manera aislada en la Depresión Central. Están definidas por gabros y monzodioritas de piroxeno, dioritas cuarcíferas y granodioritas del Jurásico Inferior (Jlg), plutones de monzodioritas cuarcíferas, dioritas y granodioritas de biotita, piroxeno y hornblenda (Jsg) del Jurásico Medio y Superior, y por los batolitos de Punta Negra y Huara-Pozo Almonte (JKg) formados por granodioritas, dioritas, monzodioritas y granitos, pórfidos dacíticos y andesíticos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior.

Las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias jurásicas son la Formación La Negra (J3l) constituida por lavas andesíticas con intercalaciones de brechas y rocas sedimentarias que conforman una franja discontinua en la Cordillera de la Costa y afloramientos aislados en los depósitos de la Depresión Central, y una secuencia volcánica y sedimentaria marina (J2m) formada por lavas y brechas, andesíticas y basálticas, y por calizas y areniscas marinas fosilíferas, que aflora aisladamente en la Depresión Central.

Los materiales rocosos sedimentarios jurásicos los conforman, desde el Jurásico Inferior hasta el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, una secuencia sedimentaria marina litoral aflorante en la Cordillera de la Costa (Jl1m) formada por calizas, areniscas calcáreas, lutitas y conglomerados, seguida de la Formación Cholita en el sector de la Pampa de Tamarugal o Grupo Caracoles en la cordillera de Domeyko (Js1m) que corresponde a una

secuencia de origen marino formada por calizas marinas grises y azuladas, conglomerados, areniscas y lutitas calcáreas. Sobre ellas se depositaron la Formación Quetena (J1m) consistente en una secuencia de lutitas, areniscas, calizas y evaporitas marinas, presente en las inmediaciones de Calama, y sobre ésta última la Formación Cerritos Bayos (JK1c) formada por areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados rojos de origen aluvial, fluvial y eólico en parte transicional, que configura parte de los cerros de Chuquicamata y la parte más occidental de las sierras de Limón Verde y la Precordillera.

Los materiales cretácicos intrusivos son principalmente monzodioritas y dioritas de piroxeno, granodioritas, monzogranitos, gabros, pórfidos andesíticos, dioríticos y graníticos, y tonalitas que pertenecen a 4 conjuntos distintos: el asociado al sistema de Fallas de Atacama de la Cordillera Central (Klbg), el situado al Este de este sistema de fallas de Atacama (Klsg), el presente en la Cordillera de Domeyko en forma de pequeños plutones y cerca de la conjunción del río San Pedro con el río Loa (Ksg) y el Complejo granítico de Quillagua del Cretácico Superior-Terciario Inferior (KTg) presente en algunos cerros de Chuquicamata y la Depresión Central.

Los materiales volcánicos y volcanosedimentarios cretácicos están representados al Oeste y Suroeste de Calama, cerca de Maria Elena y la Oficina de Pedro de Valdivia, y al lado Oeste de Sierra Moreno a la altura de la Pampa de Tamarugal, por secuencias y complejos volcánicos continentales del Cretácico Inferior (Kla3) formados por lavas y brechas basálticas a andesíticas y rocas piroclásticas, por el miembro superior de la Formación Cerro Empexa (Ks3l) compuesto por lavas andesíticas de piroxeno con intercalaciones de dacitas, tobas y brechas, por secuencias volcánicas y sedimentarias de rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres (Kla2), y por la Formación Quebrada Mala (Ks2c) constituida por rocas epiclásticas y piroclásticas riolíticas, lavas andesíticas y traquíticas.

Los materiales rocosos sedimentarios del Cretácico corresponden al miembro inferior de la Formación Cerro Empexa (Ks1c) formado por paraconglomerados gruesos de composición andesítica, con intercalaciones de areniscas y lavas andesíticas y por la Formación Tolar (KT1c) constituida por conglomerados, areniscas y limolitas rojizas de origen aluvial y fluvial, presente en las estribaciones de Sierra Moreno y al Norte de Chuquicamata.

Los materiales rocosos más recientes que conforman las sierras y cordilleras son de naturaleza intrusiva y volcánica y abarcan desde el Eoceno hasta la actualidad. Los materiales intrusivos eocenos están conformados por granodioritas de hornblenda y biotita (Pag) situadas al Oeste del Salar de Talabre y en el margen Este de la Depresión Central junto a la Sierra de Limón Verde, por granodioritas, tonalitas, dioritas cuarcíferas y monzodioritas (Eg) y por pórfidos granodioríticos, monzoníticos, dioríticos, dacíticos y riolíticos portadores de la mineralización de tipo "Pórfido cuprífero gigante" (EOp) presente en Chuquicamata. Los materiales volcánicos eocenos corresponden a la Formación Icanche (E3) compuesta por lavas y brechas basálticas a andesíticas con intercalaciones de rocas piroclásticas y domo riolíticos, situada en la Precordillera.

En cuanto a los materiales volcánicos miocenos, pliocenos y pleistocenos pertenecen todos a centros y secuencias volcánicas e ignimbritas situados en la Cordillera Alpina y en el curso alto del río Loa. Del Mioceno Inferior son los complejos volcánicos parcialmente erosionados y las secuencias volcánicas de lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas (M3l). Al Mioceno Superior pertenecen lavas, domos y depósitos piroclásticos con intercalaciones aluviales asociados a depósitos epitermales de Au-Ag (Ms3l), así como las ignimbritas dacíticas a riolíticas y depósitos de piroclastos de estratovolcanes (Ms3t). Los

materiales pliocenos son centros volcánicos formados por lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos (P3l). Como materiales volcánicos pleistocenos destacan los depósitos de avalancha de Ollagüe (Q3av) y los depósitos de flujo piroclástico (Q3t), localmente soldados, así como los volcanes recientes presentes en la Cordillera Principal (Q3l). De entre todos ellos, únicamente las ignimbritas miocenas son susceptibles de configurar acuitardos, como el existente en la cuenca de Calama, que se dispone sobre depósitos limo-arcillosos del acuitardo detrítico del río Loa.

Materiales detríticos de media a alta permeabilidad: rellenos de cuencas

Tal y como se ha comentado anteriormente, los materiales más susceptibles de ser acuíferos y/o acuitardos son los depósitos sedimentarios de edad cenozoica y cuaternarios que rellenan las principales cuencas de la región, como son la Depresión Central, la cuenca de Calama y el curso alto del río Loa.

Respecto a los materiales cenozoicos estos corresponden a edades diversas, desde el Eoceno hasta la actualidad. Los materiales más antiguos son los materiales rocosos detríticos del Eoceno-Oligoceno que conforman la Formación Calama (EO1c), los cuales sólo se localizan junto a la ciudad de Calama en el cerro del mismo nombre y el cerro Milagro. Se trata de secuencias sedimentarias continentales torrenciales y gravitacionales formadas por gravas, areniscas, limolitas y conglomerados con intercalaciones de lavas y brechas andesíticas en la parte basal de la secuencia, cuya potencia media es de al menos 120 metros de acuerdo con la información registrada en numerosos pozos de explotación inventariados en la región.

En el Oligoceno-Mioceno se depositaron, en el curso alto del río Loa y en las quebradas que cruzan las pampas anexas a la Cordillera de la Costa, materiales detríticos correspondientes al miembro inferior de la Formación Alto de Pica (OM1c). Se trata de secuencias sedimentarias parálicas o aluviales formadas por conglomerados, areniscas, lutitas, calizas y mantos de carbón. Durante el mismo período se depositó en la zona de la actual cuenca de Calama la Formación Yalqui, formada por brechas sedimentarias, conglomerados, areniscas guijarrosas o limosas, limolitas y arcillolitas guijarrosas o laminadas que alcanzan los 1.500 metros de espesor. En la vertiente oriental de la Cordillera de Domeyko se depositó la Formación Tambores compuesta de conglomerados con intercalaciones de areniscas.

Los materiales del Mioceno Medio y Superior están representados en la región por el miembro superior de la Formación Altos de Pica y la Formación Diablo (M1c) presentes en las estribaciones occidentales de Sierra Moreno, relleno de la Pampa de Tamarugal, al Oeste de la Sierra de Limón Verde y al Este y Sureste del Salar de Talabre. Estas formaciones son secuencias sedimentarias de abanicos aluviales, pedimentos o fluviales formadas por gravas, arenas y limos con intercalaciones de ignimbritas que rellenan las pampas. Cabe destacar que algunos autores (Jordan et al, 2006) consideran esta formación como perteneciente al Grupo Loa.

Sobre estos depósitos se disponen, relleno de la mayor parte de la cuenca de Calama, los sedimentos lacustres y en parte fluviales y aluviales del Grupo Loa (MP1l), el cual está formado por 5 formaciones principales que están agrupadas en dos miembros principales, uno inferior y otro superior. El miembro inferior es de color pardo-terroso y está formado por conglomerados y limos arenosos de las Formaciones El Yeso, Jalquinche y Lasana que pertenecen al Mioceno Inferior a Superior bajo, y el miembro superior es de color blanquecino, de carácter arenoso, limolítico y calcáreo y está formado por las

Formaciones Chiquinaputo y Opache cuya edad es Mioceno Superior a Plioceno. La característica más destacable de este grupo son los abundantes cambios litológicos laterales y la lenticularidad de los diferentes niveles, lo cual se puede observar en la Figura 4.2-6, obtenida de la REF#29. En cuanto a sus afloramientos, éstos se disponen en el Salar de Talabre y a lo largo del curso de los ríos Loa y San Salvador.

La Formación El Yeso está formada por brechas, areniscas y una sucesión de limolitas y yeso masivo con intercalaciones de tobas, mientras que la Formación Jalquinche está compuesta por areniscas, limolitas macizas, arcillolitas y ocasionales cuerpos canalizados de areniscas de guijarro. La Formación Lasana está formada por materiales más groseros, tratándose de conglomerados y areniscas gruesas con algunas limolitas. La Formación Chiquinaputo está formada por conglomerados, areniscas y tobas ignimbríticas, tufitas, limolitas y de manera subordinada diatomitas y travertinos, mientras que la Formación Opache está constituida por un conjunto de conglomerados, areniscas detríticas, areniscas calcáreas y calizas con algunas margas diatomíticas, que engranan lateralmente y en parte la cubren a la Formación Chiquinaputo.

Durante este mismo período (Mioceno Superior-Plioceno) se depositan, abarcando amplias superficies a lo largo de toda la Depresión Central, recubriendo las estribaciones meridionales de la Precordillera y gran parte del Norte de la Cordillera de Domeyko, así como a lo largo del valle alto del río Loa, los sedimentos detríticos de la Formación Huaylas (MP1c). Se trata de secuencias sedimentarias clásticas de piedemonte, aluviales, coluviales y fluviales formadas por gravas, arenas y limos, en ocasiones cementados formando conglomerados, areniscas y limolitas. Por último, durante el Plioceno-Pleistoceno se depositó, tanto en la zona de la cuenca de Calama (alrededores de la localidad de Chiu-Chiu) como en pequeñas cuencas en el interior de la Precordillera y la Cordillera Central, la Formación Chiu-Chiu (PPII) que se caracteriza por ser secuencias sedimentarias lacustres conformadas por limos y arcillas calcáreas con intercalaciones de diatomitas, yesos, escasos niveles de conglomerados y cenizas volcánicas retrabajadas, originados por corrientes torrenciales esporádicas

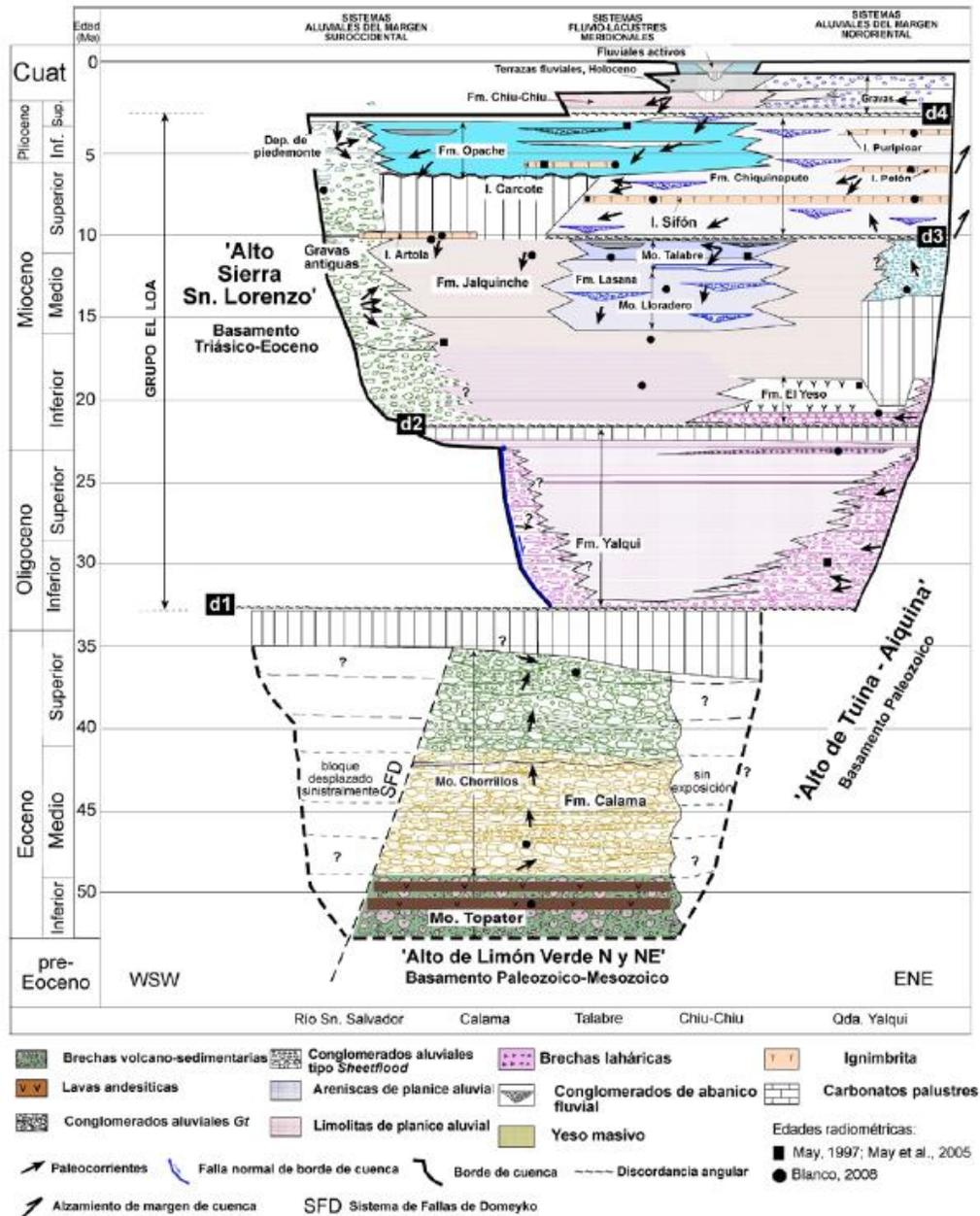
Desde el Mioceno al Cuaternario se disponen, en los salares de Bellavista, Llamara, del Indio, Talabre y Rudolph entre otros, depósitos salinos de la Formación Soledad (MQs) formados por sulfatos (yeso y anhidrita) y cloruros (halita), y en menor medida por carbonatos y niveles detríticos finos, que se formaron en ambiente continental evaporítico asociados a un sistema lacustre somero con predominio de sulfatos y cloruros, y que sobreyacen discordantemente a los materiales terciarios.

Recubriendo parcialmente los materiales expuestos anteriormente, principalmente los de edad terciaria, se dispone el conjunto de sedimentos cuaternarios no consolidados, caracterizado principalmente por materiales aluviales, fluviales, lacustres, de piedemonte, fluvio-glaciares y eólicos, generados por grandes eventos pluviales y que actualmente ocupan gran parte de las depresiones conformando el nivel de erosión de las mismas.

Los principales depósitos de relleno de cuenca cuaternarios son los abanicos aluviales (Qa) asociados a la degradación del cordón volcánico Neógeno-Cuaternario de la Cordillera Principal, que comprenden a depósitos torrenciales derivados de la erosión de estos edificios volcánicos y que están formados por gravas y ripios polimícticos, mal seleccionados, con matriz de arena, limo y arcilla, en ocasiones parcialmente consolidados. Los depósitos de piedemonte englobados dentro de los depósitos aluviales están constituidos por las extensas rampas de deyección que bordean los cerros de las principales sierras y cordilleras y los conforman gravas, arenas y una gran proporción de

limos no consolidados. También se incluyen dentro de esta unidad los aluviales recientes que corresponden a depósitos de gravas arenosas aflorantes en el fondo de los cauces mayores (Río Loa, Salado, San Pedro, San Salvador y Quebrada Amarga) y en drenajes menores que disectan los piedemontes del Plioceno. Además, recubriendo mantos de limos, chuscales y ocasionalmente sobre formaciones terciarias y materiales rocosos paleozoicos, se encuentran depósitos aluviales salinos de poco espesor compuestos por halita, yeso y limos arcillosos en distintas proporciones, formados en cuencas endorreicas y cuyas características distintivas son su rugosidad y dureza.

Figura 4.2-6 Cronoestratigrafía de la Cuenca de Calama en el Terciario



Fuente: REF#29

Los depósitos de llanuras y terrazas fluviales abandonadas (Qf) están estrechamente ligados a los cursos de agua actuales y corresponden a gravas, arenas y limos no consolidados, que en su mayor parte son utilizadas como zonas de cultivo. Los depósitos eólicos (Qe) se disponen en el sector Noroeste del Salar de Llamara y en la pampa de Tamarugal y están formados por mantos de arenas muy regulares y uniformes depositados por acción eólica en forma de dunas disimétricas. Los depósitos fluvioglaciares (Q1g) se encuentran restringidos a la Cordillera Principal y consisten en bloques inmersos en matriz de limos, arcillas, gravas y arenas. Por último, se encuentran los depósitos antrópicos (Qan) formados por depósitos de material estéril de la gran minería, rellenos sanitarios y tranques de relaves.

Sectorización de acuerdo a la Geología

Como se describió anteriormente, los materiales detríticos de media a alta permeabilidad corresponden a los potenciales acuíferos de la cuenca. De este modo, la Figura 4.2-7 muestra las zonas acuíferas potenciales en cada una de las subcuencas ya definidas.

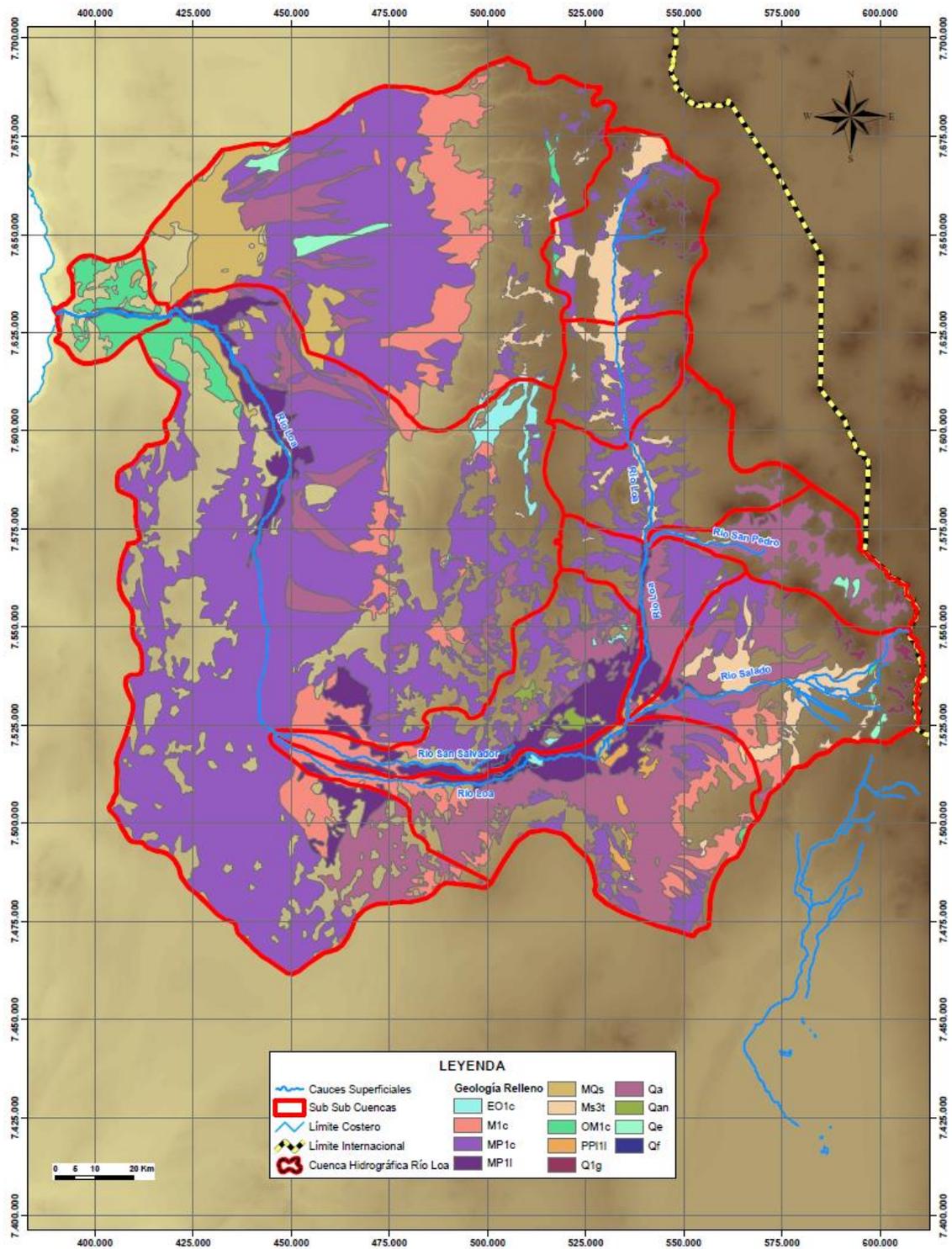
4.2.4.3. Información Geofísica y Estratigráfica

El total de información geofísica recopilada en el presente estudio, analizada y presentada en el capítulo 2, se dispone en los Anexos A, B y C, correspondientes a antecedentes de sondajes, estudios geofísicos TEM y estudios gravimétricos respectivamente. El primer caso corresponde a pozos de sondaje de los que principalmente se obtiene información estratigráfica, donde en ciertos casos se alcanza contacto con la roca de basamento. El método TEM proporciona una diferenciación vertical de la resistividad del subsuelo, con lo cual es posible delimitar los diferentes estratos existentes, incluyendo el contacto roca relleno. Por último, el método gravimétrico consiste en la medición de anomalías de la gravedad de la Tierra provocadas por contrastes de densidad provocadas por grandes cuerpos mineralizados, con lo cual se puede inferir y estimar la presencia del basamento rocoso.

De la información recopilada, una gran cantidad no puede ser utilizada a efectos de la sectorización de acuíferos debido a la falta de detalles proporcionados en los respectivos estudios base (por ejemplo, falta de interpretación de los datos o la no entrega de cotas asociadas a basamento y/o estratos). Luego se filtra aquella información que entregue una interpretación del basamento o contacto con éste, en busca de realizar una estimación de su profundidad en los diferentes sectores acuíferos identificados preliminarmente. Finalmente se identifican 460 puntos desde estudios de geofísica y 19 de pozos de sondajes posibles de utilizar.

Por lo tanto, para determinar la geometría en profundidad del acuífero se utiliza la información que da cuenta del contacto roca relleno, la cual corresponde principalmente a la recopilada a través de los estudios geofísicos. Por otro lado, la descripción estratigráfica con la que se cuenta ya ha sido previamente interpretada en las zonas de Calama y Pampa Llalqui, desde donde se ha determinado la existencia de dos estratos acuíferos. De esta forma, en función de caracterizar la geometría de los sectores acuíferos de la cuenca del río Loa, ambas fuentes de información son utilizadas en conjunto.

Figura 4.2-7 Materiales Detríticos de Media a Alta Permeabilidad



Fuente: Elaboración Propia

4.2.4.4. Información Hidrogeológica

En este punto se presenta la recopilación de información hidrogeológica asociada a la cuenca del río Loa, la cual será utilizada para definir y caracterizar los sectores acuíferos junto con la información geofísica y estratigráfica.

En términos hidrogeológicos, la cuenca del río Loa presenta un conjunto de distintas unidades hidrogeológicas, que presentan distintas potencialidades acuíferas. En términos generales, se observan unidades de gravas y arenas desde las zonas nacientes de la cuenca hasta las zonas más bajas, presentándose las mayores potencias acuíferas en la cuenca de San Pedro de Inacaliri, el sector de Calama y Llalqui. En estos últimos sectores, las gravas y arenas conforman el llamado "Acuífero Inferior de Calama", con valores altos de permeabilidad y gran parte de los derechos de aprovechamiento de la cuenca.

En el mismo sector de la cuenca se presenta una unidad superficial correspondiente al "Acuífero Superior de Calama", correspondiente principalmente a estratos arcillosos y calizas, y que posee permeabilidades variables. Debajo de esta unidad se encuentra un estrato semiconfinante conformado por arcillas y limos, de baja permeabilidad.

Unidades de baja permeabilidad son también observadas en toda la zona baja de la cuenca, principalmente entre María Elena y Quillagua, cuya presencia explica la ausencia de derechos de aprovechamiento de aguas en el sector.

Se observan también, principalmente en la zona alta, unidades asociadas a procesos volcánicos con distinto nivel de fracturamiento, como es el caso de coladas de lavas andesíticas en el sector de Polapi e Ignimbritas en el sector de Pampa Puno.

Finalmente, la unidad de basamento impermeable es observada, de acuerdo a los antecedentes revisados, en toda la cuenca, con profundidades variables que en su mayoría han podido ser identificadas en base a información geofísica y de sondajes, y que permiten definir a grandes rasgos la geometría del acuífero.

Geometría del Acuífero

La definición de las características geométricas de los sectores acuíferos comenzó con una clasificación crítica a los antecedentes recopilados en el capítulo 2, haciendo referencia a la cantidad y calidad de la información existente en su delimitación superficial dentro de cada subsubcuenca del río Loa. De acuerdo a esta metodología, se reconocieron tres niveles de información:

- **Límites Completos:** Se cuenta con la delimitación completa de los acuíferos y sus límites se encuentran definidos con un bajo nivel de incertidumbre. Esto se verifica para las cuencas del Salar de Llamara y Pampa Puno, donde la delimitación de sus acuíferos se obtuvieron desde la REF#23 y REF#15 respectivamente. Esta información es utilizada de manera fiel en la sectorización de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.
- **Límites Parciales:** Se cuenta con una delimitación parcial del sector acuífero, o bien la información utilizada en su definición posee cierto grado de incertidumbre. Esta clasificación se observa en la REF#28, correspondiente a la modelación de los sectores acuíferos de Calama y Llalqui, donde debido a la utilización de condiciones de borde no es necesaria su delimitación completa. La información aquí clasificada es

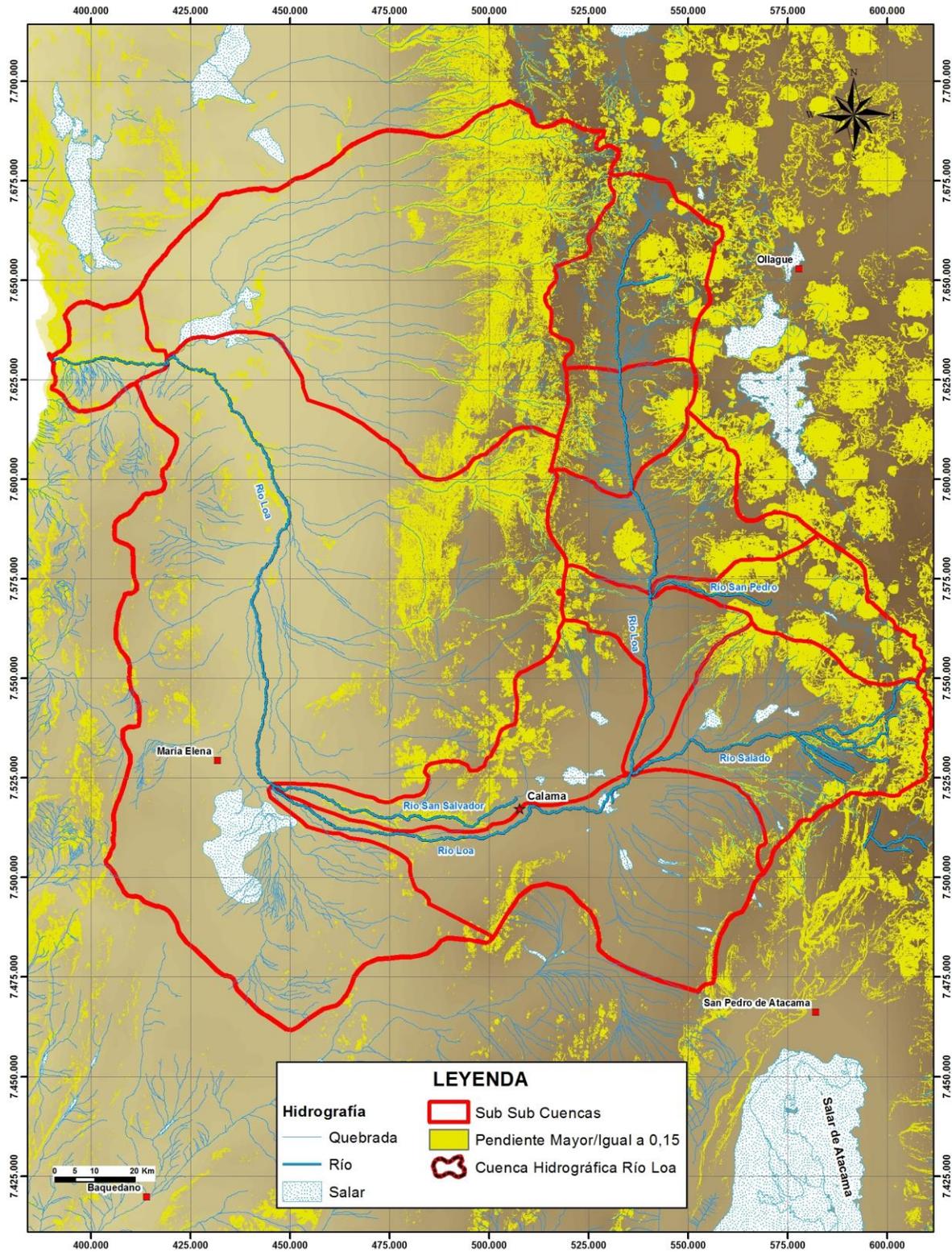
utilizada de manera referencial en la sectorización de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.

- Sin Información: Corresponde a aquellos sectores que cuentan con escasa o nula información sobre su delimitación. Esto sucedió en el caso de las cuencas de los ríos Salado y San Pedro y en los sectores del Loa Alto (aguas arriba del embalse Conchi) y Loa Bajo - Medio (aguas abajo de la confluencia de los ríos Loa y San Salvador hasta la desembocadura).

De acuerdo a la revisión de antecedentes, se verificó la necesidad de generar una metodología para la delimitación superficial de aquellos sectores acuíferos que presentan información nula o parcial en este punto. Esta nueva metodología consiste en la utilización de los antecedentes geológicos, geofísicos y topográficos de la cuenca del río Loa, donde cada una de sus actividades se detalla a continuación.

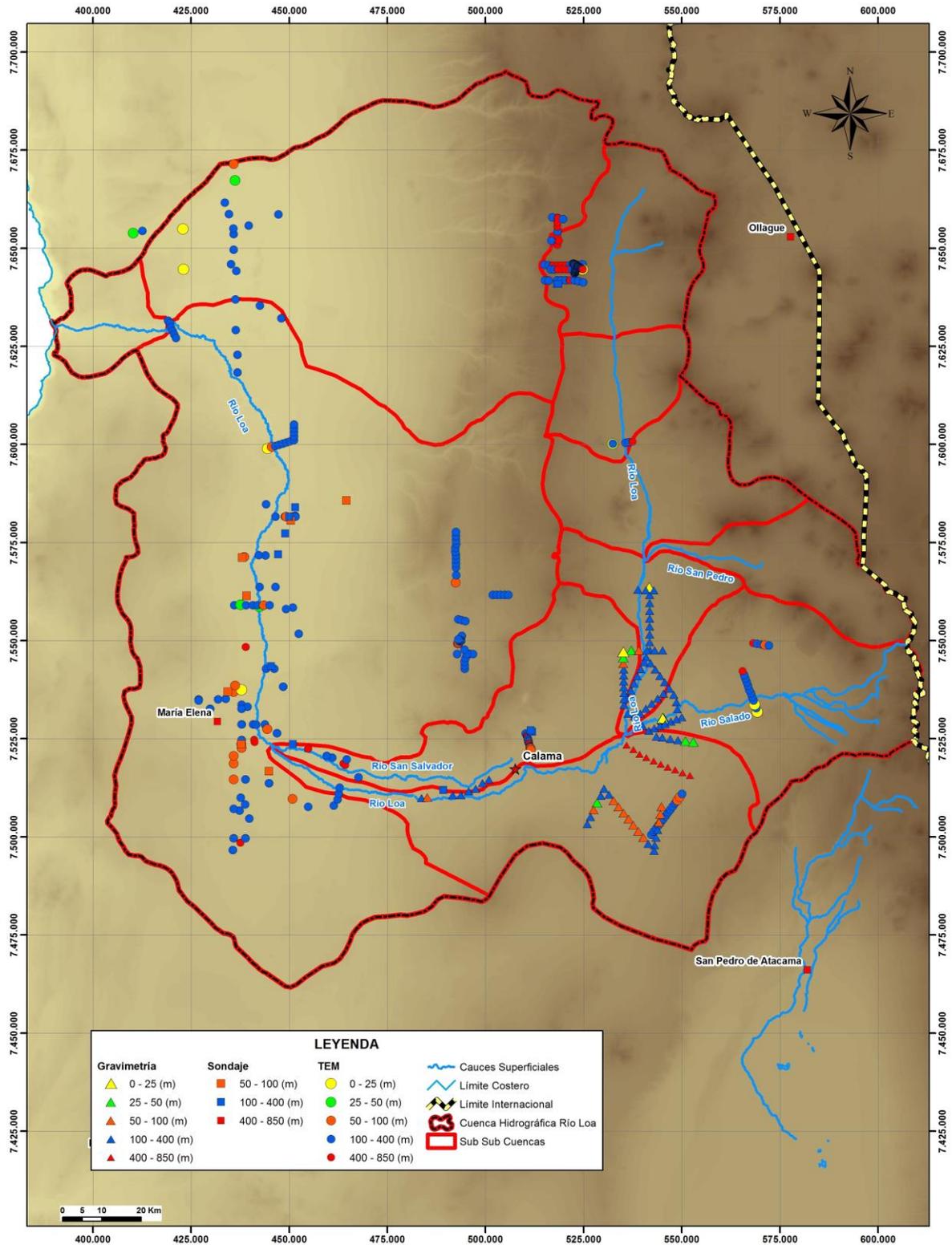
1. La primera aproximación a los límites del sector acuífero corresponde a reconocer las formaciones geológicas que presentan mejores condiciones para albergar un acuífero, es decir aquellas conformadas por materiales detríticos de alta a media permeabilidad. Esto corresponde a lo realizado en el acápite 4.2.4.1, que presenta sus resultados en la Figura 4.2-7.
2. Se delimitan las zonas donde se estima el contacto roca - relleno en base al supuesto de que éste se encuentra bajo los sectores con pendiente igual o superior a 0,15. Utilizando la información topográfica es posible generar un mapa de pendientes para toda la cuenca del río Loa, desde donde se diferencian aquellas zonas con pendientes mayores y menores a 0,15. La nueva delimitación se presenta en la Figura 4.2-8.
3. Los puntos anteriores permitieron la delimitación superficial de los sectores acuíferos por medio de dos criterios diferentes, los cuales a continuación deben ser unificados. Se define que los sectores con presencia de acuíferos son aquellos donde la geología tiene capacidad de albergar aguas subterráneas y donde las pendientes son menores a 0,15. Por lo tanto los resultados de los puntos anteriores se superponen de manera gráfica y la nueva delimitación corresponde a las zonas donde se cumplan ambos criterios.
4. Por último, se debe verificar la delimitación contrastándola con información de basamento obtenida desde estudios geofísicos o pozos de sondaje. Como se mencionó en el acápite 4.2.4.2, se clasifican los antecedentes que presenten valores de profundidad del basamento y se distribuyen geográficamente de acuerdo a sus coordenadas como muestra la Figura 4.2-9. Luego, se verifica que estos puntos con información se ubiquen dentro de los límites y sean acordes con la delimitación acuífera realizada.

Como resultado de esta metodología se obtiene la delimitación de los acuíferos que se presenta en la Figura 4.2-10.

Figura 4.2-8 Separación de Zonas por Pendiente del Terreno

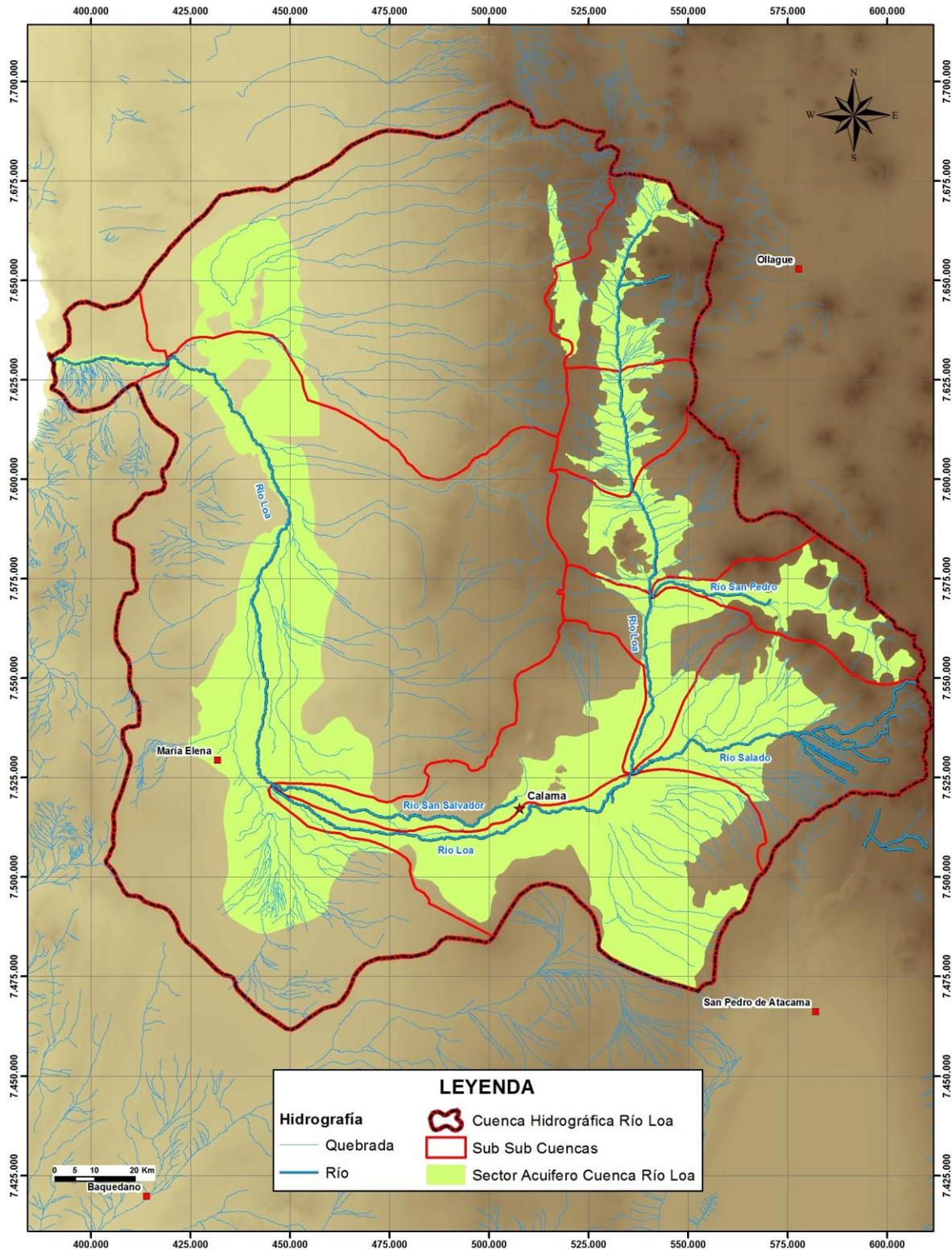
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2-9 Información de Profundidad de Basamento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2-10 Delimitación Sector Acuífero Cuenca Río Loa



Fuente: Elaboración Propia

Parámetros Hidráulicos

Los antecedentes dan cuenta de la estimación de tres parámetros hidráulicos: transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento. En la determinación de estos valores para cada uno de los sectores acuíferos de la cuenca del río Loa, se distribuyeron, de acuerdo a sus coordenadas geográficas, los pozos y sondajes que cuentan con esta información. De esta forma se elaboró la Figura 4.2-11, donde se presentan los puntos con estimación de algún parámetro hidráulico, con la cual fue posible asignar valores de transmisividad, permeabilidad o coeficiente de almacenamiento a los distintos sectores acuíferos.

Finalmente la información se resume en el Cuadro 4.2-2, donde se presenta el rango de valores para los parámetros hidráulicos estimados en cada sector acuífero.

Cuadro 4.2-1 Parámetros Hidráulicos por Sector Acuífero

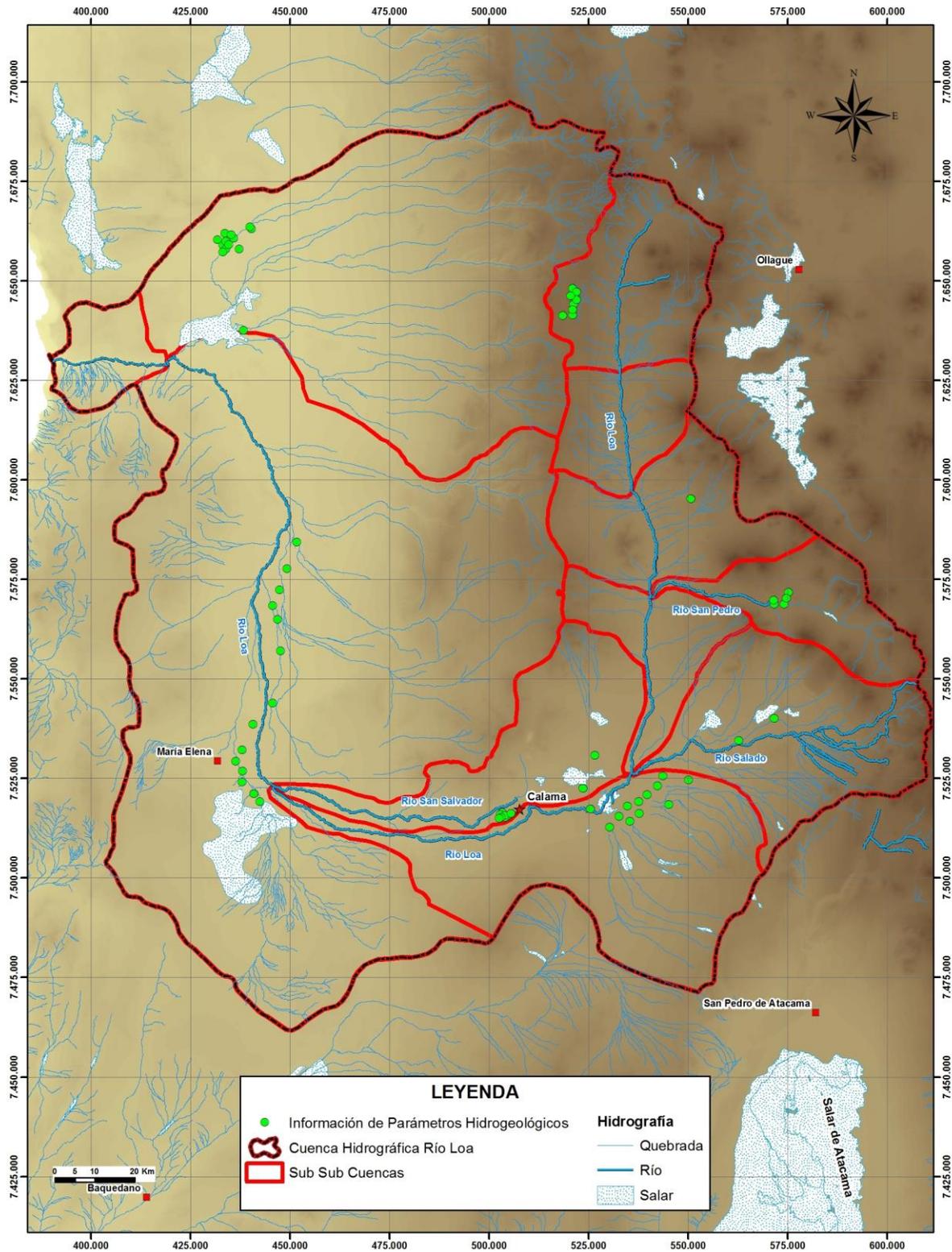
Sector Acuífero	Transmisividad (m ² /d)	Permeabilidad (m/d)	Coficiente de Almacenamiento
	Rango	Rango	Rango
Pampa Puno	2 - 7.500	-	-
Loa Aguas Arriba Embalse Conchi	222 - 266	-	-
San Pedro de Inacaliri	3 - 85.436	1 - 380	0,00076 - 0,34
Río Salado	565 - 2710	6 - 31	0,00061 - 0,018
Calama	19,4 - 250	0,017 - 41	0,0002 - 0,02
Pampa Llalqui	-	0,0015 - 309,3	0,00003 - 0,69
Salar de Miraje	38,4 - 122	0,9 - 4,3	0,03 - 0,036
Salar de Llamara	6 - 1.500	0,1 - 11,6	0,12 - 0,30
Loa desde María Elena a Quillagua	13-60,5	0,8 - 0,9	0,01-0,05
Loa desde Quillagua a Desembocadura	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia

Niveles de Agua

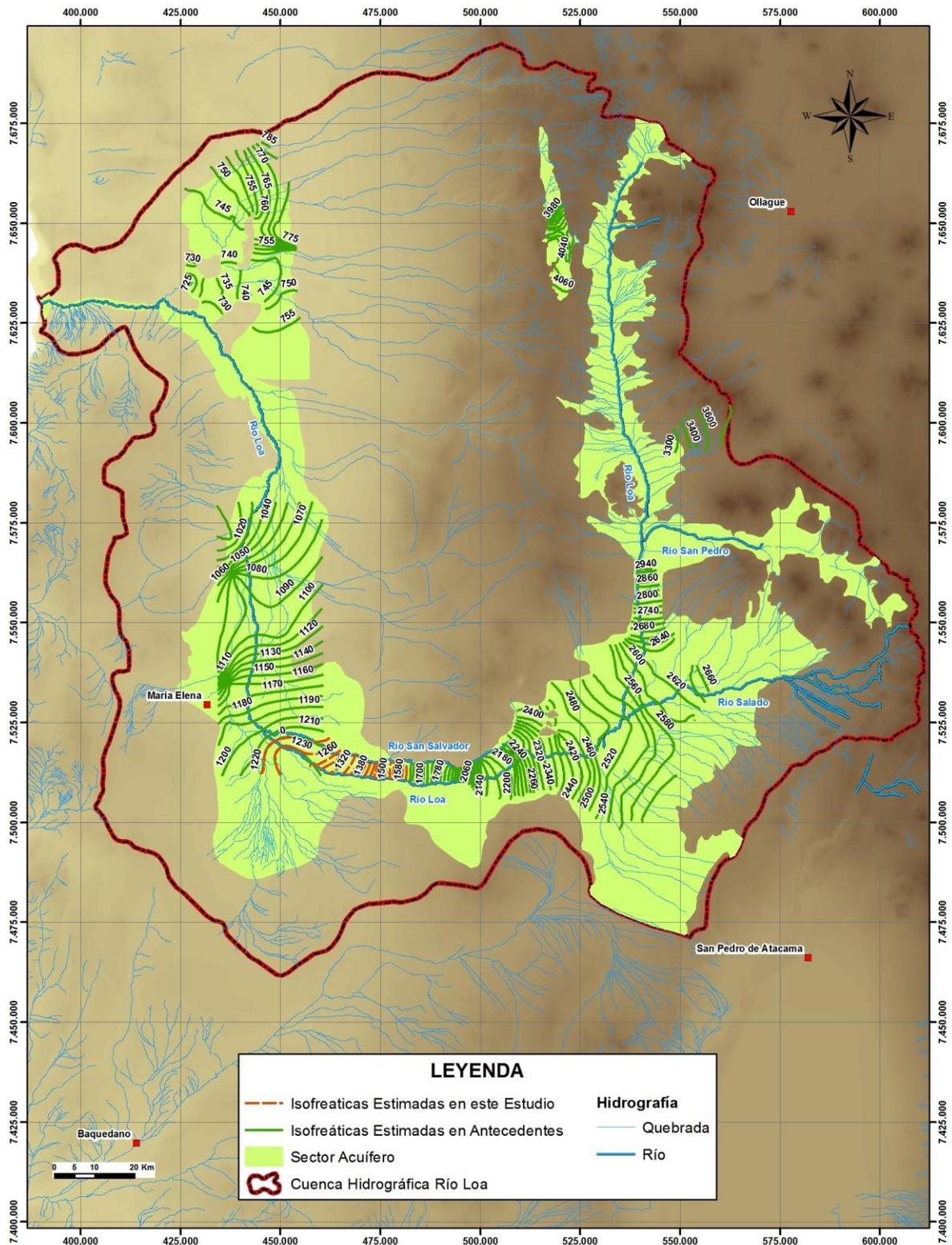
La profundidad a la cual se encuentra el agua subterránea de la cuenca del río Loa queda representada a través de las curvas isofreáticas existentes para los sectores de Pampa Puno, Quebrada Polapi, Calama, María Elena y Salar de Llamara, las que se presentan en la Figura 4.2-12. Con el objetivo de dar una continuidad de flujo subterráneo entre los sectores de Calama y María Elena, se estimaron curvas isofreáticas en base a los valores y pendientes que presentaban cada uno de ellos.

Figura 4.2-11 Información de Parámetros Hidrogeológicos



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2-12 Información de Niveles Freáticos



Fuente: Elaboración Propia

Singularidades Hidrogeológicas

Dentro de la cuenca del río Loa se identifican singularidades hidrogeológicas tales como zonas de afloramiento y elementos que constituyen condiciones de borde o fronteras del sistema.

Zonas de Afloramiento: por medio de un análisis a las estaciones fluviométricas de la DGA y al conocimiento de la zona de este consultor, se reconocen como zonas de afloramiento los sectores de Lequena y Quinchamale, correspondientes al Loa Alto, río Salado en Turi, río Loa en Angostura, río San Salvador, río Loa aguas abajo de Calama, río Loa en Quillagua y quebrada Amarga.

Condiciones de Borde: se reconoce una desconexión, frente al sistema acuífero de la cuenca del río Loa, de los sectores acuíferos del río San Pedro, por la alta explotación subterránea que presenta, y Pampa Puno.

Fronteras: correspondientes al contacto roca relleno posible de estimar por medio de los resultados de los antecedentes geofísicos y estratigráficos existentes. En los sectores de San Pedro de Inacaliri y río Salado se reconoce falta de información, la cual se sobrelleva delimitando el relleno en base a la pendiente del terreno. Por otra parte, se estima que los acuíferos de Calama y Pampa Llalqui presentarían 3 estratos, de los cuales 2 corresponderían a acuíferos interconectados entre sí.

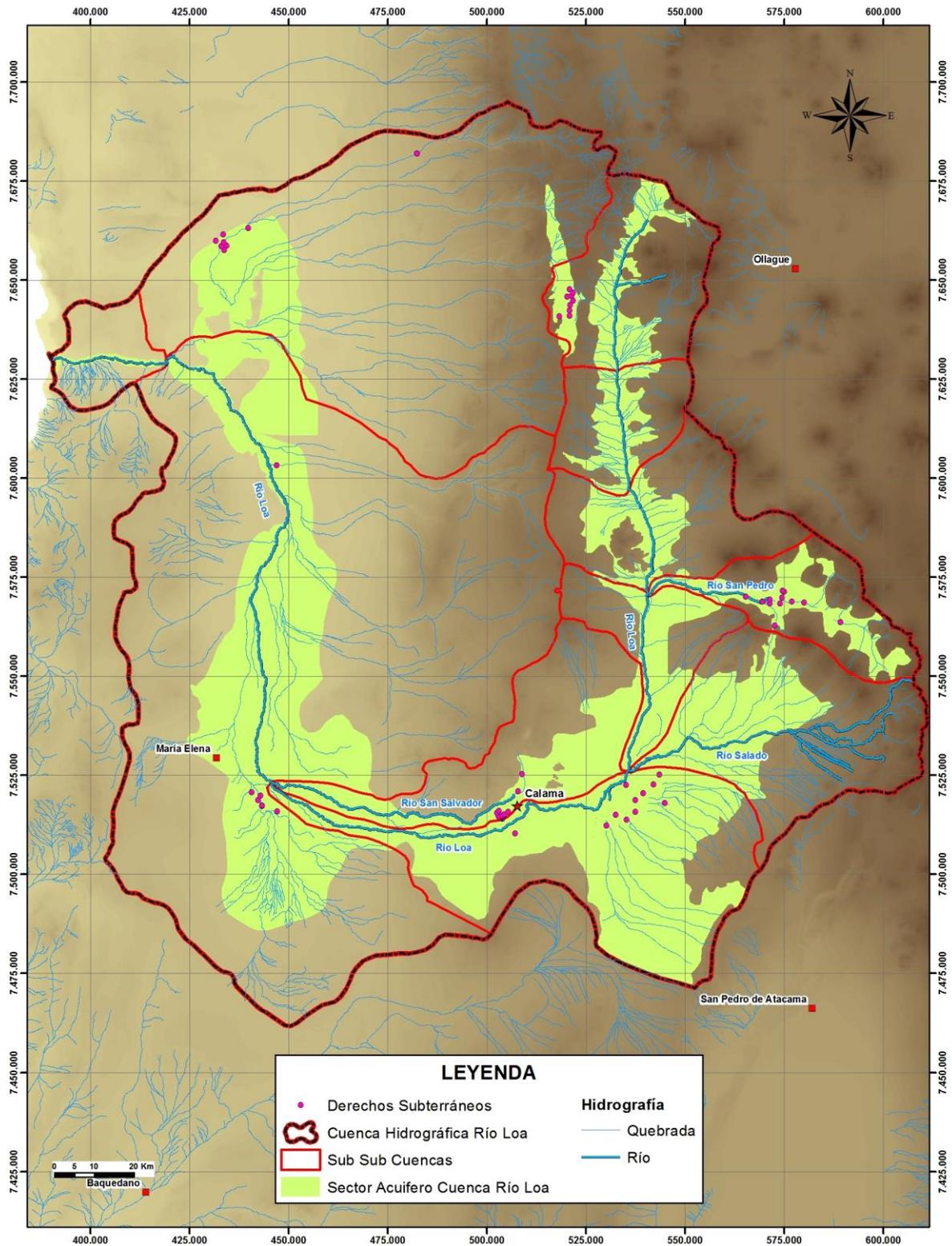
4.2.5. Captaciones Subterráneas

Una vez realizada la sectorización acuífera, se llevó a cabo una revisión de la ubicación de los distintos pozos con derechos de aprovechamiento de agua subterránea dentro de la cuenca, con el fin de analizar la existencia de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común dentro de un mismo sector acuífero. La información recabada y utilizada en este punto se puede consultar en detalle en el Anexo D5.

La Figura 4.2-13 muestra la geometría acuífera, en conjunto con los pozos con derechos de aprovechamiento otorgados, en la que se aprecia la existencia de grupos de pozos, específicamente en los sectores de Pampa Puno, Ojos de San Pedro, Pampa Llalqui, Calama, Salar de Miraje y Salar de Llamara.

La inexistencia de pozos con derechos en otros sectores de la cuenca, da cuenta de la baja importancia hidrogeológica de aquellos sectores, en concordancia a menores valores de permeabilidad, que hacen ineficiente la extracción del recurso subterráneo.

Figura 4.2-13 Pozos con Derechos Subterráneos



Fuente: Elaboración Propia

4.2.6. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común

En base al análisis realizado en los puntos anteriores, se definieron 10 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC):

- SHAC Pampa Puno
- SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi
- SHAC Río San Pedro Inacaliri
- SHAC Río Salado
- SHAC Calama
- SHAC Pampa Llalqui
- SHAC Salar de Miraje
- SHAC Salar de Llamara
- SHAC Loa desde María Elena hasta Quillagua
- SHAC Loa desde Quillagua hasta Desembocadura

A continuación se realizará una descripción de cada uno de ellos, indicando sus principales características.

4.2.6.1. SHAC Pampa Puno

Todos los límites de este sector fueron obtenidos de la referencia REF#15. Según esta referencia, el acuífero de este sector se encuentra desconectado del acuífero del Loa Alto, lo cual puede ser apreciado en la Figura 4.2-14, junto con la delimitación final de este sector.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 110 y 700 m.
- Transmisividad entre 2 y 7.500 m²/d.
- Niveles de agua subterránea entre 3.940 y 4.060 m s.n.m.
- Cuenta con 9 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.2. SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi

Los límites norte, este y oeste de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. Se utilizó como punto de control el Embalse Conchi, por lo que el acuífero en la parte sur quedó limitado por una línea recta en donde se encuentra el embalse. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 136 y 505 m.
- Transmisividad entre 222 y 266 m²/d.
- El único sector que cuenta con información de niveles de agua subterráneas es el de Polapi, donde los niveles están entre 3.300 y 3.700 m s.n.m.
- No cuenta con derechos de agua subterráneas.

4.2.6.3. SHAC San Pedro Inacaliri

Todos los límites de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- No cuenta con información de la profundidad del basamento.
- Transmisividad entre 3 y 85.436 m²/d. permeabilidad entre 1 y 380 m/d y almacenamiento entre 0,00076 y 0,34.
- No cuenta con información de niveles de agua subterránea.
- Cuenta con 14 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.4. SHAC Río Salado

Los límites norte y este de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. Los límites sur y oeste son los límites de la subcuenca del río Salado. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 100 y 510 m.
- Transmisividad entre 565 y 2.710 m²/d, permeabilidad entre 6 a 31 m/d y almacenamiento entre 0,00061 y 0,018.
- Niveles de agua subterránea, estimados entre 2.800 y 3.100 m s.n.m.
- No cuenta con derechos de agua subterráneas.

4.2.6.5. SHAC Calama

Los límites noroeste, oeste y sur de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites y utilizando en forma referencial el acuífero de la referencia REF#28. El límite noreste - suroeste quedó limitado por el borde de la subcuenca del río Salado y límite del acuífero de Pampa Llalqui. Se utilizó como punto de control el Embalse Conchi, por lo que el acuífero en la parte norte quedó limitado por una línea recta en donde se encuentra el embalse. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 33 y 550 m.
- Transmisividad entre 19,4 y 250 m²/d, permeabilidad entre 0,017 y 41 m/d y almacenamiento entre 0,0002 y 0,02.
- Niveles de agua subterránea entre 1.600 y 2.960 m s.n.m.
- Cuenta con 15 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.6. SHAC Pampa Llalqui

Los límites sur, oeste y este de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. El límite noroeste -suroeste quedó limitado por parte del río Loa, hasta el punto donde el acuífero aflora y la parte más hacia el sur de este límite fue definida como una curva perpendicular a las curvas del nivel, desde el punto de afloramiento hasta el contacto roca relleno. El límite norte del acuífero quedó

limitado por el borde de la subcuenca del río Salado. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 36 y 760 m.
- Permeabilidad entre 0,0015 y 309,3 m/d y almacenamiento entre 0,00003 y 0,69.
- Niveles de agua subterránea entre 2.460 y 2.600 m s.n.m.
- Cuenta con 10 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.7. SHAC Salar de Miraje

Los límites sur, este y oeste de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. Además, el límite este fue limitado usando como referencia el límite de la referencia REF#28. El límite norte del acuífero fue limitado por el borde de la subcuenca del río San Pedro y por un punto aguas abajo del último derecho de aguas subterráneas del sector, de donde parten las líneas que lo conectan con el contacto roca - relleno del oeste y con el borde de la subcuenca del río San Pedro. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 55 y 828 m.
- Transmisividad entre 38,4 y 122 m²/d, permeabilidad entre 0,9 y 4,3 m/d y almacenamiento entre 0,03 y 0,036.
- Niveles de agua subterránea, estimados entre 1.200 y 1.580 m s.n.m.
- Cuenta con 6 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.8. SHAC Salar de Llamara

Todos los límites de este sector fueron obtenidos de la referencia REF#23. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 10 y 370 m.
- Transmisividad entre 6 y 1.500 m²/d, permeabilidad 0,1 y 11,6 m/d y almacenamiento entre 0,12 y 0,30.
- Niveles de agua subterránea entre 720 y 780 m s.n.m.
- Cuenta con 9 derechos de agua subterráneas.

4.2.6.9. SHAC Loa desde María Elena hasta Quillagua

Los límites este y oeste de este sector fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. El límite sur quedó definido por el límite norte de la cuenca del Salar de Miraje y el límite norte quedó definido por una línea recta entre la localidad de Quillagua y el único derecho de aguas subterráneas del sector. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- Profundidad del basamento entre 24 y 444 m.

- Transmisividad entre 13 y 60,5 m²/d, permeabilidad entre 0,8 y 0,9 m/d y almacenamiento entre 0,01 y 0,05.
- Niveles de agua subterránea entre 1.000 y 1.200 m s.n.m.
- Cuenta con 1 derecho de agua subterránea.

4.2.6.10. SHAC Loa desde Quillagua hasta Desembocadura

Los límites norte, sur y noroeste-sureste del lado occidental del río Loa, fueron obtenidos mediante la metodología para cuencas sin información de límites. El límites noroeste – sureste del lado oriental del río Loa, quedó definido por los límites al sur del sector de Llamara. El límite más hacia el sur quedó definido por la misma línea recta del límite norte del sector Loa desde María Elena hasta Quillagua. La delimitación final de este sector se puede apreciar en la Figura 4.2-14.

Otras características relevantes de este sector son:

- No cuenta con información de profundidad del basamento, parámetros hidrogeológicos, niveles de agua subterránea o derechos de aguas subterráneas.

4.2.7. Vínculos

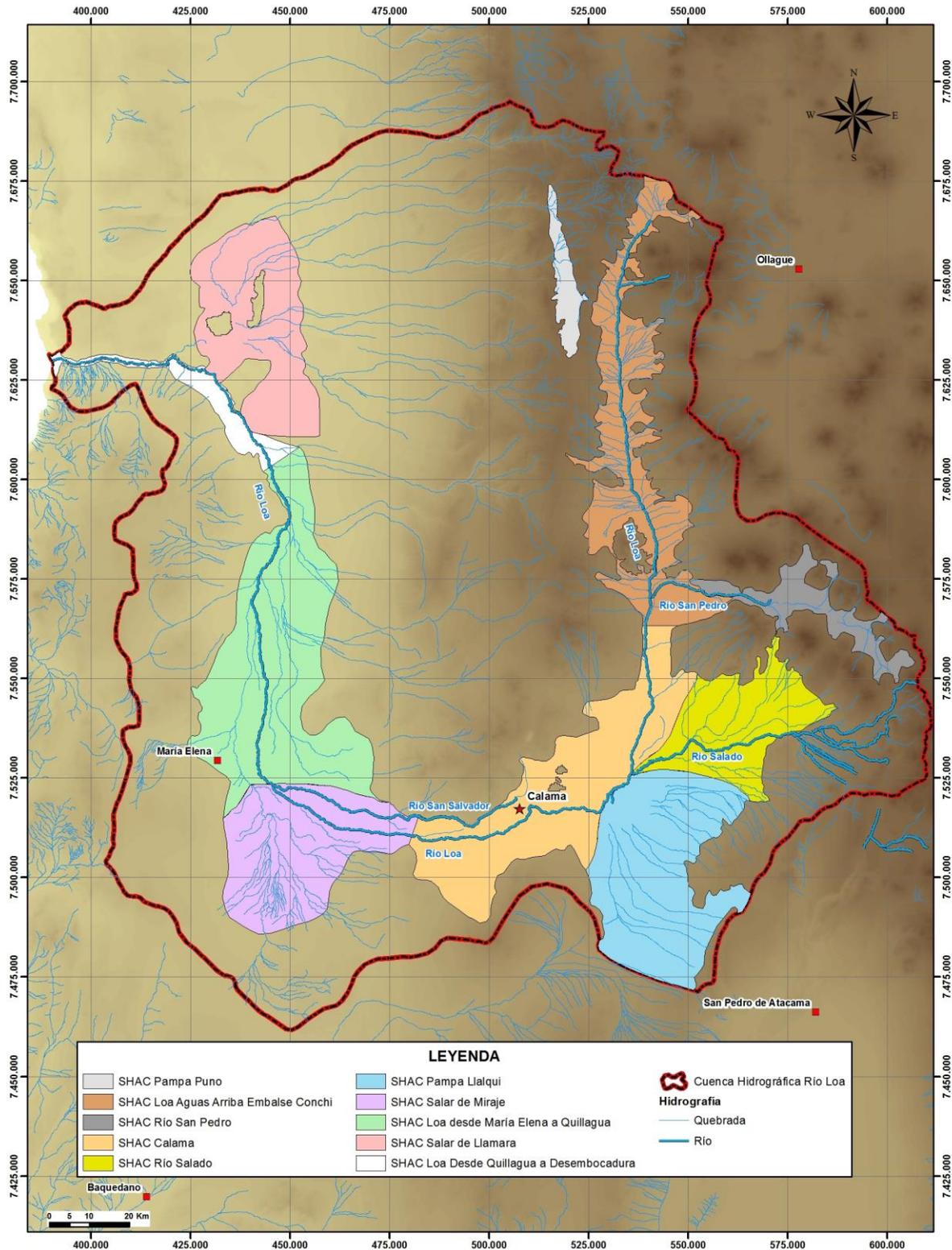
Los vínculos asociados a la sectorización se refieren a la definición de la relación existente entre ellos, específicamente a la conexión en términos de caudal.

Comenzando desde aguas arriba, el caudal saliente del SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi es aportante al SHAC Calama, al igual que el SHAC Pampa Llalqui, el cual recibe el aporte del SHAC Río Salado. La salida subterránea del SHAC de Calama es aportante al SHAC Salar de Miraje, que a su vez aporta al SHAC Loa desde María Elena hasta Quillagua, continuando hacia el SHAC Loa desde Quillagua a Desembocadura. Este último recibe aportes desde el SHAC Salar de Llamara en las cercanías de Quillagua y Quebrada Amarga.

Los SHAC Pampa Puno y San Pedro Inacaliri no han sido listados pues se encuentran desconectados del resto de la cuenca. El primero de ellos posee un flujo subterráneo en la dirección sur-norte que aflora en la Quebrada Sacapunta, generando una conexión superficial con el SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi, mientras que el segundo se encuentra desconectado tanto superficial como subterráneamente debido a la sobreexplotación existente.

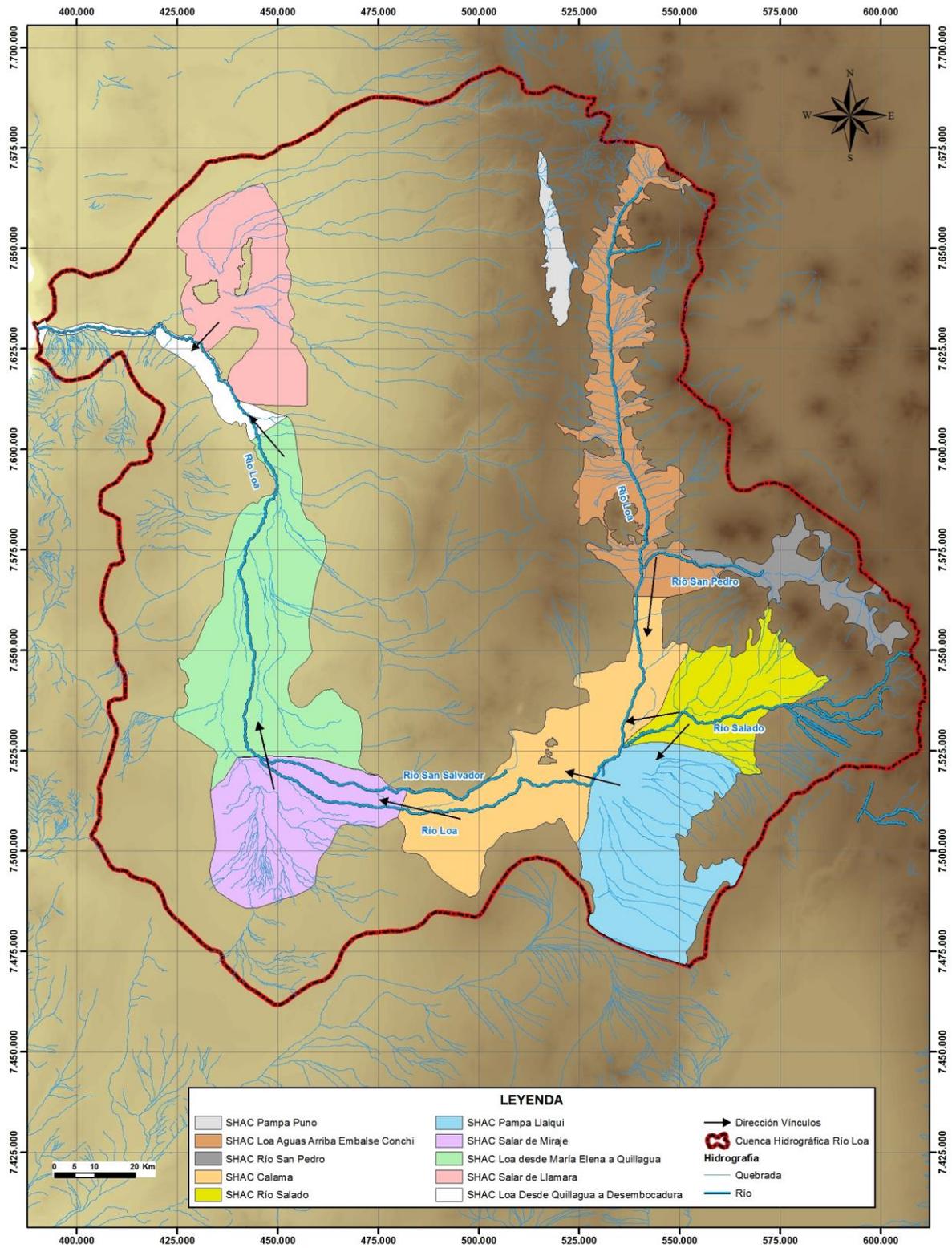
La Figura 4.2-15 muestra con mayor claridad las direcciones de flujo que involucran los vínculos existentes.

Figura 4.2-14 **Sistemas Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común**



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2-15 Vínculos SHAC



Fuente: Elaboración Propia

4.2.8. Interpretación de la Profundidad de Basamento

A continuación se presentan las curvas de isoprofundidad de basamento, estimadas en función de toda la información disponible dentro de la superficie delimitada por la sectorización de acuíferos. Los sectores de Loa Alto, San Pedro de Inacaliri y último tramo antes de Desembocadura no fueron considerados debido a la poca o nula información disponible en esos sectores.

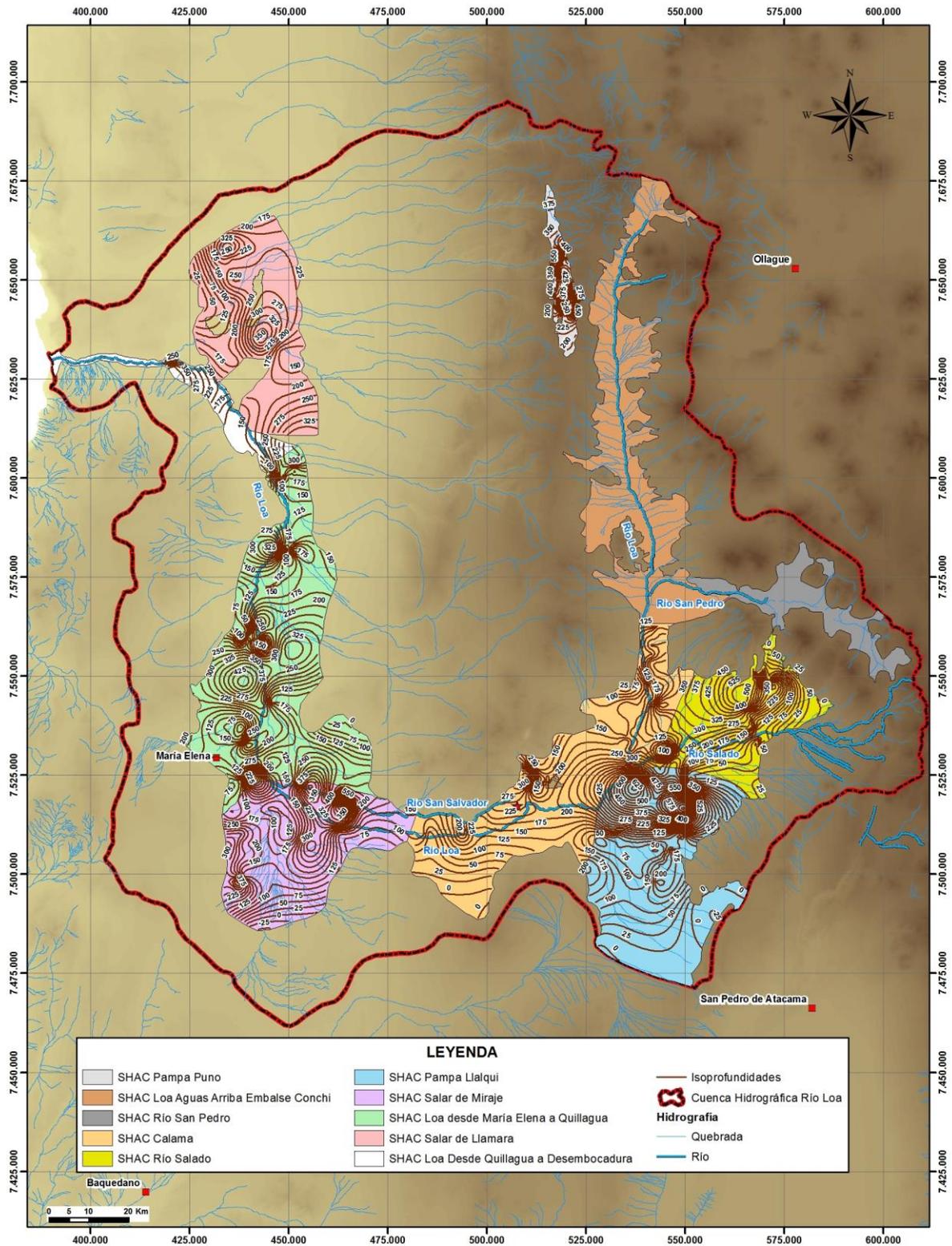
En el caso del Loa Alto, la REF#29 generó una gran cantidad de información en base a geofísica gravimétrica y TEM, con lo cual fue generada una superficie de basamento. Sin embargo, esta información no ha podido ser utilizada en el presente informe, debido a que el detalle de aquella información no se encuentra disponible.

En el caso de San Pedro de Inacaliri, la cuenca se encuentra estudiada por Codelco, cuya información es de carácter privado.

Finalmente, en el último tramo del río Loa antes de Desembocadura no se dispone de información hacia aguas abajo de quebrada Amarga, por lo que se decidió dejar fuera del presente análisis ese sector.

Es importante destacar que esta interpretación corresponde sólo a una aproximación, necesitándose una mayor densidad de información para obtener un producto de mayor precisión.

Figura 4.2-16 Profundidad de Basamento



Fuente: Elaboración Propia

5. ACTUALIZACIÓN MODELO INTEGRADO

El modelo integrado corresponde a la modelación del sistema hídrico superficial en conexión con el subterráneo de la cuenca del río Loa por medio del programa MAGIC, el cual es actualizado a raíz de los resultados y nueva información obtenida en el desarrollo del presente estudio. Las actividades realizadas en el desarrollo de esta actualización se detallan en los puntos siguientes.

5.1. Modelo Integrado 2013

A continuación se describen las principales características de la modelación, correspondiente a la REF#31, realizada mediante MAGIC para la cuenca del río Loa durante el periodo comprendido por los años hidrológicos 1974-1975 y 2012-2013.

5.1.1. Nodos

Los elementos que interactúan en la cuenca del río Loa son representados por parte del programa MAGIC mediante nodos. El modelo se construye en base a 119, los cuales pueden presentar una o más características como se detalla en el Cuadro 5.1-1.

Cuadro 5.1-1 Nodos Definidos en Modelación MAGIC 2013

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-001	EF	534.949	7.605.229	Loa
NO-002	CP	535.115	7.603.695	Loa
NO-003	CP	551.545	7.597.550	Loa
NO-004	CP	557.485	7.596.545	Loa
NO-005	CP	558.250	7.595.456	Loa
NO-006	Q - ZR	541.965	7.580.941	Loa
NO-007	AF	541.495	7.578.968	Loa
NO-008	CP	541.455	7.577.335	Loa
NO-009	Q	596.815	7.559.626	San Pedro
NO-010	EF	600.440	7.565.684	San Pedro
NO-011	CP	600.232	7.565.330	San Pedro
NO-012	CP	596.571	7.563.889	San Pedro
NO-013	C	595.081	7.562.215	San Pedro
NO-014	Q	587.339	7.575.618	San Pedro
NO-015	CP	586.697	7.575.396	San Pedro
NO-016	C	581.932	7.567.650	San Pedro
NO-017	AF - ZR	567.037	7.569.313	San Pedro
NO-018	EF	565.242	7.570.373	San Pedro
NO-019	EF	550.347	7.572.730	San Pedro
NO-020	CP	550.047	7.573.027	San Pedro
NO-021	CP	549.593	7.573.344	San Pedro
NO-022	EF	548.285	7.573.604	San Pedro
NO-023	C	540.342	7.570.467	Loa

Cuadro 5.1-1 Nodos Definidos en Modelación MAGIC 2013

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-024	EF	540.243	7.569.856	Loa
NO-025	EF	540.331	7.569.426	Loa
NO-026	EF	540.485	7.568.732	Loa
NO-027	EM	539.203	7.564.272	Loa
NO-028	EF - CP	539.131	7.564.050	Loa
NO-029	Q - RE	540.920	7.544.792	Loa
NO-030	B	539.829	7.540.928	Loa
NO-031	B	539.792	7.540.855	Loa
NO-032	B	539.061	7.539.472	Loa
NO-033	B	539.010	7.539.423	Loa
NO-034	B	538.729	7.538.412	Loa
NO-035	B	538.443	7.537.894	Loa
NO-036	B - ZR	537.142	7.534.779	Loa
NO-037	B	535.890	7.530.855	Loa
NO-038	B	535.801	7.529.721	Loa
NO-039	Q - AF	601.278	7.542.041	Salado
NO-040	CP	601.040	7.541.946	Salado
NO-041	Q - ZR	601.825	7.544.526	Salado
NO-042	C	600.715	7.542.058	Salado
NO-043	CP	600.590	7.541.973	Salado
NO-044	RE	598.089	7.540.366	Salado
NO-045	Q	588.560	7.536.114	Salado
NO-046	EF	588.008	7.536.320	Salado
NO-047	CP	587.944	7.536.403	Salado
NO-048	B	587.915	7.536.435	Salado
NO-049	Q	586.235	7.538.011	Salado
NO-050	Q - AF	601.057	7.540.571	Salado
NO-051	CP	600.872	7.540.530	Salado
NO-052	Q	584.847	7.535.169	Salado
NO-053	CP	584.522	7.535.399	Salado
NO-054	C - ZR	582.640	7.537.191	Salado
NO-055	Q - AF	584.144	7.534.191	Salado
NO-056	RE	583.034	7.534.925	Salado
NO-057	CP	582.416	7.535.247	Salado
NO-058	C	581.046	7.535.985	Salado
NO-059	EF	578.009	7.536.077	Salado
NO-060	Q	585.176	7.526.543	Salado
NO-061	B	583.879	7.527.297	Salado
NO-062	Q	580.084	7.533.334	Salado

Cuadro 5.1-1 Nodos Definidos en Modelación MAGIC 2013

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-063	C - ZR	578.961	7.533.950	Salado
NO-064	C	576.110	7.536.365	Salado
NO-065	B	570.224	7.536.124	Salado
NO-066	EF - AF - ZR	567.487	7.534.983	Salado
NO-067	B	573.918	7.541.524	Salado
NO-068	B	573.915	7.541.516	Salado
NO-069	B	575.579	7.551.110	Salado
NO-070	B	570.995	7.556.199	Salado
NO-071	B	570.930	7.555.861	Salado
NO-072	Q - ZR	545.228	7.529.902	Salado
NO-073	EF	536.670	7.526.151	Salado
NO-074	C - ZR	535.504	7.526.066	Loa
NO-075	AF	528.283	7.517.445	Loa
NO-076	Q	517.523	7.516.635	Loa
NO-077	B	516.349	7.516.661	Loa
NO-078	B	514.778	7.516.112	Loa
NO-079	EF	512.399	7.517.311	Loa
NO-080	EF - ZR	511.256	7.517.865	Loa
NO-081	B	510.154	7.517.946	Loa
NO-082	CP	510.030	7.517.611	Loa
NO-083	B	510.204	7.516.335	Loa
NO-084	B	510.121	7.516.156	Loa
NO-085	B - ZR	507.926	7.514.058	Loa
NO-086	B	507.298	7.513.684	Loa
NO-087	B	506.574	7.513.033	Loa
NO-088	B	504.385	7.511.831	Loa
NO-089	EF - ZR	502.227	7.511.174	Loa
NO-090	EF	500.936	7.510.768	Loa
NO-091	Q	457.190	7.515.325	Loa
NO-092	CP	454.320	7.517.567	Loa
NO-093	Q - AF	503.253	7.517.933	Loa
NO-094	B	503.200	7.517.924	Loa
NO-095	DP	504.276	7.516.828	Loa
NO-096	C - ZR	502.684	7.517.839	Loa
NO-097	EF - AF	499.822	7.513.595	Loa
NO-098	CP	499.773	7.513.601	Loa
NO-099	CH	498.108	7.513.249	Loa
NO-100	DP	496.353	7.513.225	Loa
NO-101	Q - AF	446.081	7.523.055	Loa
NO-102	CP	445.667	7.523.182	Loa

Cuadro 5.1-1 Nodos Definidos en Modelación MAGIC 2013

Nodo	Elemento	Coordenadas WGS84 19S		Río
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-103	C - AF	445.628	7.523.191	Loa
NO-104	EF	445.344	7.523.365	Loa
NO-105	CP	441.757	7.528.313	Loa
NO-106	EF	441.738	7.528.698	Loa
NO-107	Q - AF	448.524	7.595.365	Loa
NO-108	EF	446.354	7.598.565	Loa
NO-109	B	446.345	7.598.591	Loa
NO-110	B	445.334	7.602.523	Loa
NO-111	EF	444.473	7.604.611	Loa
NO-112	EF - ZR	444.430	7.605.359	Loa
NO-113	AF	435.583	7.617.312	Loa
NO-114	Q	420.943	7.630.700	Loa
NO-115	Q - AF	421.031	7.631.322	Loa
NO-116	CP	420.955	7.631.135	Loa
NO-117	C	420.749	7.631.106	Loa
NO-118	Q - AF	392.936	7.629.993	Loa
NO-119	EF	390.619	7.630.039	Loa

Nota: Nomenclatura utilizada: AF - Afloramiento; B - Bocatoma; CP - Captación Puntual; DP - Descarga Puntual; EF - Estación Fluviométrica; Q - Aporte Subcuenca; ZR - Derrame Zona de Riego.

Fuente: REF#31.

5.1.2. Tramos de Río

Corresponden a la conexión entre los nodos y representan los cauces superficiales de la cuenca. En el Cuadro 5.1-2 se presentan los parámetros que definen a cada uno de ellos.

Cuadro 5.1-2 Parámetros Tramos de Río Modelación MAGIC 2013

Río	Nodo Inicio	Nodo Fin	Acuífero	Largo (Km)	Ancho (m)	Espesor (m)	K (m/d)	Coef. Manning	Pend. Media
Río Loa	NO-001	NO-119	AC-01 AC-04 AC-05 AC-08	342	16	28	5,0	0,035	0,016
Río San Pedro	NO-010	NO-023	AC-01 AC-02	65	4	10	8,9	0,035	0,029
Río Toconce	NO-039	NO-058	AC-03	31	8	4	5,0	0,035	0,047
Río Hojalar	NO-050	NO-054	AC-03	20	10	3	3,8	0,035	0,046
Río Salado	NO-055	NO-074	AC-03	88	12	9	5,0	0,035	0,023
Río Curti	NO-062	NO-063	AC-03	1	10	3	5,0	0,035	0,014
Río Caspana	NO-060	NO-064	AC-03	14	10	3	5,0	0,035	0,036
Río San Salvador	NO-093	NO-103	AC-05 AC-08	70	8	10	6,0	0,035	0,047
Quebrada Colana	NO-014	NO-016	AC-02	10	4	10	4,9	0,035	0,080
San Pedro	NO-009	NO-013	AC-02	3	4	10	4,9	0,035	0,029
Quebrada Cupo	NO-070	NO-072	AC-03	37	8	8	5,0	0,035	0,037
Quebrada Turi Paniri	NO-067	NO-072	AC-03	31	7	17	5,0	0,035	0,027

Fuente: REF#31.

5.1.3. Acuíferos

La interacción entre el sistema superficial y subterráneo se realiza mediante los nodos y tramos de río ya descritos junto a la definición de sectores acuíferos que corresponden a lo que muestra el Cuadro 5.1-3.

Cuadro 5.1-3 Acuíferos Modelación MAGIC 2013

Código	Nombre
AC-01	Quinchamale
AC-02	Ojos de San Pedro
AC-03	Río Salado
AC-04	Pampa Llalqui
AC-05	Calama
AC-06	María Elena
AC-07	Salar de Llamara
AC-08	Loa a Desembocadura

Fuente: REF#31.

Luego de la definición de los sectores acuíferos, se deben representar los flujos subterráneos por medio de vínculos entre ellos, tal como se presenta en el Cuadro 5.1-4.

Cuadro 5.1-4 Conectividad Acuíferos Modelación MAGIC 2013

Código	Acuífero	Nombre	Objeto Final	Nombre
QZS-01	AC-01	Quinchamale	AC-05	Calama
QZS-02	AC-02	Ojos de San Pedro	AC-01	Quinchamale
QZS-03	AC-03	Río Salado	AC-04	Pampa Llalqui
QZS-04	AC-04	Pampa Llalqui	AC-05	Calama
QZS-05	AC-05	Calama	AC-08	Loa a Desembocadura
QZS-06	AC-06	María Elena	AC-08	Loa a Desembocadura
QZS-07	AC-07	Salar de Llamara	AC-08	Loa a Desembocadura

Fuente: REF#31.

5.1.4. Zonas de Riego

La demanda por riego que presenta la cuenca se refleja en la definición de las zonas de riego. Estas se definen como la superficie cultivable en cada periodo de tiempo, a las que se les asocian diferentes tipos de cultivo y métodos de riego. Las zonas de riego asignadas al modelo se presentan en el Cuadro 5.1-5.

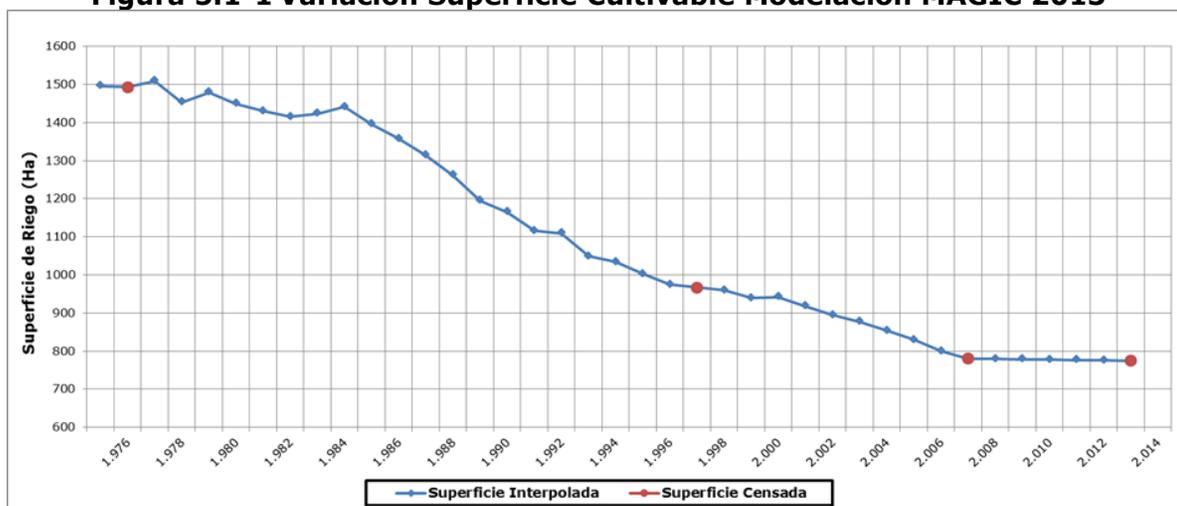
Cuadro 5.1-5 Zonas de Riego Modelación MAGIC 2013

Código	Acuífero	Superficie 2013 (Ha)		
		Cultivada	No Cultivada	Total
ZR-01	AC-05	92	73	165
ZR-02	AC-05	115	99	214
ZR-03	AC-03	10	34	44
ZR-04	AC-03	22	59	81
ZR-05	AC-03	4	9	13
ZR-06	AC-03	51	142	193
ZR-07	AC-03	4	7	11
ZR-08	AC-03	13	44	57
ZR-09	AC-05	20	62	82
ZR-10	AC-05	256	262	518
ZR-11	AC-05	182	942	1.124
ZR-12	AC-05	6	2	8
ZR-13	AC-08	1	151	152
ZR-14	AC-01	1	142.809	142.810
ZR-15	AC-02	1	27.499	27.500
ZR-16	AC-03	1	79.799	79.800

Fuente: REF#31.

El modelo consideró la creación de 3 zonas de riego (ZR-14, ZR-15 y ZR-16), con una superficie equivalente a los acuíferos asignados, con la finalidad de generar recarga por precipitación en la zona alta de la cuenca.

Las superficies de cada zona de riego debieron ser generadas de forma anual para el periodo completo de modelación, existiendo información de 3 Censos Agropecuarios y una actividad en terreno realizada el año 2013 por personal de Knight Piésold. Para completar la estadística se consideraron las variaciones históricas del Producto Interno Bruto (PIB) Silvoagropecuario regional, estimando que se encuentra en directa relación con la solidez de la actividad. La superficie de cultivo anual durante el periodo de modelación utilizada es la que muestra la Figura 5.1-1.

Figura 5.1-1 Variación Superficie Cultivable Modelación MAGIC 2013

Fuente: REF#31.

5.1.5. Canales de Regadío

Los canales conducen el recurso hídrico desde los cauces hacia las zonas de riego con el objetivo de satisfacer su demanda. La representación de la red de canales en el modelo queda dada por aquellos que se presentan en el Cuadro 5.1-6, en la cual se integra la información del nodo representativo y el largo total de conducción.

Cuadro 5.1-6 Canales Modelación MAGIC 2013

Código	Nombre	Nodo	Largo (m)
CA-001	Canal Buen Retiro	NO-030	1.826
CA-002	Canal San Antonio	NO-031	1.519
CA-003	Canal Los Ramírez	NO-032	1.127
CA-004	Canal Quilchire	NO-033	10.706
CA-005	Canal Los Perales	NO-034	591
CA-006	Canal Pona	NO-035	3.379
CA-007	Canal Grande	NO-036	6.312
CA-008	Canal La Banda	NO-037	2.705
CA-009	Canal El Pueblo	NO-038	4.080
CA-010	Canal Toconce	NO-048	5.070
CA-011	Canal Caspana	NO-061	8.112
CA-012	Canal Ayquina	NO-065	1.167
CA-013	Canal El Trigal	NO-067	485
CA-014	Canal Puente	NO-068	4.106
CA-015	Canal Paniri	NO-069	150
CA-016	Canal Inga	NO-070	3.110
CA-017	Canal Mesón	NO-071	2.530
CA-018	Canal Yalquincha 2	NO-077	5.674
CA-019	Canal Yalquincha 1	NO-078	4.809
CA-020	Canal Tronco	NO-081	5.135
CA-021	Canal Unificado Banda Radic Topater	NO-083	3.467
CA-022	Canal Lay Lay	NO-084	3.106
CA-023	Canal Núñez	NO-085	4.772
CA-024	Canal Chunchuri Bajo	NO-086	4.051
CA-025	Canal La Prensa	NO-087	2.584
CA-026	Canal Dupont	NO-088	2.337
CA-027	Canal río San Salvador	NO-094	795
CA-028	Canal 1	NO-109	10.227
CA-029	Canal 2	NO-110	4.888

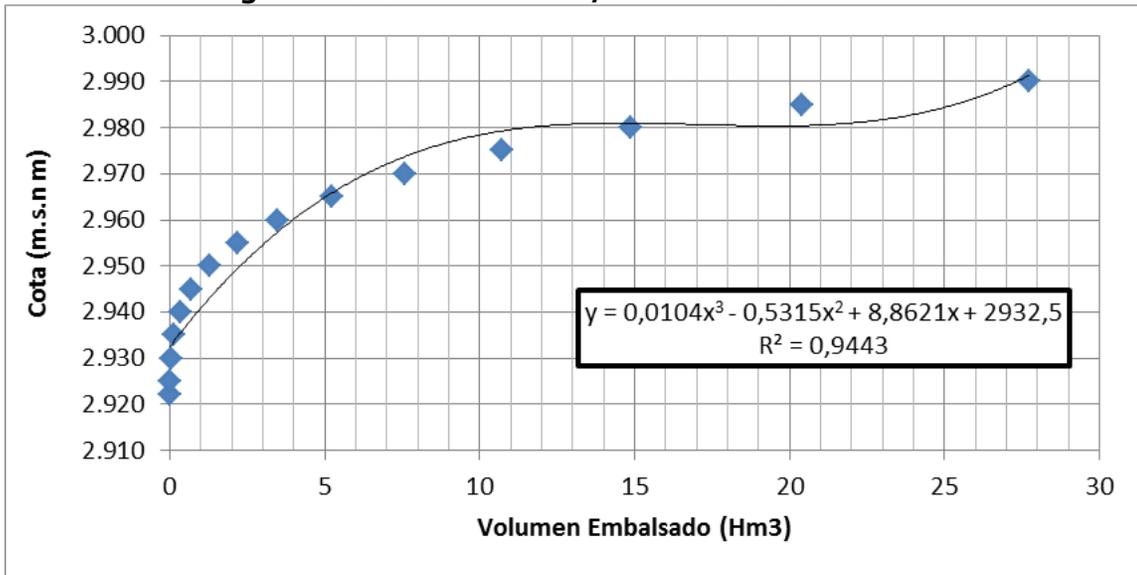
Fuente: REF#31.

5.1.6. Embalse Conchi

El embalse cumple con la regulación del caudal del río Loa, el cual es utilizado en satisfacer la demanda por riego en los sectores de Lasana, Chiu-Chiu y Calama. La información utilizada para su representación en el modelo corresponde a:

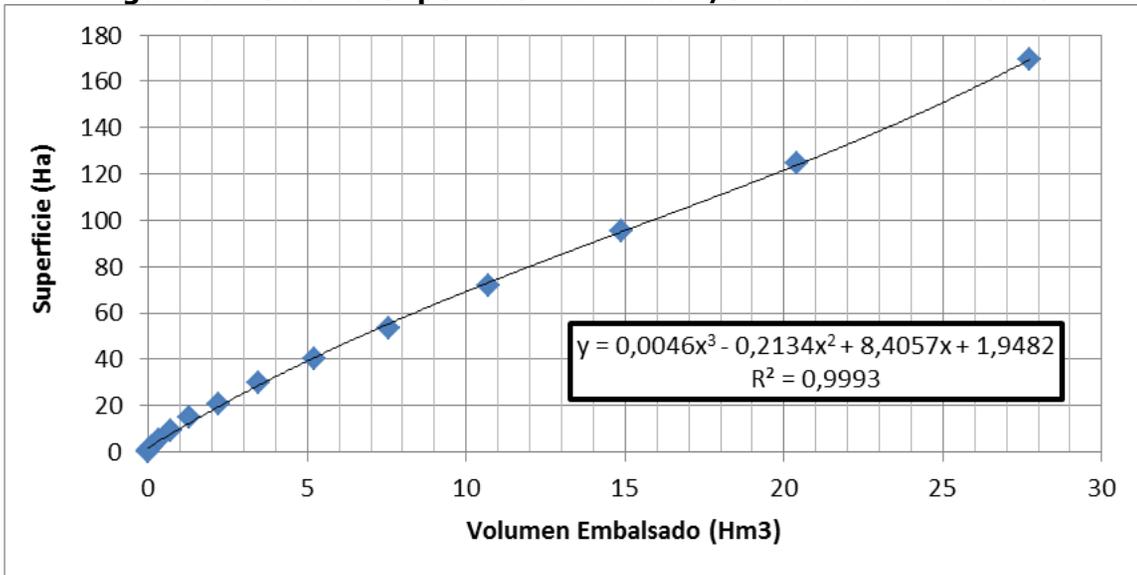
- Curvas de Superficie y Cota vs. Volumen embalsado, cuyas expresiones cúbicas presentan una excelente correlación como se observa en las Figuras 5.1-2 y 5.1-3.
- Volumen muerto y volumen máximo de embalsamiento.
- Tasas de evaporación a nivel mensual, obtenidas de la estación meteorológica Conchi Embalse.

Figura 5.1-2 Curva Cota v/s Volumen Embalsado



Fuente: REF#31.

Figura 5.1-3 Curva Superficie Inundada v/s Volumen Embalsado



Fuente: REF#31.

5.1.7. Pozos de Bombeo

Los pozos se definieron en base a la información de derechos subterráneos disponibles en el sitio web de la DGA, los que en la modelación comienzan a operar en la fecha en la cual fueron constituidos sus respectivos derechos. El Cuadro 5.1-7 presenta las características de cada uno de ellos.

Cuadro 5.1-7 Pozos Modelación MAGIC 2013

Código	Q Derecho (l/s)	Fecha Der Otorgado	Uso	Acuífero	Coord WGS84, 19S	
					UTM N (m)	UTM E (m)
PO-01	60	13-01-1993	MI	AC-02	7.568.759	574.098
PO-02	135	30-12-1992	MI	AC-02	7.571.703	575.185
PO-03	200	12-01-1990	MI	AC-02	7.571.692	575.157
PO-04	100	30-12-1992	MI	AC-02	7.570.239	574.665
PO-05	40	15-02-1993	MI	AC-02	7.568.679	571.553
PO-06	90	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.175	569.693
PO-07	200	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.187	569.683
PO-08	220	12-01-1990	MI	AC-02	7.571.998	574.819
PO-09	220	12-01-1990	MI	AC-02	7.569.216	577.122
PO-10	233	12-01-1990	MI	AC-02	7.568.937	580.164
PO-11	150	13-01-1994	MI	AC-02	7.569.678	571.544
PO-12	58	12-01-1990	MI	AC-02	7.564.078	589.391
PO-13	7	12-01-1990	MI	AC-02	7.570.448	565.523
PO-14	30	12-01-1990	MI	AC-02	7.563.157	572.767
PO-15	31	30-07-1996	MI	AC-04	7.522.986	535.302
PO-16	66	26-01-2001	MI	AC-05	7.515.039	504.218
PO-17	8	15-09-1992	MI	AC-06	7.517.760	443.470
PO-18	3	15-09-1992	MI	AC-06	7.517.660	443.480
PO-19	7	14-07-2000	MI	AC-06	7.516.204	447.212
PO-20	16	14-07-2000	MI	AC-06	7.520.223	443.105
PO-21	45	13-02-1998	MI	AC-05	7.516.370	503.227
PO-22	1	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.083	504.057
PO-23	47	11-07-1995	MI	AC-05	7.516.070	505.550
PO-24	50	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.864	502.771
PO-25	1	11-07-1995	MI	AC-05	7.515.513	504.530
PO-26	17	09-01-2008	MI	AC-05	7.515.041	503.053
PO-27	5	08-10-2003	MI	AC-06	7.519.103	442.436
PO-28	10	08-09-2003	MI	AC-06	7.521.081	440.879
PO-29	47	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.962	504.277
PO-30	73	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.581	503.644
PO-31	65	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.881	503.891
PO-32	70	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.520	503.895
PO-33	65	05-02-2004	MI	AC-05	7.514.329	504.023
PO-34	30	12-05-2008	AP	AC-04	7.512.629	530.295

Cuadro 5.1-7 Pozos Modelación MAGIC 2013

Código	Q Derecho (l/s)	Fecha Der Otorgado	Uso	Acuífero	Coord WGS84, 19S	
					UTM N (m)	UTM E (m)
PO-35	40	12-05-2008	AP	AC-04	7.523.061	542.237
PO-36	35	12-05-2008	AP	AC-04	7.514.189	535.387
PO-37	50	12-05-2008	AP	AC-04	7.515.374	532.641
PO-38	20	12-05-2008	AP	AC-04	7.519.133	537.591
PO-39	20	12-05-2008	AP	AC-04	7.516.119	537.638
PO-40	50	12-05-2008	AP	AC-04	7.518.293	545.064
PO-41	40	12-05-2008	AP	AC-04	7.525.516	543.655
PO-42	34	12-05-2008	AP	AC-04	7.520.852	539.663
PO-43	30	09-05-2008	OT	AC-05	7.510.700	507.300
PO-44	30	19-06-2003	MI	AC-05	7.521.343	508.002
PO-45	2	18-04-2008	MI	AC-05	7.525.654	509.045
PO-46	19	24-06-1999	MI	AC-07	7.657.992	433.844
PO-47	65	24-06-1999	MI	AC-07	7.659.096	434.560
PO-48	35	24-06-1999	MI	AC-07	7.661.977	433.595
PO-49	30	24-06-1999	MI	AC-07	7.663.593	439.902
PO-50	60	24-06-1999	MI	AC-07	7.660.012	433.787
PO-51	31	24-06-1999	MI	AC-07	7.658.924	433.145
PO-52	5	23-06-1999	MI	AC-07	7.660.337	431.762
PO-53	6	18-05-2012	MI	AC-07	7.682.350	482.590

Nota: Nomenclatura Uso: AP: Agua Potable; MI: Minero; OT:Otro.

Fuente: REF#31.

Adicionalmente a los pozos anteriores, se debieron definir 6 nuevos con el objetivo de representar elementos que el modelo no permitió incluir. El Cuadro 5.1-8 presenta estos casos.

Cuadro 5.1-8 Pozos Representativos Modelación MAGIC 2013

Código	Acuífero	Nodo	Qb max (m ³ /s)	Observación
PO-54	AC-02	NO-017	0,75	Drenes
PO-55	AC-03	NO-070	0,02	Afloramiento
PO-56	AC-03	NO-069	0,08	Afloramiento
PO-57	AC-03	NO-067	0,25	Afloramiento
PO-58	AC-03	NO-065	0,05	Afloramiento
PO-59	AC-03	NO-060	0,03	Afloramiento

Fuente: REF#31.

En el primer caso, el programa no considera la opción de integrar drenes, operativos en la cuenca del río San Pedro hasta el año 1990, mientras que los restantes respondieron a un máximo posible de 4 afloramientos por cada acuífero.

5.1.8. Captaciones Puntuales

Corresponden a las demandas del recurso hídrico desde los cauces existentes en la cuenca del río Loa y que principalmente salen del sistema. El Cuadro 5.1-9 presenta las captaciones puntuales representadas en el modelo.

Cuadro 5.1-9 Captaciones Puntuales Modelación MAGIC 2013

Código	Nombre	Capacidad (m³/s)	Fecha Der Otorgado
CP-01	ESSAN Lequena	0,55	11-12-1985
CP-02	FCAB Aguada Palpana	0	31-07-1995
CP-03	Vertiente Polapi 1	0,02	31-07-1995
CP-04	Vertiente Polapi 2	0	31-07-1995
CP-05	ESSAN Quinchamale	0,3	19-02-1985
CP-06	Ferrocarriles Siloli	0,12	11-07-1906
CP-07	Codelco Inacaliri	0,15	22-03-1990
CP-08	Codelco Colana	0,05	29-05-1980
CP-09	Parshall 2	0,18	10-09-1914
CP-10	Inacaliri I y II ADASA	1,65	10-01-1995
CP-11	Codelco Linzor	0,05	12-12-1985
CP-12	Toconce (Linzor) ADASA	0,05	12-12-1985
CP-13	ESSAN Toconce	0,47	11-12-1985
CP-14	Toconce (Hojalar) ADASA	0,14	28-03-1985
CP-15	Codelco Salado	0,54	13-12-1961
CP-16	Puente Negro	0,15	01-01-1994
CP-17	Soquimic Pedro de Valdivia	0,09	06-04-1932
CP-18	Soquimic Coya Sur	0,09	07-03-1963
CP-19	Soquimic María Elena	0,06	18-01-1928
CP-20	SQM Quebrada Amarga	0,06	24-06-1999
CP-21	Trasvase hacia Río Salado	0,1	13-12-1961
CP-22	Demanda Embalse	6	01-04-1975
CP-23	Evaporación Tramo 1	0,2	-
CP-24	Evaporación Tramo 2	0,2	-
CP-25	Evaporación Tramo 3	0,2	-

Fuente: REF#31.

Las últimas 3 captaciones listadas corresponden a la representación de las pérdidas por evaporación desde los cauces. Adicionalmente se deben considerar 3 captaciones que presentan retornos al sistema superficial, las cuales se describen en el Cuadro 5.1-10.

Cuadro 5.1-10 Retorno de Captaciones Modelación MAGIC 2013

Código CP	Código Retorno	Nodo Inicial	Nodo Final	Retorno de la CP
CP-14	RE-01	NO-051	NO-044	100%
CP-21	RE-02	NO-053	NO-056	100%
CP-22	RE-03	NO-028	NO-029	100%

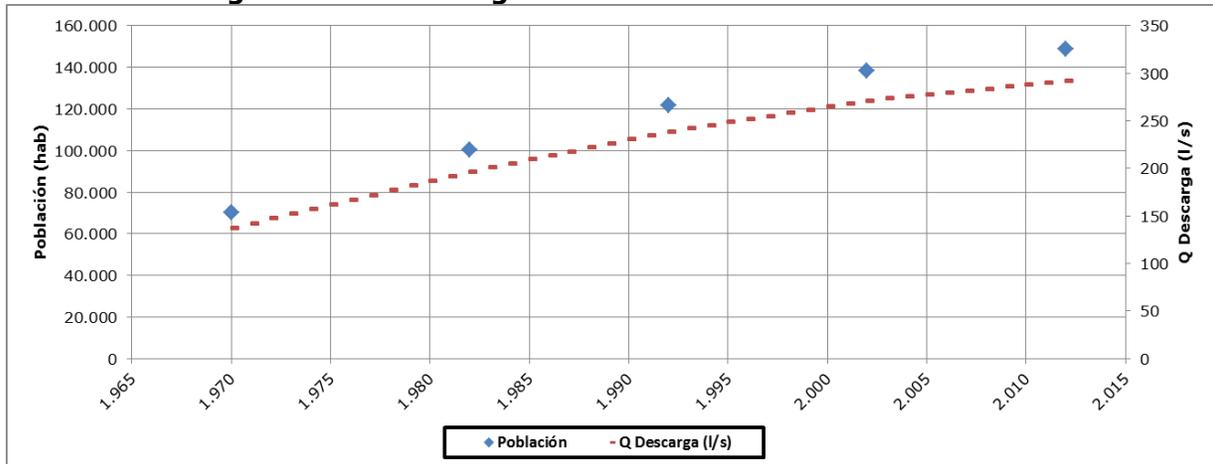
Fuente: REF#31.

Donde las 2 primeras corresponden a trasvases de caudal, igualmente aprovechado por otra captación aguas abajo, mientras que la última corresponde a la entrega de caudal por parte del embalse y que será utilizado en mitigar la demanda de riego.

5.1.9. Descargas Puntuales

Representan los aportes externos al sistema natural de la cuenca, que en este caso corresponde a la descarga de las aguas tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama. La descarga se consideró variable en el tiempo de acuerdo al crecimiento poblacional y al caudal de diseño de la planta, correspondiente a 0,002 l/s/hab. El caudal resultante para el periodo de modelación se presenta en la Figura 5.1-4.

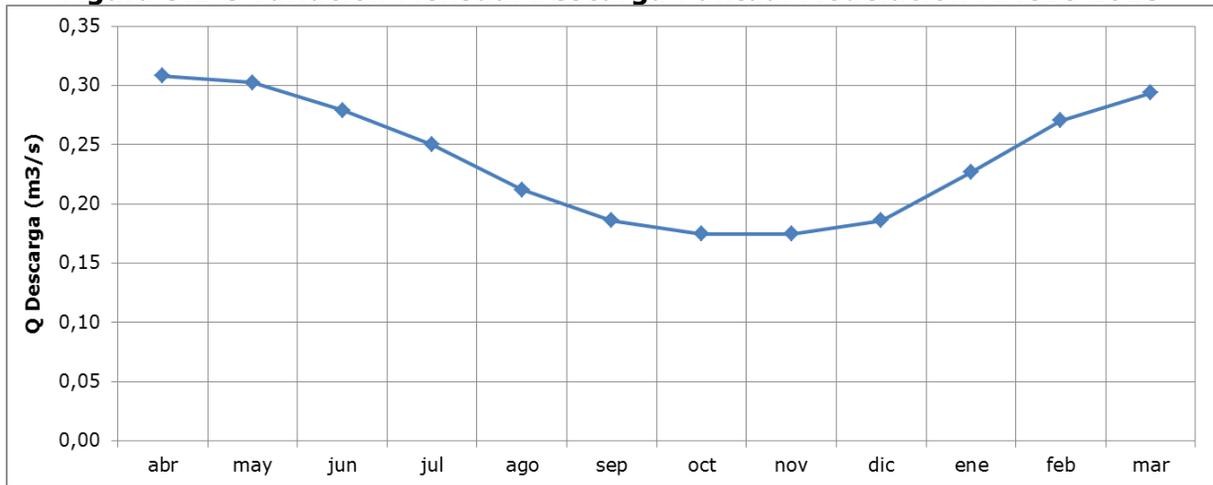
Figura 5.1-4 Descarga Puntual Modelación MAGIC 2013



Fuente: REF#31.

El cual fue distribuido de manera mensual, como se observa en la Figura 5.1-5, de acuerdo a la variación de la descarga de aguas servidas a nivel nacional de acuerdo a la estadística de los años 2007 y 2008 presentada en el sitio web de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

Figura 5.1-5 Variación Mensual Descarga Puntual Modelación MAGIC 2013



Fuente: REF#31.

5.1.10. Estaciones Fluviométricas de Calibración

El modelo incluyó 24 estaciones fluviométricas de propiedad de la DGA, de las cuales una se utilizó como nodo de entrada, mientras que 9 se utilizaron para el proceso de calibración y ajuste del modelo. Las restantes no son utilizadas debido a su corto periodo de estadística o a que no presentan características físicas apropiadas para que su información sea confiable. La totalidad de las estaciones son consideradas en el Cuadro 5.1-11, junto a su representación y uso en el modelo.

Cuadro 5.1-11 Retorno de Captaciones Modelación MAGIC 2013

Nodo	Nombre	Coordenadas WGS84 19S		Observación
		E UTM (m)	N UTM (m)	
NO-001	Río Loa antes Represa Lequena	534.949	7.605.229	Cabecera
NO-010	Río Siloli antes B.T Fcab	600.440	7.565.684	No Utilizada
NO-018	Río San Pedro en Parshall N°1	565.242	7.570.373	No Utilizada
NO-019	Río San Pedro en Parshall N°2 (Codelco)	550.347	7.572.730	No Utilizada
NO-022	Río San Pedro en Camino Internacional	548.285	7.573.604	No Utilizada
NO-024	Río Loa en Vado Santa Bárbara	540.243	7.569.856	Calibración
NO-025	Río Loa en Alcantarilla Conchi N2	540.331	7.569.426	No Utilizada
NO-026	Río Loa en Conchi	540.485	7.568.732	No Utilizada
NO-028	Río Loa en Salida Embalse Conchi	539.131	7.564.050	Calibración
NO-046	Río Toconce antes Represa SENDOS	588.008	7.536.320	Calibración
NO-059	Río Salado antes junta Curti	578.009	7.536.077	No Utilizada
NO-066	Río Salado en Sifón Ayquina	567.487	7.534.983	Calibración
NO-073	Río Salado antes junta Loa	536.670	7.526.151	No Utilizada
NO-079	Río Loa en Yalquincha	512.399	7.517.311	Calibración
NO-080	Río Loa en Escorial	511.256	7.517.865	Calibración
NO-089	Río Loa en Chintoraste	502.227	7.511.174	No Utilizada
NO-090	Río Loa en Finca	500.936	7.510.768	Calibración
NO-097	Vertiente Ojos de Opache	499.822	7.513.595	No Utilizada
NO-104	Río Loa d. j. San Salvador (Chacance)	445.344	7.523.365	No Utilizada
NO-106	Río Loa d. j. San Salvador (M. Elena)	441.738	7.528.698	No Utilizada
NO-108	Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	446.354	7.598.565	Calibración
NO-111	Canal Quillagua en Quillagua	444.473	7.604.611	No Utilizada
NO-112	Río Loa en Quillagua	444.430	7.605.359	No Utilizada
NO-119	Río Loa en Desembocadura	390.619	7.630.039	Calibración

Fuente: REF#31.

5.2. Modificaciones Asociadas a la Actualización del Modelo

Se contempla la modelación integrada de la cuenca del río Loa en base al modelo realizado con información hasta el año 2013, correspondiente a la REF#31 y el acápite 5.1, junto a la nueva información existente a la fecha y delimitación de sectores acuíferos propuesta. En los puntos siguientes se presentan las modificaciones y actualizaciones realizadas al modelo del año 2013.

5.2.1. Acuíferos

La representación de los acuíferos en el modelo se define por medio de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) delimitados en el presente estudio. Corresponde a la modificación más importante realizada, donde se considera un número mayor de acuíferos y varían sus parámetros hidrogeológicos y geométricos. El Cuadro 5.2-1 presenta la representación y parámetros hidrogeológicos de cada uno, mientras que en el Cuadro 5.2-2 se observan sus características geométricas.

Cuadro 5.2-1 Parámetros Hidrogeológicos Acuíferos

Acuífero	Código	K (m/s)	K (m/d)	S
Loa Aguas Arriba Embalse Conchi	AC-01	9,3E-06	0,8	0,0002
Río San Pedro	AC-02	2,0E-04	17,0	0,1100
Río Salado	AC-03	9,2E-05	7,9	0,0053
Pampa Llalqui	AC-04	3,6E-05	3,1	0,0100
Calama	AC-05	2,1E-05	1,8	0,0101
Salar de Miraje	AC-06	1,4E-05	1,2	0,0330
Salar de Llamara	AC-07	3,7E-05	3,2	0,2100
Loa desde María Elena a Quillagua	AC-08	4,6E-06	0,4	0,0300
Loa desde Quillagua a Desembocadura	AC-09	4,2E-06	0,4	0,0090

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 5.2-2 Parámetros Geométricos Acuíferos

Acuífero	Sup (Km ²)	Sección Entrada			Sección Salida			L Equiv (Km)	Q Max Ent (m ³ /s)	Q Max Sal (m ³ /s)	Vol Máx Alm. (Hm ³)
		Ancho (Km)	Alto (m)	Pend. Media	Ancho (Km)	Alto (m)	Pend. Media				
AC-01	1.407	12	90	0,076	9	168	0,015	133	0,79	0,20	27
AC-02	399	7	50	0,010	7	50	0,001	55	0,74	0,07	2.193
AC-03	845	14	116	0,013	33	67	0,002	36	1,95	0,46	368
AC-04	1.476	66	85	0,002	31	153	0,002	31	0,46	0,41	1.577
AC-05	1.634	40	147	0,015	8	126	0,010	69	1,84	0,21	2.368
AC-06	1.192	8	182	0,010	47	105	0,001	44	0,20	0,10	4.572
AC-07	1.162	25	100	0,001	16	83	0,001	57	0,11	0,05	22.804
AC-08	2.013	47	170	0,001	11	204	0,005	70	0,05	0,05	10.637
AC-09	275	11	188	0,005	3	150	0,029	38	0,045	0,063	443

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.2. Tramos de Río

Si bien la cantidad de nodos y su ubicación permanece inalterada, los tramos de río se ven afectados tanto por el cambio de acuífero al que corresponden sus infiltraciones, como por sus parámetros geométricos e hidrogeológicos. El Cuadro 5.2-3 presenta las características que define a cada cauce representado en el modelo.

Cuadro 5.2-3 Parámetros Tramos de Río

Río	Nodo Inicio	Nodo Fin	Acuífero	Largo (Km)	Ancho (m)	Espesor (m)	K (m/d)	Coef. Manning	Pend. Media
Río Loa Aguas Arriba Embalse Conchi	NO-001	NO-028	AC-01	43	20	30	0,8	0,035	0,015
Río Loa en Calama	NO-028	NO-104	AC-05	142	16	23	5,4	0,035	0,016
Río Loa María Elena a Quillagua	NO-104	NO-110	AC-08	85	20	30	1,2	0,035	0,010
Río Loa Quillagua a Desembocadura	NO-110	NO-119	AC-09	72	20	21	1,1	0,035	0,014
Río San Pedro	NO-009	NO-023	AC-02	68	4	10	17,0	0,035	0,029
Río Toconce	NO-039	NO-058	AC-03	31	8	4	0,0	0,035	0,047
Río Hojalar	NO-050	NO-054	AC-03	20	4	3	0,0	0,035	0,046
Río Salado	NO-064	NO-074	AC-03	42	15	9	7,9	0,035	0,020
Río Curti	NO-055	NO-064	AC-03	14	4	4	0,0	0,035	0,024
Río Caspana	NO-060	NO-063	AC-03	10	4	3	0,0	0,035	0,040
Río San Salvador	NO-093	NO-103	AC-05	70	8	12	6,5	0,035	0,047
Quebrada Colana	NO-014	NO-016	AC-03	10	1	10	7,9	0,035	0,080
Quebrada de Cupo	NO-070	NO-072	AC-03	37	1	8	7,9	0,035	0,037
Quebrada Turi Paniri	NO-067	NO-072	AC-03	68	1	21	7,9	0,035	0,025
Quebrada Amarga	NO-115	NO-117	AC-03	7	1	30	0,0	0,035	0,032

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3. Zonas de Riego

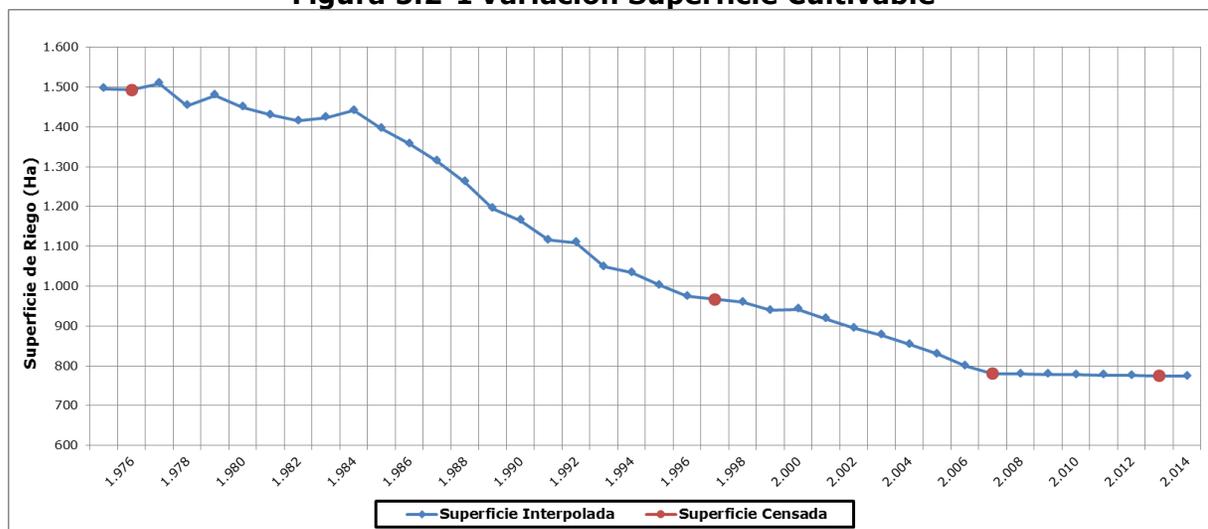
Las zonas de riego presentan percolaciones desde el sistema superficial al subterráneo, por lo que la nueva delimitación de acuíferos afecta esta relación. Adicionalmente se debe considerar las nuevas características geométricas, principalmente la superficie de las zonas de riego de la parte alta de la cuenca, definidas con el objetivo de obtener la recarga por precipitación. El Cuadro 5.2-4 presenta las características de cada una de ellas.

Cuadro 5.2-4 Zonas de Riego

Zona de Riego	Acuífero	Superficie (Ha)		
		Cultivada	No Cultivada	Total
ZR-01	AC-05	91,5	73,5	165
ZR-02	AC-05	115,4	98,6	214
ZR-03	AC-03	9,5	34,3	43,8
ZR-04	AC-03	22,3	58,9	81,2
ZR-05	AC-03	3,9	9	12,9
ZR-06	AC-03	50,7	142,3	193
ZR-07	AC-03	4,2	6,5	10,7
ZR-08	AC-03	12,8	44,3	57,1
ZR-09	AC-05	19,7	62,3	82
ZR-10	AC-05	256	262	518
ZR-11	AC-05	182	942	1.124
ZR-12	AC-05	6,2	1,5	7,7
ZR-13	AC-09	1	151	152
ZR-14	AC-01	1	140.681	140.682
ZR-15	AC-02	1	39.878	39.879
ZR-16	AC-03	1	84.534	84.535

Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, debido a la extensión del periodo de modelación hasta el año hidrológico 2013 - 2014, se actualizó la superficie cultivable para el último año. Para tal efecto se utilizó la misma metodología que en la REF#31, es decir la variación de la superficie corresponde directamente a la del Producto Interno Bruto Silvoagropecuario regional. La Figura 5.2-1 presenta la estadística utilizada en la modelación.

Figura 5.2-1 Variación Superficie Cultivable

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.4. Pozos de Bombeo

El modelo presenta la integración de un nuevo derecho subterráneo, la modificación de aquellos definidos con el objetivo de representar elementos que no es posible asignar

directamente y considera pozos de bombeo que no presentan derechos, pero de los cuales se sabe de su existencia y funcionamiento en el sector del Tranque Talabre. El Cuadro 5.2-5 presenta estos casos.

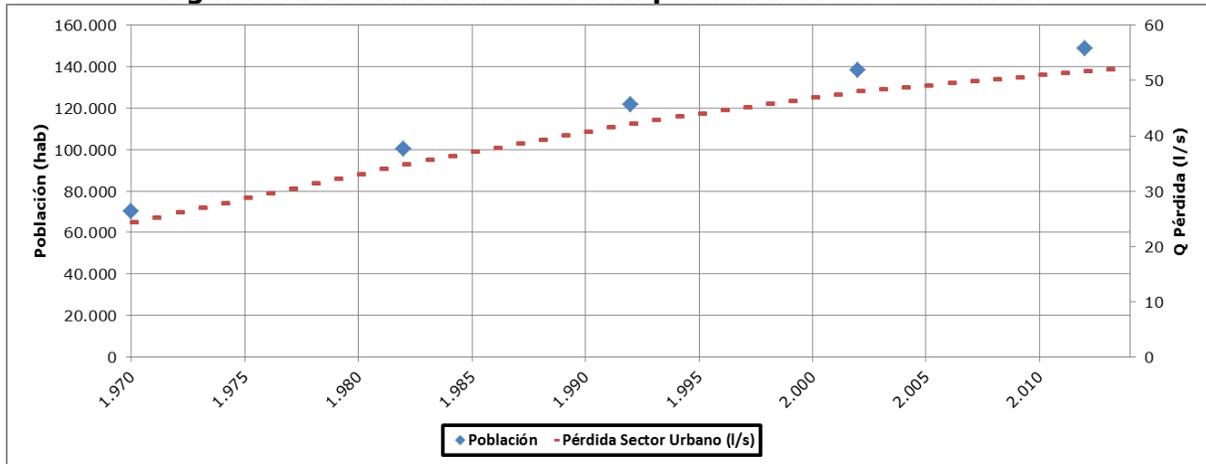
Cuadro 5.2-5 Pozos Representativos

Código	Sector Acuífero	Nodo	Qb Máximo (m³/s)	Observaciones
PO-54	Río San Pedro	NO-017	0,75	Drenes
PO-55	Río Salado	NO-050	0,21	Afloramiento
PO-56	Río Salado	NO-055	0,39	Afloramiento
PO-57	Río Salado	NO-039	0,05	Afloramiento
PO-58	Río Salado	NO-060	0,05	Afloramiento
PO-59	Río Salado	NO-042	0,37	Afloramiento
PO-60	Calama	NO-095	0,10	Pérdida Agua Potable
PO-61	Calama	N/A	0,033	CMG-1 Lomas Bayas
PO-62	Calama	N/A	0,001	SI-1B Talabre / Sin Derechos
PO-63	Calama	N/A	0,026	SI-2B Talabre / Sin Derechos
PO-64	Calama	N/A	0,002	SI-3B Talabre / Sin Derechos
PO-65	Calama	N/A	0,012	SI-4B Talabre / Sin Derechos
PO-66	Calama	N/A	0,005	SI-5B Talabre / Sin Derechos
PO-67	Calama	N/A	0,012	SI-6B Talabre / Sin Derechos

Nota: N/A corresponde a No Asignado.

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa un cambio en la ubicación de los pozos utilizados como afloramientos en el acuífero del río Salado, asociándolos a nodos de la zona alta de la subcuenca. Adicionalmente se integra un pozo que representa las pérdidas del sistema de conducción de agua potable en la ciudad de Calama. El flujo corresponde a una recarga al acuífero, es decir se simula como un pozo de inyección. El caudal involucrado se asocia directamente a la variación poblacional, que implica una mayor superficie urbana, y se considera una pérdida del 15% del sistema frente a una dotación de 200 l/hab/día. La Figura 5.2-2 presenta la variación de la recarga urbana frente a la variación poblacional actualizada al año 2014.

Figura 5.2-2 Variación de Caudal por Pérdidas Sector Urbano

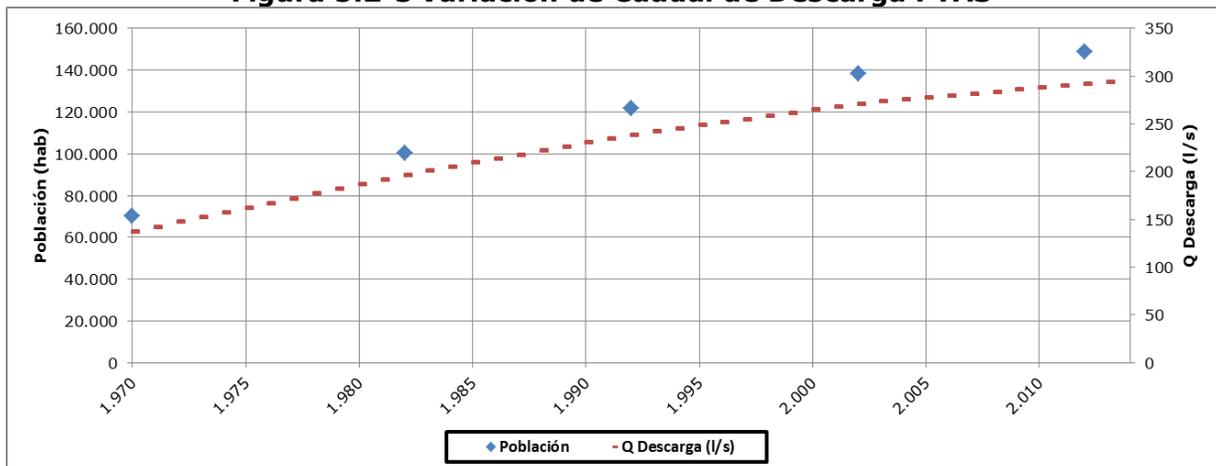
Fuente: Elaboración Propia.

5.2.5. Estadísticas

A este ítem corresponden todos aquellos elementos que no vieron modificados sus parámetros, pero que su información debió ser expandida un año para actualizar el modelo a 2014. Por lo tanto se actualizaron los datos medidos en las estaciones fluviométricas y pluviométricas (Anexo D1 y D2 respectivamente), la estadística de volumen embalsado en Conchi (Anexo E), la descarga desde la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de Calama y los caudales de extracción desde las captaciones puntuales.

El caudal de las captaciones puntuales se define de acuerdo al derecho otorgado por la DGA, sin considerar variación anual, por lo que su actualización corresponde solo a la extensión de su estadística.

La descarga de la PTAS depende directamente de la población y el caudal de diseño de la planta (0,002 l/s/hab). Por lo tanto, su actualización corresponde a continuar con la metodología aplicada, resultando lo que muestra la Figura 5.2-3.

Figura 5.2-3 Variación de Caudal de Descarga PTAS

Fuente: Elaboración Propia.

5.3. Calibración del Modelo Integrado

Correspondió a la actualización de la base de datos del programa MAGIC con la información detallada en el acápite 5.2. Las condiciones de modelación utilizadas no fueron modificadas respecto a lo presentado en la REF#31, las cuales corresponden a lo siguiente:

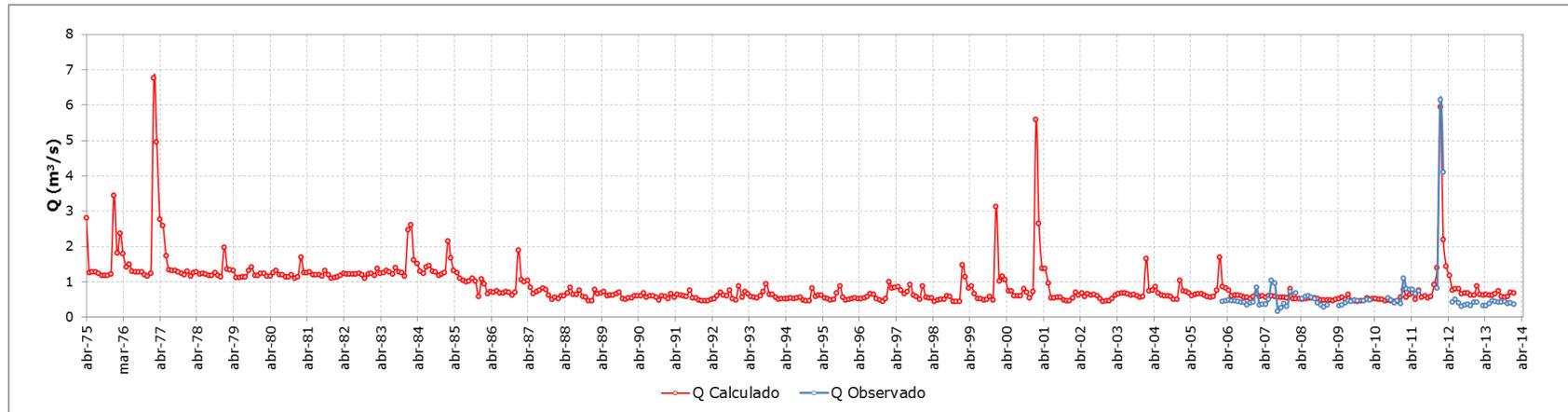
- Información en zonas de riego: Mediante necesidades netas mensuales.
- Distribución Q en nodos: Por caudales impuestos.
- Caudal de entrega de embalses: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Superficie vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Cota vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Restricción entrega de agua a nodos a capacidad de los objetos.
- Bombeo para riego: Sólo el déficit.
- Restricción a acuíferos: Si $Q_{zs} < 0$, $Q_{zs} = 0$.
- Modelo de infiltración: Lineal.

El proceso de calibración corresponde a la búsqueda de representar fielmente la estadística de caudales pasantes por las estaciones fluviométricas frente a los resultados del modelo. Para tal efecto, se ajustan parámetros que presenten un mayor nivel de incerteza en la construcción del modelo en base a los resultados parciales de cada simulación. Las estaciones incluidas en el proceso de calibración no se vieron modificadas con la actualización y corresponden a las descritas en el Cuadro 5.1-11.

Debido a la baja precipitación existente en la cuenca del río Loa, el caudal de afloramiento y de recarga al acuífero cobran alta relevancia en los flujos superficiales. Por lo tanto se decide calibrar estas variables dentro de los órdenes de magnitud que presentan los aforos o antecedentes de estos flujos y los resultados del modelo hidrogeológico realizado en Visual MODFLOW. Los parámetros ajustados corresponden principalmente a aquellos que definen los tramos de río junto a las características de los sistemas acuíferos, respetando los rangos definidos en el presente estudio.

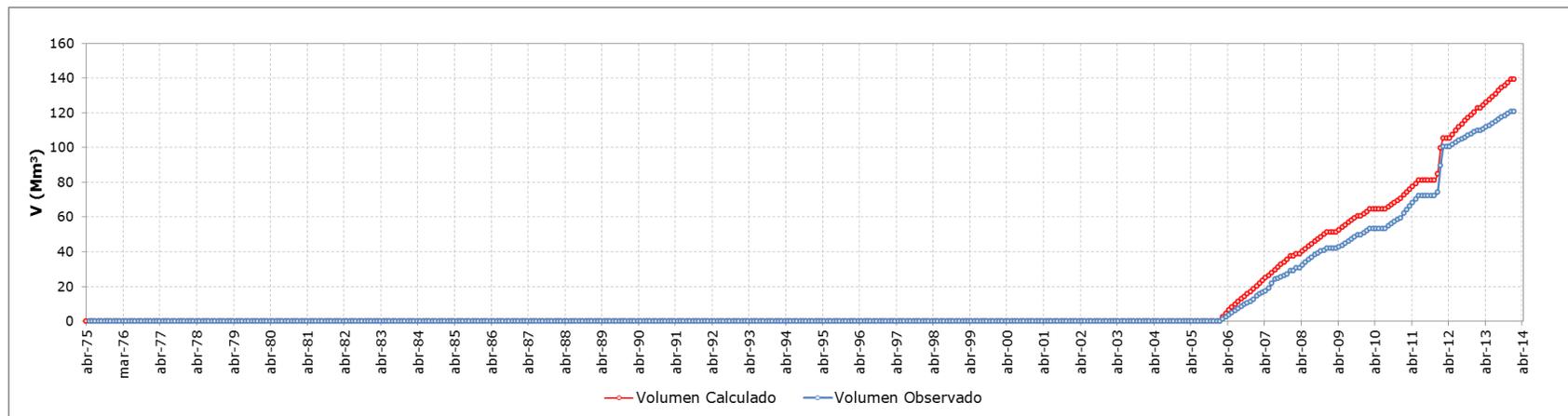
Los resultados del proceso de calibración se presentan a continuación a través de los nodos representativos de las estaciones fluviométricas seleccionadas.

Figura 5.3-1 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Vado Santa Bárbara

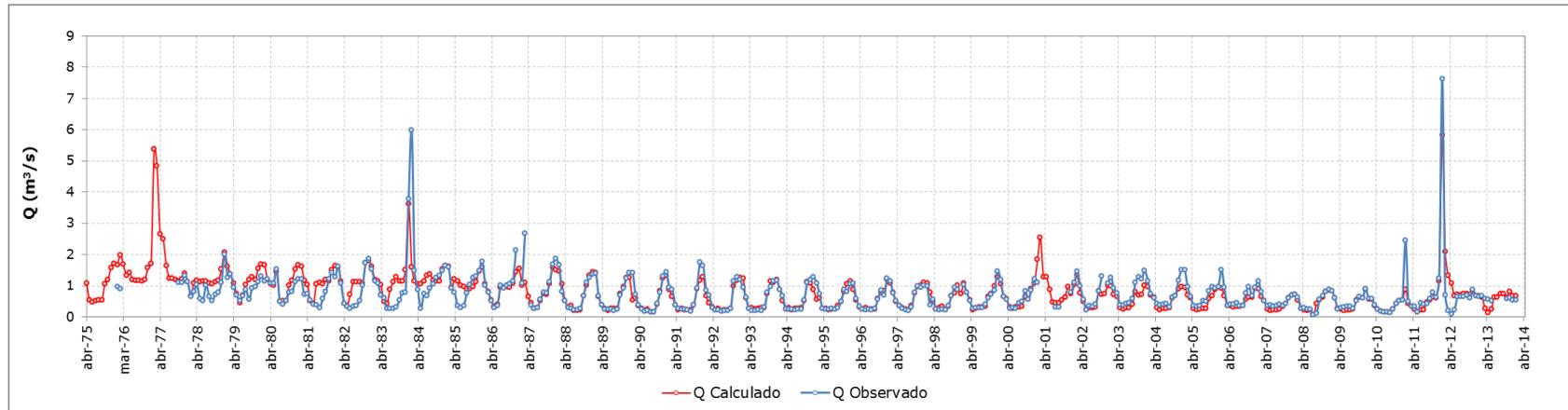


Fuente: Elaboración Propia.

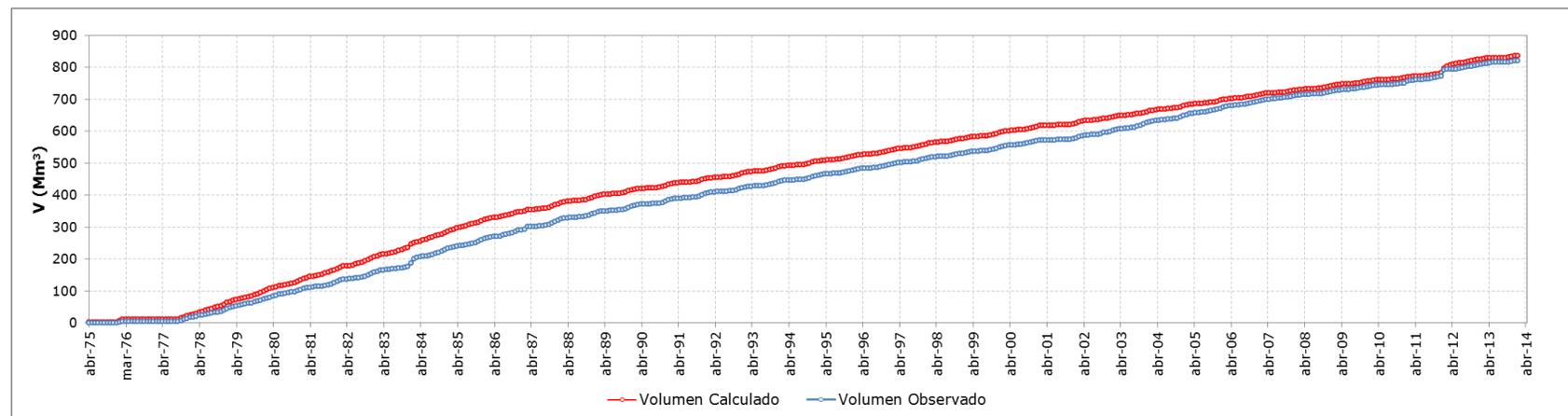
Figura 5.3-2 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Vado Santa Bárbara



Fuente: Elaboración Propia.

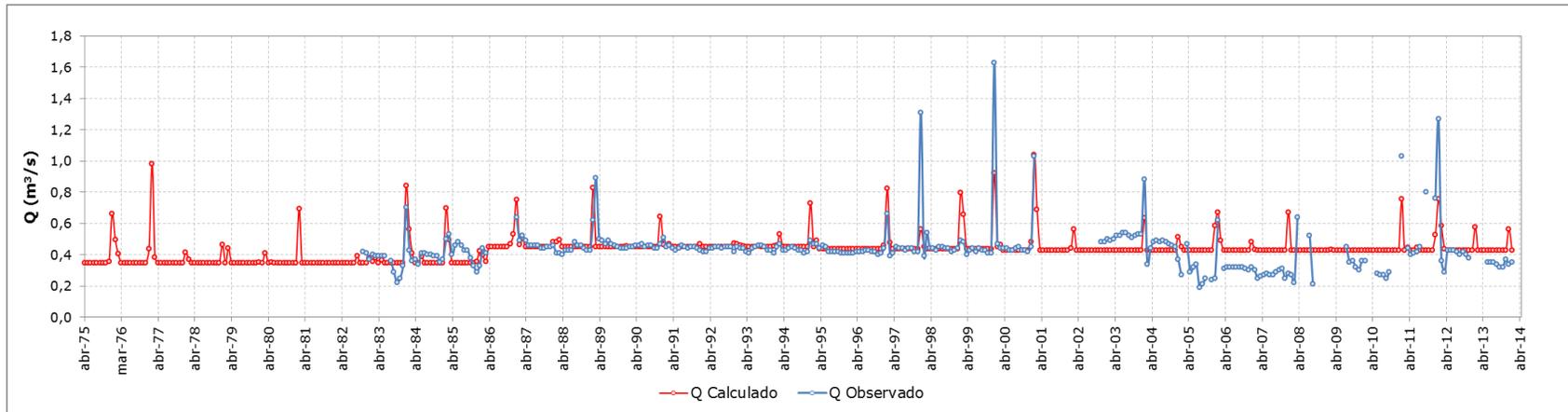
Figura 5.3-3 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa Salida Embalse Conchi

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-4 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa Salida Embalse Conchi

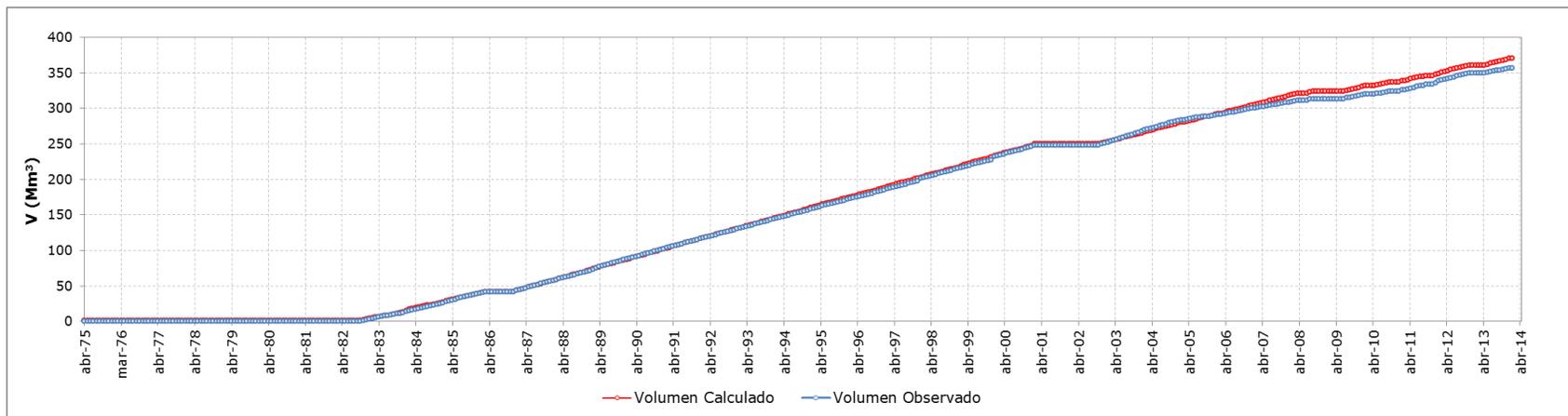
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-5 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Toconce antes Represa SENDOS

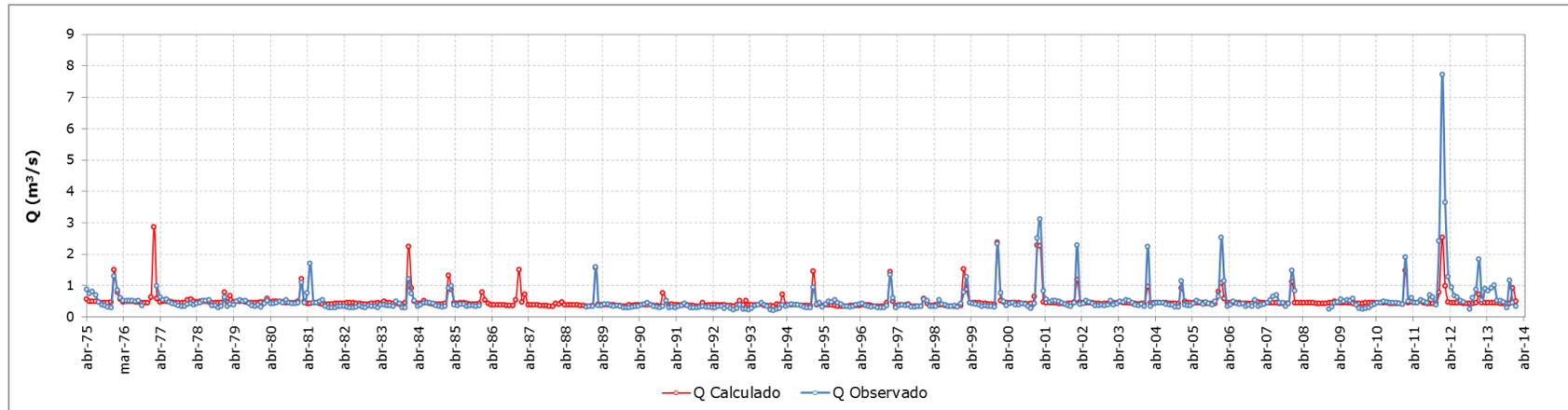


Fuente: Elaboración Propia.

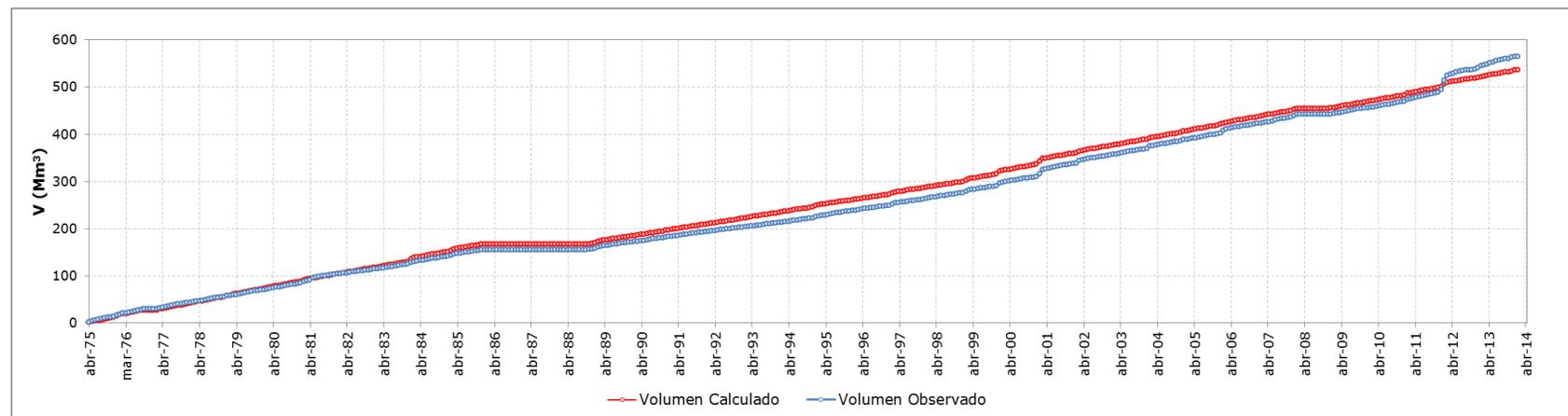
Figura 5.3-6 Serie de Volumen Acumulado; Río Toconce antes Represa SENDOS



Fuente: Elaboración Propia.

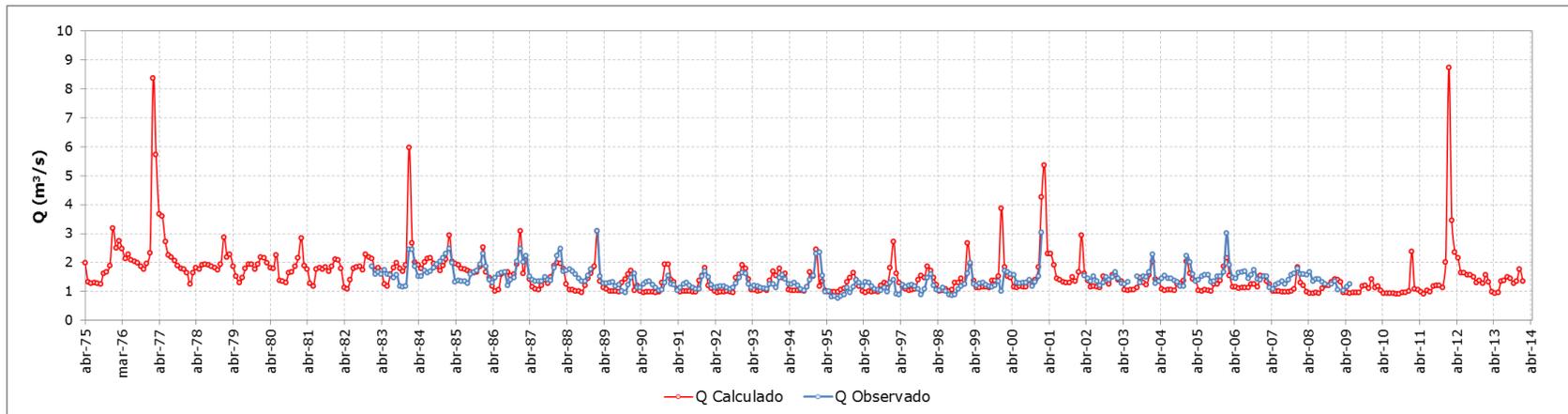
Figura 5.3-7 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Salado en Sifón Ayquina

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-8 Serie de Volumen Acumulado; Río Salado en Sifón Ayquina

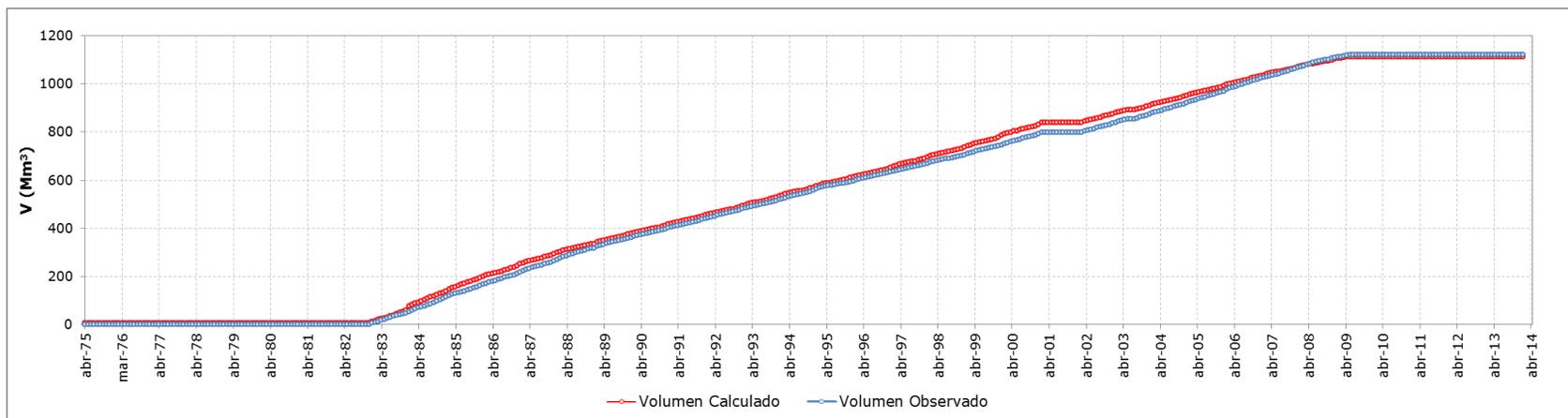
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-9 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Yalquincha

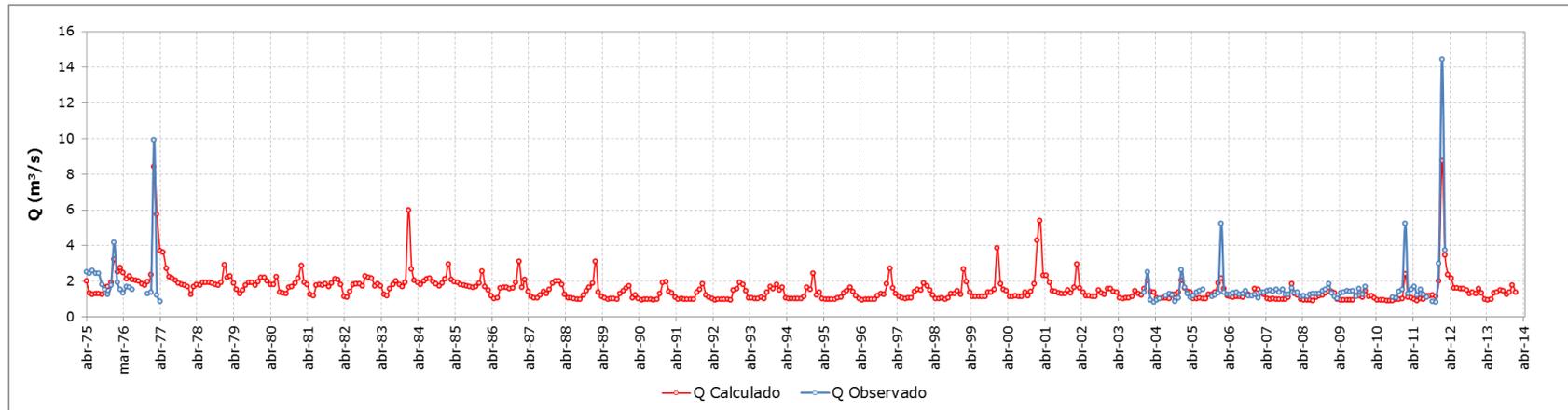


Fuente: Elaboración Propia.

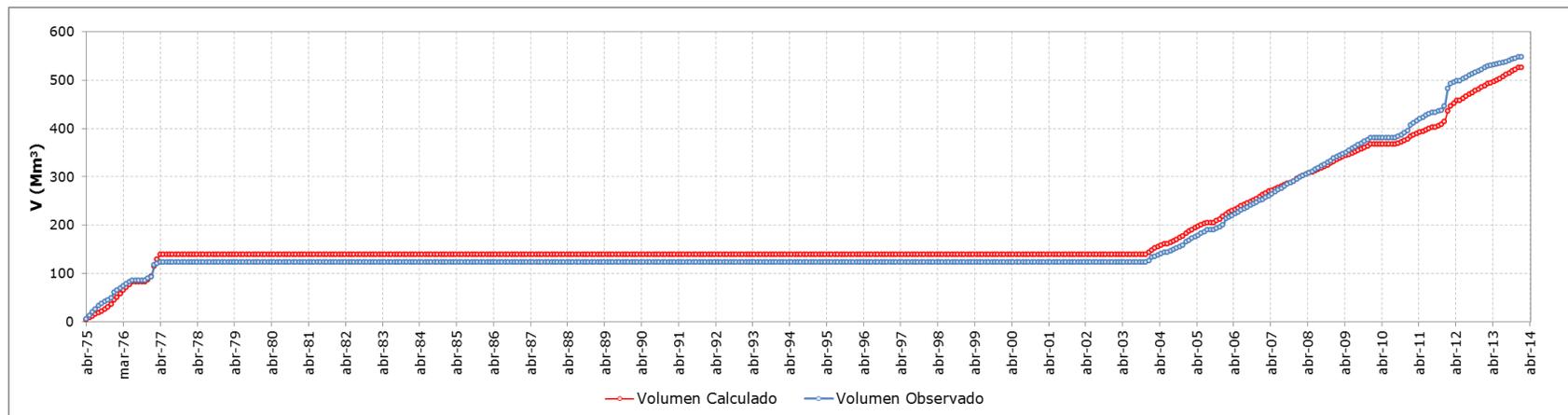
Figura 5.3-10 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Yalquincha



Fuente: Elaboración Propia.

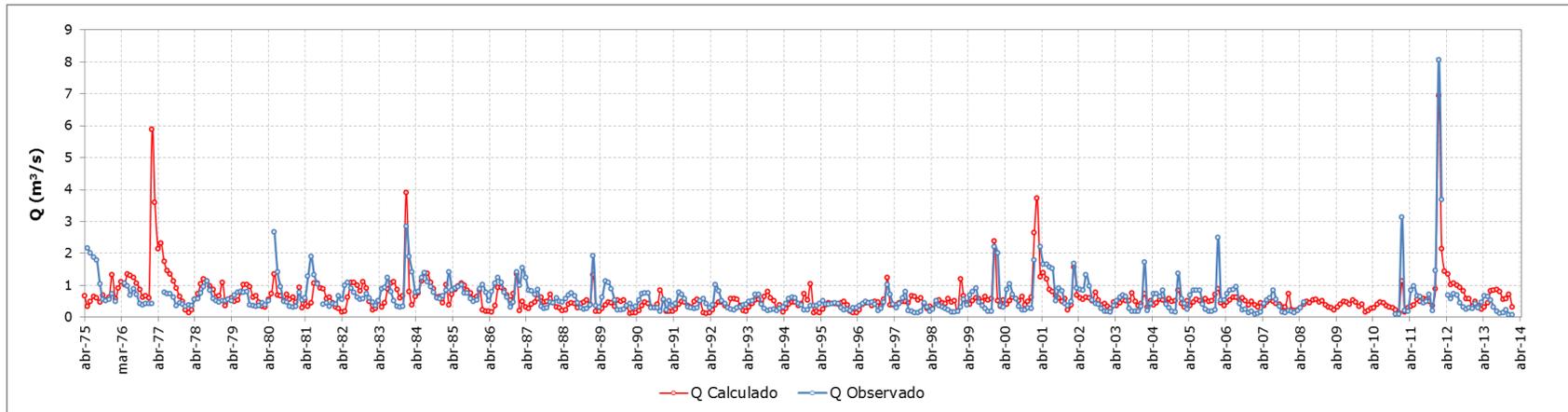
Figura 5.3-11 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Escorial

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-12 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Escorial

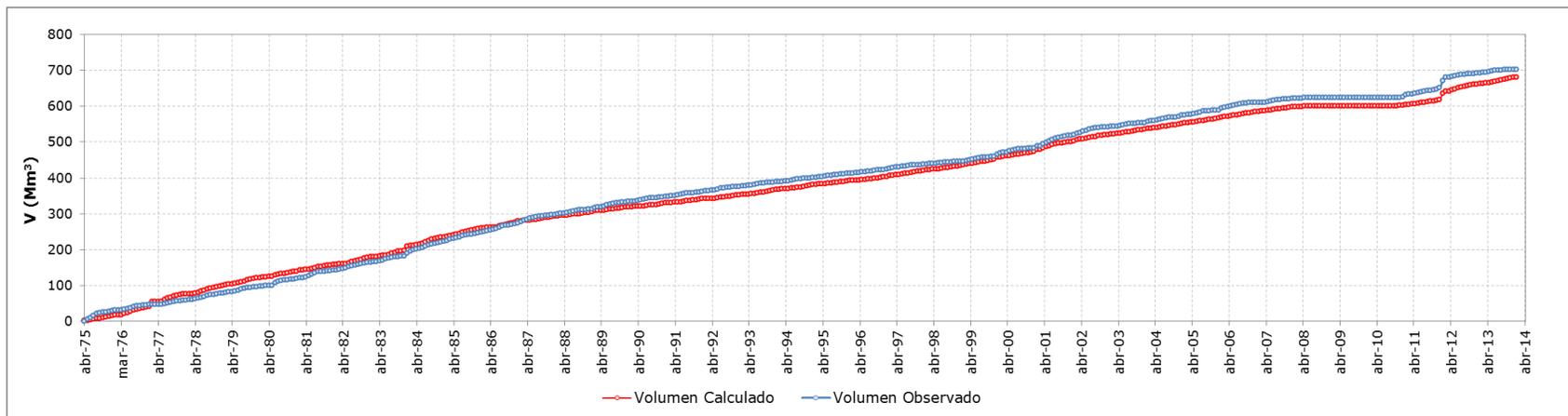
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-13 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Finca

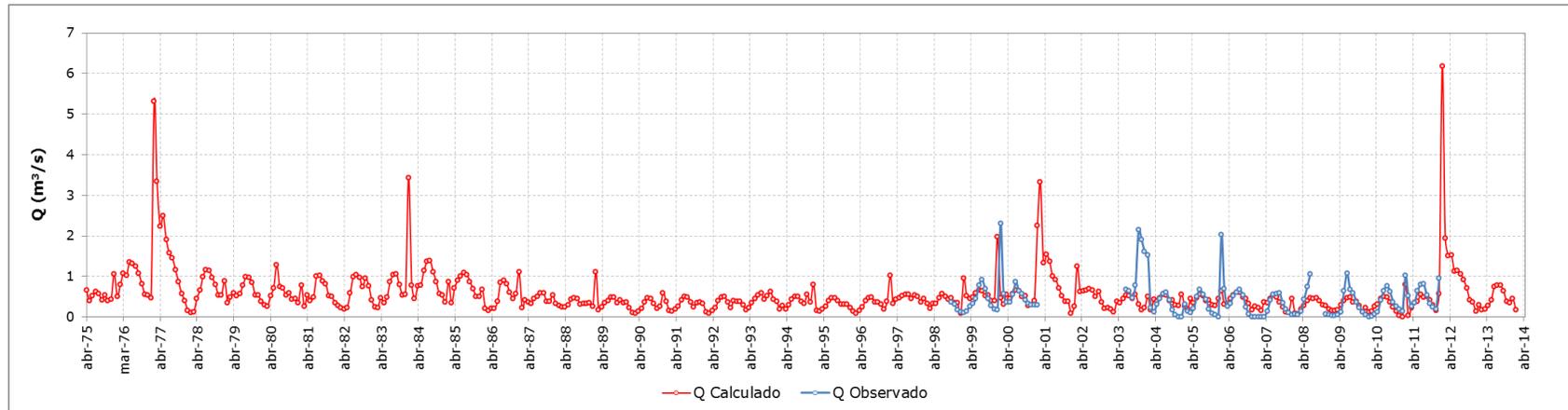


Fuente: Elaboración Propia.

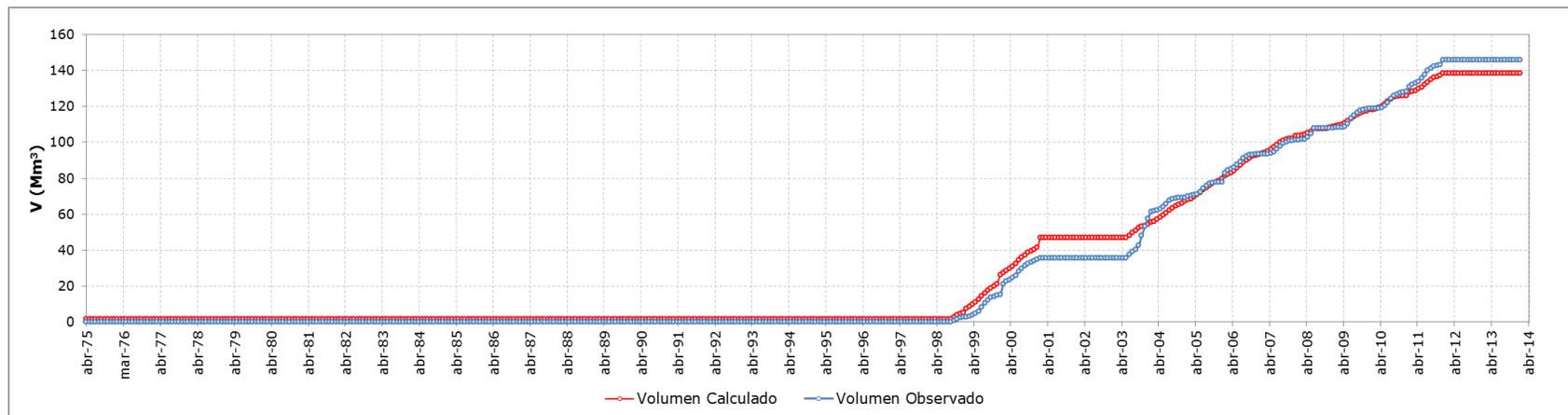
Figura 5.3-14 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Finca



Fuente: Elaboración Propia.

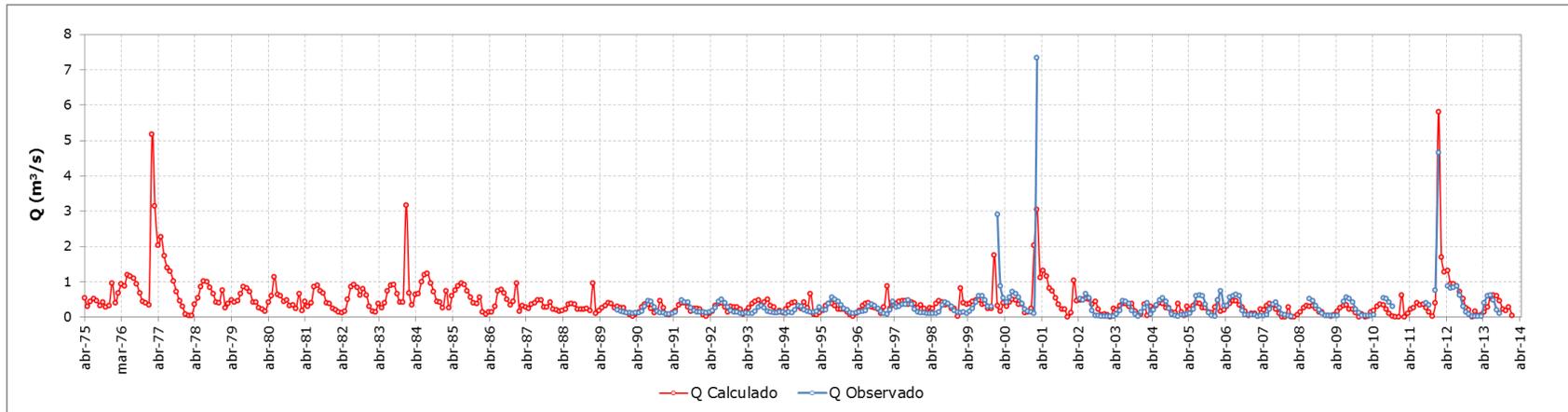
Figura 5.3-15 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-16 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua

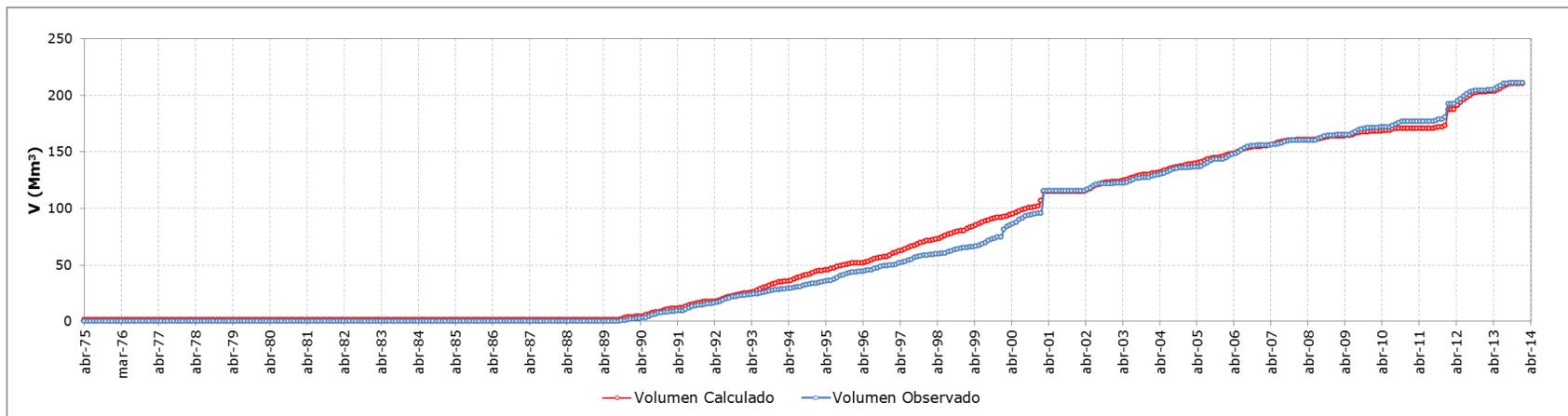
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-17 Serie de Caudales Medios Mensuales; Río Loa en Desembocadura



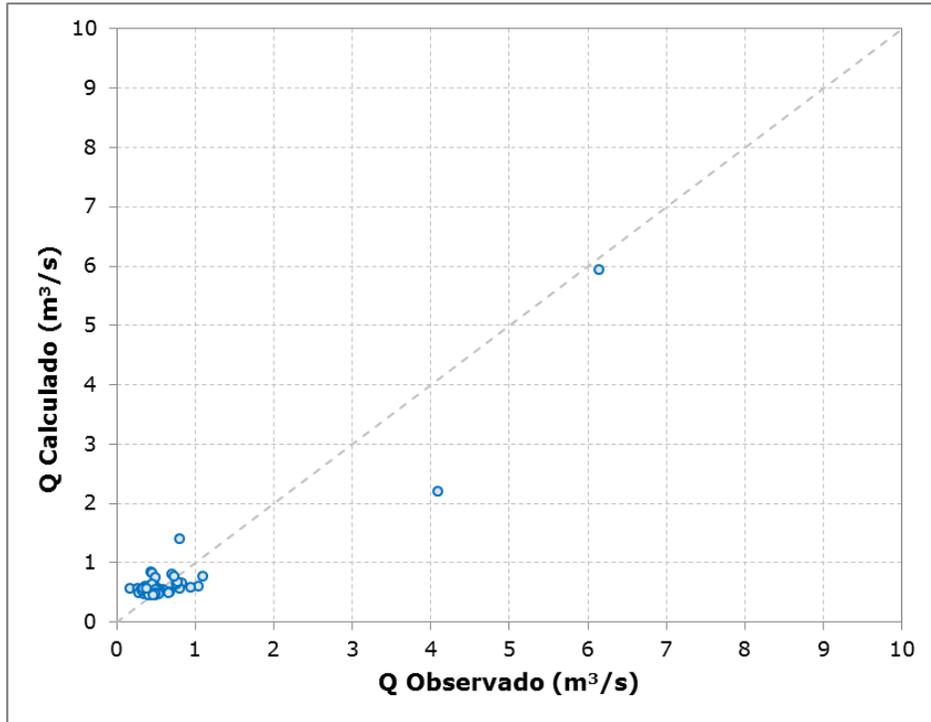
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-18 Serie de Volumen Acumulado; Río Loa en Desembocadura



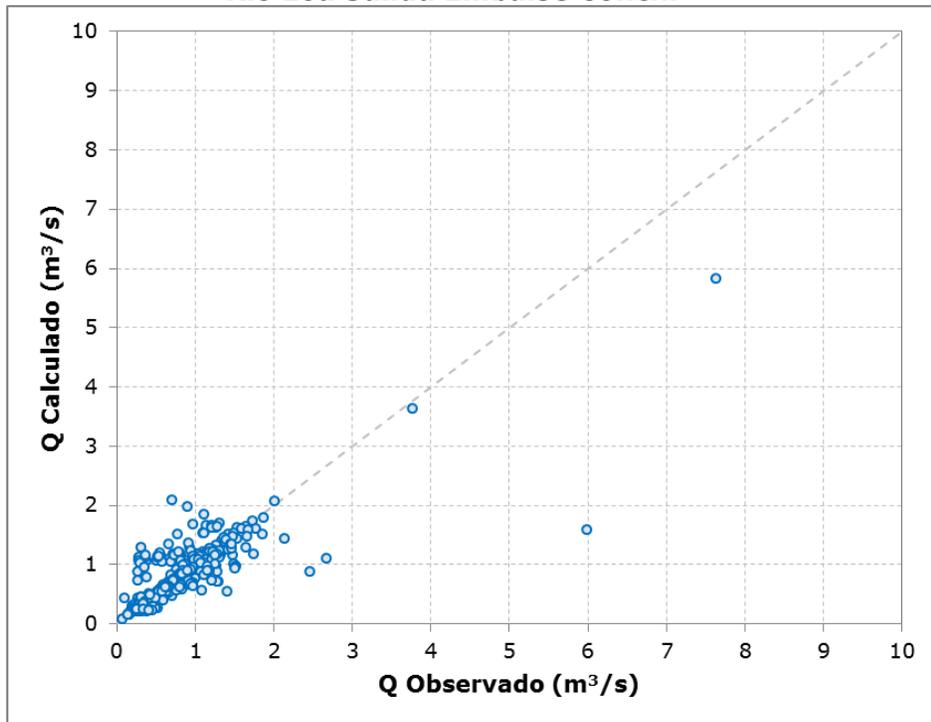
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.3-19 Caudal Calculado v/s Observado;
Río Loa en Vado Santa Bárbara**



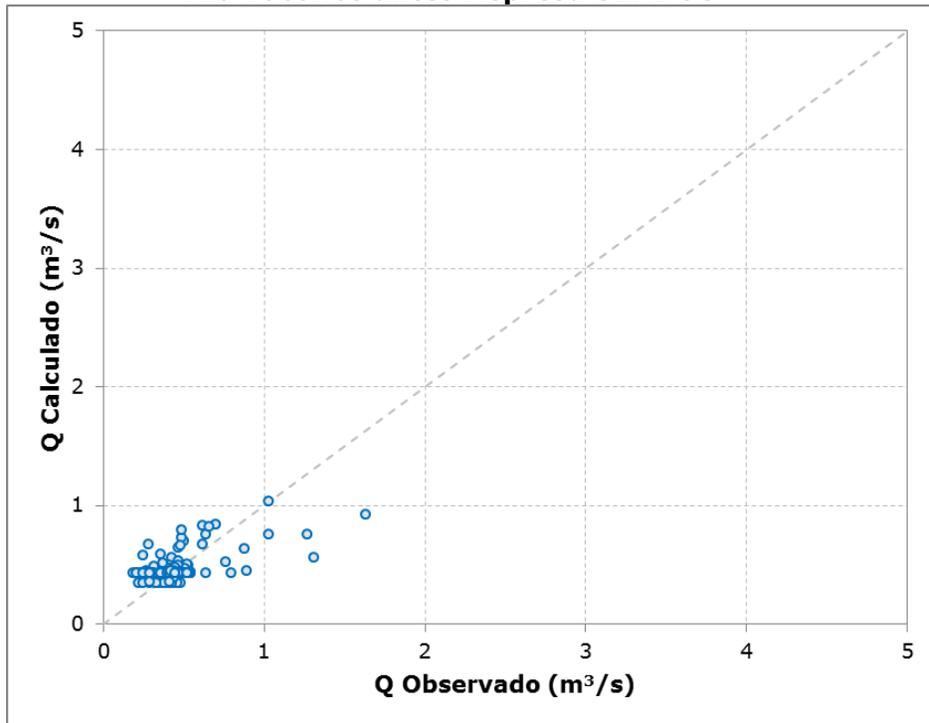
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.3-20 Caudal Calculado v/s Observado;
Río Loa Salida Embalse Conchi**



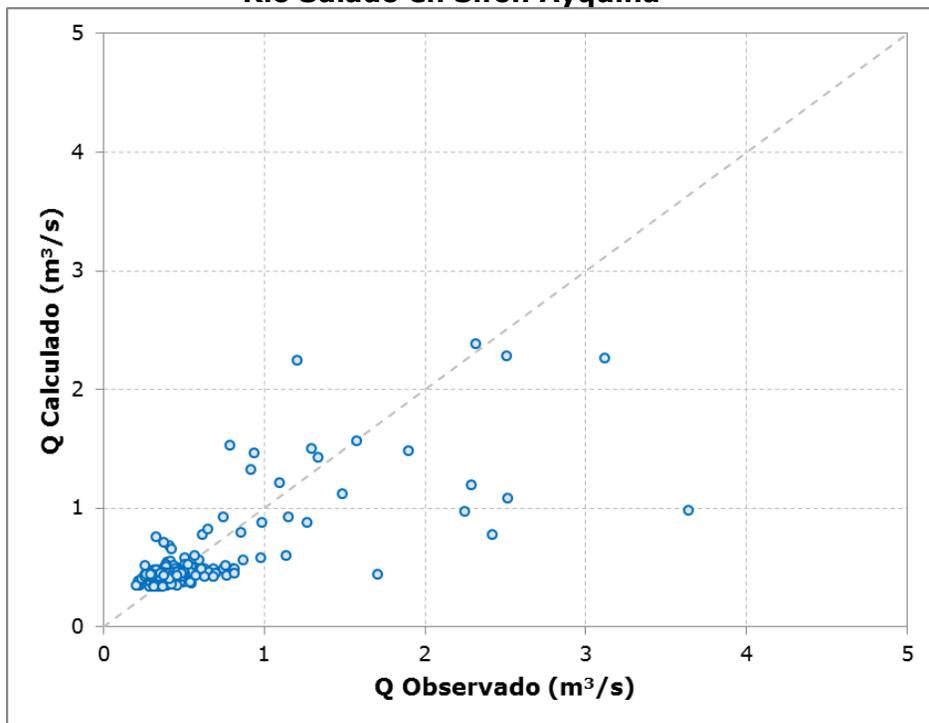
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.3-21 Caudal Calculado v/s Observado;
Río Toconce antes Represa SENDOS**



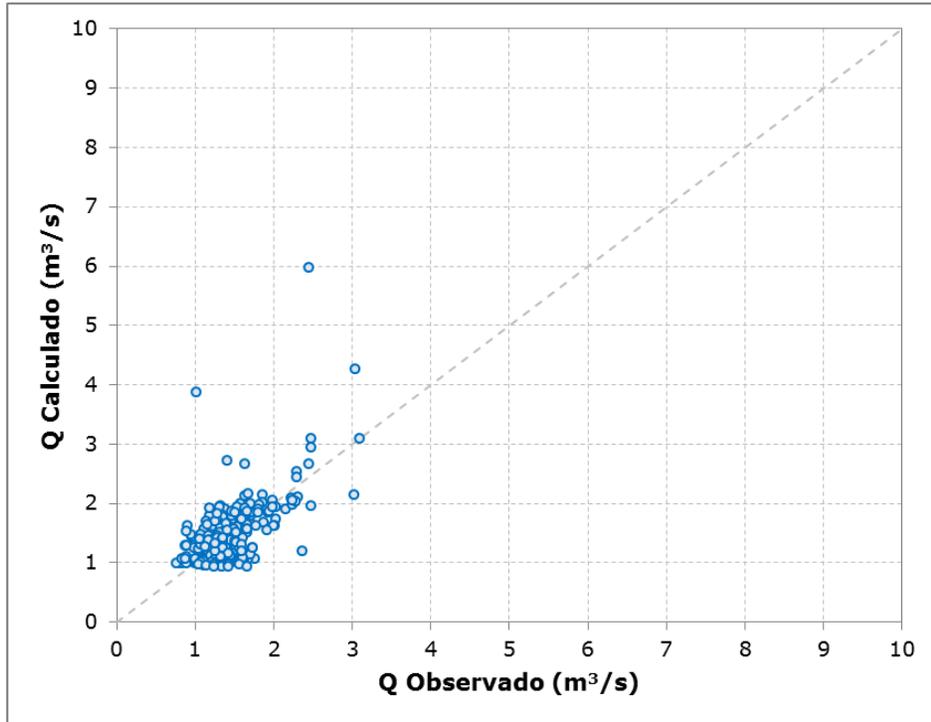
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 5.3-22 Caudal Calculado v/s Observado;
Río Salado en Sifón Ayquina**



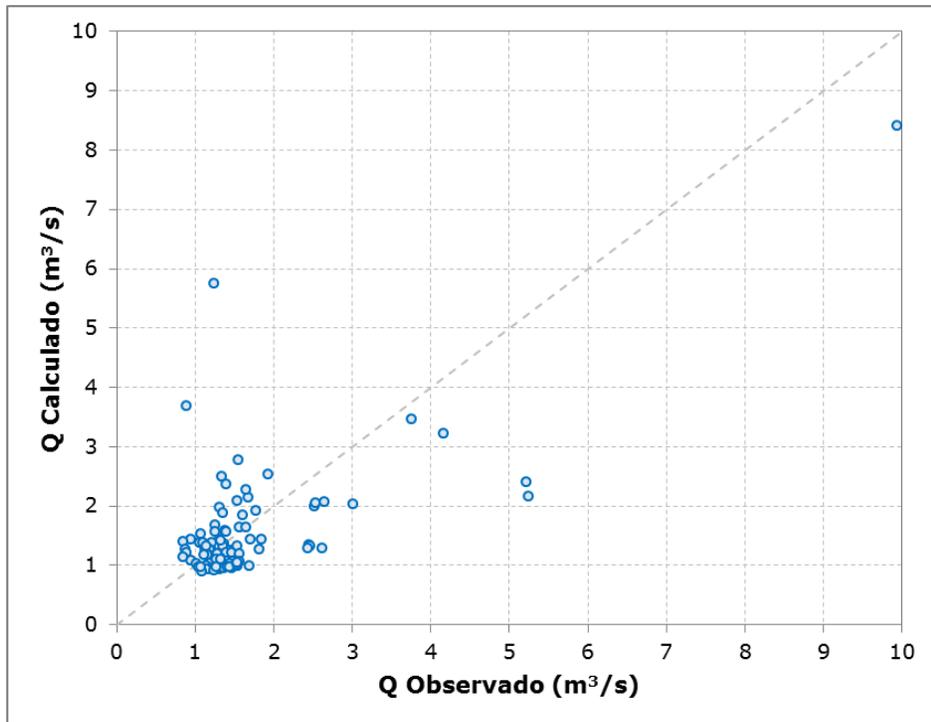
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-23 Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Yalquincha



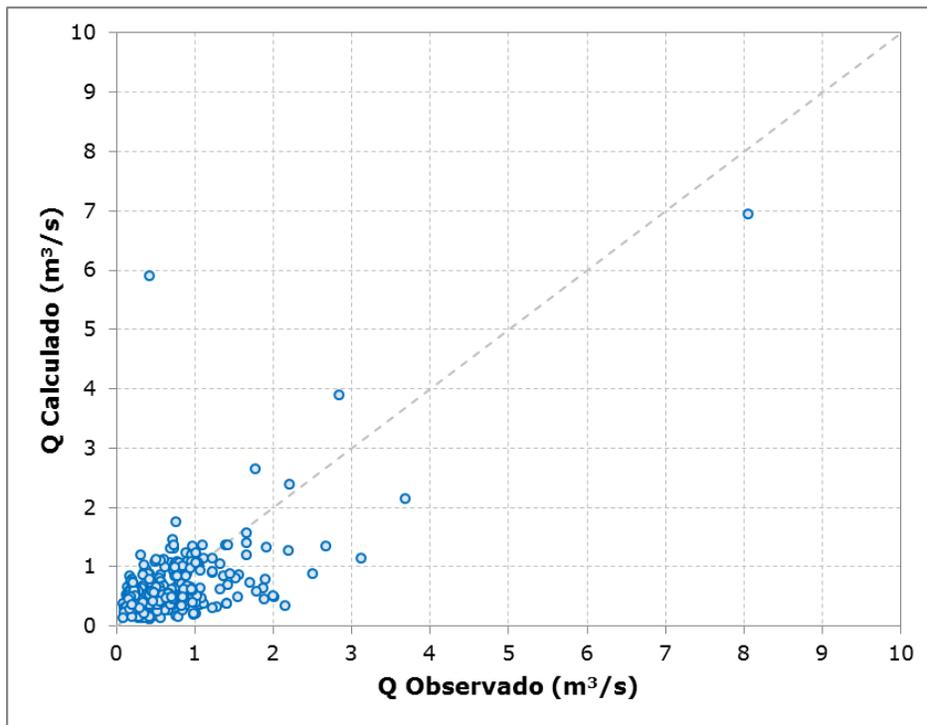
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-24 Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Escorial



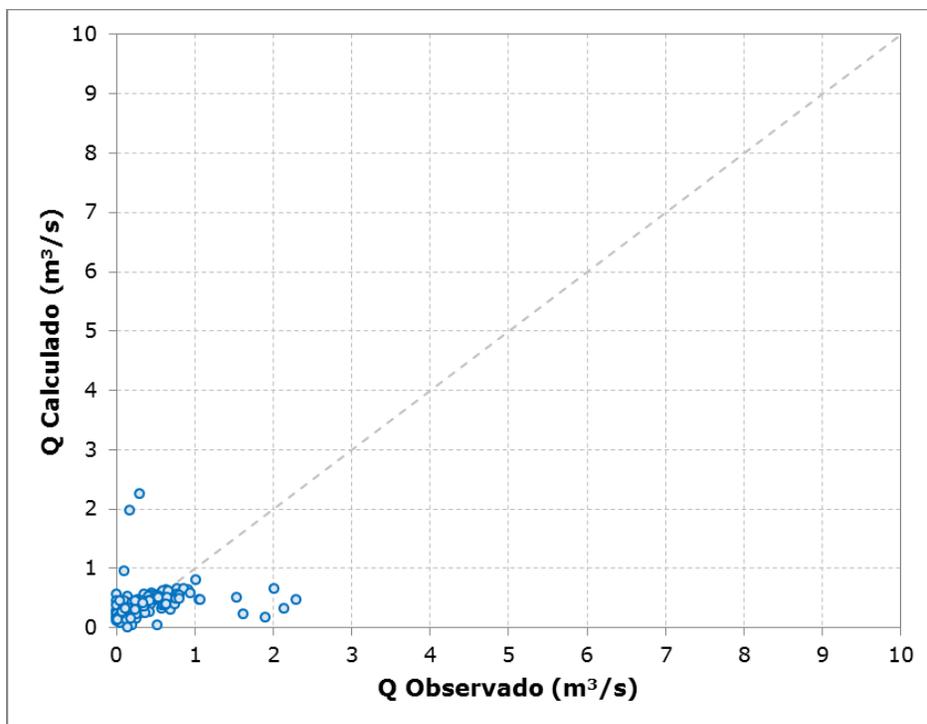
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-25 Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Finca

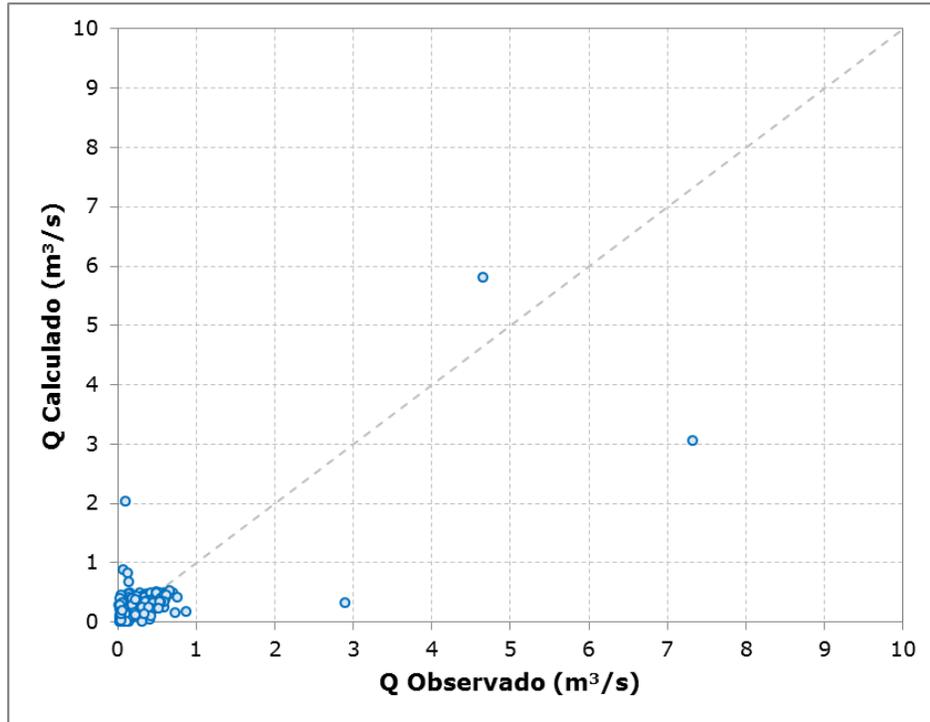


Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-26 Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-27 Caudal Calculado v/s Observado; Río Loa en Desembocadura

Fuente: Elaboración Propia.

5.4. Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluviométricas

Adicional a la calibración gráfica entre los caudales observados y calculados, se calcula una serie de estadígrafos para evaluar la calidad del ajuste:

- Coeficiente R^2 : Cuadrado del coeficiente de correlación del momento de producto Pearson, entre las series de caudales observado y simulado.
- Coeficiente RMS (root mean square): Parámetro definido por la expresión siguiente (donde n es el número de datos).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{CAL} - Q_{OBS})^2}$$

- Coeficiente RMS Normalizado: Estadígrafo anterior normalizado por la máxima diferencia entre los caudales observados.

$$RMSN = \frac{RMS}{Q_{Obs}^{Máx} - Q_{Obs}^{Mín}}$$

- Error Medio: Promedio entre las diferencias entre caudales calculados y observados. $\Sigma(Q_{Cal} - Q_{Obs})$.

- Error Absoluto Medio: Promedio entre los valores absolutos de las diferencias entre caudales calculados y observados $\Sigma|Q_{Cal}-Q_{Obs}|$.
- Error típico entre ambas variables de análisis.
- Desviación estándar.

El Cuadro presenta el valor de cada estadígrafo para las estaciones fluviométricas seleccionadas para el proceso de calibración.

Cuadro 5.4-1 Estadígrafos Calibración

Estación	R ²	RMS (m ³ /s)	RMSN	Desv. Estándar (m ³ /s)	Error Medio (m ³ /s)	Error Abs. Medio (m ³ /s)	Error Típico (m ³ /s)
Río Loa en Vado Santa Bárbara	0,86	0,33	5,4%	0,67	0,07	0,21	0,26
Río Loa Salida Embalse Conchi	0,66	0,37	4,8%	0,62	0,01	0,17	0,30
Río Toconce antes Represa Sendos	0,36	0,11	7,9%	0,11	0,01	0,06	0,07
Río Salado en Sifón Ayquina	0,58	0,36	4,8%	0,41	-0,02	0,12	0,18
Río Loa en Yalquincha	0,38	0,42	17,8%	0,64	-0,02	0,27	0,42
Río Loa en Escorial	0,65	0,94	6,9%	0,99	-0,12	0,52	0,67
Río Loa en Finca	0,40	0,49	6,2%	0,58	-0,03	0,30	0,42
Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua	0,04	0,46	20,0%	0,52	-0,03	0,25	0,27
Río Loa en Desembocadura	0,56	0,39	5,3%	0,55	0,00	0,17	0,30

Fuente: Elaboración Propia.

5.5. Análisis de la Calibración Obtenida

Observando los resultados gráficos y numéricos de la calibración del modelo, se destacan las estaciones Río Toconce antes Represa SENDOS, Río Loa en Yalquincha y Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua debido a su menor calidad de ajuste.

La estación fluviométrica Río Toconce antes Represa SENDOS, corresponde al punto de control ubicado en la zona alta de la cuenca del río Toconce, afluente al río Salado. Se estima que los valores estadigráficos se ven afectados principalmente por el caudal medido entre los años 2005 y 2011. En este periodo se observa una fuerte disminución del flujo pasante en comparación a lo registrado históricamente. La razón de esta caída es desconocida por el consultor, pero puede provocarse por errores en la medición, un aumento en el porcentaje de uso de algún derecho o una disminución repentina en afloramientos aguas arriba. De cualquier forma, esta situación se considera una anomalía dentro de las características históricas del sector, reafirmada por la tendencia que muestran los registros en el último periodo de medición. Adicionalmente, se cuenta con la serie de volumen acumulado pasante por la estación, la cual muestra una buena correlación entre lo modelado y observado. De acuerdo a esto, se puede determinar que

se representa de buena forma las características del sector sobre periodos prolongados de tiempo.

La estación Río Loa en Yalquincha se ubica en lo que se define como la entrada a la ciudad de Calama y aguas abajo del sector Angostura, donde se presentan afloramientos entre 500 y 700 l/s. El flujo pasante presenta una condición oscilatoria determinada por el caudal de entrega desde el embalse Conchi, el cual suple la demanda de los sectores agrícolas de Lasana y Chiu-Chiu previo a ser registrado por la estación. Otra característica que define al flujo es su magnitud, la cual se ve fuertemente influenciada por el afloramiento en el sector de Angostura. Considerando ambas variables, se estima que la principal fuente de error para los resultados de la modelación proviene del ajuste de las oscilaciones de caudal, donde se observa una mayor diferencia a partir del año 2004. Éstas presentan una amplitud correcta, incluso representando de buena manera las crecidas, por lo que el análisis se debe centrar en las demandas de riego de los sectores agrícolas de Lasana y Chiu-Chiu. La dificultad radica en la cantidad de variables que integra la determinación de la demanda (tipo y rotación de cultivos, métodos de riego o tipos de suelo, entre otras) y que el modelo no es capaz de reconstruir con certeza a nivel mensual. De igual forma, la serie de volumen pasante por la estación muestra una vez más que el modelo se ajusta de manera correcta para un periodo prolongado de tiempo, dando mayor seguridad frente a posibles simulaciones de escenarios futuros.

De igual forma, se debe considerar la buena calibración que presenta la estación Río Loa en Escorial, la cual se ubica cercana y es complementaria en cuanto a los periodos de registro. Por otro lado, ya se comentó que la estación Río Loa en Yalquincha se encuentra influenciada por el embalse Conchi, cuya calibración presenta problemas hasta el año 1986. Esto ocurre ya que, como se observa en la calibración de la estación Río Loa en Vado Santa Bárbara, en este periodo se modela un caudal mayor al registrado históricamente, lo que repercute en un aporte superior al embalse. Esta situación conlleva su funcionamiento a máxima capacidad, entregando la mayor parte del tiempo el caudal de rebase. Luego de superado este periodo, el embalse retoma un funcionamiento normal, descargando lo necesario para cubrir la demanda hídrica desde las zonas de riego aguas abajo. Bajo un razonamiento similar al realizado para la cuenca del río Toconce, se estima que el mayor caudal puede tener su origen en una demanda no integrada al modelo durante el periodo, una baja en el caudal de afloramiento o condiciones naturales no reflejadas. De cualquier forma, se considera que el modelo debe presentar un mejor ajuste en los últimos años de modelación, considerando que puede ser utilizado como una herramienta para verificar condiciones futuras de la cuenca.

Por lo tanto, se estima que la modelación del flujo pasante previo a la zona agrícola de Calama en la estación Río Loa en Yalquincha, presenta características con las cuales se estima un correcto ajuste del modelo.

Continuando, la estación Río Loa antes Zona Agrícola Quillagua muestra un bajo valor en su coeficiente de correlación R^2 . Al observar la calibración de su serie de caudales medios mensuales, se estima que presenta un buen ajuste tanto a las oscilaciones del flujo como a su magnitud. El problema radica en el bajo caudal pasante por la estación, con lo cual las diferencias en la estimación de las crecidas se convierten en una fuente importante de error frente al cálculo numérico de los estadígrafos. En este caso, nuevamente se verifica un buen ajuste en la serie de volumen pasante, correspondiente al ajuste de la calibración en periodos prolongados de tiempo.

Finalmente, se destaca la estación de cierre del modelo, Río Loa en Desembocadura, la cual recibe aportes desde el Salar de Llamara, aguas abajo del poblado de Quillagua. Se observa una buena calibración tanto de manera gráfica como numérica, donde se ajustan las oscilaciones de caudal, su magnitud y las crecidas se ven representadas. El bajo caudal pasante por este sector atenta contra mejores valores estadigráficos, pero se estima que la estación de cierre presenta una buena calidad de ajuste.

De manera general, la cuenca se encuentra ampliamente influenciada por los caudales de afloramiento, especialmente en la cuenca del río Salado. De acuerdo a los resultados de la calibración, se estima que esta variable fue bien reproducida, la cual depende de las condiciones de borde determinadas para los acuíferos, sus características geométricas y parámetros hidrogeológicos.

5.6. Análisis de los Resultados del Modelo

A continuación se presentan los resultados determinados por el modelo sobre tres elementos de importancia en la dinámica de la cuenca, los sectores acuíferos, las zonas de riego y el embalse Conchi.

5.6.1. Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados

El modelo integrado busca simular las condiciones de la cuenca analizando la interacción entre el sistema hídrico superficial y subterráneo. La dificultad radica en que el programa MAGIC realiza una simplificación de éste último, por lo que sus resultados son solo referenciales. Por otro lado, se cuenta con una modelación hidrogeológica del sector de Calama y Pampa Llalqui construido en Visual MODFLOW y actualizado bajo los mismos objetivos de este estudio. Por lo tanto, en función de una mejor representación del sistema subterráneo, la calibración de MAGIC debe presentar resultados coherentes con Visual MODFLOW en cuanto a caudales de entrada, recarga y afloramiento en el sector de Calama. El Cuadro 5.6-1 muestra el promedio de los caudales medios mensuales de cada sector acuífero. Un análisis mensual presenta valores similares debido a que el sistema subterráneo se define saturado, supuesto de la modelación para la generación de afloramientos, por lo que los caudales involucrados se estabilizan rápidamente.

Cuadro 5.6-1 Balance Subterráneo MAGIC (m³/s)

BALANCE	AC-01 Río Loa Aguas Arriba Embalse Conchi	AC-02 Río San Pedro	AC-03 Río Salado	AC-04 Pampa Llalqui	AC-05 Calama	AC-06 Salar de Miraje	AC-07 Salar de Llamara	AC-08 Río Loa antes de Quillagua	AC-09 Río Loa en Desembocadura	SUMA
Entradas										
Subterránea	0,79	0,73	1,95	0,39	0,54	0,20	0,11	0,09	0,10	4,89
Recarga PP+Riego	0,20	0,09	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
Recarga Ríos	0,02	0,25	0,13	0,00	0,78	0,00	0,00	0,06	0,07	1,31
Recarga Canales	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
Salidas										
Subterránea	-0,10	0,00	-0,43	-0,39	-0,20	-0,09	-0,05	-0,05	-0,06	-1,38
Pozos	0,00	-0,94	-1,04	-0,03	-0,17	0,00	-0,02	0,00	0,00	-2,20
Afloramientos	-0,93	0,00	-0,57	0,00	-1,31	-0,10	-0,04	-0,10	-0,06	-3,12
Total Entradas	1,01	1,07	2,08	0,39	1,53	0,20	0,11	0,15	0,17	6,71
Total Salidas	-1,03	-0,94	-2,04	-0,42	-1,68	-0,20	-0,11	-0,15	-0,12	-6,70
Balance	-0,02	0,13	0,04	-0,03	-0,15	0,00	-0,01	0,00	0,05	0,01

Fuente: Elaboración Propia.

El balance no cierra completamente, lo cual reafirma la calidad referencial de los resultados proporcionados por MAGIC para el sistema subterráneo. Se destaca que en el sector acuífero de Calama se identifica un caudal de afloramiento total de 1,31 m³/s, correspondiente a las zonas de Angostura (681 l/s), Río San Salvador (235 l/s) y Quebrada Ojos de Opache (393 l/s).

Considerar de igual forma que, a pesar de no existir cultivos en los sectores acuíferos AC-01 y AC-02, la creación de zonas de riego ficticias definidas solo con superficie no cultivada, permite la recarga por precipitación, observándose registros mayores al resto de la cuenca.

5.6.2. Satisfacción de la Demanda Hídrica en Zonas de Riego

Corresponde al porcentaje del caudal demandado desde las zonas de riego que efectivamente se ha logrado satisfacer por medio del caudal existente en el cauce que es conducido a través de la red de canales definida en el modelo.

El cálculo de la satisfacción de la demanda se definió de la siguiente manera:

$$\text{Satisfacción Demanda} = \frac{Q \text{ Disponible para Riego}}{NNM \text{ de cada ZR} \cdot \text{Sup. Cultivable}}$$

Los valores de cada una de estas variables se entregan como resultado de la modelación por parte de MAGIC, los cuales se resumen y presentan para cada zona de riego en el Cuadro 5.6-2.

Cuadro 5.6-2 Satisfacción Demanda Hídrica

Zona de Riego	Localidad	Q Demandado (m ³ /s)	Q Afluente (m ³ /s)	Seguridad de Riego
ZR-01	Lasana	0,251	0,227	91%
ZR-02	Chiu-Chiu	0,251	0,197	81%
ZR-03	Toconce	0,006	0,004	70%
ZR-04	Caspana	0,023	0,019	93%
ZR-05	Ayquina	0,003	0,003	93%
ZR-06	Turi	0,038	0,038	98%
ZR-07	Paniri	0,003	0,003	93%
ZR-08	Cupo	0,012	0,009	83%
ZR-09	Calama	0,045	0,044	97%
ZR-10	Calama	0,591	0,590	100%
ZR-11	Calama	0,418	0,404	98%
ZR-12	Calama	0,011	0,011	97%
ZR-13	Quillagua	0,003	0,003	96%
Total			1,656	1,552

Fuente: Elaboración Propia.

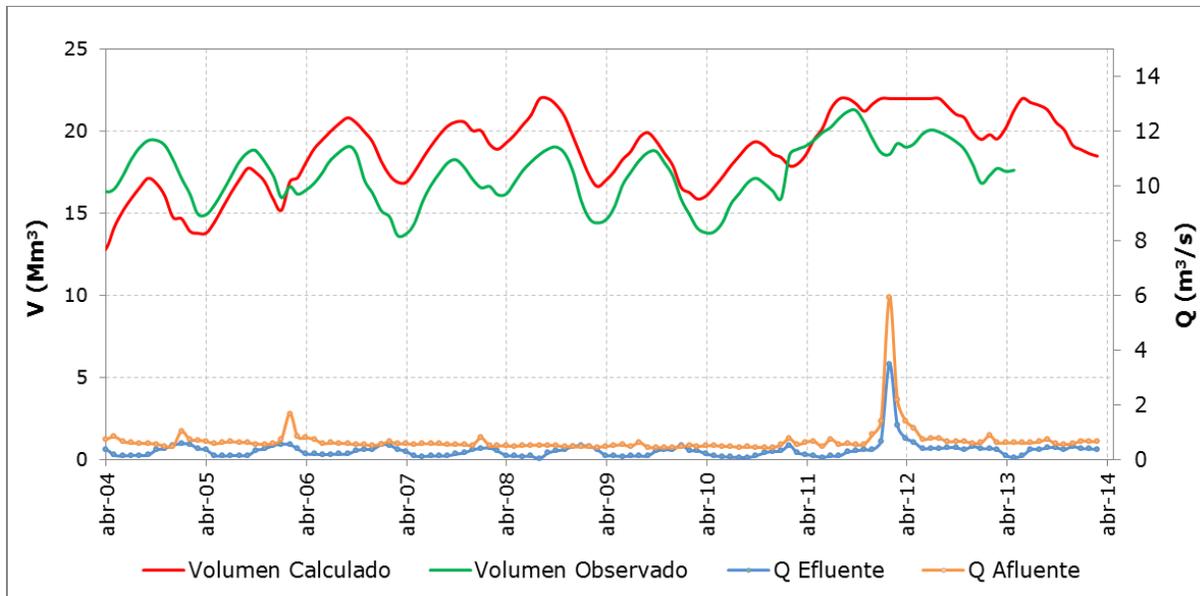
Se han omitido las zonas de riego 14, 15 y 16 debido a que corresponden a sectores sin cultivos asociados, generadas solo con la finalidad de calcular la recarga por precipitación al acuífero.

5.6.3. Análisis Volumétrico Embalse Conchi

El embalse es representado en el modelo por medio de las curvas de cota de embalsamiento y superficie inundada frente al volumen embalsado, pero no es posible asignar una regla de operación. Esta deficiencia conlleva que el caudal de entrega queda determinado por satisfacer las deficiencias hídricas de las zonas de riego asignadas al embalse. Debido a que el tramo del río Loa en el sector de Calama recibe aportes del río Salado, el embalse reduce considerablemente su flujo de salida. Por lo tanto, como solución se asocia una captación puntual a los pies del embalse con una demanda equivalente a las necesidades de las zonas de riego aguas abajo. La Figura 5.6-1 presenta

el caudal de entrega del embalse observado y calculado, donde los registros oficiales corresponden al periodo entre los años 2004 y 2013.

Figura 5.6-1 Balance Volumétrico Embalse Conchi



Fuente: Elaboración Propia.

6. ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO

El sector medio de la cuenca del río Loa, específicamente entre el embalse Conchi y unos 25 km aguas abajo de Calama, cuenta con un modelo numérico desarrollado en Visual MODFLOW y calibrado en régimen permanente (REF#31). Este modelo ha sido sometido a una actualización y re-calibración, como resultado de la nueva información geofísica existente, la sectorización de acuíferos realizada en el Capítulo 4, así como también, de la información proporcionada en la actualización del modelo de flujo subterráneo del Estudio de Talabre (2014) y que se presentó a la autoridad (REF#33).

6.1. Modelo Hidrogeológico 2013

El dominio del modelo incluye la totalidad del sector hidrogeológico de aprovechamiento común de Calama y parte de los sectores de Llalqui y Salado. Las características asociadas a este modelo se presentan en el Cuadro 6.1-1.

Cuadro 6.1-1 Características Modelo Numérico REF#31

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Límite Norte (UTM)	m	7.566.206
Límite Sur (UTM)	m	7.493.206
Límite Oeste (UTM)	m	478.635
Límite Este (UTM)	m	561.490
Nº Filas	-	200
Nº Columnas	-	227
Nº Estratos	-	3
Nº Celdas	-	136.200
Tamaño Celdas	m x m	365 x 365

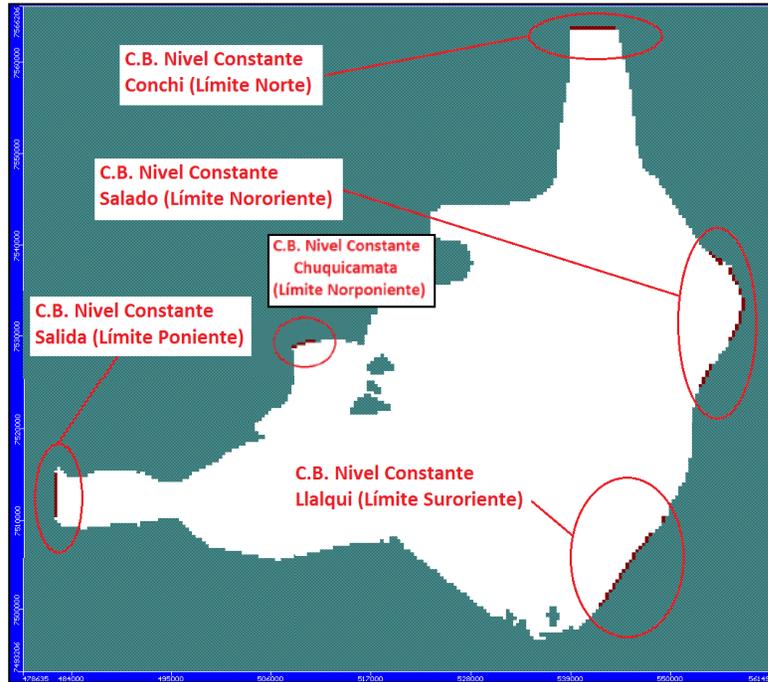
Fuente: REF#31.

El sistema presenta una gran variedad de condiciones de borde, debido a la complejidad en la dinámica de flujo existente, que corresponden a Nivel Conocido, Condición de Río, Condición de Dren y Recarga Areal.

Se implementaron 5 condiciones de nivel conocido: límite norte en sector Conchi, límite este en sector río Salado, límite sur-este en sector Llalqui, límite oeste 25 km aguas abajo de Calama y límite Chuquicamata al norte de Calama. De estas condiciones, sólo el límite oeste representa una salida subterránea del sistema, siendo todas las otras entradas provenientes de diferentes sectores (Figura 6.1-1).

En cuanto a la condición de río, ésta representa los principales cauces de la zona modelada (río Loa y Salado) y permite su interacción con el sistema subterráneo en zonas de descarga y afloramiento reconocidas (Figura 6.1-2).

La condición de borde tipo dren fue definida para el río San Salvador y las vertientes Likantatay, La Cascada y Ojos de Opache, ya que todos estos cauces son generados por los afloramientos existentes en el sector poniente de Calama (Figura 6.1-3).

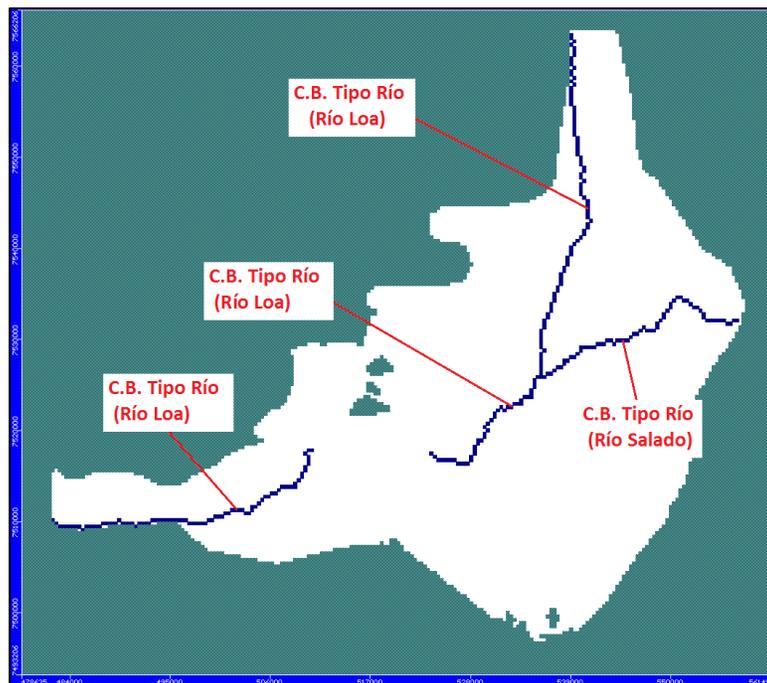
Figura 6.1-1 Condiciones de Borde Nivel Conocido

Fuente: REF#31.

Finalmente, la condición de recarga fue utilizada para representar los aportes de precipitación directa sobre el dominio, recargas en zonas de riego, recarga asociada al tranque de relaves Talabre y la recarga asociada a las pérdidas en el sistema de distribución de agua potable de Calama.

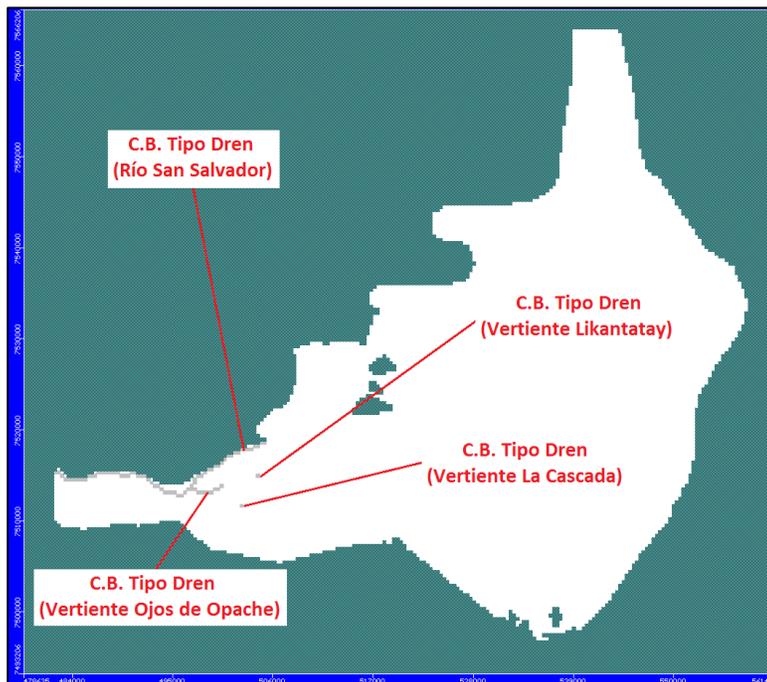
La calibración del modelo fue realizada en régimen permanente, utilizando como referencia la REF#26, que indica una situación de equilibrio en el sistema de Calama para principios del año 2003. Esta calibración consideró tanto un ajuste de niveles calculados vs observados, como un ajuste de los caudales relevantes en la zona modelada (afloramientos, flujos de entrada y salida, etc.). La Figura 6.1-4 muestra el ajuste de niveles con un valor de RMS normalizado de 3,91%, mientras que el Cuadro 6.1-2 muestra el resultado del balance de aguas, con un error de cierre de 0,41%.

Figura 6.1-2 Condiciones de Borde Río

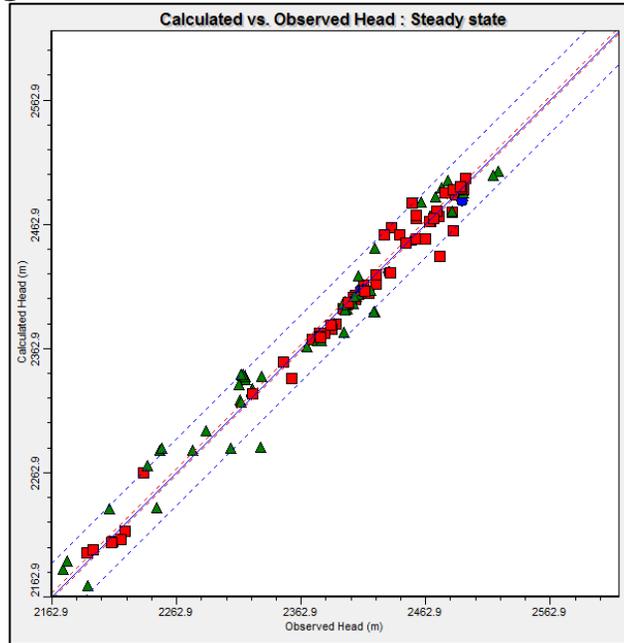


Fuente: REF#31.

Figura 6.1-3 Condiciones de Borde Dren



Fuente: REF#31.

Figura 6.1-4 Calibración Modelo REF#31

Fuente: REF#31.

6.2. Modificaciones Asociadas a la Actualización del Modelo

A raíz de los trabajos realizados para el presente estudio, existe una serie de posibles modificaciones que afectan la construcción y calibración actual del modelo.

En relación a su geometría, ésta se ve afectada tanto por la nueva información geofísica desarrollada en el presente estudio, como por la sectorización acuífera realizada.

El perfil L1, correspondiente a la geofísica del sector Parque Eólico Calama (Figura 3.3-1), muestra los diferentes estratos que se observan en el sector coincidente con la condición de borde sur-este de nivel conocido. Esta información difiere de la representación existente en el modelo actual, debido a que ese sector no presentaba información de detalle. Debido a esto, y a la importancia de representar correctamente las condiciones de borde, se realizó la modificación de la geometría del sector sur-este del modelo, tomando en cuenta la nueva información disponible.

Por otra parte, la sectorización acuífera presentada en el Capítulo 4 para los acuíferos de Calama y Llalqui posee diferencias con el límite activo del modelo hidrogeológico MODFLOW. De acuerdo con la Figura 4.2-14, el sector Llalqui se extendería hacia el sur – Sur-Este, mientras que la zona poniente del acuífero de Calama se extendería más ampliamente hacia el Sur. A pesar de lo anterior, se optó por mantener el dominio actual del modelo por lo siguiente:

- El modelo posee una condición de borde en el sector Llalqui, que permite representar el aporte de la zona no considerada en el modelo.
- El sector poniente del modelo posee como condición de borde Sur el río Loa, por lo que la zona no modelada no representa un cambio significativo.

- Realizar cambios de esa magnitud produce diferencias significativas en la calibración del modelo que no pueden ser ajustadas de manera adecuada en los plazos establecidos.

Cuadro 6.2-1 Balance Hídrico Modelo REF#31

ENTRADAS (I/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	NE	213
	SE	405
	N	77
	NO	160
Inf. Tranque Talabre		20
Inf. Riego		76
Inf. Agua Potable		50
Pérdida Ríos/ Aporte Acuífero	Río Loa Tramo 1	12
	Río Loa Tramo 2	0
	Río Loa Tramo 3	45
	Río Loa Tramo 4	331
Recarga por Precipitación		61
TOTAL ENTRADAS (I/s)		1.450

SALIDAS (I/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	O	363
Afloramiento Acuífero/Recuperación Ríos	Río Loa Tramo 1	0
	Río Loa Tramo 2	438
	Río Loa Tramo 3	0
	Río Loa Tramo 4	0
	Río Salado	135
Drenes	Río San Salvador	168
	V. Ojos de Opache	332
	V. La Cascada	0
	V. Likantatay	20
TOTAL SALIDAS (I/s)		1.456

Balance Global (I/s)	-6,0
Error Global (%)	0,41

Fuente: REF#31.

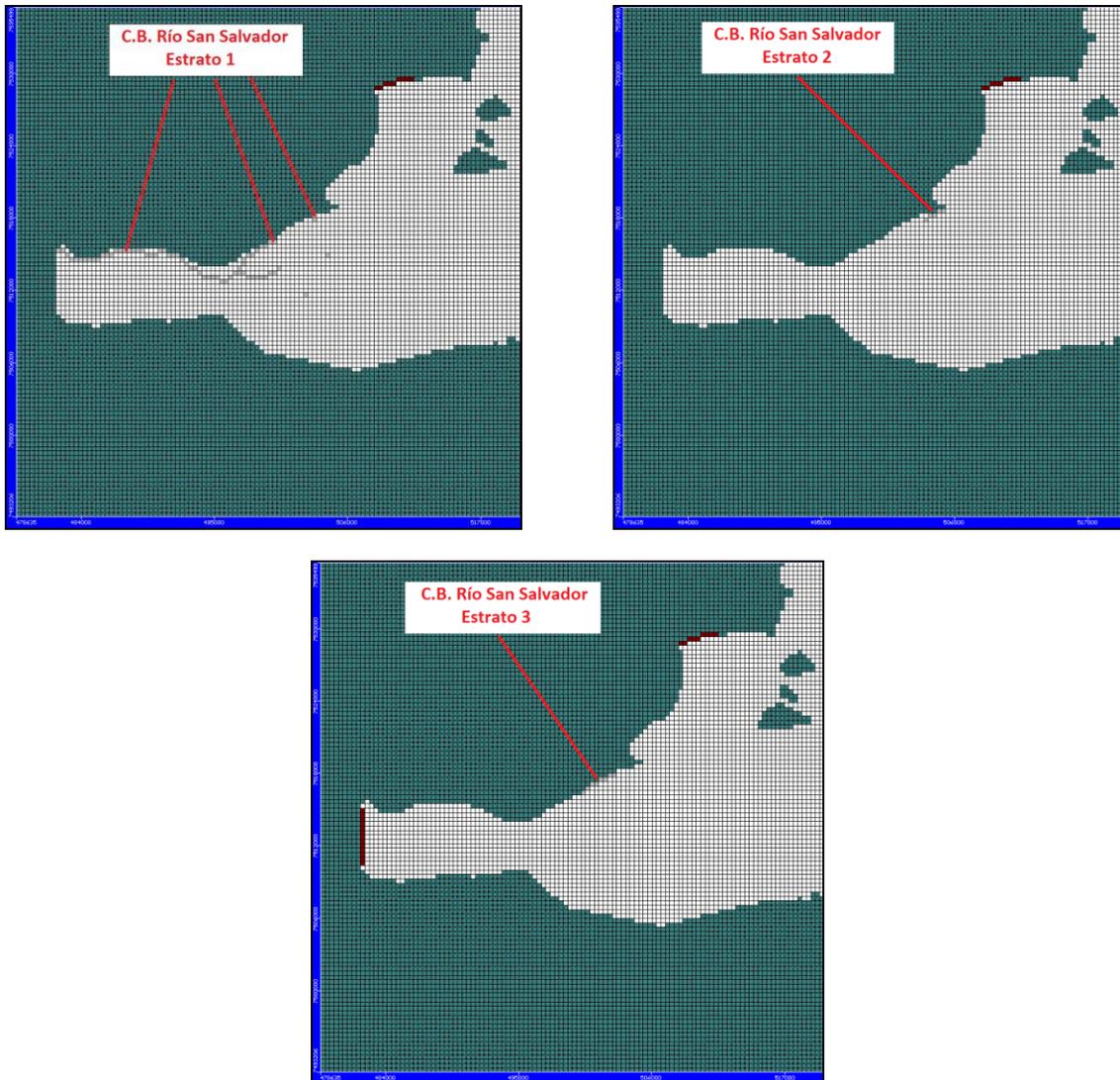
En resumen, los cambios geométricos realizados al modelo corresponden sólo a los generados por la nueva información geofísica disponible para el sector de Llalqui.

Por otro lado, otro de los cambios que se realizó al modelo subterráneo del 2013, guarda relación con la modificación de la Condición de Borde tipo Dren asignado al río San Salvador, entre el tramo de su nacimiento hasta el campo de pozos de Minera El Tesoro. Esta modificación significó una reasignación de las cotas asignadas a las celdas tipo Dren profundizándolas entre los estratos superior, intermedio e inferior de modo de

compatibilizar la geometría con lo verificado en terreno en dicho sector. Además se modificó la magnitud de la conductancia de los drenes que conforman el cauce del río San Salvador reasignándolos a valor que varían entre los 300 a 0,5 m²/día. En la Figura 6.2-1, se presenta la modificación de las celdas tipo Dren reasignadas al río San Salvador para cada uno de los 3 estratos.

Adicionalmente, siguiendo la línea de los cambios anteriores, se efectuaron modificaciones en las magnitudes de las conductancias en algunas celdas de la Condición de Borde tipo Río asignadas al cauce del río Loa. En particular, se reasignaron valores de conductancia en los tramos de este cauce principal que van entre los sectores de Yalquincha-Escorial y Escorial-Salida Oeste del modelo.

Figura 6.2-1 **Modificación de Condición de Borde en Río San Salvador**



Fuente: Elaboración Propia.

A consecuencia de los cambios en la geometría y en algunas de las condiciones de borde tipo Dren y Río, se realizó una verificación de la calibración del modelo, de manera tal de asegurar los requerimientos mínimos descritos en la "Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA". Como resultado de este chequeo, se observó un leve desajuste del modelo, reflejado en un valor del RMS normalizado de 4,1%. A pesar de la pequeña diferencia, se decidió re-ajustar el modelo, de manera tal de disponer de un modelo permanente similar al actual.

6.3. Calibración del Modelo Hidrogeológico

Luego de realizadas las modificaciones al modelo hidrogeológico, se procede con su calibración. En este punto es importante mencionar que dado que las modificaciones pueden generar variaciones en los resultados del modelo ya calibrado, es necesario realizar nuevamente la calibración del modelo en régimen permanente.

A continuación se detalla el procedimiento y los resultados obtenidos para las calibraciones en régimen permanente y transiente.

6.3.1. Calibración Régimen Permanente

Como ya se mencionó, es necesario re-calibrar el modelo en régimen permanente como resultado de la implementación de nueva información. Este proceso considera tanto el ajuste del balance hídrico del dominio del modelo, como el ajuste de los niveles observados. En cuanto a esto último se consideraron 16 pozos de observación de CODELCO, los cuales se utilizaron en la calibración en régimen permanente del modelo actualizado del Estudio Talabre (REF#33), así como también, los pozos de propiedad de Minera El Tesoro y DGA (Aeropuerto). En el Cuadro 6.3-1, se presenta un resumen con los pozos de observación empleados en la calibración en régimen permanente a Enero de 2003.

Cuadro 6.3-1 Pozos de Observación utilizados en Calibración Régimen Permanente

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Propietario	Nivel Estático (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)		
AEROPUERTO	514.250	7.510.760	DGA	2.363,03
CHU-26B(IC-V)	530.654	7.536.726	CODELCO	2.610,00
CHU-45(IL-V)	509.709	7.525.436	CODELCO	2.390,60
CHU-47(IL-V)	508.837	7.525.409	CODELCO	2.387,91
CHUCA-10B(IL-V)	508.911	7.525.266	CODELCO	2.377,50
CHUCA-13B(IL-V)	508.859	7.525.280	CODELCO	2.381,53
CHUCA-1B(IC-V)	511.996	7.512.638	CODELCO	2.306,64
CHUCA-2(IC-V)	509.591	7.509.647	CODELCO	2.301,83
CHUCA-5(IC-V)	510.125	7.520.815	CODELCO	2.286,90
CHUCA-6B(IC-V)	507.792	7.520.984	CODELCO	2.249,70
CHUCA-8(IL-V)	509.448	7.524.973	CODELCO	2.371,88
LE-1	502.677	7.516.487	MINERA EL TESORO	2.171,64
LE-2	503.121	7.516.805	MINERA EL TESORO	2.175,27

Cuadro 6.3-1 Pozos de Observación utilizados en Calibración Régimen Permanente

Pozo Observación	Coordenadas UTM: WGS-84		Propietario	Nivel Estático (m s.n.m.)
	Este (m)	Norte (m)		
LE-4	502.632	7.515.411	MINERA EL TESORO	2.190,72
LE-6	503.046	7.515.996	MINERA EL TESORO	2.195,50
LE-7	503.841	7.514.734	MINERA EL TESORO	2.210,50
LE-9	505.378	7.515.710	MINERA EL TESORO	2.221,36
P-10	503.460	7.514.207	MINERA EL TESORO	2.202,90
P-18	503.891	7.514.885	MINERA EL TESORO	2.212,00
P-19	503.707	7.514.507	MINERA EL TESORO	2.204,50
P-21	504.035	7.514.665	MINERA EL TESORO	2.211,53
P-24	504.093	7.514.588	MINERA EL TESORO	2.208,00
P-25	503.711	7.514.146	MINERA EL TESORO	2.204,00
P-27	503.839	7.513.955	MINERA EL TESORO	2.203,70
P-7	503.408	7.514.290	MINERA EL TESORO	2.203,10
PBC-1	502.897	7.514.720	MINERA EL TESORO	2.175,00
PBC-2	502.328	7.514.552	MINERA EL TESORO	2.173,00
PPR-1	504.398	7.515.153	MINERA EL TESORO	2.218,17
PPR-4	503.867	7.514.707	MINERA EL TESORO	2.210,53
PPR-5	502.588	7.515.488	MINERA EL TESORO	2.191,49
SE-1(IC-V)	529.267	7.536.455	CODELCO	2.602,47
SE-3(IC-III)	531.026	7.526.845	CODELCO	2.504,90
SE-5(IC-V)	514.248	7.518.275	CODELCO	2.316,46
SE-5B(IC-V)	514.204	7.518.297	CODELCO	2.314,77
SI-1B(IL-V)	512.620	7.526.213	CODELCO	2.407,50
SI-4B(IL-V)	512.560	7.526.861	CODELCO	2.413,57

Fuente: Elaboración Propia, en base a información proporcionada por CODELCO, Minera El Tesoro y DGA.

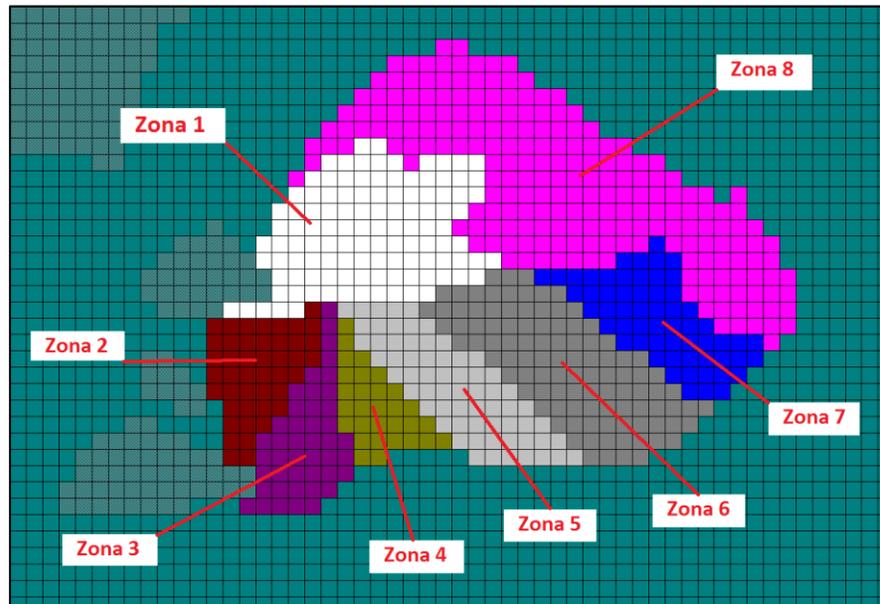
Por otra parte, se incorporó al modelo MODFLOW la distribución espacial de las recargas por infiltración del Tranque Talabre que se adoptó en la actualización del modelo de flujo del Estudio Talabre (REF#33). En la Figura 6.3-1, se presenta la zonificación espacial de los sectores de recarga producto de la infiltración del Tranque Talabre adoptada en el presente modelo numérico y que proviene del estudio de la REF#33.

De la Figura 6.3-1, se observa en total un número de 8 zonas, las cuales presentan la siguiente nomenclatura:

- Zona 1: Recarga Tranque Talabre Sección N-N'
- Zona 2: Recarga Tranque Talabre Sección A-A'
- Zona 3: Recarga Tranque Talabre Sección B-B'
- Zona 4: Recarga Tranque Talabre Sección C-C'
- Zona 5: Recarga Tranque Talabre Sección D-D'
- Zona 6: Recarga Tranque Talabre Sección F-F'

- Zona 7: Recarga Tranque Talabre Sección G-G'
- Zona 8: Recarga Tranque Talabre Proyección

Figura 6.3-1 Zonificación Espacial de Sectores de Recarga por Infiltración Tranque Talabre



Fuente: Elaboración Propia.

Asimismo, para cada una de las 8 zonas de recarga anteriores, se les asignó el mismo caudal de infiltración determinado en el estudio de la REF#33 en su fase estacionaria. Lo anterior, implicó la utilización de las siguientes tasas de recarga para cada una de las zonas de recarga del Tranque Talabre, expresadas en unidades de mm/año:

Cuadro 6.3-2 Tasa de Recarga Zonal por Infiltración del Tranque Talabre. Régimen Permanente

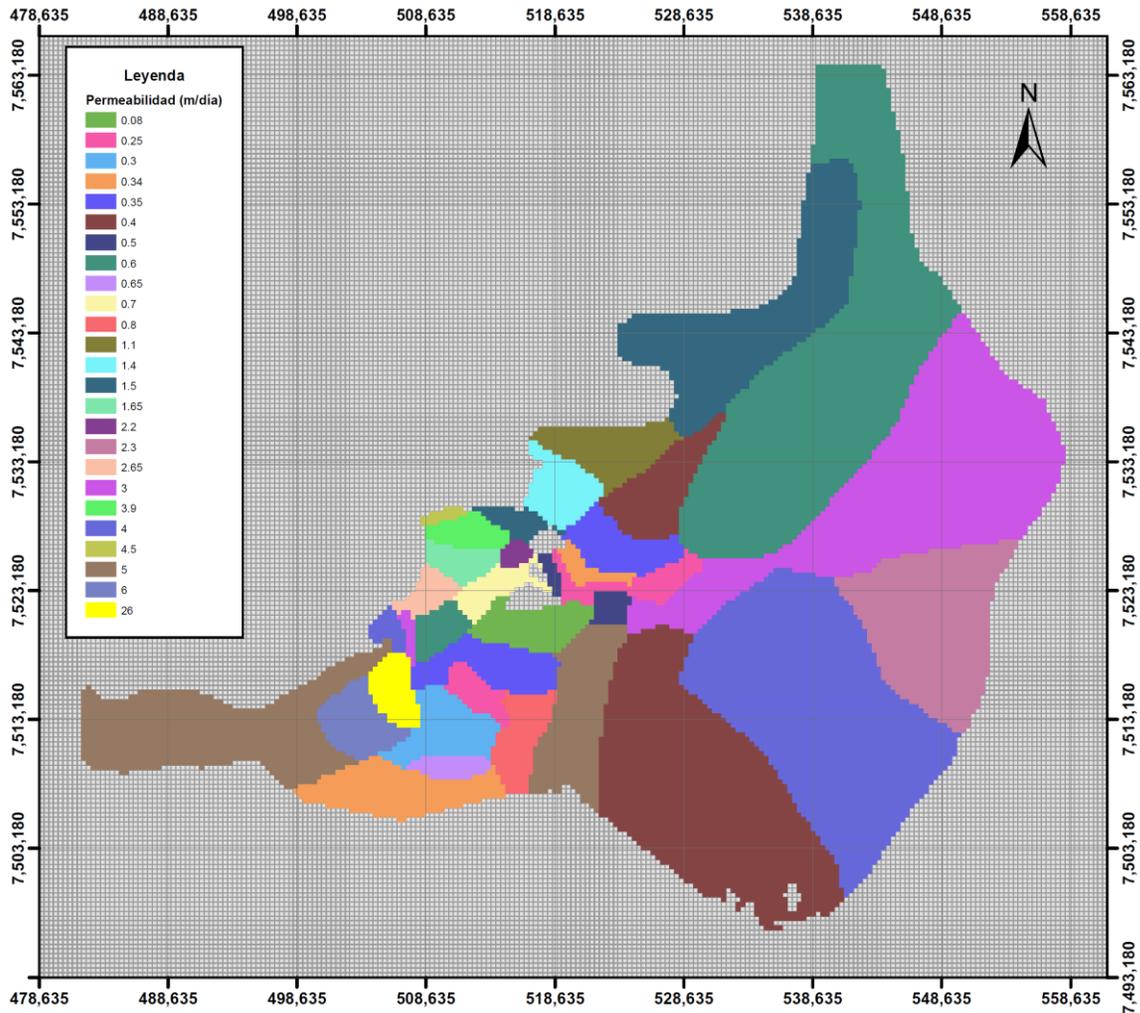
Zona	Descripción Zona	Tasa Infiltración (mm/año)
1	Recarga Tranque NN	0
2	Recarga Tranque AA	57,69
3	Recarga Tranque BB	30,56
4	Recarga Tranque CC	34,26
5	Recarga Tranque DD	1,39
6	Recarga Tranque FF	1,51
7	Recarga Tranque GG	0
8	Recarga Tranque Proyección	1,02

Fuente: Elaboración Propia.

El ajuste fue realizado mediante la modificación de los valores de permeabilidad en los diferentes sectores del modelo, verificando mantener el balance hídrico dentro de los valores del modelo conceptual de la REF#31.

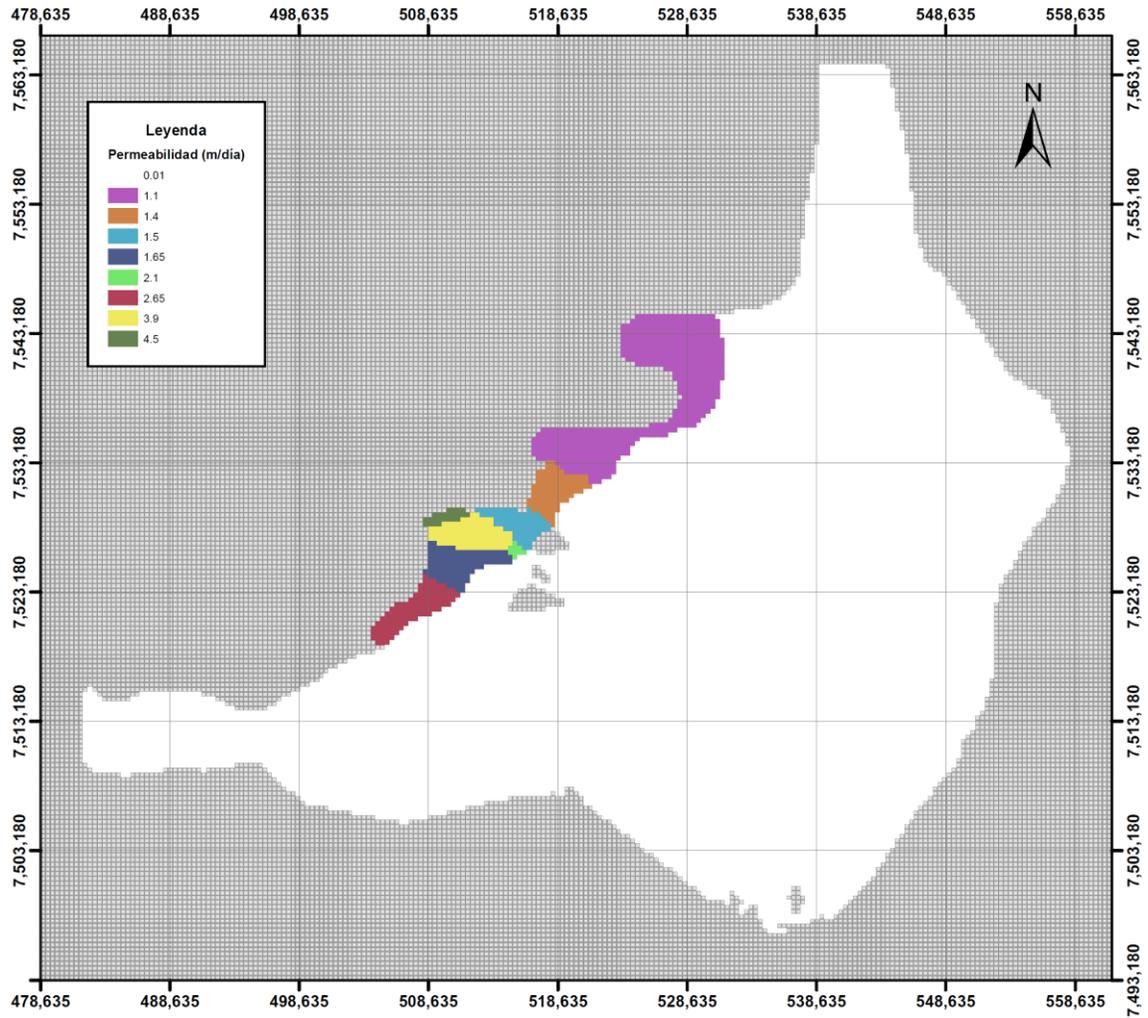
Las Figuras 6.3-2 a 6.3-4 muestran los valores definitivos de permeabilidad que permitieron mejorar la calibración disponible para los estratos superior, medio e inferior, respectivamente.

Figura 6.3-2 Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Superior



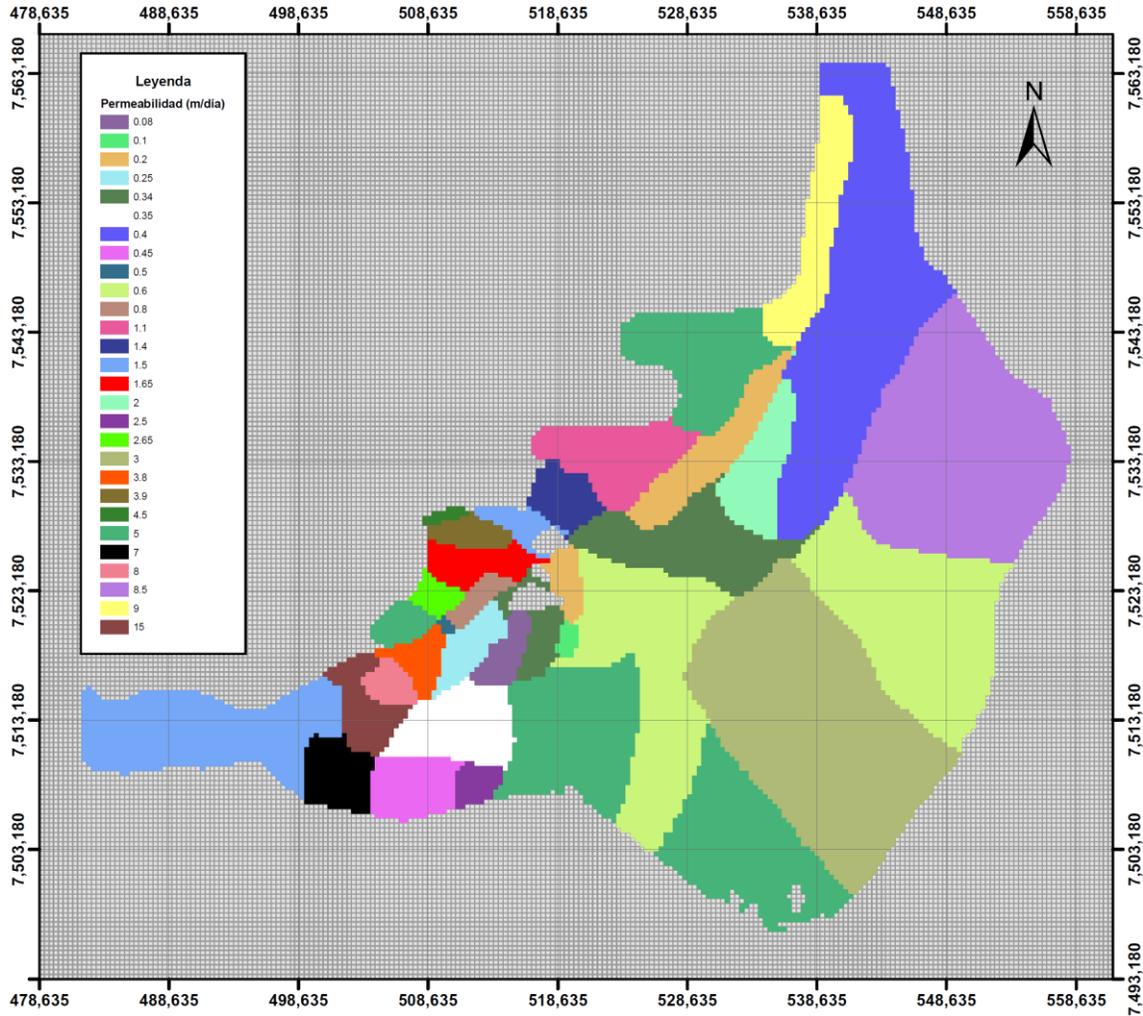
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-3 Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Intermedio



Fuente: Elaboración Propia.

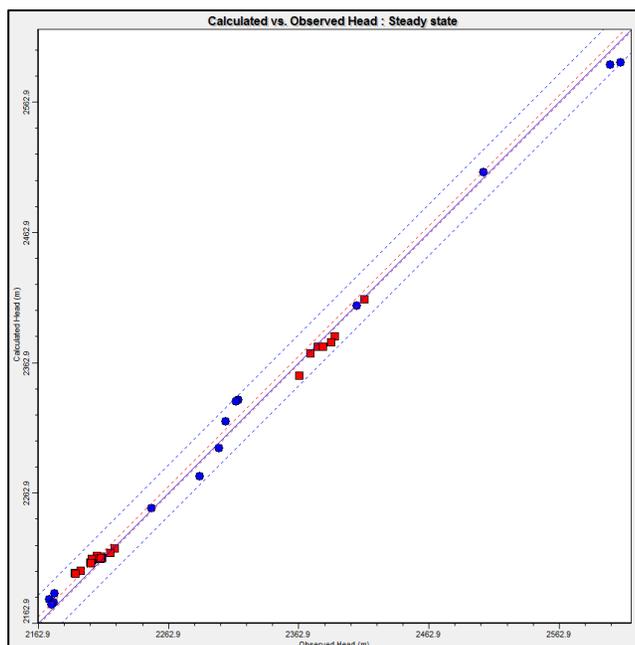
Figura 6.3-4 Distribución Espacial Definitiva de Permeabilidad en Estrato Inferior



Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, la Figura 6.3-5 muestra el ajuste logrado, con un valor RMS normalizado de 3,89%. En el Cuadro 6.3-3, se presenta un resumen con los principales parámetros estadísticos y residuales obtenidos de la calibración en régimen permanente.

En el caso del balance hídrico, este se muestra en el Cuadro 6.3-4, con un error de 0,07%.

Figura 6.3-5 Calibración Ajuste en Régimen Permanente

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.3-3 Parámetros Estadísticos y Residuales obtenidos de la Calibración en Régimen Permanente

Parámetro	Fórmula	Valor
Coefficiente de Correlación (R^2)	$1 - \frac{\sum (N_{OBS} - N_{SIM})^2}{\sum (N_{OBS} - \bar{N}_{OBS})^2}$	0,998
Error Medio (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i$	1,985
Error Absoluto Medio (MAE) (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i $	6,851
Máximo Residual Absoluto (m)	$\max \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	18,545
Mínimo Residual Absoluto (m)	$\min \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	0,918
Desviación Estándar (m)	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (r_i - R)^2}$	1,364
RMS (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2}$	8,309
RMS Normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$	1,895

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.3-4 Balance Hídrico en Régimen Permanente

ENTRADAS (l/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	NE	211
	SE	395
	N	160
	NO	167
Inf. Tranque Talabre		23
Inf. Riego		76
Inf. Agua Potable		50
Pérdida Ríos/ Aporte Acuífero	Río Loa Tramo 1	4
	Río Loa Tramo 2	0
	Río Loa Tramo 3	15
	Río Loa Tramo 4	255
Recarga por Precipitación		61
TOTAL ENTRADAS (l/s)		1.417

SALIDAS (l/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	O	403
Afloramiento Acuífero/Recuperación Ríos	Río Loa Tramo 1	11
	Río Loa Tramo 2	302
	Río Loa Tramo 3	0
	Río Loa Tramo 4	0
	Río Salado	109
Drenes	Río San Salvador	249
	V. Ojos de Opache	304
	V. La Cascada	0
	V. Likantatay	40
TOTAL SALIDAS (l/s)		1.418

Balance Global (l/s)	-1
Error Global (%)	0,07

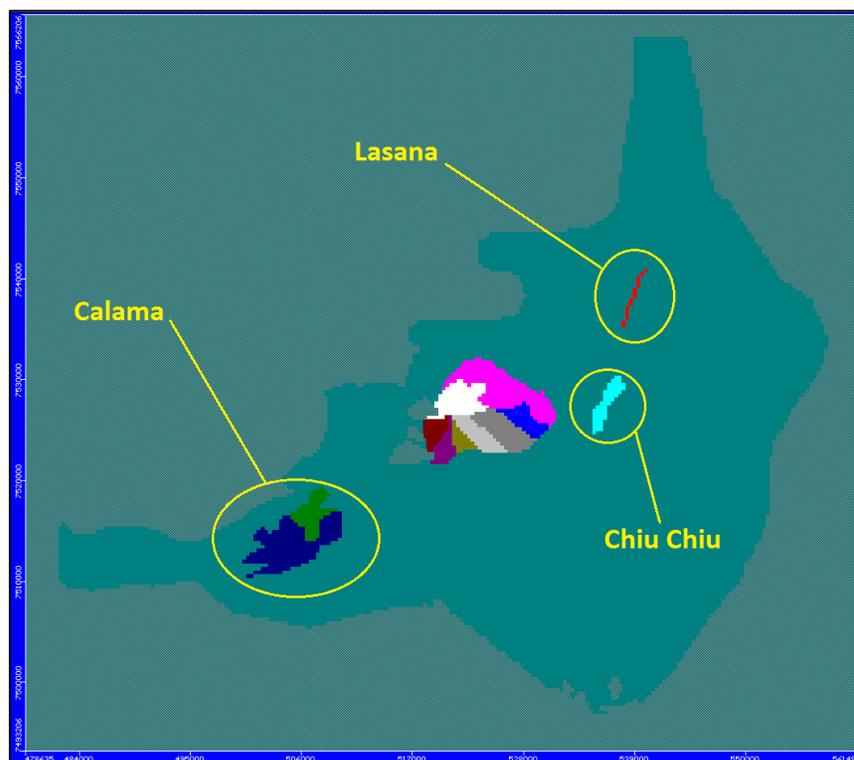
Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2. Calibración Régimen Transiente

A continuación se describe el proceso de calibración en régimen transiente del modelo numérico, el cual considera como condición inicial de simulación el modelo en régimen permanente mencionado en el punto anterior. Este modelo será operado para el período 2003 – 2014, considerando la información de niveles disponibles de Minera El Tesoro, la cual abarca hasta el año 2009, mientras que para los pozos de CODELCO los registros piezométricos llegan sólo hasta Diciembre de 2013.

Además para esta modelación en estado transitorio, se consideró como datos de entrada las mismas series de recargas ingresadas al modelo MAGIC que guardan relación con los retornos de riego agrícola de Calama, Chiu Chiu y Lasana, así como también las pérdidas por infiltración de la red de agua potable de Calama. En la Figura 6.3-6, se presentan las zonas de riego y de percolación de agua potable antes señaladas dentro del modelo numérico.

Figura 6.3-6 Zonas de Riego y de Infiltración de Agua Potable dentro del Modelo



Fuente: Elaboración Propia.

Análogamente se incorporó al modelo transiente, la recarga temporal producto de la infiltración desde el tranque Talabre, de acuerdo a lo estimado en el estudio de la REF#33 y cuya distribución espacial fue mostrada previamente en la Figura 6.3-1. La serie de recarga temporal de infiltración que se estimó en ese estudio, consideró el período que va entre los años 2003 a 2013, por lo que para poder proyectar la serie hasta el año 2014, se asumió en la mayoría de los casos una tendencia lineal y en los otros se mantuvo constante para efectos de esta modelación. En el Cuadro 6.3-5 se presenta la variación

temporal de la recarga por infiltración del tranque Talabre ingresada a Visual MODFLOW como tasa en unidades de mm/año.

Cuadro 6.3-5 Serie de Tasas de Infiltración del Tranque Talabre Ingresada al Modelo en Régimen Transiente

Zona Tranque	Período Modelación		Fecha		Tasa Infiltración (mm/año)
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
1	0	365	01-01-2003	01-01-2004	0
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	0
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	0
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	0
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	0
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	0
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	0
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	4.51
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	9.02
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	9.02
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	9.02
	4015	4108	29-12-2013	01-04-2014	9.02
2	0	365	01-01-2003	01-01-2004	57.69
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	60.48
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	63.27
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	66.06
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	68.86
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	71.65
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	74.22
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	77.00
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	80.01
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	82.81
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	85.60
	4015	4108	29-12-2013	01-04-2014	86.05
3	0	365	01-01-2003	01-01-2004	30.56
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	31.79
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	33.01
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	34.24
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	35.46
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	36.68
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	37.77
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	38.99
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	40.36

Cuadro 6.3-5 Serie de Tasas de Infiltración del Tranque Talabre Ingresada al Modelo en Régimen Transiente

Zona Tranque	Período Modelación		Fecha		Tasa Infiltración (mm/año)
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	41.58
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	42.81
	4015	4108	29-12-2013	01-04-2014	43.23
4	0	365	01-01-2003	01-01-2004	34.26
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	37.35
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	40.43
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	43.53
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	46.61
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	49.70
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	52.87
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	55.95
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	58.96
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	62.05
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	65.13
5	0	365	01-01-2003	01-01-2004	1.39
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	3.98
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	6.56
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	9.15
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	11.73
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	14.32
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	16.92
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	19.51
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	22.07
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	24.66
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	27.24
6	0	365	01-01-2003	01-01-2004	1.51
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	1.64
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	1.77
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	1.89
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	2.02
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	2.14
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	2.38
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	2.51

Cuadro 6.3-5 Serie de Tasas de Infiltración del Tranque Talabre Ingresada al Modelo en Régimen Transiente

Zona Tranque	Período Modelación		Fecha		Tasa Infiltración (mm/año)
	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	2.52
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	2.65
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	2.77
	4015	4108	29-12-2013	01-04-2014	2.80
7	0	365	01-01-2003	01-01-2004	0
	365	730	01-01-2004	31-12-2004	0.22
	730	1095	31-12-2004	31-12-2005	0.96
	1095	1460	31-12-2005	31-12-2006	2.02
	1460	1825	31-12-2006	31-12-2007	3.08
	1825	2190	31-12-2007	30-12-2008	4.14
	2190	2555	30-12-2008	30-12-2009	5.34
	2555	2920	30-12-2009	30-12-2010	6.40
	2920	3285	30-12-2010	30-12-2011	7.32
	3285	3650	30-12-2011	29-12-2012	8.38
	3650	4015	29-12-2012	29-12-2013	9.44
4015	4108	29-12-2013	01-04-2014	9.67	
8	0	4108	01-01-2003	01-04-2014	1.02

Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2.1. Niveles Observados

En base a los antecedentes revisados en el presente estudio, se dispone de tres fuentes con información de niveles en el sector modelado: los pozos de monitoreo DGA y los pozos pertenecientes a Minera El Tesoro (REF#25). Si bien se sabe de la existencia de una gran cantidad de pozos distribuidos en los sectores de Calama y Llalqui, no se dispone de sus registros de nivel como para ser utilizados.

El Cuadro 6.3-4 presenta el listado de pozos utilizados para la calibración en régimen transiente, detallando la extensión de sus registros.

Cuadro 6.3-6 Pozos de Observación considerados para Calibración en Régimen Transiente

Pozo Observación	Período Registro de Niveles
Aeropuerto DGA	Desde 15-01-2003 hasta 11-12-2007
LE-1	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
LE-2	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
LE-4	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009

Cuadro 6.3-6 Pozos de Observación considerados para Calibración en Régimen Transiente

Pozo Observación	Período Registro de Niveles
LE-6	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
LE-7	Desde 23-02-2003 hasta 27-03-2009
LE-9	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
PPR-1	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
PPR-4	Desde 15-01-2003 hasta 27-03-2009
P-7	Desde 14-01-2005 hasta 21-03-2009
P-10	Desde 14-01-2005 hasta 27-03-2009
P-18	Desde 06-08-2007 hasta 27-03-2009
P-19	Desde 14-01-2005 hasta 21-03-2009
P-24	Desde 14-01-2005 hasta 21-03-2009
P-25	Desde 14-01-2005 hasta 21-03-2009
P-27	Desde 14-01-2005 hasta 21-03-2009
PBC-1	Desde 06-08-2007 hasta 27-03-2009
PBC-2	Desde 06-08-2007 hasta 27-03-2010

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de REF#25 y DGA.

Es importante notar que, a excepción del pozo Aeropuerto, todos los pozos con niveles observados se ubican aguas abajo de Calama, por lo que la calibración se enfocará en ese sector en particular.

De acuerdo a la información de MET incorporada en la REF#25, se dispone de la información relativa a la ubicación de las cribas y por ende de los estratos acuíferos donde se registran las correspondientes lecturas de niveles de aguas subterráneas. En el Cuadro 6.3-5 se presenta un resumen con los pozos de MET y con el detalle de los estratos acuíferos captantes de cada uno.

Cuadro 6.3-7 Pozos de propiedad de MET con sus respectivos Estratos Acuíferos Captantes

Pozo MET	Tipo de Pozo	Formación Captante	Estrato Modelo
LE-1	Observación	Calama	Acuífero Inferior
LE-2	Observación	Calama	Acuífero Inferior
LE-4	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
LE-6	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
LE-7	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
LE-9	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
PPR-1	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
PPR-4	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior

Cuadro 6.3-7 Pozos de propiedad de MET con sus respectivos Estratos Acuíferos Captantes

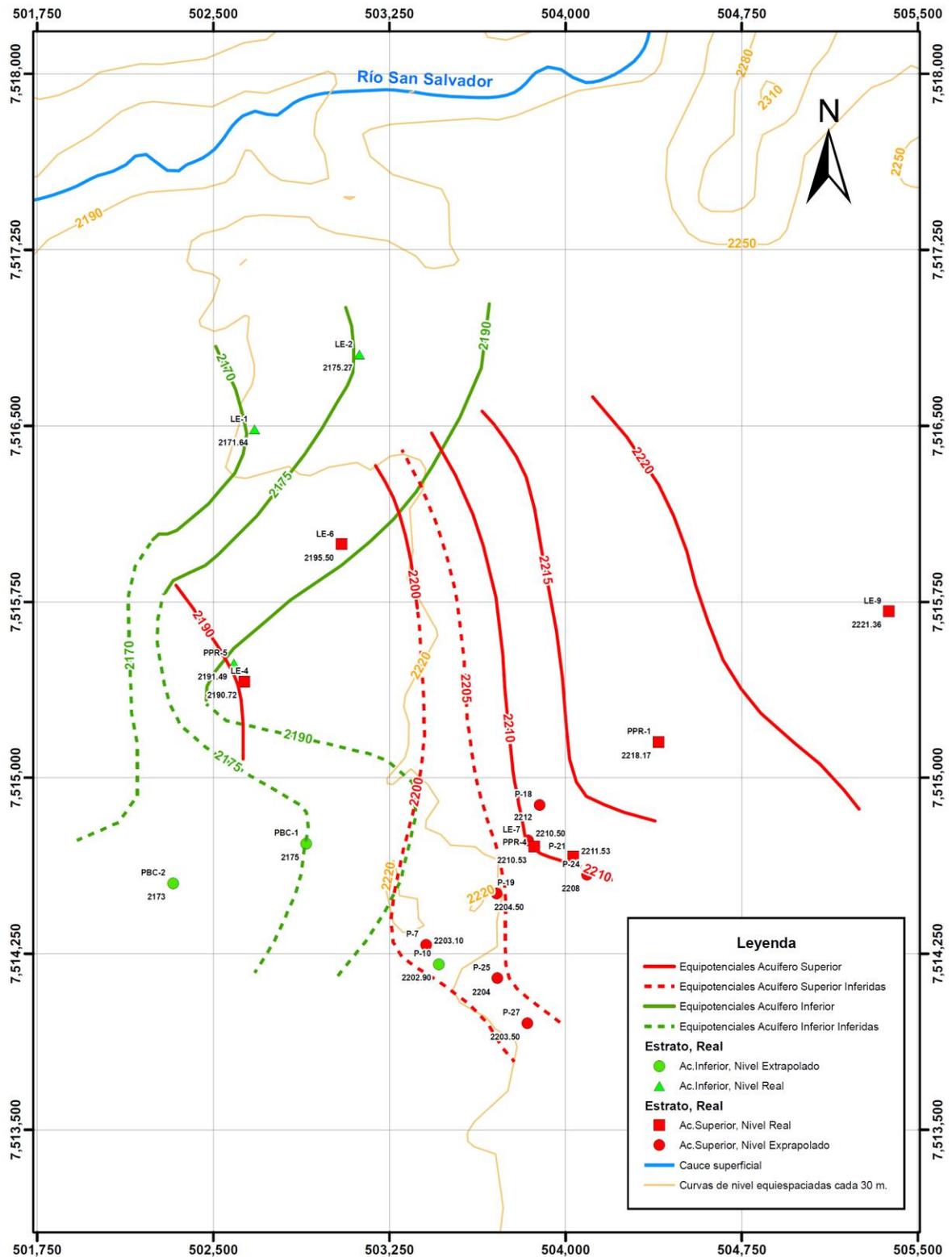
Pozo MET	Tipo de Pozo	Formación Captante	Estrato Modelo
PPR-5	Bombeo	Calama	Acuífero Inferior
P-7	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
P-10	Observación	Calama	Acuífero Inferior
P-18	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
P-19	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
P-24	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
P-25	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
P-27	Observación	Loa Superior	Acuífero Superior
PBC-1	Observación	Calama	Acuífero Inferior
PBC-2	Observación	Calama	Acuífero Inferior

Fuente: Elaboración Propia en base a datos de REF#25.

Los pozos de observación del Cuadro 6.3-5, fueron analizados en una primera instancia para estudiar el comportamiento de los niveles registrados en cada uno de ellos y ver si siguen una tendencia similar en su conjunto o si existen anomalías en la información. Para ello, se trazaron curvas equipotenciales tanto para el estrato acuífero superior como inferior con la información de niveles subterráneos registrados en los pozos de observación correspondientes a cada estrato y para el período de Enero de 2003. Para aquellos pozos que no disponían de información de niveles a Enero de 2003, se realizó una extrapolación retrospectiva de la tendencia de sus niveles hacia dicha fecha. En la Figura 6.3-7, se muestran las curvas equipotenciales trazadas para los estratos superior e inferior utilizando la información de niveles observados en los pozos de MET a Enero de 2003.

De la Figura 6.3-7, se aprecia que en el caso particular de los pozos PPR-5 y P-10, los valores de sus respectivos niveles subterráneos se ajustan de mejor manera a la tendencia general de las equipotenciales del estrato superior. Por lo tanto, dichos pozos fueron ingresados nuevamente al modelo, pero esta vez como representativos del Layer 1 correspondiente a la formación de las Calizas del Loa (Loa Superior).

Figura 6.3-7 Curvas Equipotenciales Proyectadas para los Pozos MET en los Estratos Superior e Inferior a Enero de 2003.



Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de REF#25.

6.3.2.2. Pozos de Bombeo

Dentro de los antecedentes recopilados, sólo se dispone de información de caudales de bombeo asociados a los pozos pertenecientes a Minera El Tesoro, Xstrata Lomas Bayas y CODELCO (REF#24 y REF#26), cuya información se presenta en el Cuadro 6.3-6. Cabe precisar que los bombeos señalados en el Cuadro anterior, asociados a los pozos de CODELCO, corresponden sólo a valores medios comprendidos entre los años 2002 a 2009.

Cuadro 6.3-8 Pozos de Bombeo con algún grado de Información

Pozo Bombeo	Propietario	Rango Caudal Bombeado (l/s)	Período de Bombeo
PPR-2	MET	31.4 - 46.6	Agosto 2007 a Diciembre 2008
CG-1	Xstrata Lomas Bayas	3.6 - 32.6	Enero 2003 a Marzo 2008
SI-1B	CODELCO	0.75(*)	2002 - 2009
SI-2B	CODELCO	25.67(*)	2002 - 2009
SI-3B	CODELCO	2.38(*)	2002 - 2009
SI-4B	CODELCO	12.24(*)	2002 - 2009
SI-5B	CODELCO	4.6(*)	2002 - 2009
SI-6B	CODELCO	11.8(*)	2002 - 2009

Nota: (*) Caudales medios de bombeo.

Fuente: Elaboración Propia a partir de REF#24 y 26.

A modo de completar los bombeos existentes en los sectores de Calama y Llalqui, se han incorporado además al modelo los pozos de derechos de aprovechamiento otorgados. Dentro de estos pozos con derechos, existen algunos de propiedad de MET donde se tiene la certeza que se encontrarían en operación, de acuerdo a las REF#24, 25 y 28. De los derechos restantes sólo se sabe que ya se encuentran otorgados en los sectores de Tranque Talabre y Llalqui, dada la información de derechos entregada por la DGA.

En el Cuadro 6.3-7, se presentan los derechos junto con los valores de caudales otorgados considerados en el modelo implementado en régimen transiente.

Cuadro 6.3-9 Derechos Subterráneos Considerados en la Modelación

Derecho	Usuario	Caudal Otorgado (l/s)
Pozo P-21	COMPAÑIA CONTRACTUAL MINERA LEONOR	65.8
Pozo PPR-3	COMPAÑIA CONTRACTUAL MINERA LEONOR	45
Pozo PPR-5	COMPAÑIA CONTRACTUAL MINERA LEONOR	50
RT-1(*)	CORPORACION NACIONAL DEL COBRE DE CHILE, DIVISION CODELCO NORTE	30
RT-2(*)	CODELCO CHILE DIVISION RADOMIRO TOMIC	2
Pozo W1	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	50
Pozo W2	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	20
Pozo W5	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	20
Pozo W6	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	35

Cuadro 6.3-9 Derechos Subterráneos Considerados en la Modelación

Derecho	Usuario	Caudal Otorgado (l/s)
Pozo Px	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	40
Pozo P1	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	34
Pozo E1	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	40
Pozo E2	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	30
Pozo E3	AGUAS DE LA SIERRA LIMITADA	50
Pozo Paty N°1	MINERA CERRO DOMINADOR (COMPAÑÍA MINERA PHOENIX)	31

Nota: (*) Nomenclatura inventada en ausencia de su nombre original.

Fuente: Elaboración Propia a partir de información de derechos facilitada por la DGA.

Es importante precisar en este punto, que existe una gran incertidumbre en cuanto a los bombeos reales existentes en la cuenca. En particular, se desconoce la regla de operación existente para la barrera hidráulica asociada al tranque de relaves Talabre, la cual podría alterar de manera significativa la dinámica subterránea del sector cercano a Calama. Además para efectos de la modelación se han asumido para los pozos de derechos del Cuadro 6.3-7, valores de caudales bombeo de acuerdo al factor de uso asignado.

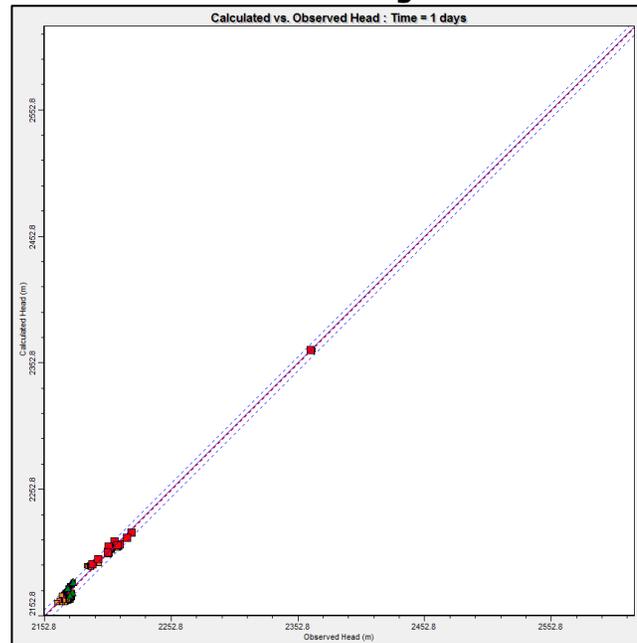
6.3.2.3. Coeficiente de Almacenamiento y Almacenamiento Específico

Tanto el coeficiente de almacenamiento como el almacenamiento específico poseen una importancia relevante en el comportamiento de los niveles en el acuífero. El primero de estos es preponderante en el caso del acuífero superior, mientras que el segundo toma relevancia en los estratos confinados y semiconfinados (estrato medio e inferior del modelo).

Los valores iniciales de estos parámetros han sido estimados de acuerdo a los valores obtenidos en pruebas de bombeo presentadas en la REF#24 y REF#26 y han sido sometidos al proceso de calibración.

6.3.2.4. Resultados Calibración

A continuación se presentan los resultados del proceso de calibración en régimen transiente, tanto en términos de nivel como de balance (Figuras 6.3-8 a 6.3-13 y Cuadro 6.3-8).

Figura 6.3-8 Calibración Modelo en Régimen Transiente Ajuste de Niveles

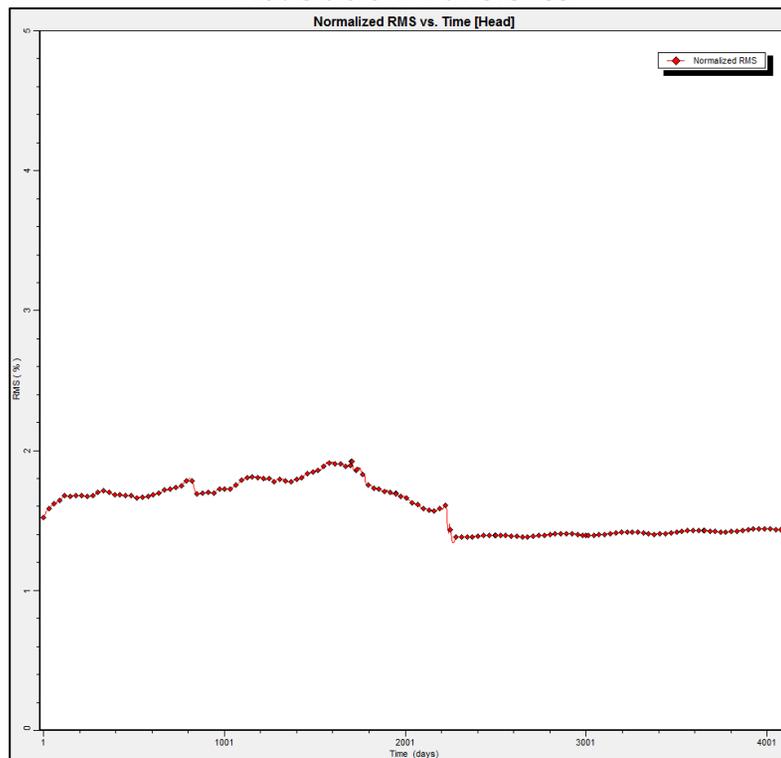
Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 6.3-8 muestra el ajuste de niveles calculados vs observados para aquellos pozos que poseen registros de nivel en función del tiempo. Se puede apreciar que en términos generales existe un buen ajuste de los niveles observados con los simulados en casi todo el período con datos observados. En concreto, se tiene un valor del error cuadrático medio RMS igual a 1,44%.

Por otra parte, en la Figura 6.3-9 se aprecia que para todo el período de modelación que va entre los años 2003 y 2014 (4.108 días), el valor del error cuadrático medio RMS no supera en ningún instante el valor máximo admisible de 5%, exigido en la guía de modelación del SEA¹.

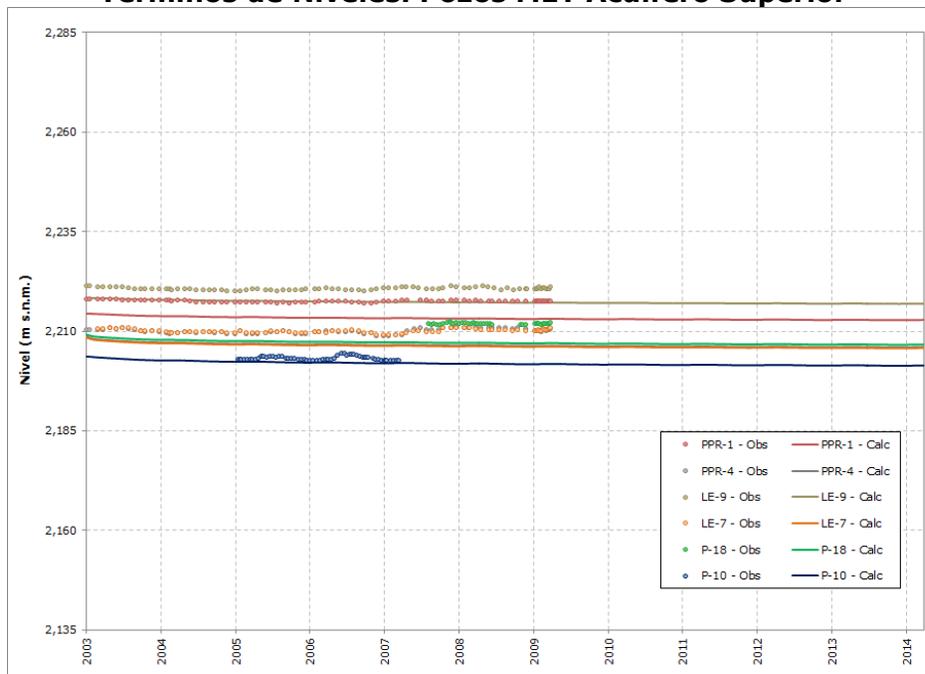
¹ "Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA". SEA, 2012.

Figura 6.3-9 Evolución del Error Cuadrático Medio RMS en Período de Modelación Transiente



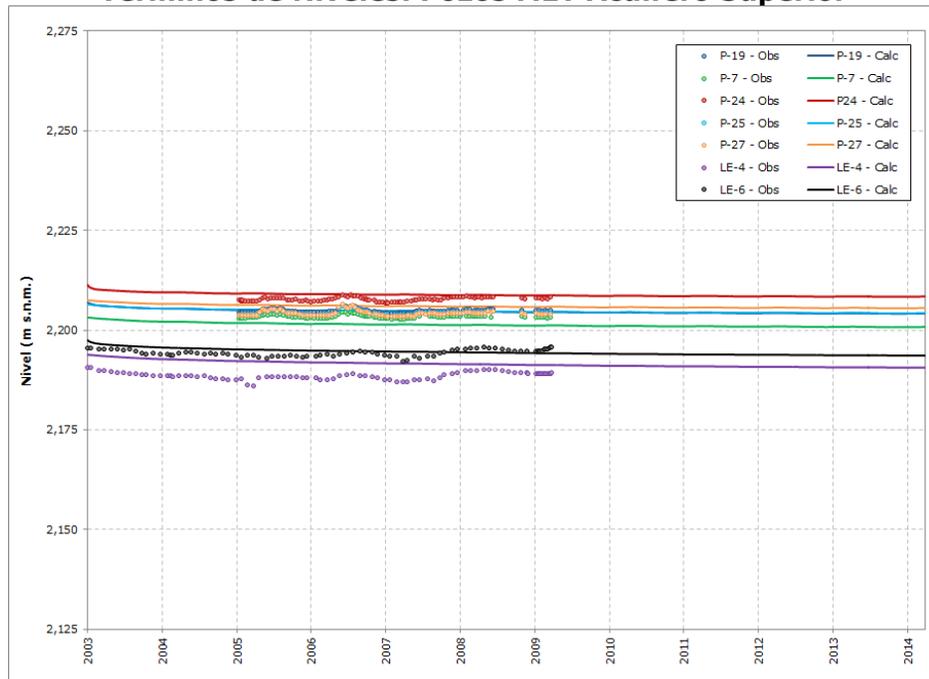
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-10 Calibración Modelo Actual en Régimen Transiente en Términos de Niveles. Pozos MET Acuífero Superior



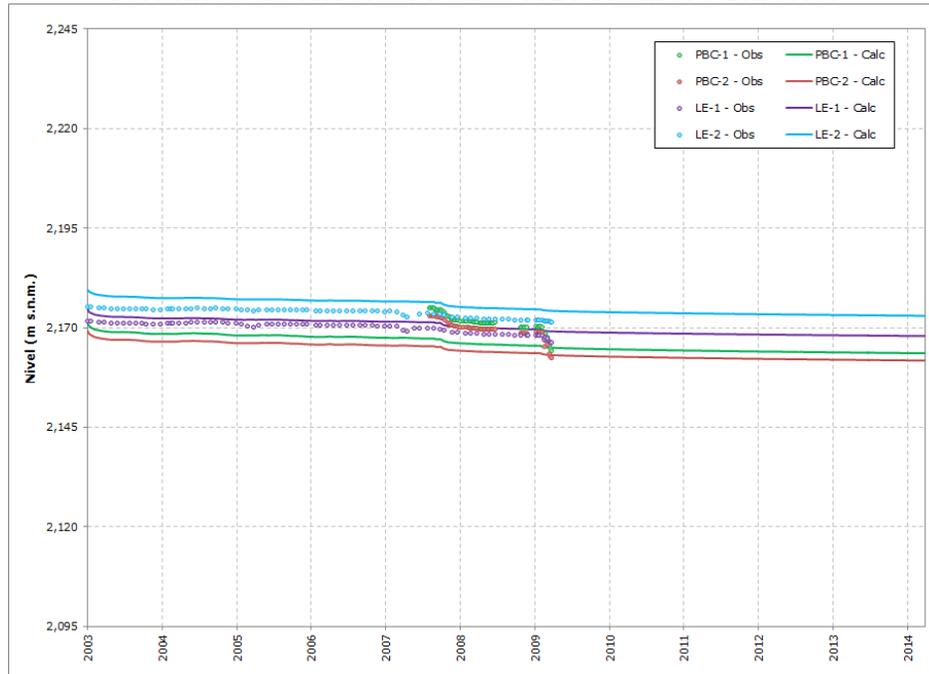
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-11 Calibración Modelo Actual en Régimen Transiente en Términos de Niveles. Pozos MET Acuífero Superior



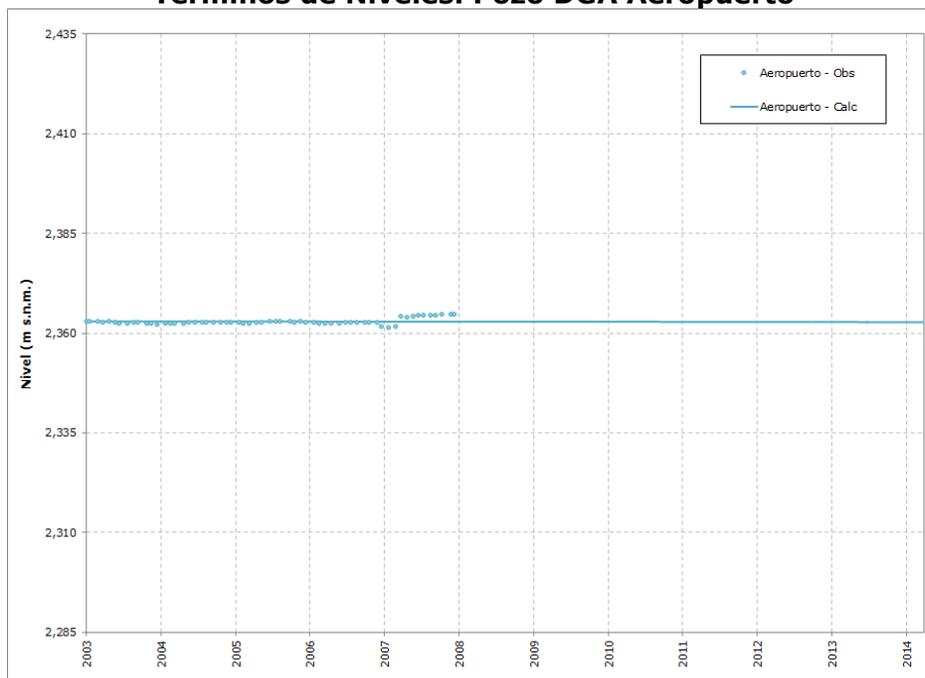
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.3-12 Calibración Modelo Actual en Régimen Transiente en Términos de Niveles. Pozos MET Acuífero Inferior



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-13 Calibración Modelo Actual en Régimen Transiente en Términos de Niveles. Pozo DGA Aeropuerto



Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a los gráficos de nivel, se pueden apreciar un apropiado ajuste, puesto que no se aprecian grandes diferencias entre los niveles simulados y observados, a excepción de unos pocos pozos en particular, cuyas condiciones iniciales se encuentran desfasadas lo que repercute en que el modelo transiente no se adecúa de mejor manera a los valores de niveles registrados. Esto se explica en gran parte por la gran extensión del modelo, tanto areal como en diferencia de cota, razón por lo que el ajuste de niveles en régimen permanente llega a ser muy bueno en términos estadísticos, a pesar de existir grandes diferencias de nivel en algunos puntos. A lo anterior se suma el importante tamaño de cada una de las celdas (del orden de 365 m X 365 m), lo que genera que en algunos sectores específicos del modelo, sobretodo en la zona de MET, se aglutinen un gran número de pozos por celda, dificultando aún más el proceso de calibración. Sin embargo, se observa que, en términos generales, el modelo numérico subterráneo es capaz de representar la tendencia de los niveles y sus cambios a consecuencia de los bombeos.

En lo referente al balance de aguas obtenido del modelo transiente, se aprecia que las extracciones subterráneas consideradas en el modelo generan una disminución en los caudales de afloramiento, principalmente en los ríos Loa en sector de Angostura y San Salvador, así como también en las vertientes aguas abajo de Calama, pero en menor medida. Sin embargo, el principal aporte proviene del almacenamiento del acuífero, aportando un 65% del agua extraída.

Cuadro 6.3-10 Balance Hídrico en Régimen Transiente. Valores Promedio (2003-2014)

ENTRADAS (l/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	NE	280
	SE	393
	N	73
	NO	200
Recarga Total		200
Pérdida Ríos/ Aporte Acuífero	Río Loa Tramo 1	34
	Río Loa Tramo 2	0
	Río Loa Tramo 3	7
	Río Loa Tramo 4	313
TOTAL ENTRADAS (l/s)		1.500

SALIDAS (l/s)		
Componente		Caudal
Caudal Subterráneo	O	402
Afloramiento Acuífero/Recuperación Ríos	Río Loa Tramo 1	0
	Río Loa Tramo 2	302
	Río Loa Tramo 3	0
	Río Loa Tramo 4	0
	Río Salado	180
Drenes	Río San Salvador	186
	V. Ojos de Opache	308
	V. La Cascada	0
	V. Likantatay	30
Bombeos		291
TOTAL SALIDAS (l/s)		1.699

ALMACENAMIENTO (l/s)		
Componente		Caudal
Consumo Almacenamiento		189

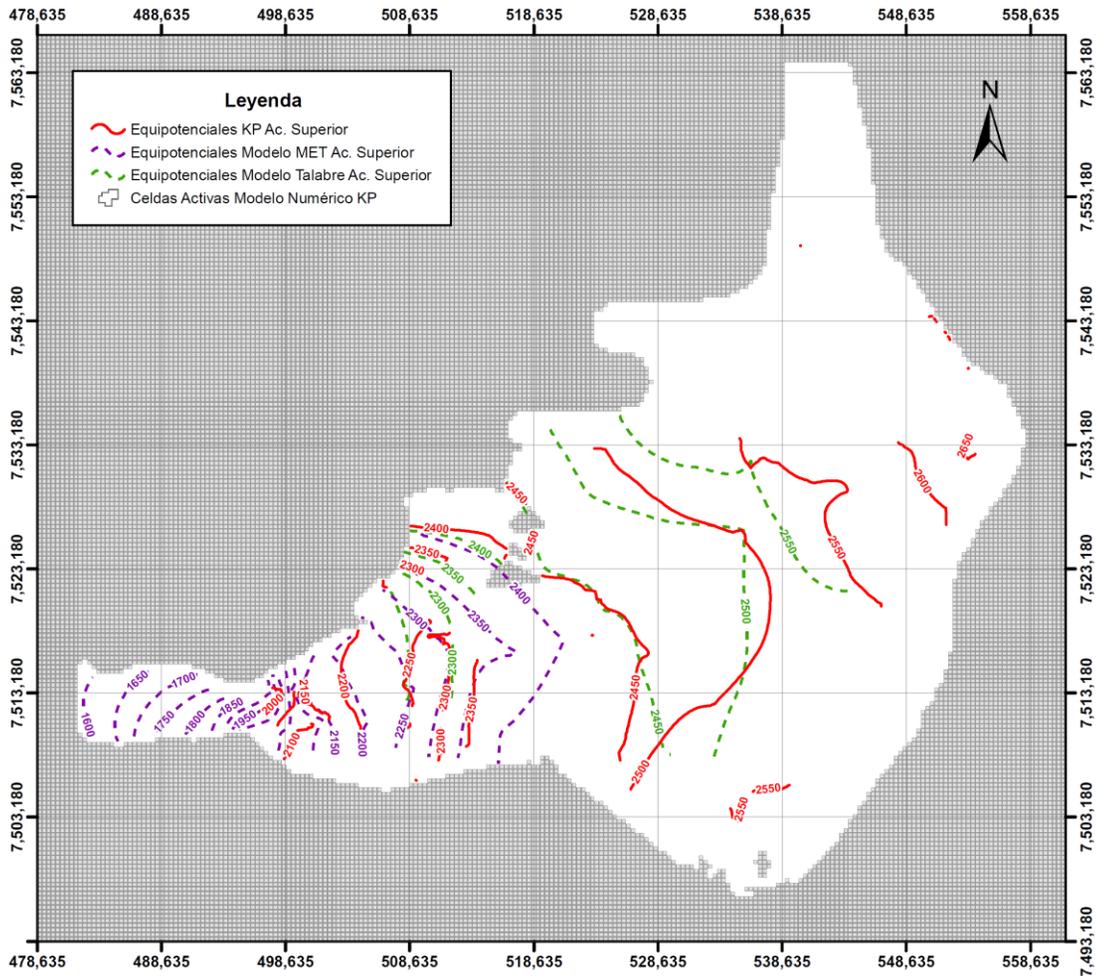
Balance Global (l/s)	-10
Error Global (%)	0,59

Fuente: Elaboración Propia.

6.3.3. Curvas Equipotenciales

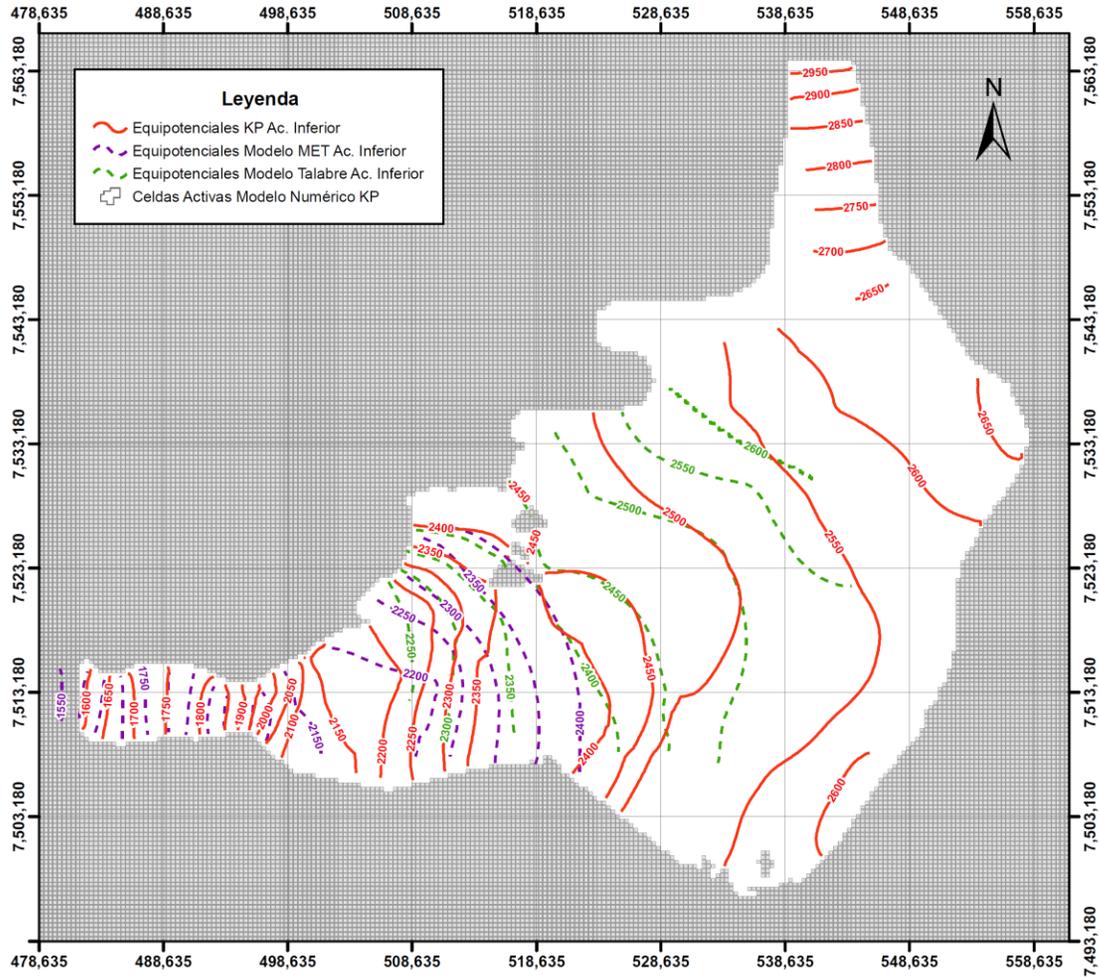
En las Figuras 6.3-14 y 6.3-15, se adjuntan las curvas equipotenciales obtenidas por el modelo numérico en régimen permanente tanto para el estrato acuífero superior como inferior respectivamente, junto con las equipotenciales generadas en los modelo de Talabre y Tesoro para su comparación.

Figura 6.3-14 Curvas Equipotenciales para Unidad Acuífera Superior



Fuente: Elaboración Propia y datos de REF#24 y REF#26.

Se advierte de la Figura 6.3-14, que para los sectores de Calama y tranque Talabre las curvas equipotenciales generadas por el modelo en régimen permanente del presente estudio siguen la misma tendencia del modelo Talabre compartiendo además similares valores de niveles subterráneos. De igual forma, las curvas equipotenciales generadas por el actual modelo se ajustan de manera semejante a lo obtenido en el Modelo El Tesoro en particular, en la zona ubicada aguas abajo de Calama donde se ubican los pozos de propiedad de MET. Sin embargo, existen diferencias sobre todo en la parte oeste del modelo, entre las coordenadas Este 481.500 y 496.000 m, ya que en dicho lugar el actual modelo simula una condición no saturada del estrato superior a diferencia de lo generado en el modelo de El Tesoro.

Figura 6.3-15 Curvas Equipotenciales para Unidad Acuífera Inferior

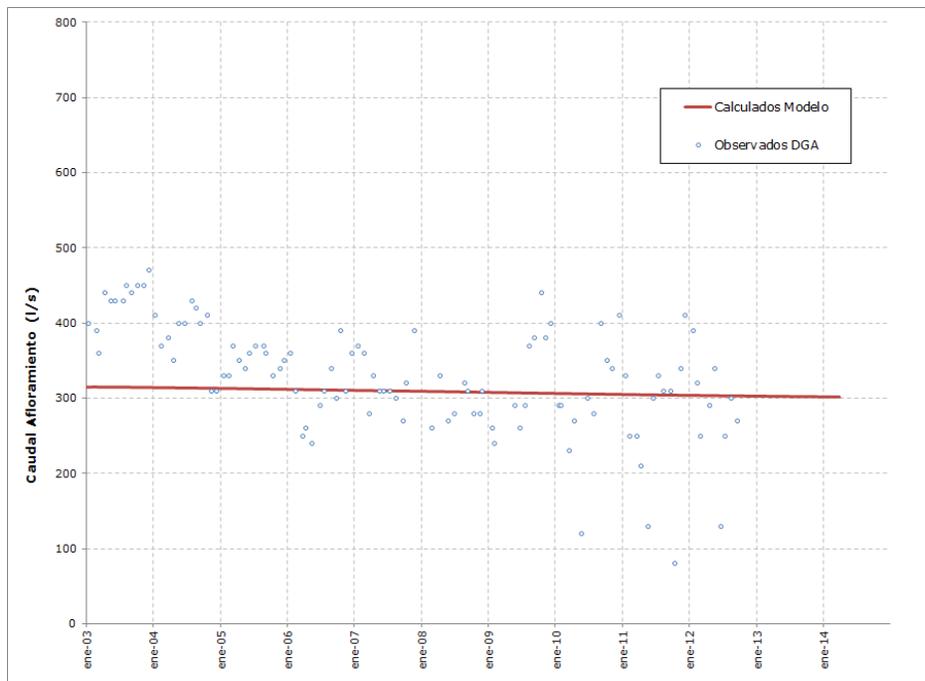
Fuente: Elaboración Propia y datos de REF#24 y REF#26.

En el caso de la Figura 6.3-15, se observan similitudes en la configuración de las equipotenciales localizadas en el sector de tranque Talabre y Calama obtenidas tanto por los modelos de Talabre como de El Tesoro. Asimismo, se exhibe similar condición en la zona poniente del modelo, aguas abajo del campo de pozos de MET, donde se produce el angostamiento del material acuífero el cual se restringe a los cauces de los ríos San Salvador y Loa. No obstante se exhiben discrepancias aguas abajo de Calama en el sector de pozos MET, las que se explicarían en parte por el análisis efectuado en el acápite 6.3.2.1 donde se reinterpretaron los estratos representativos de algunos pozos ubicados en esa zona.

6.3.4. Comparativa Caudales de Afloramiento

En la Figura 6.3-16, se presenta un gráfico con la evolución temporal del afloramiento ubicado en la vertiente Ojos de Opache para todo el período de modelación (2003-2014), junto con los valores de aforos que ha registrado la DGA en el sector y cuya estadística se extiende desde 1996 a 2012.

Figura 6.3-16 Gráfico Temporal Comparativo de Caudales de Afloramientos Observados versus Calculados por el Modelo



Fuente: Elaboración Propia y datos de la DGA.

De la Figura anterior, se advierte claramente un adecuado ajuste en términos generales de los valores de caudales de afloramiento entregados por el modelo y los observados por la DGA en la vertiente de Ojos de Opache. Se observa además que el modelo refleja la tendencia al descenso que experimentan los caudales en el último tiempo.

7. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Como parte del análisis de resultados de la modelación integrada, se realizan escenarios de simulación para la estimación de la oferta hídrica y el volumen embalsado de los sistemas acuíferos determinados en el presente estudio.

7.1. Determinación de la Oferta Hídrica

La determinación de la oferta hídrica corresponde al cumplimiento de criterios impuestos por la autoridad, detallados en el acápite siguiente, relacionados a una explotación sustentable del sistema acuífero.

7.1.1. Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua

Los criterios definidos por la DGA son los siguientes:

Criterio 1: Descensos Sostenibles en el Tiempo a Nivel de Acuífero

Los descensos deben estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles debe ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, aporte de flujos de agua subterránea de acuíferos superiores, etc.).

Criterio 2: Afectación sobre Aguas Superficiales

La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc.) y subterráneas debe ser despreciable, de forma que no afecte los recursos superficiales ya comprometidos. Por lo tanto, el grado de interacción debe ser menor a un 10% del caudal medio mensual asociado al 85% de probabilidad de excedencia durante 6 meses consecutivos.

$$\Delta Q = \text{Deja de aflorar} + \text{Aumenta Infiltración}$$

$$\Delta Q < 10\% \cdot Q_{\text{Flujo Pasante } 85\%}$$

Criterio 3: Satisfacción Demanda

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda.

$$Q_{\text{ACEPTADO}} \geq 95\% \cdot Q_{\text{IMPUESTO}}$$

Criterio 4: Pozos Desconectados en el Modelo

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

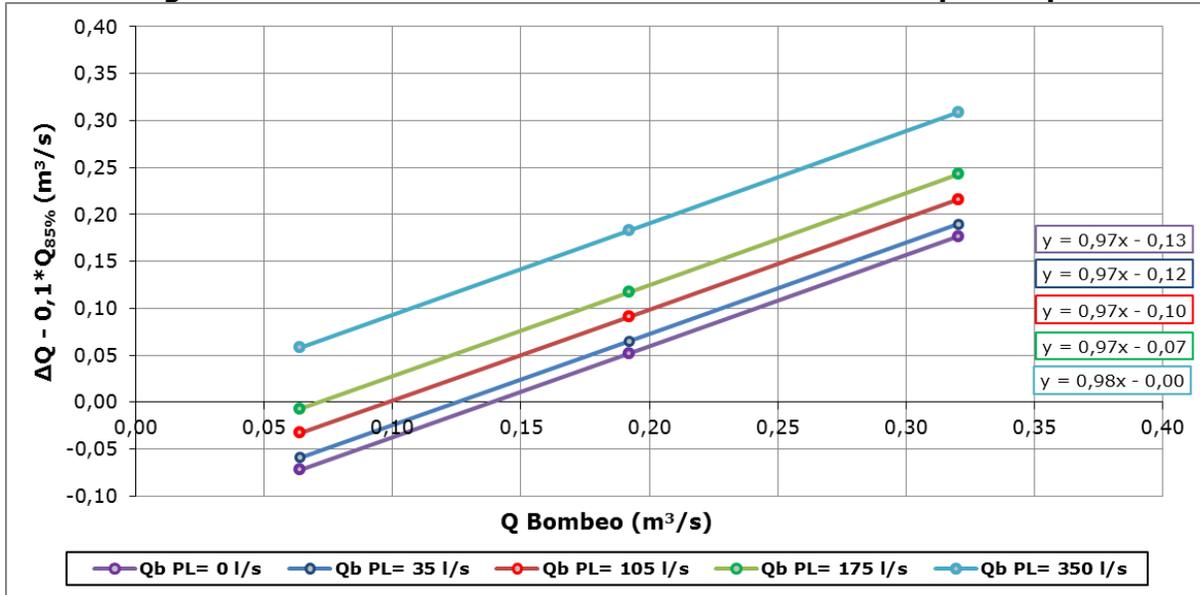
$$\text{Pozos Desconectados} \leq 5\% \text{ Total Pozos}$$

7.1.2. Evaluación de la Oferta Hídrica mediante MAGIC

El programa MAGIC integra el sistema acuífero a su modelación, pero de manera simplificada, por lo que sus resultados son considerados referenciales en este ámbito. Las capacidades del programa permiten evaluar solo el Criterio 2, es decir la afección de las aguas superficiales por parte de un caudal de extracción subterránea. Por lo tanto, se

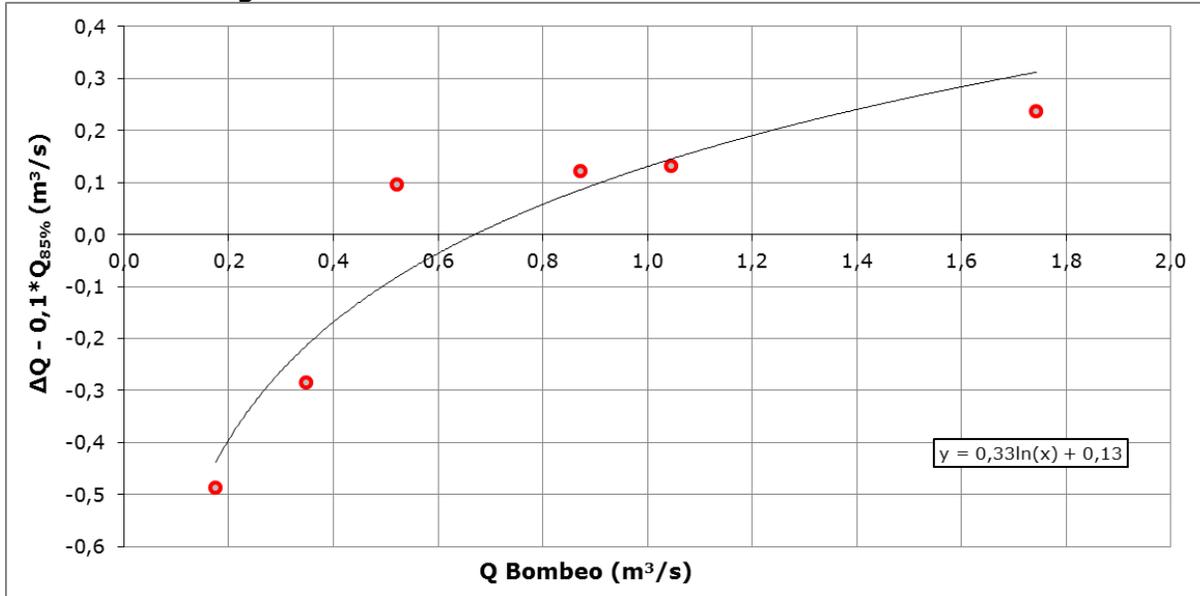
realizó la evaluación a los SHAC que poseen derechos subterráneos otorgados por la autoridad y contemplados en el modelo. La metodología utilizada corresponde a considerar todos los bombeos nulos, a excepción de los que pertenecen al SHAC en estudio. Adicionalmente, se analiza la situación de bombeo conjunto entre los sectores acuíferos de Calama y Pampa Llalqui. A continuación se presentan los resultados de caudales de bombeo frente al valor del Criterio 2, donde un valor negativo corresponde al cumplimiento del mismo.

Figura 7.1-1 Oferta Hídrica SHAC Calama – Pampa Llalqui



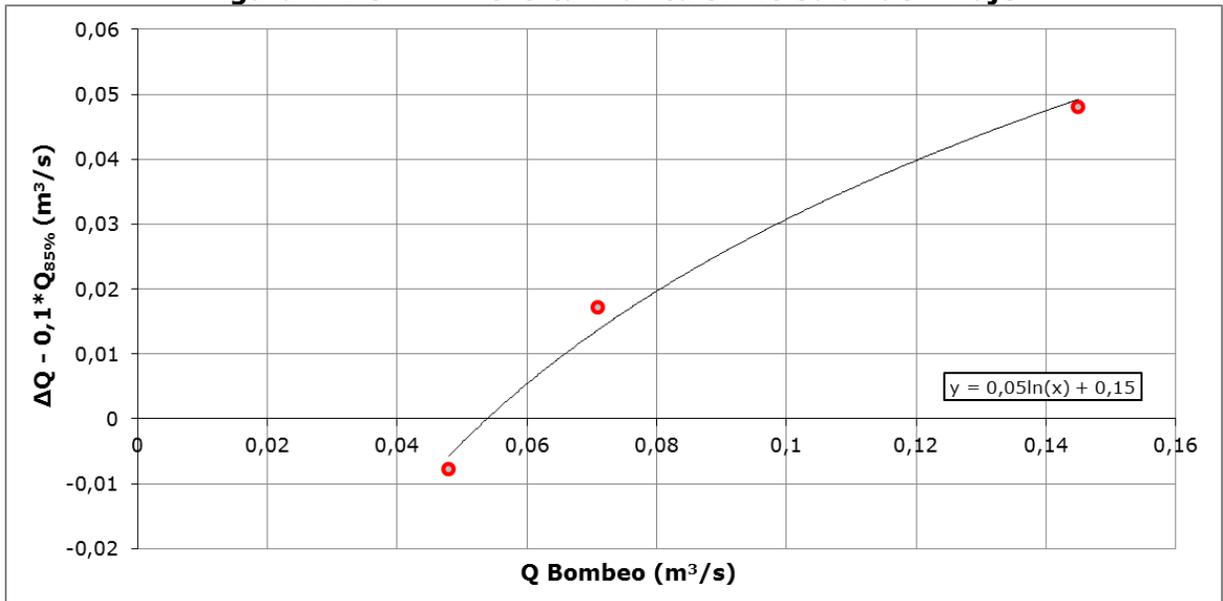
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.1-2 Oferta Hídrica SHAC Río San Pedro



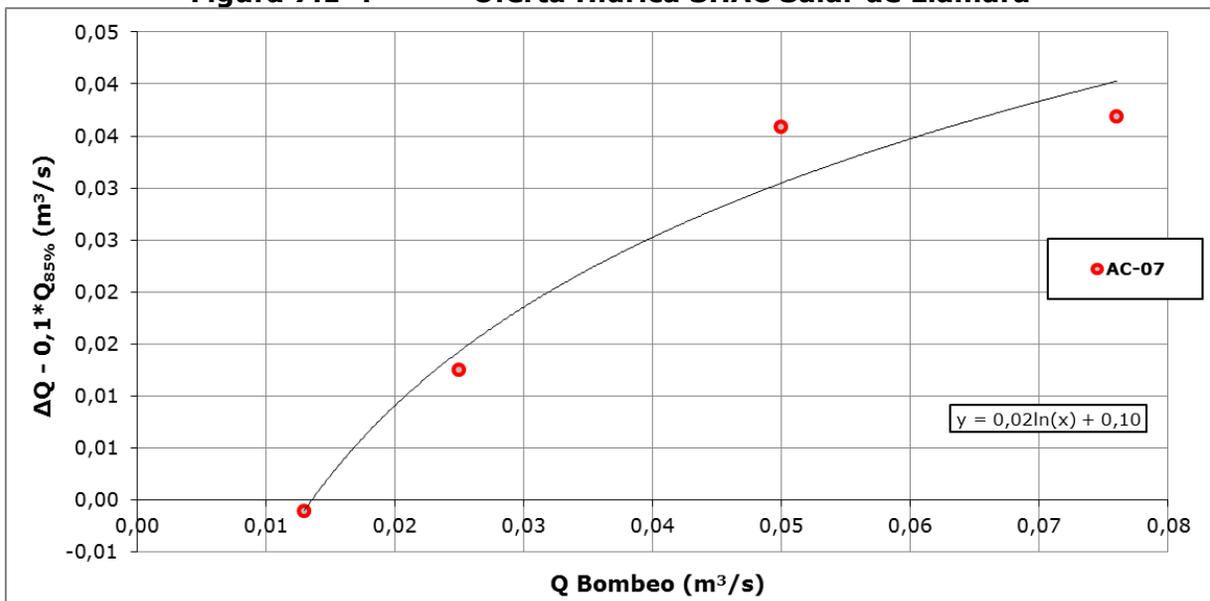
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.1-3 Oferta Hídrica SHAC Salar de Miraje



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.1-4 Oferta Hídrica SHAC Salar de Llamara



Fuente: Elaboración Propia.

Por medio de los valores gráficos es posible estimar el caudal sustentable de cada SHAC estudiado de acuerdo a la modelación MAGIC, presentando sus resultados en el Cuadro 7.1-1.

Cuadro 7.1-1 Oferta Hídrica SHAC Calama

Qb Pampa Llalqui		Oferta Hídrica Calama	
I/s	% Derecho	I/s	% Derecho
0	0%	138	22%
35	10%	125	20%
105	30%	98	15%
175	50%	71	11%
350	100%	5	1%

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 7.1-2 Oferta Hídrica SHAC con Derechos Subterráneos

SHAC	Q Derecho	Oferta Hídrica	
	I/s	I/s	% Derecho
Río San Pedro	1.744	670	38%
Salar de Miraje	48	53	109%
Salar de Llamara	251	14	5%

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa una clara dependencia entre los SHAC Calama y Pampa Llalqui, donde la explotación subterránea del primero afecta el caudal subterráneo de entrada a Calama y por lo tanto su caudal de extracción.

La cuenca del río San Pedro presenta una oferta hídrica muy por debajo de los derechos otorgados, por lo que actualmente se encontraría en sobreexplotación. Se destaca que el caudal determinado es similar al extraído previo al año 1990 a través de drenes que poseían derechos subterráneos por 750 l/s.

El resultado observado en el SHAC Salar de Miraje corresponde a su explotación individual, pero respecto a él, existe un equilibrio de explotación.

El SHAC Salar de Llamara presenta un valor bajo respecto a sus derechos subterráneos debido a que el afloramiento depende directamente del caudal de bombeo y adicionalmente no existen cauces definidos en el modelo sobre su superficie, es decir no presenta recarga superficial por este ítem. De igual forma, el salar de Llamara presenta un alto caudal de evaporación que no puede ser representado por medio de MAGIC, distorsionando el resultado y aplicación de este criterio.

7.1.3. Evaluación de la Oferta Hídrica mediante Visual MODFLOW

Para este análisis, dadas las limitantes de MAGIC en la representación de acuíferos, se utilizó el modelo numérico hidrogeológico en régimen permanente implementado en Visual MODFLOW ya que es el escenario más adecuado para simular condiciones de interacción entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos en régimen natural, es decir, sin bombes de por medio. Para lo anterior, se ingresaron los derechos subterráneos otorgados por la autoridad en el sector del dominio del modelo, los cuales corresponden a un total de 26 pozos de bombeo y se detallan en el Cuadro 7.1-3. Cabe señalar que se dispone de la habilitación de la mayoría de estos pozos, sin embargo existen algunos en donde no se tiene mayores antecedentes, tales como el PO-26, PO-43,

PO-15, PO-44 y PO-45. Para estos últimos pozos se asumió que disponen de cribas en los tres estratos acuíferos.

Cuadro 7.1-3 Pozos con Derechos Subterráneos en Acuífero Calama

Código MAGIC	Coordenadas UTM: WGS84		Derecho Otorgado (l/s)
	Norte (m)	Este (m)	
PO-15	7.522.986	535.302	31
PO-16	7.515.039	504.218	65.8
PO-21	7.516.370	503.227	45
PO-22	7.515.083	504.057	0.7
PO-23	7.516.070	505.550	47
PO-24	7.515.864	502.771	50
PO-25	7.515.513	504.530	0.5
PO-26	7.515.041	503.053	16.5
PO-29	7.514.962	504.277	46.8
PO-30	7.514.581	503.644	73.2
PO-31	7.514.881	503.891	65
PO-32	7.514.520	503.895	70
PO-33	7.514.329	504.023	65
PO-61	7.511.906	504.586	35
PO-34	7.512.629	530.295	30
PO-35	7.523.061	542.237	40
PO-36	7.514.189	535.387	35
PO-37	7.515.374	532.641	50
PO-38	7.519.133	537.591	20
PO-39	7.516.119	537.638	20
PO-40	7.518.293	545.064	50
PO-41	7.525.516	543.655	40
PO-42	7.520.852	539.663	34
PO-43	7.510.700	507.300	30
PO-44	7.521.343	508.002	30
PO-45	7.525.654	509.045	2

Fuente: Elaboración Propia y datos de derechos de la DGA.

Se efectuaron 6 simulaciones del modelo considerando los factores de uso de 5%, 10%, 25%, 50%, 75% y 100% de los derechos otorgados, con el objeto de analizar cada uno de los criterios exigidos por la DGA.

Los resultados de los 6 escenarios anteriores fueron satisfactorios y como corresponden a simulaciones en régimen permanente, se satisface de forma inmediata el Criterio 1 para todos los factores de uso.

En lo que respecta al Criterio 2, fueron evaluados para cada una de las 6 simulaciones los valores de infiltración y afloramiento de los cauces y posteriormente comparadas con el modelo permanente calibrado. De esta forma se obtienen rangos de caudales, tanto de lo que se deja de aflorar y como del aumento de la infiltración. La suma de estos valores, se contrasta con el 10% del caudal superficial de 85% en régimen natural del acuífero de Calama, cuya magnitud se obtuvo mediante análisis de frecuencia. Este caudal de 85%

de probabilidad de excedencia resultó ser igual a 1.208 l/s, por lo que el 10% de dicho valor, corresponde a 120,8 l/s.

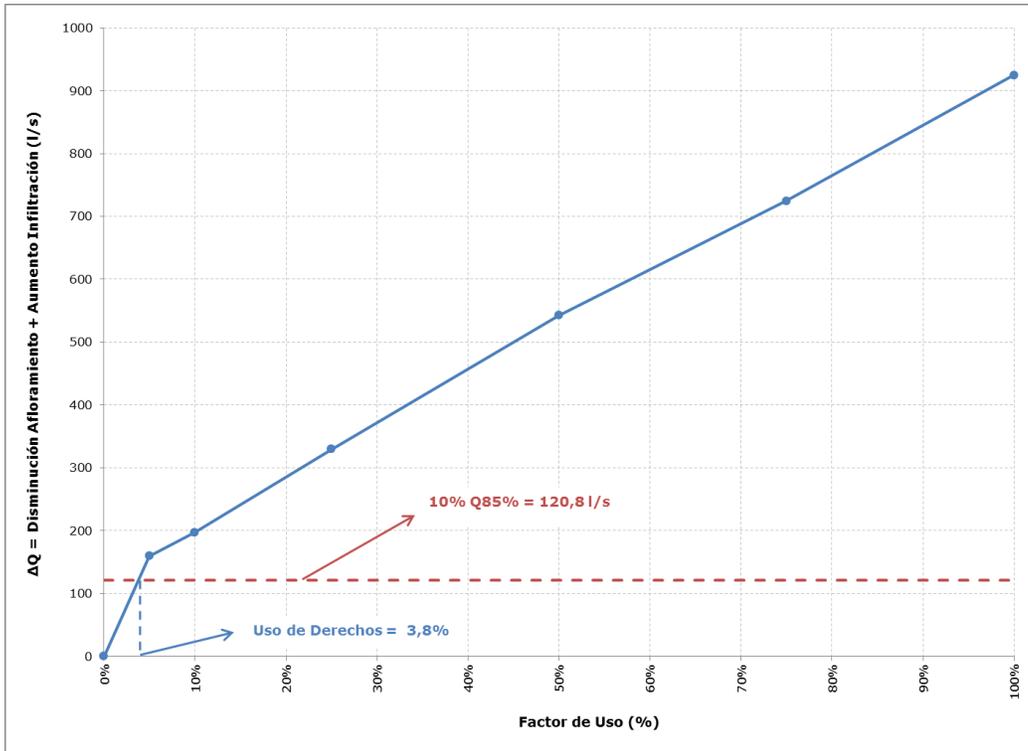
En el Cuadro 7.1-4, se presentan los resultados de las 6 simulaciones consideradas en términos de la afección de las aguas superficiales, mientras que en la Figura 7.1-5 se muestra un gráfico con los valores tabulados de dicho Cuadro.

Cuadro 7.1-4 Pozos con Derechos Subterráneos en Acuífero Calama

Uso Derechos	Aumento Infiltración (l/s)	Disminución Afloramiento (l/s)	Afección Total (l/s)
0%	0	0	0
5%	5	154	159
10%	31	166	197
25%	81	249	330
50%	174	368	543
75%	277	448	725
100%	343	582	925

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 7.1-5 Gráfico Afección sobre Aguas Superficiales



Fuente: Elaboración Propia.

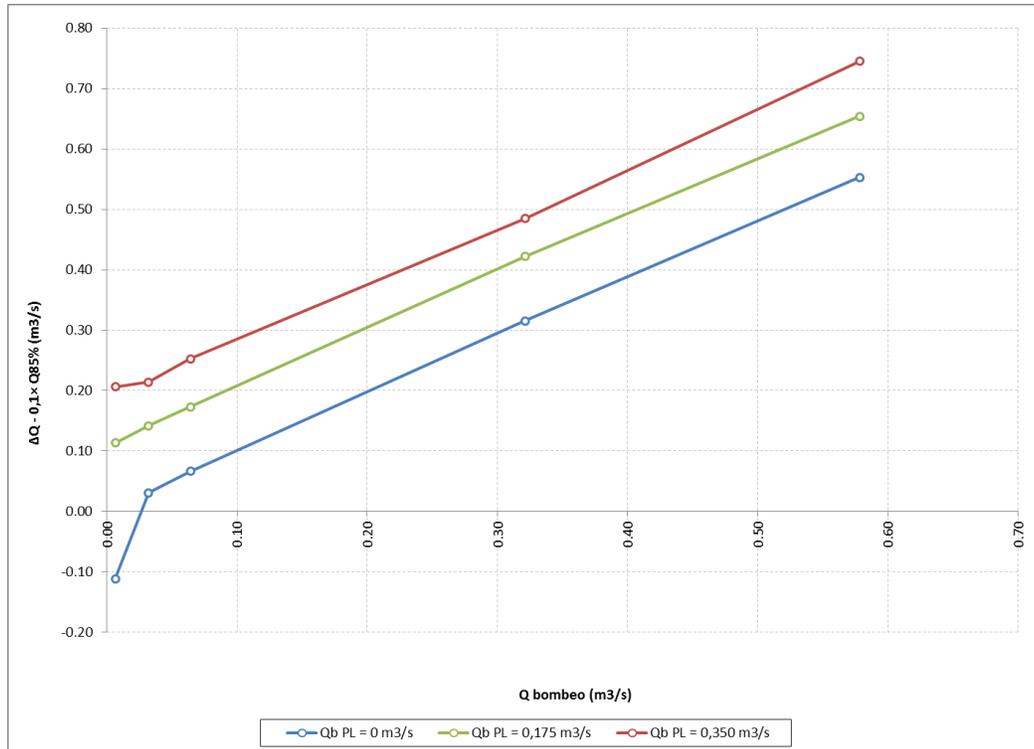
De la Figura 7.1-5, se desprende que el máximo uso de los derechos que permite cumplir con el Criterio 2 corresponde aproximadamente a un 3,8%, equivalentes a un caudal total del orden de los 37,7 l/s, de los cuales 24,42 l/s y 13,30 l/s corresponden a los sectores acuíferos de Calama y Pampa Llalqui, respectivamente.

Por otro lado, los Criterios 3 y 4 fueron evaluados de acuerdo al análisis de los pozos que resultaron colgados o completamente secos luego de las respectivas simulaciones. De acuerdo a esto último no se detectó en ninguno de los escenarios modelados la presencia de sondajes colgados, por lo que cada uno de los pozos extrajo el caudal impuesto y por consiguiente se respetan ambos criterios para todos los porcentajes de uso de derechos. No obstante es necesario precisar, que este análisis sería más preciso si se conociera el cribaje de los pozos con derechos que no se tiene mayor información al respecto.

Por último, en base al análisis de cada uno de los criterios definidos, resulta ser el Criterio 2 el más limitante en cuanto a oferta hídrica subterránea para el acuífero de Calama.

Siguiendo con el análisis mostrado en el acápite 7.1.2, se replicó lo realizado en MAGIC en cuanto a estudiar la afección de un sector hidrogeológico en particular frente al bombeo en otro sector adyacente. Como se dispone del modelo numérico para el acuífero de Calama, se le ocupó para analizar en concreto los SHAC de Pampa Llalqui y Calama. Los resultados de este análisis se resumen en el gráfico de la Figura 7.1-6.

Figura 7.1-6 Afección de los SHAC de Pampa Llalqui y Calama según Criterio 2



Elaboración Propia.

Del gráfico 7.1-6 se observa que para un bombeo nulo en Pampa Llalqui junto con una extracción progresiva subterránea en los pozos de Calama, se llega a un instante en que

el bombeo de Calama es tal, que los volúmenes subterráneos de Pampa Llalqui no son sostenibles para valores mayores a dicho caudal de extracción crítico. Según el análisis gráfico anterior, se prevé que el caudal de extracción crítico en Calama se alcanzaría en torno a los 26,5 l/s, valor umbral que condiciona la sustentabilidad del volumen subterráneo de Pampa Llalqui.

Asimismo el gráfico de la Figura 7.1-6, muestra una tendencia a la no sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo a medida que se incrementa la explotación tanto en los sectores hidrogeológicos de Calama y Pampa Llalqui de manera conjunta. Además se aprecia una mayor sensibilidad de las modelaciones al considerar factores de uso comprendidos entre 0 y 5%, tal como se exhibe también en el gráfico de la Figura 7.1-5.

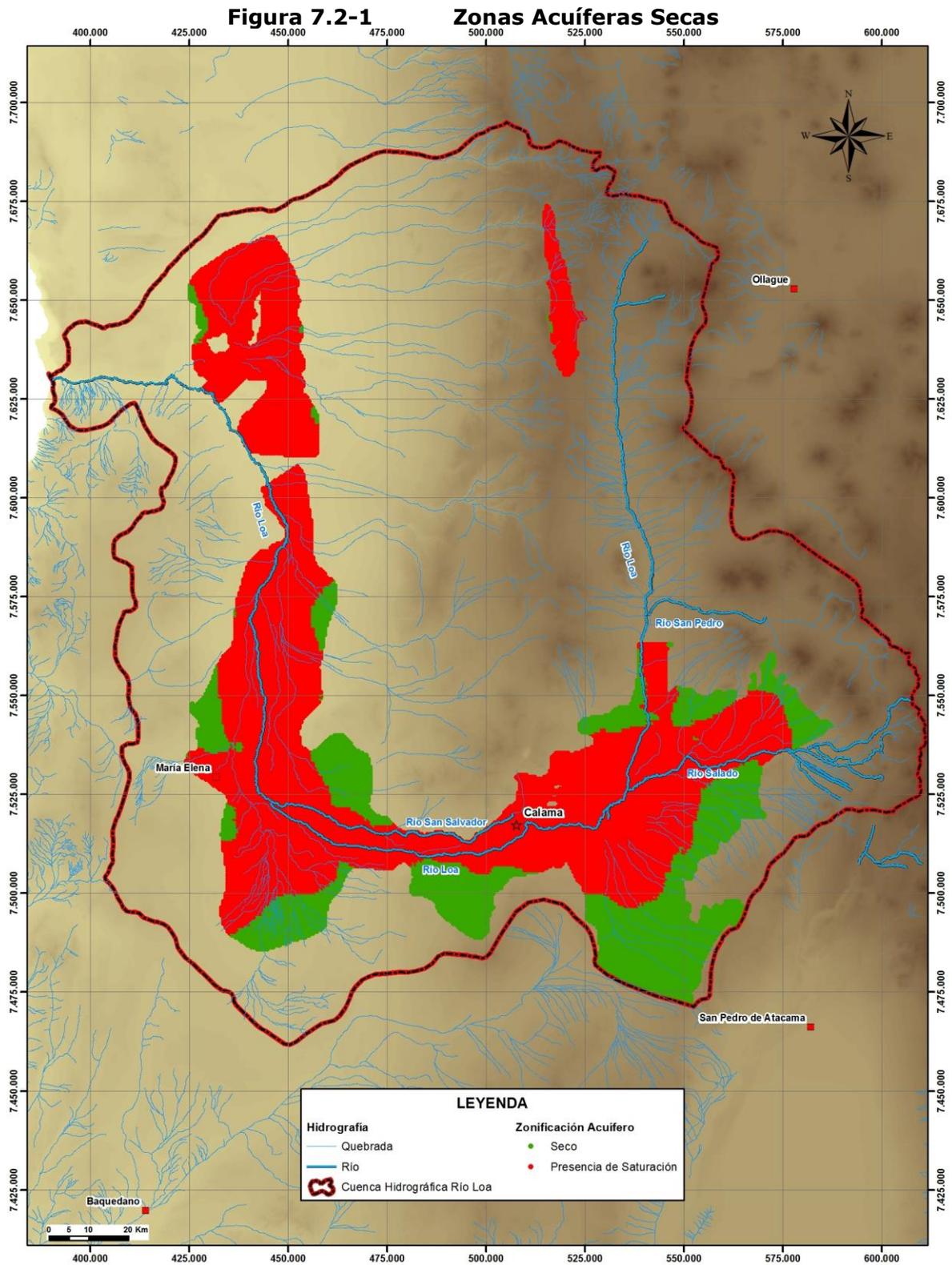
7.2. Determinación del Volumen Embalsado

Para la estimación del volumen embalsado se ha considerado la información topográfica, de basamento e isofreáticas. Dado que ésta no se encuentra disponible para todos los acuíferos, la estimación no fue realizada para los SHAC Loa Aguas Arriba Embalse Conchi, río San Pedro y Loa desde Quillagua hasta Desembocadura.

Se procedió a interpolar, sobre toda el área determinada de los SHAC, las isofreáticas recopiladas en la revisión de antecedentes presentadas en la Figura 4.2-12.

Luego, se generó una malla de celdas con una dimensión de 500 x 500 metros, limitada a la superficie de los SHAC. Se procedió a asignar los valores de topografía, profundidad de basamento y niveles freáticos de manera puntual a cada una de estas celdas.

Por medio de la diferencia entre el nivel freático y el basamento se obtiene la altura del estrato saturado en cada celda. En aquel lugar donde el valor de esta diferencia es negativo, implica un sector seco no utilizado en el cálculo del volumen almacenado en el acuífero. Las zonas secas y aquellas donde se estima la presencia de un sector saturado se presenta en la Figura 7.2-1.



Fuente: Elaboración Propia.

El cálculo del volumen embalsado se realiza sobre el área de las celdas estimadas con presencia de saturación y utilizando un valor medio de porosidad. El Cuadro 7.2-1 presenta el resultado para el volumen alojado en cada sector acuífero.

Cuadro 7.2-1 Volumen Embalsado

SHAC	Altura Media (m)	Área (Km ²)	Volumen Total (Mm ³)	Coefficiente Porosidad	Volumen Almacenado (Mm ³)
Pampa Puno	132	1.063	140.506	50%	70.253
Río Salado	140	535	75.175	50%	37.587
Pampa Llalqui	168	608	101.917	50%	50.959
Calama	163	1.181	192.567	50%	96.284
Salar de Miraje	106	920	97.859	50%	48.929
Salar de Llamara	143	1.074	153.662	50%	76.831
Río Loa desde M. Elena hasta Quillagua	145	1.242	197.817	50%	98.909

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, el volumen posible de aprovechamiento a través de una explotación subterránea se relaciona al coeficiente de almacenamiento, pues se debe considerar el efecto de adhesión entre las partículas de agua y suelo. El Cuadro 7.2-2 muestra este resultado para cada sector acuífero, donde adicionalmente se presenta el caudal de explotación que implicaría una baja en un 5% del volumen total en el acuífero, considerando un bombeo constante para el periodo de tiempo expuesto.

Cuadro 7.2-2 Volumen Máximo de Explotación

SHAC	Volumen Total (Mm ³)	Coeficiente Almacenamiento	Volumen Explotación (Mm ³)	Q Explotación 5% (m ³ /s)	
				25 años	50 años
Pampa Puno	140.506	1,0%	1.405	0,089	0,045
Río Salado	75.175	0,5%	399	0,025	0,013
Pampa Llalqui	101.917	1,0%	1.029	0,065	0,033
Calama	192.567	1,0%	1.945	0,123	0,062
Salar de Miraje	97.859	3,3%	3.229	0,205	0,102
Salar de Llamara	153.662	5,0%	7.683	0,487	0,244
Río Loa desde M. Elena hasta Quillagua	197.817	3,0%	5.935	0,376	0,188

Fuente: Elaboración Propia.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado de la presente etapa del estudio, se presentan a continuación las principales conclusiones obtenidas, en conjunto con las recomendaciones nacidas en la elaboración del estudio.

8.1. Conclusiones Generales

Se ha realizado una recopilación de los principales antecedentes asociados a la cuenca del río Loa, abarcando temas tales como geología, geofísica, hidrogeología, modelos numéricos, etc., los cuales han permitido agrupar la información relevante que ha permitido caracterizar los acuíferos de la cuenca. En particular, se recopiló gran cantidad de información asociada a los expedientes de exploración, la cual no se encuentra analizada en ninguna de las referencias de estudios revisados.

La información recopilada permitió identificar la distribución espacial de la información disponible, principalmente hidrogeológica. De esta manera, se obtuvo la ubicación de la geofísica TEM, gravimétrica y sondajes que proporcionaba información valiosa acerca de las características acuíferas, principalmente ubicación del basamento, nivel freático y parámetros hidráulicos.

A la información anterior se agregó una campaña geofísica realizada por la empresa Geodatos, en la que se midieron 80 estaciones TEM distribuidas en 8 perfiles distribuidos a lo largo de la cuenca de estudio. Estos perfiles permitieron caracterizar zonas con un bajo nivel de información, como es el caso de la zona baja de la cuenca (aguas debajo de María Elena), en que la información obtenida mostró un bajo potencial acuífero representado por las unidades de arcilla, arena arcillosa y sedimentos de baja permeabilidad. Por otro lado, se identificaron importantes estratos de gravas en el sector medio de la cuenca, en que se destaca el perfil ubicado en el Parque Eólico Calama, el cual permite mejorar la representación de la condición de borde de Llalqui en el modelo numérico MODFLOW.

Luego, en base a la información recopilada y generada, se realizó una propuesta de sectorización acuífera en base al procedimiento recomendado en el estudio de la REF#32, en el cual se definen los siguientes puntos relevantes: Identificación de la Zona de Estudio, Base Topográfica, Red de Drenaje, Sectorización Preliminar, Hidrogeología, Captaciones Subterráneas, Sectorización Acuífera y Vínculos.

En el presente estudio se diferenció la definición de la geometría dependiendo del nivel de información disponible. De este modo, se consideró la definición completa de un acuífero en el caso en que la fuente de la información es un estudio que posee un bajo nivel de incertidumbre y todos los límites se encuentran bien definidos. Esto sucedió en el caso de las cuencas del Salar de Llamara y Pampa Puno. Por otro lado, se consideraron los límites de manera parcial o referencial en los casos en que la delimitación existente posee cierto grado de incertidumbre, como es el caso de Calama y Llalqui. Finalmente, en los sectores que cuentan con escasa o nula información sobre su delimitación se utilizó un procedimiento de análisis de la geología, topografía y basamento para definir sus límites, como fue el caso de San Pedro, Loa Alto y Salado.

Posteriormente, se realizó la sectorización definitiva en base a singularidades hidrogeológicas y ubicación de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas

en la cuenca, obteniéndose 10 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, con distintos valores de sus parámetros hidráulicos y geometría.

Basándose en la nueva información existente se realizó una actualización del modelo integrado MAGIC disponible para la cuenca. El programa contempla tanto el sistema hídrico superficial como subterráneo, los cuales se relacionan por medio de nodos o zonas de riego. Por lo tanto, de acuerdo a la determinación de los SHAC y su inclusión al modelo, estas conexiones deben ser redefinidas, siendo ésta la principal modificación realizada. Sus características hidrogeológicas como geométricas, se implementaron respetando los rangos de valores determinados en el presente estudio para cada SHAC contemplado en la modelación. Por su parte, todas las variables que integran el modelo fueron actualizadas con la información disponible para el año hidrológico 2013 - 2014. El proceso de calibración arrojó resultados gráficos correctos, pero que en algunos casos no concordó con los valores estadísticos. Esta situación se ve enraizada en el bajo caudal que presenta el río Loa a lo largo de su cauce, otorgándole un peso específico importante a pequeñas variaciones entre lo observado y calculado. Sin embargo, se considera que la correcta simulación de las condiciones generales de flujo, junto a la buena estimación del volumen acumulado pasante por los puntos de control, permiten concluir que el modelo representa las características del sistema hídrico de la cuenca del río Loa para periodos prolongados de tiempo.

De manera paralela, se realizó la actualización del modelo hidrogeológico de los sectores Calama-Llallqui, considerando la nueva información disponible. Parte de la geometría del modelo fue corregida en base al perfil L1 de la geofísica realizada en el presente estudio, por lo que el modelo fue re-calibrado en régimen permanente, para posteriormente realizar el proceso de calibración en régimen transiente, utilizando información de series de recarga suministradas por MAGIC como lo son las zonas de riego y pérdida de agua potable, así como también series de infiltración del tranque Talabre proveniente de la REF#26. Cabe destacar que este proceso de calibración fue iterativo entre régimen permanente y transiente ya que las condiciones iniciales dadas por el escenario estacionario condicionan de manera importante la evolución temporal de los niveles cuando se simula en el transiente. Por tal motivo, la calibración del régimen permanente se centró en la parte baja de Calama, en la zona de pozos de MET. Los resultados de este proceso arrojaron finalmente un buen ajuste en régimen permanente así como también en la etapa transiente, con diferencias aisladas entre los niveles simulados con los observados en algunos pozos. Lo anterior se explica por la gran extensión del modelo tanto en superficie como en diferencia de cota, por lo que diferencias de varios metros generan aumentos menores en los estadígrafos de ajuste. Y si a lo anterior se suma el tamaño de las celdas del modelo, cuya área es capaz de aglutinar a varios pozos de observación dentro de una misma celda, esto trae aún más dificultades a la hora de calibrar. De cualquier modo, se observa que el modelo es capaz de simular de manera adecuada la tendencia general de los niveles y sus variaciones, y asimismo responde de forma apropiada a las reglas de bombeo ingresadas a Visual MODFLOW.

Se realizó la evaluación de la oferta hídrica de aquellos SHAC que presentaran derechos subterráneos por medio de los programas utilizados en la modelación. En particular, atendiendo la alta dependencia entre los SHAC de Calama y Pampa Llallqui, se analizó la situación de su explotación conjunta. Cabe mencionar que los resultados de MAGIC son considerados referenciales debido a la simplificación que realiza de las características e interacciones del sistema subterráneo. De igual forma, los resultados se exponen en el Cuadro 8.1-1 y 8.1-2.

Cuadro 8.1-1 Oferta Hídrica MAGIC; SHAC Calama

Qb Pampa Llalqui		Oferta Hídrica Calama	
I/s	% Derecho	I/s	% Derecho
0	0%	138	22%
35	10%	125	20%
105	30%	98	15%
175	50%	71	11%
350	100%	5	1%

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 8.1-2 Oferta Hídrica MAGIC; SHAC con Derechos Subterráneos

SHAC	Q Derecho	Oferta Hídrica	
	I/s	I/s	% Derecho
Río San Pedro	1.744	670	38%
Salar de Miraje	48	53	109%
Salar de Llamara	251	14	5%

Fuente: Elaboración Propia.

Análogamente se realizó la misma evaluación de la oferta hídrica, pero utilizando el modelo numérico implementado en Visual MODFLOW, cuyo análisis se centró exclusivamente en los sectores acuíferos de Pampa Llalqui y Calama. Los resultados de esta evaluación se resumen en el Cuadro 8.1-3.

Cuadro 8.1-3 Oferta Hídrica Visual MODFLOW; Pampa Llalqui - Calama

SHAC	Q Derecho Total	Oferta Hídrica	
	(I/s)	(I/s)	% Derechos
Pampa Llalqui - Calama	993	40	4%

Fuente: Elaboración Propia.

8.2. Recomendaciones

Los análisis realizados en el presente estudio permiten identificar a los sectores de San Pedro de Inacaliri, Loa Alto y Salado como aquellos con una menor densidad de información disponible.

El caso de San Pedro de Inacaliri es especial, ya que corresponde a una cuenca altamente explotada en la que existen una serie de estudios privados, por lo que a pesar de la existencia de información, ésta no puede ser utilizada. Sin embargo, la alta explotación ha provocado la desconexión tanto superficial como subterránea de este sector con el resto de la cuenca, por lo que la falta de información no altera el análisis de los otros sectores.

En el caso del Loa Alto, el principal antecedente corresponde al estudio de la REF#29, el cual posee una gran cantidad de información. Sin embargo, ésta no ha podido ser utilizada ya que la entrega final de ese estudio no dispuso a la DGA de la información geofísica y SIG en detalle (profundidad de basamento en puntos gravimétricos e interpretación del basamento).

Por último, la cuenca del río Salado posee un bajo nivel de información, por lo que se recomienda la realización de un estudio detallado que permita estudiar hidrogeológicamente la cuenca y su posible conexión con la cuenca de San Pedro de Inacaliri.

En cuanto a la información existente en la cuenca, la revisión de antecedentes ha mostrado que existe una gran cantidad de datos que no han sido proporcionados a la DGA, tanto en estudios como en informes. Lo anterior es particularmente notorio en los informes de cierre de exploración, en que no se presentan los resultados geofísicos. Se recomienda a la DGA exigir toda la información asociada a un estudio o informe, de manera tal de disponer de datos valiosos para la generación de estudios futuros.

El modelo MAGIC relaciona tanto el sistema superficial con el subterráneo, donde para este último una variable de importancia corresponde a la recarga superficial. Al existir una baja precipitación en los sectores medio y bajo de la cuenca del río Loa, cobra relevancia la recarga originada desde los cauces, zonas de riego y sistema de canales. Los parámetros que los definen son calibrados, pero de contar con información detallada del sistema de canales, se podría tener un mayor grado de certeza en el modelo. Por otro lado, el sistema superficial se calibra a través de la comparación entre los caudales observados en las estaciones fluviométricas de la DGA y lo simulado. Por lo tanto una mejor infraestructura en este sentido ayudaría a la representación de la cuenca. En particular, se estima necesario contar con información del río Loa aguas abajo de la zona agrícola de Chiu-Chiu y antes de la junta con el río Salado.

En cuanto al modelo hidrogeológico, se recomienda la recopilación de mayor información de los caudales de bombeos y niveles en el tiempo en los sectores de Pampa Llalqui y oriente de Calama, ya que ella permitiría ajustar el comportamiento del acuífero de una manera más óptima, considerando aspectos que hasta ahora son inciertos.