



Gobierno
de Chile

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

SECTORIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL RÍO LAJA, REGIÓN DEL BIOBÍO

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

HÍDRICA CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 430

Santiago, Octubre 2018

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Juan Andrés Fontaine

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefa (S) División de Estudios y Planificación
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniero Civil en Geografía Juan Carlos Salgado

HÍDRICA CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Agrónomo Irene Bernaus (MRecHid)
Ingeniero Civil Felipe Orellana M. (MEngSc)
Geofísico Juan Carlos Parra (MSc)
Cartógrafo Salomón Vielma P.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.

CONTENIDO

CUADROS	V
FIGURAS	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	2
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO	3
CAPÍTULO 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	6
2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	6
2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE	8
2.3 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE ANTECEDENTES	9
CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	10
3.1 INTRODUCCIÓN	10
3.2 PLUVIOMETRÍA	10
3.3 TEMPERATURA	18
3.4 FLUVIOMETRÍA	19
3.5 RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO	26
3.6 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	27
CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	28
4.1 INTRODUCCIÓN	28
4.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	28
4.2.1 Marco Geomorfológico	28
4.2.2 Marco Geológico	31
4.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA	36
4.3.1 Definición de Acuíferos	36
4.3.2 Unidades Hidrogeológicas	38

4.3.3	Niveles Freáticos	39
4.3.4	Parámetros Hidráulicos	42
4.3.5	Extracciones Existentes	47
4.4	CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA	52
CAPÍTULO 5	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA	53
5.1	INTRODUCCIÓN	53
5.2	INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE	53
5.3	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	56
5.3.1	Enfoque metodológico	56
5.3.2	Análisis de aguas superficiales	58
5.3.3	Análisis de aguas subterráneas	67
5.4	CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	70
CAPÍTULO 6	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	71
6.1	INTRODUCCIÓN	71
6.2	ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA EXISTENTE	72
6.3	SELECCIÓN DE PUNTOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	85
6.3.1	Información geofísica existente en el SHAC del río Laja	85
6.3.2	Selección de ubicación para las prospecciones geofísicas	87
6.4	TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS	89
6.4.1	Metodología de las prospecciones	89
6.4.2	Resultados de las prospecciones	90
6.5	CONCLUSIONES DE LA DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO	100
CAPÍTULO 7	GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO	101
7.1	INTRODUCCIÓN	101
7.2	CAMPAÑA DE INVENTARIO DE NIVELES EN POZOS	101
7.2.1	Análisis de Derechos de Aprovechamiento inscritos	101
7.2.2	Campaña de terreno	102
7.3	GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES	109
7.4	CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO	111
CAPÍTULO 8	DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO	112
8.1	INTRODUCCIÓN	112
8.2	REPRESENTACIÓN HIDROGEOLOGICA	112
8.2.1	Formaciones acuíferas	112

8.2.2	Parámetros elásticos	115
8.2.3	Nivel freático y dirección de flujo	122
8.2.4	Singularidades	123
8.3	BALANCE HÍDRICO	124
8.3.1	Entradas y salidas del sistema	124
8.3.2	Estimación del balance hídrico del sistema acuífero	125
8.4	CONCLUSIONES DEL DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL ACUÍFERO	126
CAPÍTULO 9 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN		128
9.1	INTRODUCCIÓN	128
9.2	SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO	129
9.2.1	Delimitación del SHAC	129
9.2.2	Unidades del SHAC	130
9.3	VÍNCULOS Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS DEL SISTEMA	132
9.4	CONCLUSIONES DE LA PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN	133
CAPÍTULO 10 DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA		135
10.1	DEFINICIÓN DE OFERTA HÍDRICA	135
10.2	ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA	135
10.2.1	Recarga del acuífero	135
10.2.1	Recarga estimada de las unidades del acuífero	137
10.3	CONCLUSIONES DE LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA	139
CAPÍTULO 11 IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS		140
11.1	BRECHAS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA	140
11.2	BRECHAS EN REGISTROS DE CONTROL HIDROMÉTRICO	140
11.3	CONCLUSIONES SOBRE BRECHAS DE INFORMACIÓN	141
CAPÍTULO 12 IMPLEMENTACIÓN DEL SIG		142
12.1	PLATAFORMA COMPUTACIONAL	142
12.2	SISTEMATIZACIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	142
12.3	CONCLUSIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SIG	147
CAPÍTULO 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
13.1	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	148
13.2	RECOMENDACIONES	152
CAPÍTULO 14 BIBLIOGRAFÍA		153

ANEXOS (DIGITAL)

ANEXO 2.1	FICHAS DE ANTECEDENTES
ANEXO 3.2	PLUVIOMETRÍA
ANEXO 3.3	TEMPERATURA
ANEXO 3.4	FLUVIOMETRÍA
ANEXO 4.3	DAA Y EXPEDIENTES DGA
ANEXO 4.3.4-1	PARÁMETROS HIDRÁULICOS
ANEXO 4.3.4-2	EXPEDIENTES DGA
ANEXO 4.3.5	DERECHOS OTORGADOS Y EN TRÁMITE
ANEXO 5.3	CALIDAD DE AGUAS
ANEXO 6.2	COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS
ANEXO 6.4	ESTUDIO GEOFÍSICO
ANEXO 7.2	FICHAS DE CAMPAÑA DE TERRENO DE MEDICIÓN DE NIVEL EN POZOS

CUADROS

Cuadro 2.1-1	Listado de Antecedentes Consultados.....	6
Cuadro 3.2-1	Estaciones Meteorológicas seleccionadas	11
Cuadro 3.2-2	Precipitación Media Mensual y Anual Estaciones analizadas.....	13
Cuadro 3.2-3	Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Laja (08367001-0)	15
Cuadro 3.2-4	Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1).....	16
Cuadro 3.2-5	Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Las Achiras (08364001-4).....	17
Cuadro 3.4-1	Estaciones Fluviométricas en la cuenca del río Laja	19
Cuadro 3.4-2	Probabilidad de Excedencia: Caudal (m ³ /s) – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1).....	24
Cuadro 3.4-3	Probabilidad de Excedencia: Caudal (m ³ /s) – Estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)	25
Cuadro 3.5-1	Recarga por infiltración del acuífero del río Laja	26
Cuadro 4.3-1	Profundidades Niveles Estáticos en SHAC río Laja, año 2012.....	39
Cuadro 4.3-2	Rangos de niveles estáticos en SHAC del río Laja, año 2012	42
Cuadro 4.3-3	Rango de Parámetros Hidráulicos para SHAC del río Laja	43
Cuadro 4.3-4	Cantidad de DAA subterráneos del SHAC del río Laja otorgados, por comuna.	47
Cuadro 4.3-5	Aplicaciones de derechos inscritos	48
Cuadro 4.3-6	Cantidad y caudal de DAA subterráneos del SHAC del río Laja en trámite, por comuna.....	50
Cuadro 4.3-7	Aplicaciones de derechos en trámite.....	50
Cuadro 5.2-1	Estaciones DGA de calidad de aguas superficiales y subterráneas analizadas..	54
Cuadro 5.3-1	Registros en estaciones de calidad de aguas superficiales con balance iónico válido	58
Cuadro 5.3-2	Estaciones DGA de calidad de aguas superficiales representativas	59
Cuadro 5.3-3	Registros en estaciones de calidad de aguas subterráneas con balance iónico válido	67
Cuadro 6.4-1	Relación entre material litológico y resistividad.....	95

Cuadro 7.2-1	Selección de pozos para campaña de terreno	102
Cuadro 7.2-2	Profundidades del nivel estático de los pozos	106
Cuadro 7.2-3	Tipología de las captaciones con medición de nivel	106
Cuadro 8.2-1	Clasificación de materiales sedimentarios según permeabilidad	116
Cuadro 8.2-2	Clasificación de acuíferos en función de la transmisividad	118
Cuadro 8.2-3	Coeficiente de almacenamiento en materiales porosos	120
Cuadro 8.3-1	Balance hídrico del acuífero del río Laja en condiciones naturales	125
Cuadro 8.3-2	Balance hídrico del acuífero del río Laja con extracciones	126
Cuadro 9.3-1	Balance hídrico de la Ud. Acuífera Norte en condiciones naturales	132
Cuadro 9.3-2	Balance hídrico de la Ud. Acuífera Sur en condiciones naturales	132
Cuadro 9.3-3	Balance hídrico de la Ud. Acuífera Norte con extracciones	133
Cuadro 9.3-4	Balance hídrico de la Ud. Acuífera Sur con extracciones	133
Cuadro 10.2-1	Estimación del 10% del Q_{85} en estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)	136
Cuadro 10.2-2	Estimación de recarga en las Unidades del SHAC del río Laja	138
Cuadro 11.2-1	Estaciones de control de nivel en pozos en el SHAC del río Laja	141
Cuadro 12.2-1	Coberturas SIG de la Carpeta “Estudio”	144

FIGURAS

Figura 1.3-1	Ubicación SHAC del río Laja	4
Figura 3.2-1	Ubicación Estaciones Meteorológicas seleccionadas	12
Figura 3.2-2	Curvas Isoyetas Media Anual SHAC del río Laja	14
Figura 3.2-3	Curvas de Variación Estacional: Precipitación– Estación Laja (08367001-0).	15
Figura 3.2-4	Curvas de Variación Estacional: Precipitación – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)	16
Figura 3.2-5	Curvas de Variación Estacional: Precipitación – Estación Las Achiras (08364001-4)	17
Figura 3.3-1	Estadística Media Mensual de Temperatura (°C) – Estación 370033	18
Figura 3.4-1	Ubicación Estaciones Fluviométricas sobre cauces naturales en la cuenca del río Laja	21
Figura 3.4-2	Caudal Medio Mensual en Río Laja en Tucapel (08380001-1) y Río Laja en Tucapel 2 (08380006-2)	22
Figura 3.4-3	Caudal Medio Mensual en Río Laja en Puente Perales (08383001-8) y Río Laja en San Rosendo (08386001-4)	22
Figura 3.4-4	Caudal Medio Mensual en Río Claro en Camino Yumbel Estación (08385001-9)	23
Figura 3.4-5	Curvas de Variación Estacional: Caudal – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)	24
Figura 3.4-6	Curvas de Variación Estacional: Caudal – Estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)	25
Figura 4.2-1	Unidades Geomorfológicas SHAC del río Laja	31
Figura 4.2-2	Formaciones Geológicas SHAC río Laja	35
Figura 4.3-1	Sub-acuíferos presentes en el SHAC del río Laja	37
Figura 4.3-2	Pozos catastrados y equipotenciales en SHAC del río Laja, año 2012	41
Figura 4.3-3	Parámetros hidráulicos del SHAC del río Laja: Permeabilidad	44
Figura 4.3-4	Parámetros hidráulicos del SHAC del río Laja: Transmisividad	45
Figura 4.3-5	Parámetros hidráulicos del SHAC del río Laja: Coeficiente de Almacenamiento	46
Figura 4.3-6	Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas otorgados en el SHAC del río Laja	49

Figura 4.3-7	Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en trámite en el SHAC del río Laja	51
Figura 5.2-1	Ubicación de estaciones DGA de Calidad Superficial y Subterránea analizadas	55
Figura 5.3-1	Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08375003-0 (río Laja alto)	60
Figura 5.3-2	Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08383001-8 (río Laja bajo aguas arriba de río Claro)	61
Figura 5.3-3	Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08385004-3 (río Claro).....	62
Figura 5.3-4	Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08386001-4 (río Laja bajo aguas abajo de río Claro).....	63
Figura 5.3-5	Niveles de molibdeno en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja	65
Figura 5.3-6	Niveles de mercurio en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja	65
Figura 5.3-7	Concentración de sólidos disueltos totales en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja	66
Figura 5.3-8	Diagramas Calidad Agua Subterránea de Estación 0830003-5 (en cuenca río Biobío)	68
Figura 5.3-9	Diagramas Calidad Agua Subterránea de Estación 08113002-7 (en cuenca río Itata)	69
Figura 6.2-1	Ubicación perfiles estratigráficos analizados.....	73
Figura 6.2-2	Sección estratigráfica L1	75
Figura 6.2-3	Sección estratigráfica L2	77
Figura 6.2-4	Sección estratigráfica L3	79
Figura 6.2-5	Sección estratigráfica L4	81
Figura 6.2-6	Sección estratigráfica L5	83
Figura 6.2-7	Sección estratigráfica L6	84
Figura 6.3-1	Antecedentes geofísicos en el SHAC del río Laja	86
Figura 6.3-2	Campaña geofísica en el SHAC del río Laja	88
Figura 6.4-1	Medición gravimétrica	89
Figura 6.4-2	Equipos para medición TEM.....	90
Figura 6.4-3	Perfiles gravimétricos y TEM analizados.....	91
Figura 6.4-4	Modelamiento gravimétrico Línea L1	93
Figura 6.4-5	Modelamiento gravimétrico Línea L2	93
Figura 6.4-6	Modelamiento gravimétrico desde antecedentes (L5)	94
Figura 6.4-7	Sección TEM modelo 1D del perfil L1	97
Figura 6.4-8	Sección de interpretación TEM del perfil L1	97
Figura 6.4-9	Sección de interpretación TEM del perfil L2	98
Figura 6.4-10	Sección de interpretación TEM del perfil L3	98
Figura 6.4-11	Sección de interpretación TEM del perfil L4	99

Figura 7.2-1	Ubicación Pozos Visitados durante Campaña de Terreno	103
Figura 7.2-2	Formato del formulario Ficha Campaña de terreno: Inventario Niveles Freáticos	105
Figura 7.2-3	Distribución espacial de los niveles estáticos de los pozos	107
Figura 7.2-4	Distribución espacial de la tipología de las captaciones	108
Figura 7.3-1	Curvas equipotenciales y sentido de escurrimiento del SHAC del río Laja..	110
Figura 8.2-1	Suelos de arenas observados durante la campaña de terreno en la zona central del área de estudio	113
Figura 8.2-2	Suelos residuales observados durante la campaña de terreno en la zona NW del área de estudio.....	114
Figura 8.2-3	Permeabilidad en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja	117
Figura 8.2-4	Transmisividad en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja	119
Figura 8.2-5	Coeficiente de almacenamiento en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja	121
Figura 9.1-1	Diagrama de flujo para la sectorización del acuífero del río Laja	128
Figura 9.2-1	Propuesta de sectorización del SHAC del río Laja.....	131
Figura 12.2-1	Estructura SIG del estudio SHAC Río Laja.....	142
Figura 12.2-2	Ejemplo de parte del contenido Carpeta “Estudio” del SIG	143
Figura 12.2-3	Contenido de la Carpeta “Mxd” del SIG.....	147

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERAL

El Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas, aprobado en el Decreto Supremo N°203 de 2013, en su artículo 54 define Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC, en adelante) como “acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente” (DGA, 2014b). Para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas susceptibles de explotar a nivel de SHAC, la Dirección General de Aguas (DGA) se ha enfocado en realizar un análisis de la realidad de los acuíferos a lo largo del territorio nacional.

Además, el conocimiento detallado de los acuíferos y/o SHAC y sus características permitiría resolver las solicitudes de derechos de aprovechamiento que se presentan, atendiendo a la disponibilidad hídrica subterránea de cada uno. De la lectura de los artículos 20 y 27 del DS N°203 de 2013, se concluye que el concepto de disponibilidad tiene relación con la posibilidad de aprovechar y explotar aguas subterráneas, recurso de por sí limitado, sin perjuicio ni menoscabo de otros titulares de derechos, y no está referido a la mera existencia de dicho recurso.

En especial, cabe mencionar el concepto “volumen sustentable”, entendido como la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero, es decir, al flujo de agua que lo alimenta naturalmente que proviene de precipitaciones, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos (DGA, 2014b). El volumen sustentable es aquel susceptible de constituir como derecho de aprovechamiento de aguas con carácter de definitivo.

En esta línea, el volumen de explotación sustentable a nivel de SHAC es aquel que permite un equilibrio de largo plazo del sistema, otorgando respaldo físico a los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos, no generando afección a derechos de terceros, tanto derechos superficiales como subterráneos, y no produciendo impactos no deseados a la fuente y al medio ambiente.

En algunos SHAC el Servicio se ha visto imposibilitado de resolver el creciente número de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, las que, en algunos casos, datan del año 2003, debido a que en la actualidad no se dispone para aquellos, información con un nivel de incertidumbre aceptable, sobre su volumen sustentable y las características geológicas, geofísicas, hidrometeorológicas, entre otras.

Siguiendo la necesidad de la DGA de profundizar en el conocimiento de los acuíferos de Chile, esta institución promovió el estudio “Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional” (DGA, 2014c), en el cual se establece una serie de pasos correlativos a considerar hasta alcanzar la sectorización de un acuífero. El manual de aplicación de dicho estudio pretende ser una referencia para los futuros proyectos de sectorización hidrogeológica a desarrollar.

Además, cabe mencionar que el cambio climático a nivel nacional ha afectado la disponibilidad del recurso hídrico debido a los cambios en los patrones meteorológicos. Esta situación puede generar que la oferta de derechos en el sur del país tome mayor relevancia respecto al pasado. En este contexto, la DGA está promoviendo el estudio de los acuíferos ubicados en la zona sur del país, para la determinación de la disponibilidad de aguas previa a la constitución de derechos de aprovechamiento subterráneo.

Concretamente, este estudio tiene como propósito disponer de los antecedentes técnicos que permitan mejorar el conocimiento para la gestión de derechos de aguas subterráneas en el valle del río Laja, en la región del Biobío.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio es realizar una propuesta de sectorización hidrogeológica y una estimación de la recarga (oferta) para el acuífero del valle del río Laja.

Para cumplir con este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar antecedentes.
- Representar y estimar los flujos de agua subterránea.
- Identificar las zonas de recarga y descarga del acuífero.
- Elaborar una propuesta de sectores hidrogeológicos para el acuífero del valle del río Laja.
- Determinar la oferta hídrica de cada sector.
- Desarrollar una base de datos consolidada, representada en un SIG.
- Detectar brechas de información que impliquen realizar actividades en terreno (geofísica, monitoreo, etc.).

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA Y ZONA DE ESTUDIO

El río Laja es el principal afluente del río Biobío, situándose su cuenca en la zona norte de la cuenca del río Biobío. La cuenca del río Laja se encuentra ubicada principalmente en el centro y centro-oriente de la región del Biobío.

La cuenca del río Laja, con una superficie total de 4.667 km², está dividida en 2 subcuencas, las cuales son descritas a continuación.

- Río Laja Alto (hasta bajo junta Río Rucúe): Corresponde a la subcuenca asociada a los ríos Laja en su primer tramo, Polcura, Rucúe y Manco. Tiene una superficie de 2.749 km². El río Laja fluye en dirección poniente desde su nacimiento a los pies de la Laguna del Laja, mientras que el río Polcura transcurre de norte a sur; el río Rucúe fluye casi paralelo al río Laja, ligeramente de sur a norte, y el río Manco también paralelo al río Laja en la zona norte del tramo final de la subcuenca. La Laguna del Laja es la entidad hidrológica representativa de este tramo, con una superficie de 80,5 km²; se la considera como embalse, con una capacidad de 5.582 Mm³ (DGA, 2016c).
- Río Laja Bajo: Con 1.917 km² de superficie, corresponde a la cuenca aportante al río Laja en el tramo que transcurre por el valle central. Recibe las aguas de los ríos Claro y Caliboro, como principales afluentes. El río Laja fluye en dirección poniente hasta su confluencia con el río Bío-Bío. En esta subcuenca hay dos lagunas de importancia, la Laguna Los Litres (1,8 km² de superficie) y la Laguna Los Caulles (0,8 km² de superficie); ambas se sitúan en el nororiente de la subcuenca.

Según DGA (2014), en la cuenca del río Laja existen 2 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC), el de la Laguna del Laja y el del río Laja.

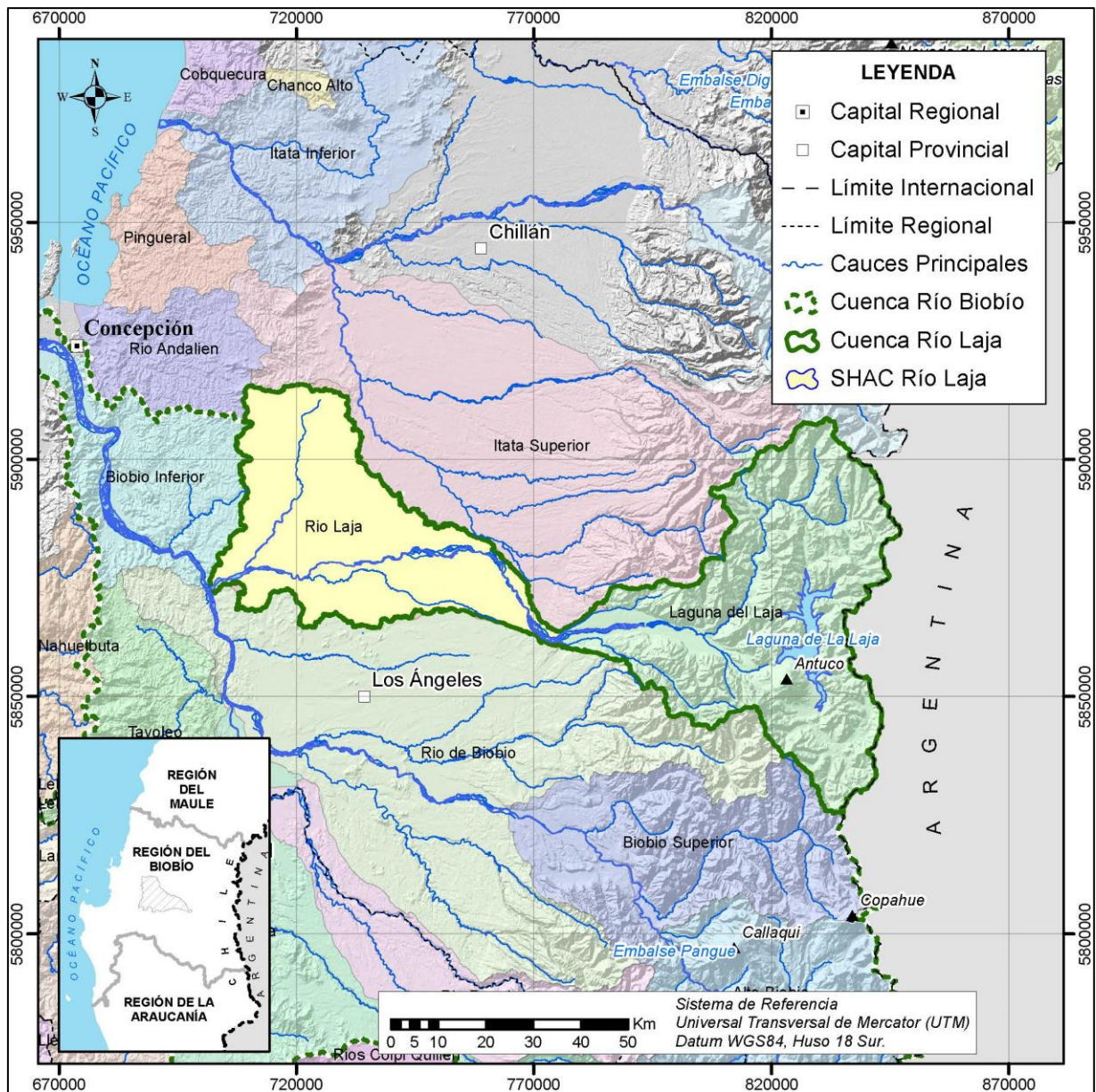
El SHAC del río Laja se ubica en la subcuenca del Laja bajo, en el valle central (ver Figura 1.3-1). Cabe destacar que, alrededor de éste, existen otros SHAC colindantes correspondientes a las subcuencas limítrofes, los cuales se identifican en la Figura 1.3-2.

Cabe mencionar que la delimitación del SHAC del río Laja corresponde, inicialmente y como punto de partida del presente estudio, a su propia subcuenca (río Laja bajo). Como resultado del análisis de antecedentes y trabajos desarrollados en terreno, el objetivo es su delimitación final dentro del área de la subcuenca y su sectorización correspondiente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.3-1 Ubicación SHAC del río Laja



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.3-2 SHAC del río Laja y colindantes

CAPÍTULO 2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

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

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Los antecedentes revisados y que han sido consultados en el desarrollo del presente estudio son aquellos presentados en el Cuadro 2.1-1. A cada uno de ellos se le ha realizado una ficha resumen con los principales resultados referentes al objetivo del estudio, las que pueden ser consultadas en el Anexo 2.1.

Cuadro 2.1-1 Listado de Antecedentes Consultados

Ref	Documento	Año	Elaborado	Autor
1	Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja.	1998	Thiele <i>et al.</i>	Thiele <i>et al.</i>
2	Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile.	1999	González <i>et al.</i>	González <i>et al.</i>
3	Estudio de disponibilidad cuenca del río Laja. SIT N° 70.	2000	Unidad Técnica DGA VIII Región	DGA
4	Contribución a la evolución geológica, geoquímica e impacto ambiental del volcán Antuco (Andes del Sur, 37°25'S).	2000	Moreno <i>et al.</i>	Moreno <i>et al.</i>
5	Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile.	2003	González <i>et al.</i>	González <i>et al.</i>
6	<i>Geodetic measurement of the local elastic response to the changing mass of water in Lago Laja.</i>	2004	Bevis <i>et al.</i>	Bevis <i>et al.</i>
7	Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. SIT N° 104.	2004	Cade-Idepe	DGA
8	Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Bío Bío. SDT N° 183.	2004	DARH	DGA
9	<i>Persistent toxic substances in soils and Waters along an altitudinal gradient in the Laja River Basin, Central Southern Chile.</i>	2005	Barra <i>et al.</i>	Barra <i>et al.</i>

Ref	Documento	Año	Elaborado	Autor
10	Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur).	2005	Mardones y Vargas	Mardones y Vargas
11	<i>The Andes. Active Subduction Orogeny</i>	2006	Oncken <i>et al.</i>	Oncken <i>et al.</i>
12	Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X. SIT N° 223.	2010	Conic BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda	DGA
13	Análisis preliminar de niveles de aguas subterráneas. SIT N° 224.	2010	INIA	DGA
14	Estudio Hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata. SIT N° 258.	2011	Aquaterra Ingenieros Ltda	DGA
15	Instalación de piezómetros operativos. Regiones del Maule y Bío Bío. SIT N° 259 y 287.	2011-2012	Compañía Chilena de Perforaciones Ltda.	DGA
16	Estimación de pérdidas de agua en tramos de ríos del sistema Laja-Diguillín en la zona central de Chile.	2012	Arumí <i>et al.</i>	Arumí <i>et al.</i>
17	Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile.	2012	Arumí <i>et al.</i>	Arumí <i>et al.</i>
18	Estudio Hidrogeológico cuenca Bío Bío. SIT N° 297.	2012	Aquaterra Ingenieros Ltda	DGA
19	Estudio de la interacción y regulación del sistema hídrico en la cuenca lacustre de laguna de la Laja, Región del Biobío, Chile.	2012	González <i>et al.</i>	González <i>et al.</i>
20	Modelación hidrogeológica cuenca Itata-Bajo, Región del Biobío. SIT N° 320.	2013	Aqualogy Medioambiente Chile SA	DGA
21	<i>Gridded data for a hydrological model in a scarce-data basin.</i>	2013	Muñoz <i>et al.</i>	Muñoz <i>et al.</i>
22	Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas.	2014	DGA	DGA
23	Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional. SIT N° 341.	2014	GCF Ingenieros Ltda	DGA
24	Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. SDT N° 359.	2014	DARH	DGA
25	Análisis hidrológico del sistema Laja. Impactos por cambios antropogénicos y análisis de una nueva regla de operación.	2014	Muñoz <i>et al.</i>	Muñoz <i>et al.</i>
26	<i>Contrasting mountain and piedmont dynamics of sediment discharge associated with groundwater storage variation in the Biobío River.</i>	2014	Tolorza <i>et al.</i>	Tolorza <i>et al.</i>
27	Análisis y aplicación metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos en la provincia de Ñuble, VIII Región. SIT N° 377.	2015	Subterránea SpA	DGA

Ref	Documento	Año	Elaborado	Autor
28	Sistematización de información hidrogeológica para un futuro plan de gestión de recursos hídricos en cuencas de la región del Biobío. SDT N° 391.	2016	DEP	DGA
29	Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos. SIT N° 400	2016	Hídrica Consultores SpA	DGA
30	Acuerdo de operación y recuperación Convenio del lago Laja de 1958 para temporada 2016-2017.	2016	DOH y Enel Generación Chile SA	DOH y Enel Generación Chile SA
31	Investigación de acuíferos de gran volumen y bajo nivel de recarga en la zona norte	2017	Hídrica Consultores SpA	DGA
32	Estudio de disponibilidad de la cuenca del río Laja. Desde sus nacientes hasta la estación DGA "Río Laja en Puente Perales"	2017	DARH	DGA
33	Derechos de aguas registrados en DGA. Región del Biobío.	2018	DGA	DGA
34	Estudio del estado ambiental del río Caliboro, Región del Biobío	2018	EcoHyd	DGA

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que se consultó el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) en la revisión de antecedentes, hallando algunos proyectos con información hidrogeológica, pero con interés sólo a nivel local y se consideran como fuentes para trabajo interno, respecto cotas de nivel freático. Tampoco se encuentran proyectos con series de registros de calidad de aguas que puedan incorporarse a la interpretación hidrogeoquímica del presente estudio.

2.2 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RELEVANTE

La revisión de los estudios listados en el Cuadro 2.1-1 permitió la recopilación de antecedentes respecto a la subcuenca del valle del río Laja. Adicionalmente a éstos, se consideraron otras fuentes de información que proporcionan datos relevantes como, por ejemplo, estadísticas de la Red Hidrométrica de la DGA y/o expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas del Catastro Público de Aguas.

A continuación, se detallan los estudios u otras fuentes e información clave en los aspectos principales de la caracterización del acuífero del valle del río Laja:

- Antecedentes generales:
 - El documento "Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional" (DGA, 2014c) resume los pasos a seguir en la sectorización de acuíferos en territorio chileno, como es el caso del presente estudio.

- Antecedentes hidrológicos:
 - El estudio “Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos” (DGA, 2016) recopila estadística de pluviometría y registros de temperatura en la cuenca del Biobío, proporcionando datos rellenos y con análisis de consistencia en el periodo hidrológico 1960-2014 de las estaciones seleccionadas¹.
 - Estadística de precipitaciones y temperatura de estaciones meteorológicas de la DGA y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).
 - Estadística de caudales de las estaciones fluviométricas y niveles estáticos de pozos de la DGA en la zona de estudio.
- Antecedentes hidrogeológicos:
 - Según el “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío” (DGA, 2012), el sistema presentaría una gran unidad acuífera, con una división en 3 sub-acuíferos definidos a partir de su composición litológica.
 - Del mismo estudio se extrae cobertura geológica a escala 1:250.000 así como catastro de pozos, con información de niveles estáticos, parámetros elásticos y equipotenciales de la zona del SHAC del río Laja.
 - Del estudio citado anteriormente como de la publicación “*The Andes. Active Subduction Orogeny*” (Oncken, 2006) se recopilan antecedentes de trabajos geofísicos, concretamente de puntos de gravimetría existente, con información relativa a la profundidad del basamento.
 - Expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas disponibles en la web institucional del Catastro Público de Aguas.
- Antecedentes hidrogeoquímicos:
 - Registros de calidad físico-químicos de las estaciones de aguas superficiales y subterráneas de la Red Hidrométrica de la DGA.

El detalle y manejo de la información recabada se presenta en detalle en los siguientes Capítulos.

2.3 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Además de los registros históricos de la red hidrométrica de la DGA y de los expedientes de Derechos de Aprovechamiento de Agua subterráneos del CPA, el antecedente principal al presente estudio corresponde al “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío” (DGA, 2012), en el cual se realizó un levantamiento de la información hidrogeológica y un modelo conceptual del acuífero de la cuenca del río Biobío, del cual el río Laja es afluente.

¹ La selección de estaciones dentro de una cuenca, según lo descrito en DGA (2016), atiende al criterio de disponibilidad de 10 años o más de datos pre-relleno.

CAPÍTULO 3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada en la caracterización hidrológica del valle del río Laja. En base a la información disponible, se realizó una caracterización de las variables precipitación, temperatura y caudal, enfocada principalmente en la zona definida por el SHAC del Laja. Sin embargo, para tener una visión más completa de la variabilidad espacial, se incluyeron estaciones relevantes de sectores pertenecientes a la cuenca del río Biobío, del cual el río Laja es afluente.

3.2 PLUVIOMETRÍA

Se consideraron las estaciones meteorológicas que posee la DGA en la zona² y que de acuerdo a DGA (2016) presentan, para la cuenca del río Biobío, la mejor disponibilidad y calidad de información para permitir el relleno de su registro. Adicionalmente, y puesto que el SHAC del río Laja se sitúa en el extremo norte de la cuenca del río Biobío, se consideraron estaciones situadas en la zona sur de la cuenca del río Itata, pertenecientes también a la Red Hidrométrica de la DGA, para tener una mayor distribución de información pluviométrica³.

Las estaciones utilizadas para la caracterización de las precipitaciones corresponden a las presentadas en el Cuadro 3.2-1, mientras que su distribución espacial se observa en la Figura 3.2-1.

El registro de las estaciones meteorológicas ha sido completado hasta el mes de marzo de 2017 desde lo presentado por DGA (2016), esto es, desde abril de 1960 hasta el año hidrológico 2016/17, mediante la actualización de los registros con información oficial de la DGA y por medio del relleno de acuerdo a los parámetros expuestos en DGA (2016), obteniendo un periodo de análisis de 57 años. Se procedió de igual forma para las estaciones de la cuenca del río Itata, tomando los valores históricos y rellenados hasta abril de 2011 de DGA (2012),

² Excepto la estación 370033 María Dolores, Los Ángeles Ad. que pertenece a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

³ Se revisaron también estaciones meteorológicas de CONAF, INIA y Ministerio de Agricultura, sin hallarse alguna dentro del área de estudio; en sus alrededores, las estaciones existentes disponen de menos de 10 años de registro o bien están próximas a alguna de DGA/DMC seleccionada, por lo que no se consideró oportuno añadirlas al análisis.

completando el registro a marzo de 2017. La estadística rellena se presenta en el Anexo 3.2, mientras que el Cuadro 3.2-2 muestra los valores de precipitación media mensual y anual de las estaciones analizadas.

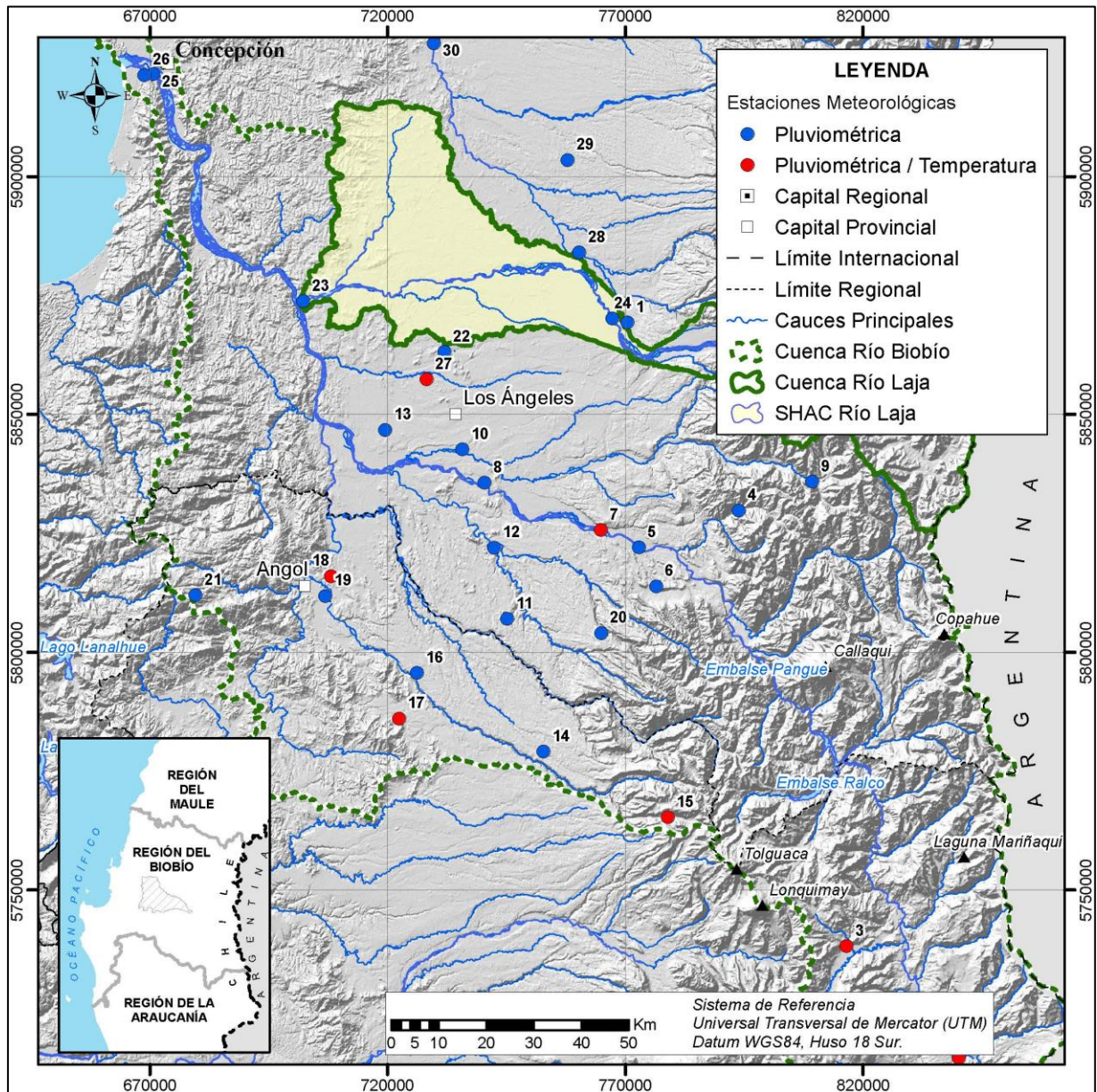
Cuadro 3.2-1 Estaciones Meteorológicas seleccionadas

N°	Identificación		Coordenadas UTM			Tª (*)
	Cód. BNA	Nombre	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
1	08122003-4	Tucapel	770.399	5.869.271	330	
2	08301001-0	Liucura	840.121	5.714.622	1.030	X
3	08304004-1	Lonquimay	816.462	5.738.212	920	X
4	08316001-2	Quillailleo	793.794	5.829.866	500	
5	08317001-8	Río Biobío en Rucalhue	772.840	5.822.061	245	
6	08317003-4	Cerro El Padre	776.486	5.813.918	400	
7	08318002-1	Quilaco	764.891	5.825.753	225	X
8	08319002-7	San Carlos de Puren	740.412	5.835.599	150	
9	08320001-4	San Lorenzo en Biobío	809.237	5.835.783	930	
10	08324001-6	Duqueco	735.723	5.842.586	120	
11	08330002-7	Pilgüen	745.156	5.807.046	300	
12	08332002-8	Mulchén	742.364	5.822.002	130	
13	08334002-9	Los Ángeles	719.498	5.846.696	90	
14	08343002-8	Encimar Malleco	752.808	5.779.096	520	
15	08350002-6	Laguna Malleco	778.939	5.765.318	890	X
16	08351003-K	Collipulli	726.172	5.795.685	240	
17	08353001-4	Ercilla (Vida Nueva)	722.375	5.786.071	250	X
18	08358002-K	Angol (La Mona)	708.082	5.816.031	101	X
19	08358003-8	El Vergel (Angol)	706.849	5.811.865	75	
20	08358004-6	Poco A Poco	764.924	5.804.054	620	
21	08358005-4	Parque Nahuelbuta	679.576	5.812.040	1.140	
22	08364001-4	Las Achiras	731.916	5.863.117	125	
23	08367001-0	Laja	702.185	5.873.759	100	
24	08380001-1	Río Laja en Tucapel	767.292	5.870.115	285	
25	08394001-8	Río Biobío en Desembocadura	670.636	5.921.479	5	
26	08410001-3	Concepción DGA	668.750	5.921.327	15	
27	370033	María Dolores Los Ángeles Ad.	728.141	5.857.324	120	X
28	08123004-8	Cholguán	760.255	5.884.037	225	
29	08123002-0	Pemuco	757.835	5.903.458	200	
30	08133003-4	Chillancito	729.714	5.928.050	40	

(*) Estaciones con registros de temperatura seleccionadas en DGA (2016).

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 18S.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

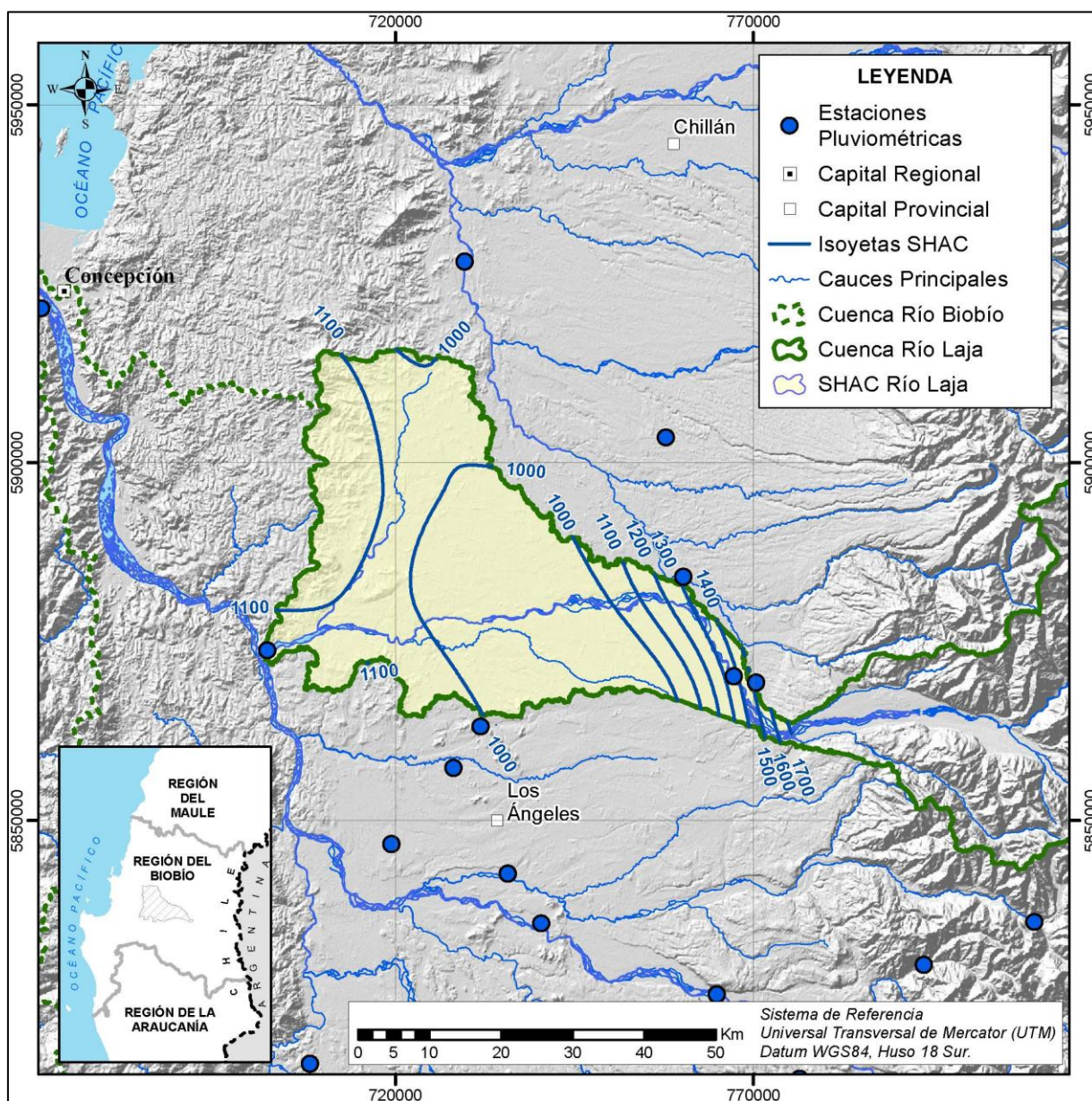
Figura 3.2-1 Ubicación Estaciones Meteorológicas seleccionadas

Cuadro 3.2-2 Precipitación Media Mensual y Anual Estaciones analizadas

Identificación			Precipitación (mm)												
Nº	BNA	Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	08122003-4	Tucapel	27,6	32,0	41,3	107,1	238,5	306,0	251,5	204,6	124,2	101,4	60,5	40,9	1.535,8
2	08301001-0	Liucura	21,7	16,3	22,8	62,7	126,2	180,0	106,1	81,5	67,3	64,4	38,9	35,8	823,7
3	08304004-1	Lonquimay	31,0	31,3	42,9	93,3	196,2	289,6	229,8	187,4	116,0	113,8	71,8	54,1	1.457,2
4	08316001-2	Quillailleo	41,9	53,6	64,1	125,2	299,1	400,2	361,3	278,6	163,6	164,4	97,4	74,6	2.124,0
5	08317001-8	Río Biobío en Rucalhue	33,3	42,9	48,7	105,9	203,8	296,9	261,4	204,6	119,5	102,5	72,8	61,3	1.553,6
6	08317003-4	Cerro El Padre	46,3	48,9	57,2	132,3	304,0	389,1	327,4	265,4	161,0	140,2	89,9	81,2	2.043,0
7	08318002-1	Quilaco	31,6	33,2	40,4	95,8	225,7	281,8	241,3	200,2	123,4	103,7	64,7	59,4	1.501,2
8	08319002-7	San Carlos de Puren	19,3	22,6	30,5	73,4	182,3	221,6	184,1	152,7	86,5	72,0	44,4	40,2	1.129,6
9	08320001-4	San Lorenzo en Biobío	41,0	56,7	60,9	135,8	289,8	371,8	337,9	259,7	179,9	146,7	92,3	65,5	2.038,0
10	08324001-6	Duqueco	17,8	19,6	26,6	67,0	171,1	183,7	182,0	138,1	81,0	63,3	43,5	38,7	1.032,3
11	08330002-7	Pilgüen	29,5	31,0	42,4	109,7	277,4	353,2	287,5	240,1	129,1	99,4	63,5	53,0	1.715,8
12	08332002-8	Mulchén	22,4	24,4	30,5	80,9	191,7	230,8	200,4	169,7	96,1	73,4	50,2	44,1	1.214,5
13	08334002-9	Los Ángeles	17,2	19,8	26,9	68,8	180,0	205,2	180,8	146,3	83,9	61,0	41,7	33,4	1.065,1
14	08343002-8	Encimar Malleco	41,9	40,4	64,9	131,1	287,4	350,4	329,4	277,6	155,1	138,3	90,1	77,7	1.984,3
15	08350002-6	Laguna Malleco	73,6	70,3	87,4	202,6	428,6	539,6	470,6	381,3	237,2	223,4	148,5	116,6	2.979,7
16	08351003-K	Collipulli	28,8	25,4	39,2	79,0	193,9	246,2	220,7	162,3	100,8	77,1	46,9	39,1	1.259,5
17	08353001-4	Ercilla (Vida Nueva)	25,2	26,1	36,1	86,1	202,0	238,4	231,7	192,5	100,5	86,8	64,1	47,0	1.336,4
18	08358002-K	Angol (La Mona)	14,4	14,6	23,1	57,3	194,6	222,9	225,4	159,1	79,5	53,2	31,8	21,3	1.097,3
19	08358003-8	El Vergel (Angol)	15,8	16,6	20,1	64,2	173,6	171,1	174,4	131,5	71,9	46,3	22,1	22,7	930,3
20	08358004-6	Poco A Poco	61,3	54,3	68,0	169,0	372,0	428,4	370,7	326,3	191,0	157,2	113,7	62,6	2.374,4
21	08358005-4	Parque Nahuelbuta	34,3	26,7	35,9	94,0	250,1	336,1	262,8	253,1	111,6	87,7	52,1	40,6	1.585,1
22	08364001-4	Las Achiras	16,4	21,4	28,8	64,5	167,4	206,1	173,1	132,0	80,2	63,1	41,8	35,1	1.029,9
23	08367001-0	Laja	16,8	11,6	20,2	65,2	172,4	221,3	182,4	142,0	70,2	55,1	33,9	14,7	1.005,7
24	08380001-1	Río Laja en Tucapel	25,7	36,9	30,5	99,1	203,1	263,8	214,0	204,5	101,6	90,2	47,5	52,4	1.369,3
25	08394001-8	Río Biobío en Desembocadura	11,9	13,5	15,0	60,5	154,3	197,6	178,8	141,2	66,8	42,7	24,1	24,1	930,6
26	08410001-3	Concepción DGA	19,7	19,8	22,9	74,4	206,6	253,5	232,5	182,4	87,9	69,7	36,9	24,5	1.230,7
27	370033	María Dolores Los Ángeles Ad.	24,2	21,1	34,1	71,6	169,9	249,1	210,3	148,3	97,5	66,4	40,8	28,3	1.161,6
28	08123004-8	Cholguán	25,2	26,1	35,5	86,8	199,9	261,2	234,1	178,8	111,2	81,5	49,4	35,6	1.325,1
29	08132002-0	Pemuco	20,9	24,2	27,8	74,6	195,9	231,9	202,4	157,3	97,1	78,5	42,2	34,0	1.186,8
30	08133003-4	Chillancito	11,6	13,9	19,8	59,6	174,4	227,1	195,0	140,1	81,5	52,2	29,6	19,0	1.023,7

Fuente: Elaboración propia.

Con los registros actualizados y rellenados de las estaciones pluviométricas, se construyeron curvas isoyetas con la precipitación media anual para caracterizar la pluviometría del SHAC del río Laja, la cual se presenta en la Figura 3.2-2. La pluviometría promedio obtenida a partir de las isoyetas para el área estudiada fue de 1.064 mm/año.

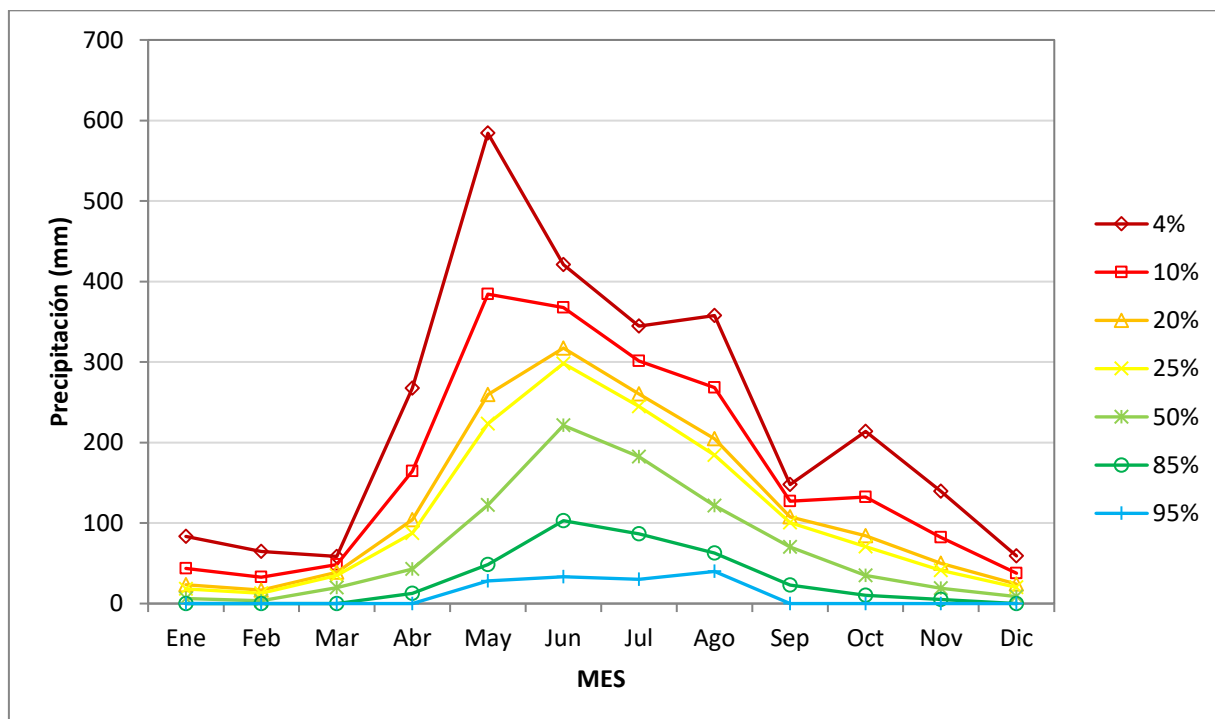


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2-2 Curvas Isoyetas Media Anual SHAC del río Laja

Posteriormente, la estadística fue utilizada en la construcción de curvas de variación estacional. Las Figuras 3.2-3 a 3.2-5 y los Cuadros 3.2-3 a 3.2-5 presentan las curvas desarrolladas, y sus valores, mientras que la totalidad del análisis se presenta en el Anexo 3.2.

Las estaciones seleccionadas para ello fueron las ubicadas dentro del perímetro de estudio (estaciones Laja y Río Laja en Tucapel), con lo cual es posible estimar la precipitación media sobre el mismo para diferentes periodos de retorno. Adicionalmente, se procedió de igual forma para la estación Las Achiras (08364001-4) que, si bien no se sitúa dentro del SHAC, se ubica próximo a éste, y es considerada en DGA (2016) como representativa de la Depresión Central en la cuenca del río Biobío en el estudio DGA (2016); por lo anterior fue seleccionada para la caracterización de la precipitación en la zona de estudio.



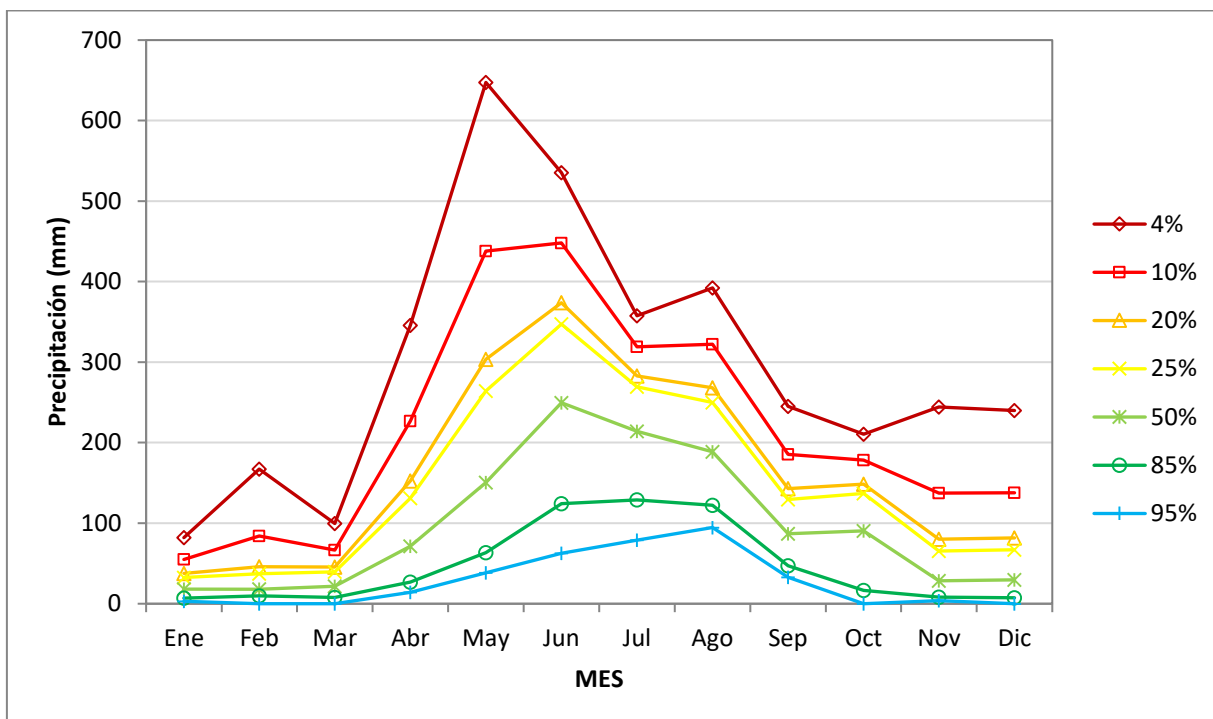
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2-3 Curvas de Variación Estacional: Precipitación– Estación Laja (08367001-0)

Cuadro 3.2-3 Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Laja (08367001-0)

P _{ex}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
4%	83,4	64,6	58,6	267,5	584,1	421,1	344,7	357,9	147,8	214,0	139,6	59,2	1.580,1
10%	43,8	32,7	48,4	164,6	384,3	367,6	301,2	268,2	127,1	132,3	82,4	37,8	1.427,8
20%	23,5	16,7	38,7	104,2	259,5	317,3	260,4	204,5	107,7	84,0	50,1	24,2	1.285,0
25%	18,4	12,8	35,0	87,4	223,5	298,3	244,9	184,5	100,4	70,6	41,4	20,2	1.230,7
50%	6,2	3,5	19,6	42,7	122,4	221,3	182,4	121,4	70,4	34,7	19,0	8,6	1.011,7
85%	0,0	0,0	0,0	12,6	48,5	102,9	86,4	62,6	23,1	10,3	5,0	0,0	675,2
95%	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2	33,5	30,0	39,9	0,0	0,0	0,0	0,0	477,7

Fuente: Elaboración propia.



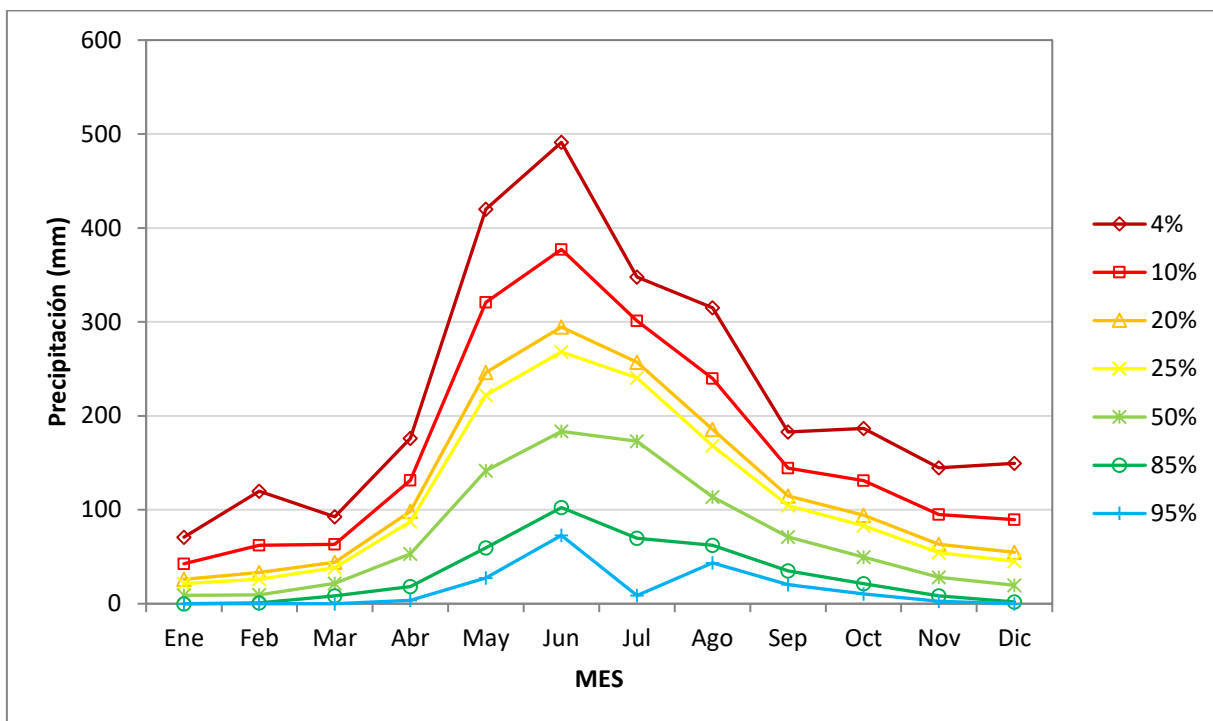
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2-4 Curvas de Variación Estacional: Precipitación – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)

Cuadro 3.2-4 Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)

P _{ex}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
4%	82,1	167,1	99,7	345,5	647,4	535,4	357,7	392,4	245,0	210,6	244,3	240,1	1.996,5
10%	54,9	83,9	66,7	226,7	438,0	448,1	319,2	322,4	185,6	178,5	137,5	137,9	1.828,5
20%	37,6	45,9	45,7	152,5	303,7	373,7	283,1	268,1	143,0	148,3	80,2	81,7	1.670,9
25%	32,6	37,1	39,5	131,2	264,2	347,3	269,3	250,0	129,5	136,9	65,4	66,9	1.611,1
50%	18,1	18,0	21,9	71,2	150,7	249,6	214,0	188,5	86,8	90,3	28,6	29,5	1.369,5
85%	6,9	9,8	8,0	27,0	63,6	124,4	128,9	122,1	47,0	16,6	8,0	7,3	998,3
95%	3,0	0,0	0,0	14,0	38,3	62,8	79,0	94,6	32,8	0,0	3,8	0,0	780,4

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2-5 Curvas de Variación Estacional: Precipitación – Estación Las Achiras (08364001-4)

Cuadro 3.2-5 Probabilidad de Excedencia: Precipitación (mm) – Estación Las Achiras (08364001-4)

P _{ex}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
4%	70,8	119,8	92,5	176,0	420,0	491,1	347,8	315,2	182,9	186,5	144,5	149,3	1.648,5
10%	42,5	62,2	63,1	131,3	320,8	377,2	301,0	239,8	144,3	131,1	94,9	89,6	1.440,4
20%	25,9	33,3	44,0	98,3	246,3	294,5	257,1	185,5	114,5	94,1	63,4	54,8	1.269,2
25%	21,3	26,2	38,3	87,6	221,9	268,1	240,4	168,3	104,6	83,0	54,2	45,2	1.209,7
50%	8,9	9,6	21,8	52,9	141,4	183,4	173,1	113,6	71,0	49,6	28,0	19,6	996,3
85%	0,0	1,0	8,3	18,1	59,5	102,4	69,6	62,1	35,1	21,3	8,3	1,8	739,5
95%	0,0	0,0	0,0	3,6	27,5	72,7	8,9	43,5	20,3	10,3	2,7	0,0	620,8

Fuente: Elaboración propia.

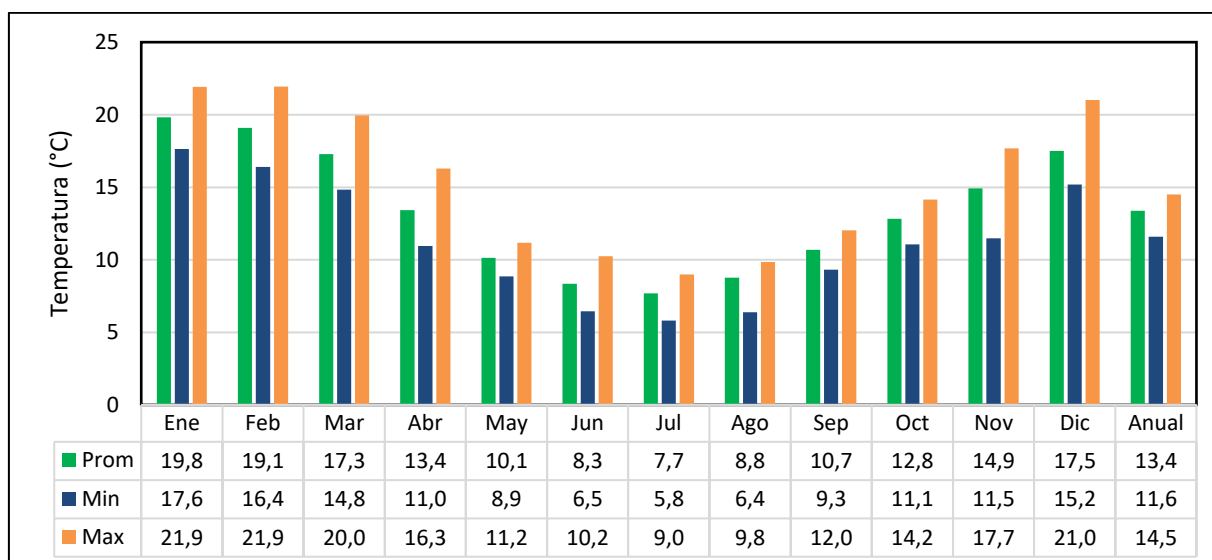
La serie de curvas de variación estacional presentadas en las Figuras 3.2-3, 3.2-4 y 3.2-5 muestran una concentración de las lluvias de mayor importancia entre los meses de mayo y agosto, coincidente en gran parte con el periodo otoñal e invernal. Se observa que la precipitación con una probabilidad de excedencia del 50% corresponde a valores alrededor de 1.000 mm/año en centro (estación Las Achiras) y poniente (estación Laja), mientras que en el extremo oriente del SHAC, ascienden a un valor superior a 1.300 mm/año (estación Río Laja en Tucapel) por la proximidad a la precordillera. Por otra parte, el efecto nival tendría poca o

nula incidencia puesto que se trata de una zona ubicada mayoritariamente en el Valle Central, caracterizado por disponer de un régimen pluvial.

3.3 TEMPERATURA

Las estaciones meteorológicas con medición de temperatura revisadas para el análisis han sido presentadas con anterioridad en el Cuadro 3.2-1. Por su ubicación y representatividad en el sector del SHAC del río Laja, se ha seleccionado la estación 370033 “María Dolores Los Ángeles Ad.”, de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), en la caracterización térmica de la zona. El resto de estaciones se sitúan en zonas alejadas y a cotas disímiles al valle del Laja, considerándose no convenientes para el análisis de detalle.

El registro de la estación ha sido rellenado a la fecha de marzo de 2017 desde lo presentado en DGA (2016), esto es, desde abril de 1960, completando el año hidrológico 2016/17 (periodo de análisis de 57 años). Posterior al relleno del registro se ha obtenido el valor de temperatura media mensual y anual. Para observar en mayor detalle la variación de temperatura en el SHAC del río Laja, se presenta la Figura 3.3-1. El registro completo es posible consultarlo en el Anexo 3.3.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3-1 Estadística Media Mensual de Temperatura (°C) – Estación 370033

De esta forma es posible observar una estacionalidad en la temperatura a lo largo del año para la estación María Dolores Los Ángeles, ubicada a 120 m.s.n.m. La temperatura promedio en invierno es de 10,9°C, mientras que para verano asciende a 18,4°C. Cabe mencionar que, si bien esta estación está fuera del área del SHAC del río Laja, concretamente al sur del mismo, ésta se encuentra en el centro de la Depresión Central, de forma análoga al valle del río Laja.

3.4 FLUVIOMETRÍA

La caracterización fluviométrica se realizó mediante la información disponible desde abril de 1960 al mes de marzo de 2017 (año hidrológico 2016/17) de las estaciones que posee la DGA en el curso del cauce del río Laja y sus afluentes. Las estaciones presentes en la cuenca del río Laja se presentan en el Cuadro 3.4-1, mientras que la distribución espacial de aquellas relativas a medición de flujo sobre cauce natural se observa en la Figura 3.4-1.

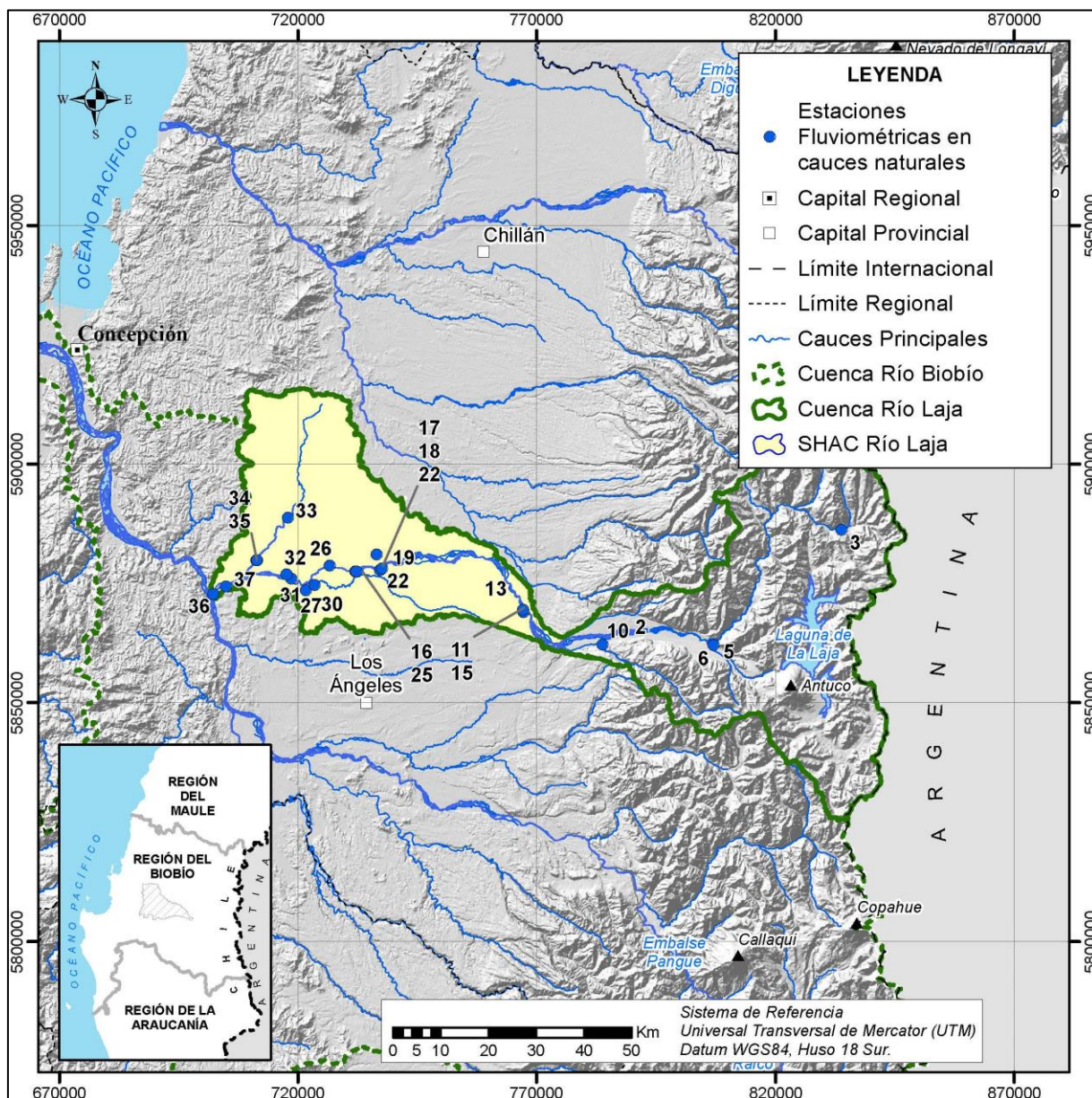
Cuadro 3.4-1 Estaciones Fluviométricas en la cuenca del río Laja

N°	Cód. BNA	Identificación	Coordenadas UTM		
		Nombre	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
1	08370006-8	Canal Alto Polcura	834.394	5.875.271	1.450
2	08371001-2	Canal de Descarga Central Antuco	795.165	5.864.426	s/i
3	08372002-6	Río Polcura en Cuatro Junta	833.718	5.886.261	1.319
4	08374002-7	Canal de Descarga Central El Toro	811.636	5.858.395	s/i
5	08375001-4	Río Polcura A. Desc. Central El Toro	806.892	5.862.151	710
6	08375002-2	Canal Abanico en km 049	806.887	5.862.028	890
7	08375004-9	Canal Zañartu después Bocatoma Río Laja	797.781	5.865.785	490
8	08375005-7	Canal Collao	796.999	5.865.967	490
9	08375006-5	Canal Mirrihue	796.706	5.863.383	500
10	08376001-K	Río Rucúe en Camino a Antuco	783.780	5.862.228	450
11	08380001-1	Río Laja en Tucapel	767.188	5.869.039	285
12	08380002-K	Canal Laja Camino a Tucapel	768.317	5.867.152	285
13	08380003-8	Canal Siberia en Bocatoma (Rec.R.Laja)	765.368	5.872.863	300
14	08380005-4	Canal Laja-Diguillín	768.851	5.867.103	s/i
15	08380006-2	Río Laja en Tucapel 2	767.105	5.869.535	s/i
16	08381001-7	Río Laja en El Salto	731.948	5.877.525	97
17	08381002-5	Río Laja en Curanilahue	736.490	5.881.100	148
18	08381003-3	Río Laja Ag. Arr. Del Salto (Rec.R.Laja)	737.214	5.877.902	140
19	08381004-1	Canal Batuco en Bocatoma (Rec.R.Laja)	738.215	5.879.262	151
20	08381005-K	Canal Río Claro en Bocatoma (Rec.Laja)	738.162	5.879.140	156
21	08381006-8	Canal La Mancha en Bocatoma (Rec.Laja)	737.162	5.878.674	153
22	08381007-6	Estero Zanjón Seco A.J. Laja (Rec.Laja)	737.597	5.878.200	149
23	08381008-4	Canal Dueñas en Bocatoma (Rec.Laja)	732.546	5.878.619	133
24	08381009-2	Canal Aguada en Bocatoma (Rec.R.Laja)	732.740	5.878.490	133
25	08381010-6	Río Laja en Pte. Longitudinal (Rec.Laja)	732.225	5.877.610	128
26	08381011-4	Estero Batuco A.J. Laja (Rec.R.Laja)	726.632	5.878.812	100
27	08382001-2	Estero Cachapoal A.J. Laja (Rec.R.Laja)	721.634	5.873.609	100
28	08382002-0	Canal Quilales en Bocatoma (Rec.R.Laja)	733.525	5.875.661	141
29	08382003-9	Canal Morales en Bocatoma (Rec.R.Laja)	733.461	5.877.791	141
30	08382004-7	Estero Caliboro A.J. Laja (Rec.R.Laja)	723.413	5.874.672	106

Identificación			Coordenadas UTM		
N°	Cód. BNA	Nombre	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
31	08383001-8	Río Laja en Puente Perales	718.591	5.876.033	65
32	08383002-6	Estero Potrerada A.J.Laja (Rec.R.Laja)	717.578	5.876.923	85
33	08385001-9	Río Claro en Camino Yumbel-Estación	717.886	5.888.820	s/i
34	08385002-7	Río Claro en Puente Claro	711.290	5.879.922	s/i
35	08385003-5	Río Claro en Estac. Río Claro (Rec.Laja)	711.364	5.879.920	80
36	08386001-4	Río Laja en San Rosendo	702.234	5.872.743	40
37	08386002-2	Río Laja en la Cantera (Rec.R.Laja)	704.914	5.874.466	75

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 18S.

Fuente: Elaboración propia en base a información DGA.



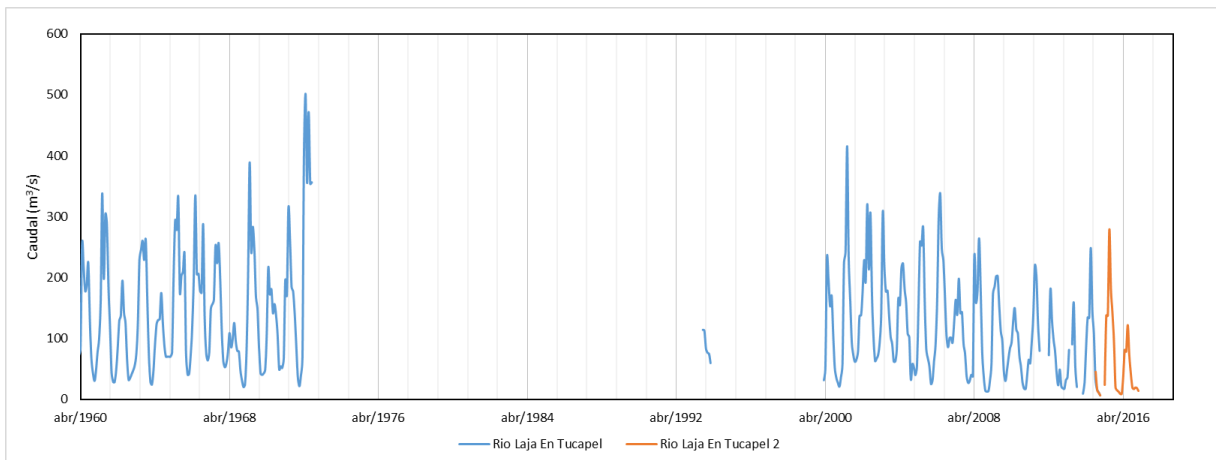
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-1 Ubicación Estaciones Fluviométricas sobre cauces naturales en la cuenca del río Laja

De las estaciones fluvimétricas midiendo flujo sobre cauce natural representadas en la figura 3.4-1, se seleccionaron, de entre aquellas ubicadas sobre el SHAC del río Laja, las estaciones más representativas en cuanto a serie de registros, importancia de la fuente y situación para

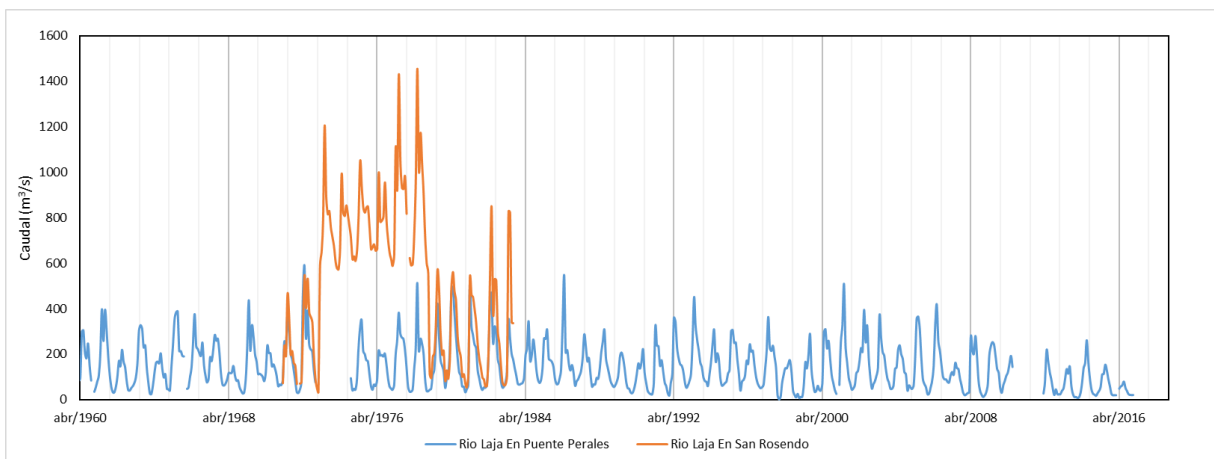
caracterizar al cauce del río Laja en la zona de estudio (entre Tucapel y junta con el río Biobío) así como el río Claro, principal afluente en ese tramo.⁴

Posteriormente, se elaboraron las Figuras 3.4-2, 3.4-3 y 3.4-4 con el registro histórico de caudal (promedio mensual) de éstas.



Fuente: Elaboración propia.

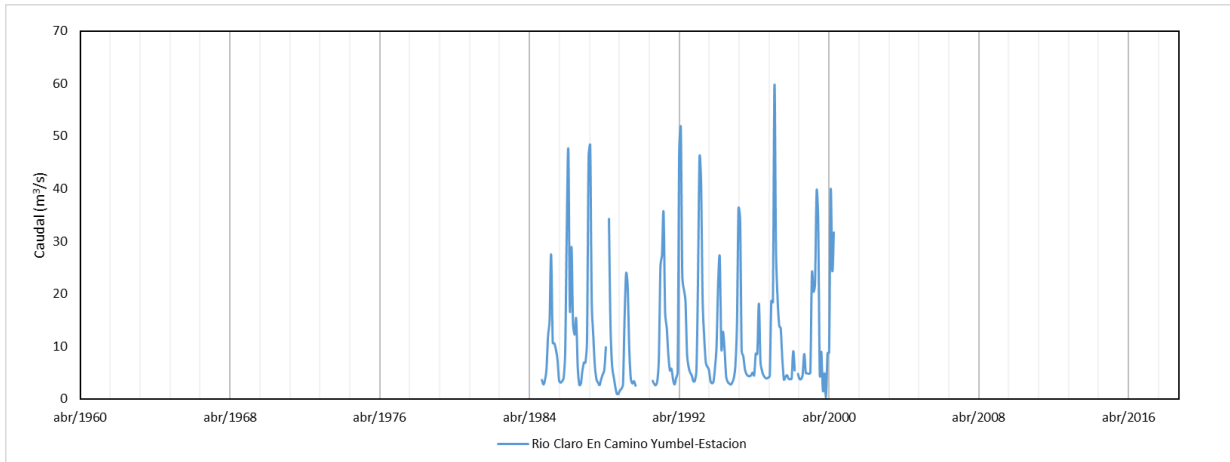
Figura 3.4-2 Caudal Medio Mensual en Río Laja en Tucapel (08380001-1) y Río Laja en Tucapel 2 (08380006-2)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-3 Caudal Medio Mensual en Río Laja en Puente Perales (08383001-8) y Río Laja en San Rosendo (08386001-4)

⁴ Las estaciones consideradas reflejan el caudal circulante por el cauce correspondiente, aspecto importante para cuantificar la evolución del flujo pasante. No se considera el efecto del uso artificial del Lago Laja sobre el río ya que la relevancia recae sobre el agua que transcurre por los cauces de la zona de estudio (independiente de su origen) y por tanto que puede tener relación con el acuífero objeto de análisis.

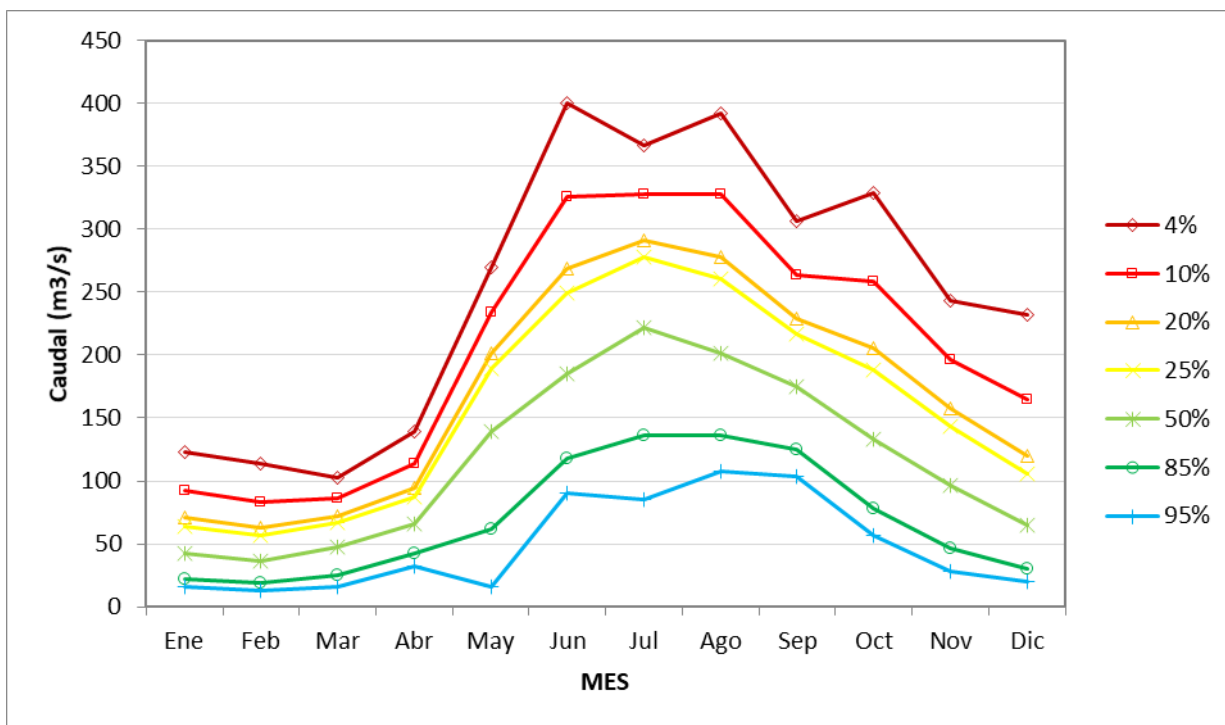


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-4 Caudal Medio Mensual en Río Claro en Camino Yumbel Estación (08385001-9)

El registro de aguas en el río Laja en San Rosendo se ve influenciado por el aporte del río Claro, principal afluente que aporta sus aguas abajo de la estación de río Laja en Puente Perales. Sin embargo, dada la magnitud de caudal registrado en río Claro, se observan datos fuera del rango esperado en San Rosendo cuando supera los 800 m³/s aproximadamente respecto del medido en Puente Perales. Ello podría deberse a errores en la medición, que la lectura estuviera influenciada por los niveles del río Biobío o alguna otra causa; en cualquier caso, la serie de datos del río Laja en Puente Perales es más confiable para la caracterización fluviométrica, dada la extensión de registros en el tiempo (vigente desde el año 1957 hasta la actualidad) y la magnitud de valores esperables. Por el contrario, la estación río Laja en San Rosendo únicamente estuvo funcionando entre los años 1971-1983.

Por otra parte, en las Figuras 3.4-5 y 3.4-6 se presentan las curvas de variación estacional de los caudales de las estaciones río Laja en Tucapel y río Laja en Puente Perales; así mismo, en los Cuadros 4.3-2 y 4.3-3 se muestran los datos obtenidos para diferentes probabilidades de excedencia. Tanto las figuras como los caudales anteriores se obtuvieron directamente de los registros disponibles de la Red Hidrométrica de la DGA.



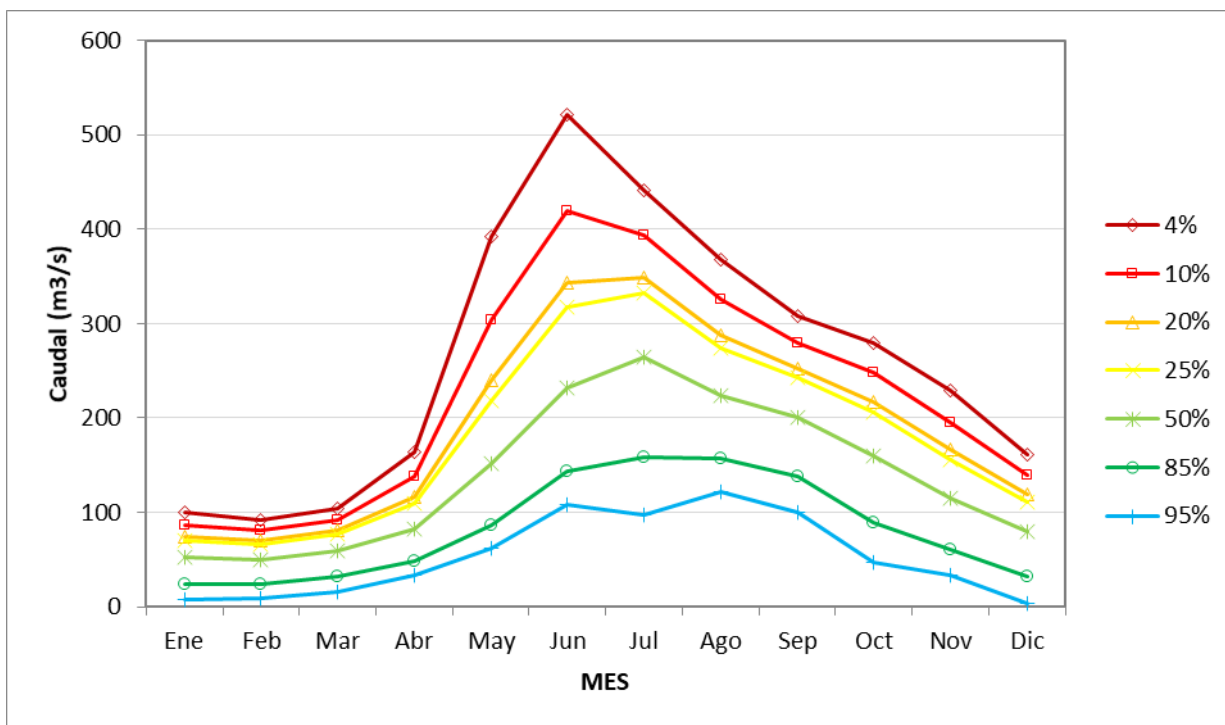
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-5 Curvas de Variación Estacional: Caudal – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)

Cuadro 3.4-2 Probabilidad de Excedencia: Caudal (m³/s) – Estación Río Laja en Tucapel (08380001-1)

P _{ex}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
4%	122,9	113,3	102,5	139,3	269,5	400,6	366,7	392,4	306,4	329,1	242,8	232,2	186,0
10%	92,3	83,5	86,2	113,9	234,5	325,9	327,8	328,2	263,6	258,2	196,5	165,0	171,4
20%	70,5	62,8	71,7	94,2	201,7	268,5	291,4	277,6	229,0	205,7	157,4	119,7	157,8
25%	63,7	56,3	66,4	87,7	189,2	249,5	277,6	260,5	217,0	188,6	143,8	106,0	152,6
50%	42,1	36,3	47,3	65,6	138,9	185,4	221,7	201,5	174,8	133,1	96,3	64,8	131,8
85%	22,4	18,5	25,0	42,0	61,6	117,5	135,9	135,8	125,4	77,8	46,2	30,4	99,7
95%	15,4	12,5	16,0	32,3	16,2	89,9	85,5	107,8	103,2	56,8	27,9	19,5	80,9

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4-6 Curvas de Variación Estacional: Caudal – Estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)

Cuadro 3.4-3 Probabilidad de Excedencia: Caudal (m³/s) – Estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)

P _{ex}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
4%	99,4	92,3	104,4	163,3	392,9	521,7	441,3	367,8	308,3	279,8	229,7	161,7	213,2
10%	86,7	80,7	92,2	137,9	304,5	420,1	393,8	325,1	279,6	247,7	195,7	139,8	195,3
20%	74,8	69,8	80,7	116,8	239,7	342,8	349,2	287,9	252,6	217,6	166,0	119,3	178,5
25%	70,3	65,7	76,3	109,3	218,9	317,4	332,3	274,5	242,4	206,1	155,2	111,5	172,2
50%	52,0	49,1	58,7	82,3	151,7	232,4	263,9	224,1	201,1	159,9	114,8	80,0	146,4
85%	24,0	23,5	31,6	48,9	86,3	144,0	158,9	156,8	137,6	89,0	60,7	31,7	106,9
95%	7,5	8,5	15,7	33,0	62,0	108,7	97,2	122,4	100,3	47,3	33,0	3,3	83,6

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se observa que los caudales mayores se dan principalmente entre mayo y octubre, siendo entre enero y marzo el periodo de menor flujo circulante; cabe señalar aquí que en el valle del río Laja existe una red de canales de regadío, la cual debe considerarse por la importancia de las extracciones en el periodo de riego, principalmente en verano. Otro aspecto que se extrae de los resultados es que los caudales del río Laja son superiores en Puente Perales respecto los obtenidos en Tucapel (entrada de la subcuenca). En el Anexo 3.4 se presenta el registro completo de los datos analizados.

3.5 RECARGA DIRECTA AL ACUÍFERO

La recarga anual por precipitación ha sido estudiada por DGA (2014) mediante el análisis de infiltración de precipitación media directa sobre la subcuenca del río Laja.

La precipitación media se estimó, en dicho estudio, a partir de los datos obtenidos de las isoyetas del “Balance Hídrico de Chile” (DGA, 1987), ocupando la extensión *Spatial Analyst* de ArcGIS 10.1. Para el factor de infiltración aplicado a la precipitación media se consideraron estudios de análisis de recargas realizados por la Dirección General de Aguas, en los cuales se diferencian tres zonas geográficas: Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa. Para el SHAC del Laja, se consideró en el mencionado estudio el factor de infiltración correspondiente a la zona de depresión intermedia, igual al 5%.

El cálculo de la recarga se determinó según la expresión:

$$R = A \cdot Pp \cdot C_i$$

donde:

- R: Recarga del acuífero (m³/año)
- A: Área de la cuenca (m²)
- Pp: Precipitación media (m/año)
- C_i: Coeficiente de infiltración (adimensional)

En el Cuadro 3.5-1 se señalan los datos ocupados para la zona del SHAC del Laja.

Cuadro 3.5-1 Recarga por infiltración del acuífero del río Laja

Subcuenca	Área (km ²)	Pp (m/año)	C _i	Recarga (m ³ /año)
Río Laja	1.837,84	1,10	0,05	101.151.038

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

De esta forma, ocupando los valores y método del estudio ya mencionado, se obtiene que la recarga anual del acuífero en la zona del SHAC del Laja de 101.151.038 m³/año, que corresponde a 3.207 l/s.

Cabe destacar que este valor de recarga anual es el considerado como volumen sustentable en el Atlas del Agua realizado el año 2016 por la misma Dirección General de Aguas. El volumen sustentable se define en este documento como “la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero, es decir, al flujo de agua que lo alimenta naturalmente que proviene de precipitaciones, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos (DGA, 2013). El

volumen sustentable es aquel susceptible de constituir como derecho de aprovechamiento de aguas con carácter de definitivo”.

3.6 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

La caracterización hidrológica ha permitido verificar que las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo y agosto, asociados al periodo otoñal e invernal, las cuales se producen en la mayor parte del SHAC entorno a los 1.000 mm/año, siendo superiores a 1.300 mm/año en el extremo oriente por la influencia de la precordillera. El valor promedio de precipitación en la zona, obtenida a partir de la generación de isoyetas, es de 1.064 mm/año. De acuerdo a esto, se ha estimado que la recarga al sistema acuífero del SHAC del río Laja por precipitaciones corresponde a una variable de importancia en el sistema.

La temperatura promedio anual es de 13,4°C, correspondiente al análisis histórico de los registros de la estación Las Achiras (DMC 370033).

El caudal con probabilidad de excedencia del 85% en la estación Río Laja en Tucapel es de 99,7 m³/s, mientras que en la estación Río Laja en Puente Perales asciende a 106,9 m³/s. Respecto al registro fluviométrico, se detecta una falta de información histórica válida sobre el río Laja en la salida de la cuenca, que permita cuantificar un balance entre el flujo superficial entrante y saliente de la zona de estudio.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

4.1 INTRODUCCIÓN

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

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

4.2 DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La caracterización de la geología del área de estudio se presenta mediante un análisis inicial de la geomorfología de la región del Biobío, para luego una vez acotada a la zona de estudio correspondiente a la cuenca hidrográfica del río Laja, se procede a definir las unidades geológicas representativas de la zona.

4.2.1 Marco Geomorfológico

De acuerdo a la caracterización geomorfológica realizada por Börgel (1983), citado en DGA (2012), se distinguen, como se presenta en la Figura 4.2-1, cinco unidades morfológicas para toda la región del Biobío. Se identifican en sentido W-E de la siguiente manera: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera o Montaña y por último la Cordillera Andina.

i. Planicies Litorales

Se distribuyen de forma discontinua de norte a sur, con alturas variables entre los 10 y 50 m.s.n.m. Dentro de esta unidad se incluyen las llanuras de sedimentación fluvial y/o aluvional asociadas al curso distal del río Biobío, caracterizándose por la presencia de sedimentos arenosos negros provenientes del arrastre de material volcanoclástico proveniente del volcán Antuco, ubicado en la alta cordillera.

Para la cuenca del río Laja, esta unidad aflora en su límite SW, en las cercanías del desemboque del río homónimo con el río Biobío, ocupando solo un pequeño porcentaje en cuanto a ocupación espacial.

ii. Cordillera de la Costa

Está representada por las rocas cronológicamente más antiguas, de edades Paleozoicas, que se alzan sobre alturas que sobrepasan los 1.000 m.s.n.m. Estratigráficamente, se exponen conjuntos metamórficos y posteriores intrusivos de origen ígneo, que, a escala regional, está representada por la Cordillera de Nahuelbuta, principalmente hacia el sector occidental de la región.

En el sector de estudio, solo en el extremo NW de la cuenca del río Laja aparece una pequeña porción de esta unidad, caracterizándose más por lomeríos moderados que grandes orogenias, formando así una vía de comunicación de tipo transicional entre la depresión central y la cordillera de la costa.

iii. Depresión Central

El SHAC del río Laja se encuentra prácticamente en su totalidad dentro de esta unidad geomorfológica. Constituida por una planicie fuertemente ondulada cuyas alturas no superan los 200 m.s.n.m., en esta sección se encuentran depósitos fluvio-glacio-lacustres que han sido arrastrados desde la cordillera de Los Andes. Este extenso valle ha sido socavado por fenómenos de transportes de aguas o aluviones provenientes de la cordillera andina; por efecto de avances y retrocesos de glaciares y por la actividad volcánica de la zona. Los materiales más comunes como arenas, bloques, limos y arcillas constituyen la secuencia estratigráfica típica del sector.

Dentro de esta unidad discurre el río Laja, en sentido E-W, hasta su desembocadura con el río Biobío. Adicionalmente aparecen el río Claro y río Caliboro como principales afluentes del cauce principal.

iv. Precordillera

Hacia el extremo oriental del SHAC del río Laja, se encuentra una zona de transición conocida como “La Montaña”. Esta zona corresponde a la base pre-cordillerana ubicada a los pies de la Cordillera de los Andes. Las cotas se ubican entre los 300 y 850 m.s.n.m. Esta unidad tiene su origen en una continua acumulación de sedimentos provenientes de movimientos gravitacionales. Se caracteriza por laderas abruptas, ríos encajonados y materiales que van desde arcillas hasta bolones, esto como consecuencia de la superposición de sistemas de abanicos aluviales y glaciovolcánicos.

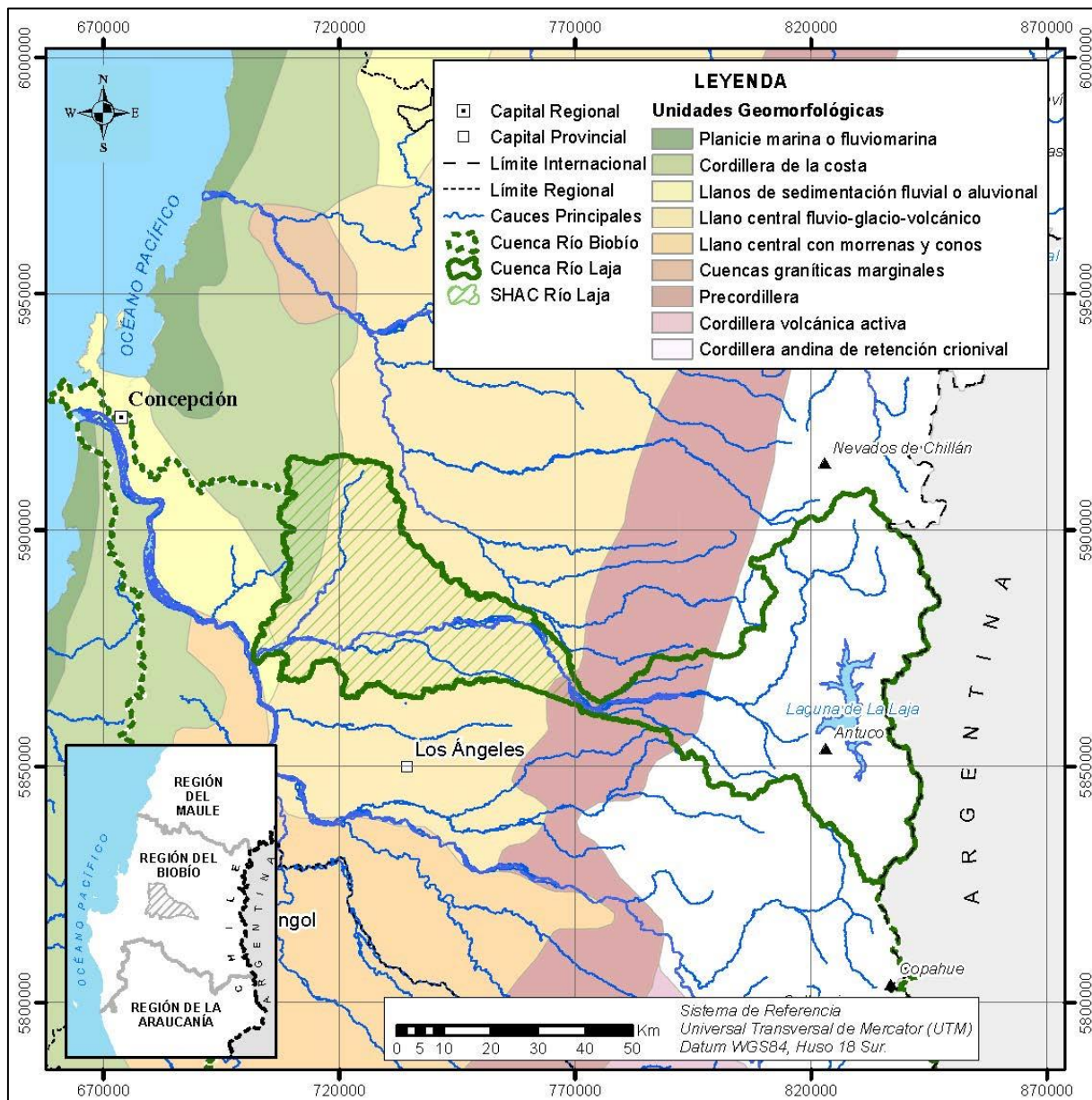
Localmente, dentro del SHAC en estudio, esta unidad es poco representativa y se ubica a los pies de la precordillera andina, donde el río Laja se abre hacia la depresión central.

v. Cordillera Andina

Regionalmente, la cordillera de Los Andes está representada por relieves abruptos. Su altura promedio varía entre 1.700 y 1.900 m.s.n.m., en algunas zonas superando los 2.000 m.s.n.m. Se encuentra cortada por diferentes ríos que a su vez forman valles pronunciados en toda su extensión. Se ubican en ella numerosos volcanes activos cuyas cumbres alcanzan hasta los 3.100 m.s.n.m.

Se observan numerosas lagunas, de diversos tamaños y formas, depresiones por depósitos morrénicos, emplazadas en circos glaciares o debido al tectonismo de la zona. La más importante dentro de la región del Biobío corresponde a la Laguna de la Laja con un área del espejo de agua de 80,5 km² (DGA, 2016c).

Debido a que la zona del SHAC se ubica principalmente dentro de la depresión central, la cordillera andina no se considera relevante para este estudio, pues aparece ocupando el sector alto de la cuenca del río Laja; sin embargo, es importante señalarla como el área donde se emplaza la Laguna del Laja que da origen al río en cuestión.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2-1 Unidades Geomorfológicas SHAC del río Laja

4.2.2 Marco Geológico

La descripción geológica del SHAC del río Laja se desarrolla en base a los principales levantamientos realizados para la elaboración de las hojas Concepción-Chillán (1981) y Los Ángeles-Angol (1981), a escala 1:250.000 para la región del Biobío. Estas cartas fueron digitalizadas dentro de los trabajos realizados en el “Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Biobío” (DGA, 2012).

Regionalmente, las rocas más antiguas vienen representadas por unidades metamórficas paleozoicas que afloran hacia el extremo occidental de la región. El lapso Jurásico-Cretácico Inferior, está representado por rocas volcánico-clásticas, en la zona precordillerana de los Estratos Polcura-Cholguán. Durante el Cretácico superior ocurre la Formación Quiriquina, en la zona costera, correspondientes a rocas transgresivas marinas sobre el basamento metamórfico, y en la Cordillera Andina por potentes secuencias volcánico-sedimentarias de la Formación Río Blanco.

Las rocas terciarias corresponden a sedimentitas marinas y continentales (Formación Curanilahue), con mantos de carbón en la región costera, y a sedimentitas (Formación Cura-Mallín) en la Cordillera Andina. Sobre la unidad anterior se disponen, discordantemente, potentes coladas de lavas andesítico-basálticas atribuidas al Plioceno-Pleistoceno y sobre estas últimas se disponen volcanes y lavas (Pleistoceno Superior-Holoceno), conformadas por más de 1.000 m de lavas andesíticas a basálticas y depósitos piroclásticos, calcoalcalinos, bien conservados.

Durante el Pleistoceno-Holoceno, los movimientos de glaciares provocan importantes acumulaciones de secuencias sedimentarias de origen glacio-lacustres y morrénicos en toda la sección de la Depresión Intermedia y la Cordillera Andina, formando así la precordillera actual.

Por último, los procesos atmosféricos de tipo eólico, eventos volcánicos y fenómenos fluviales caracterizaron la morfología actual del sector.

La identificación de las unidades geológicas presentes en el SHAC se tomó desde la base de estudios de SERNAGEOMIN (2003) y se agrupan cronológicamente de la siguiente manera:

Ec Formación Curanilahue (Eoceno Inferior)

Corresponde a una secuencia de areniscas y limolitas continentales, con carbón en su miembro superior e inferior. El miembro medio corresponde a areniscas de origen marino. Aflora en el tramo central del paso del río Laja, hacia el sur del SHAC.

MIh Lavas de Huelehueico (Mioceno Inferior)

Corresponde a una secuencia de lavas andesíticas y basálticas, que afloran en sectores aislados de la Depresión Central, entre el río Laja y el pueblo de Collipulli. Los afloramientos dentro de la zona de interés cubren áreas muy pequeñas, apareciendo de manera poco representativa en el área de estudio.

PIHca Sedimentos Glacio-Lacustres Collipulli-Angol (Pleistoceno-Holoceno)

Se define como una secuencia compuesta por niveles de arcilla, arenas y conglomerados, con potencias de 10-50 cm, que aflora, principalmente, en el margen izquierdo del curso del río Laja, donde éste se abre hacia la depresión central. Los conglomerados y areniscas de esta unidad están formados por clastos de andesitas y basaltos, y matriz cinerítica.

Hcrl Depósitos del cono fluvial del río Laja (Pleistoceno-Holoceno)

Esta unidad se compone de material piroclástico, proveniente de la actividad volcánica del volcán Antuco y centros adyacentes, cuyo transporte fue mixto, tanto fluvial (río Laja y tributarios menores) como eólicos. De acuerdo al tipo de sedimentos y a la granulometría que definen otros autores, es posible estimar para estos depósitos fluviales permeabilidades variables entre 10^{-3} y 10^{-4} cm/s. Aparece representada solo en único sector dentro del SHAC, en forma lenticular a orillas del río Laja.

Q3av Depósitos de avalancha volcánica (Pleistoceno-Holoceno)

Asociados a colapso parcial de edificios volcánicos. Los clastos son de composición riolítica a andesítica, con tamaños que varían entre grava gruesa y sedimentos finos. La ubicación de este depósito corresponde a cubrir más del 60% de la superficie del SHAC del río Laja. Debido a la variedad granulométrica, esta unidad representa un buen potencial hidrogeológico.

Q1fa Depósitos fluvio-aluviales antiguos (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno de los cauces de los ríos Laja, Claro y sus esteros. Se diferencian de los depósitos actuales al ser estos últimos asociados al cauce actual, mientras que los descritos corresponden a los depósitos generados en los paleocauces. Actualmente se disponen en las adyacencias de los cursos principales. Estos rellenos subactuales probablemente presenten permeabilidades entre 5×10^{-3} y 10^{-3} cm/s.

Q1 Depósitos fluvio-aluviales actuales (Pleistoceno-Holoceno)

En el cauce actual de los ríos y esteros se encuentran depósitos fluviales, torrenciales, donde se mezclan bloques, gravas, arenas y arcillas. Estos depósitos, aunque tienen buen desarrollo sólo en los ríos principales, se encuentran también en cada uno de los cauces menores. Esta unidad presenta mayor desarrollo al extremo SW de la zona de interés

donde se observan importantes espesores de arenas y gravas. Estos rellenos actuales debieran tener permeabilidades entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s.

Q1t Sedimentos de terrazas fluviales (Holoceno)

Esta unidad corresponde a los depósitos de gravas y arenas en niveles de terrazas, que se ubican las laderas del río Laja. Están compuestos por gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de andesitas y granitos de diámetro promedio entre 8 y 30 cm, con fracciones variables de arenas y limos. Sus espesores máximos alcanzan a 20 m. Conforme a la descripción que entregan los autores que han levantado la geología del área, es posible estimar para estos rellenos aterrizados, una permeabilidad promedio de más o menos 10^{-3} cm/s.

Hacia el extremo occidental del SHAC se presentan de manera limitante cuerpos intrusivos que representan el inicio de la cordillera de la costa, al oeste. Dentro de estas intrusiones se encuentran:

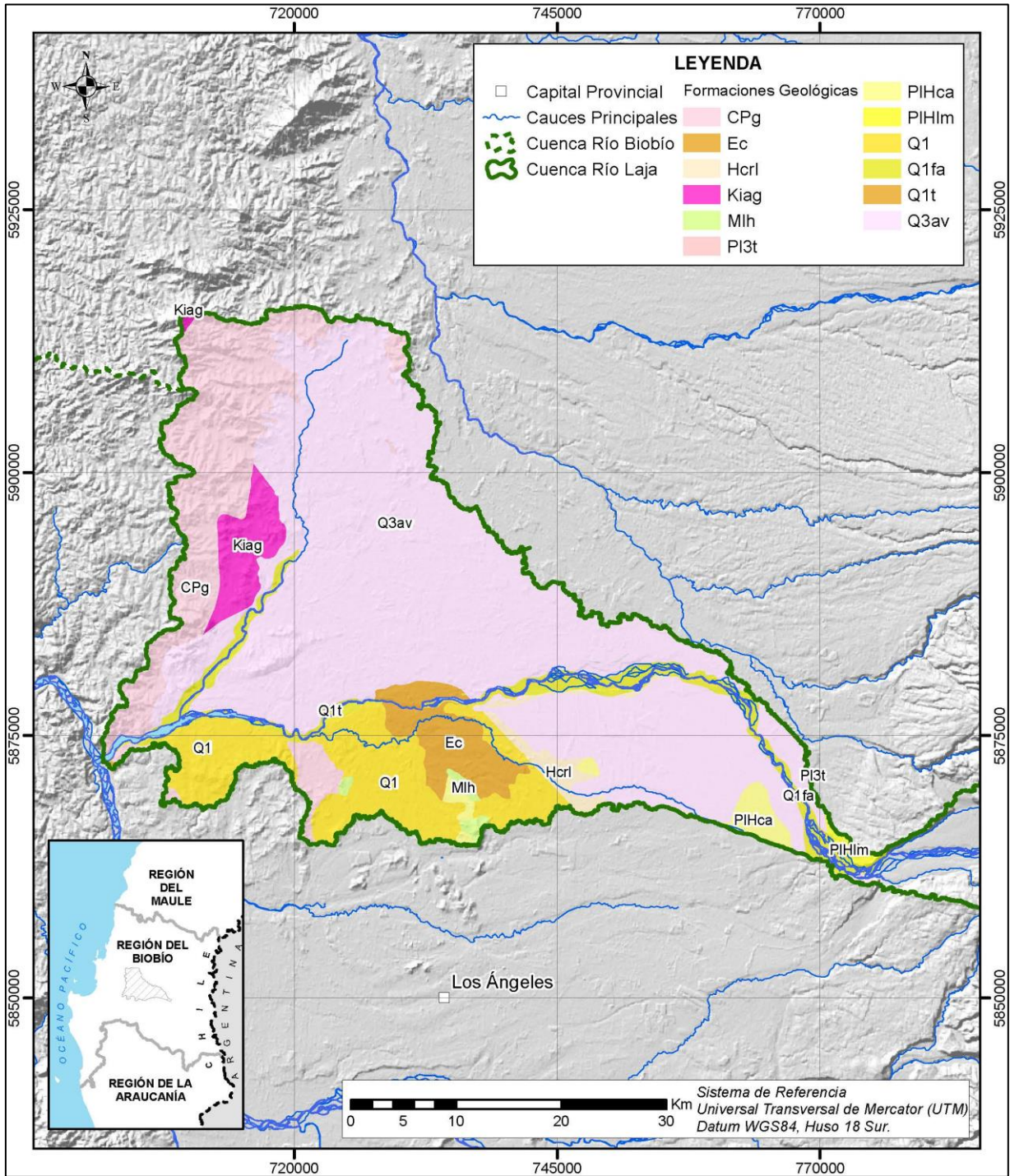
Kiag Intrusivos Cretácicos

Se reconocen de cuerpos graníticos, de composición en general semejante a los granitoides carboníferos y de textura más fina. Estos cuerpos se localizan en una franja en dirección general NNE-SSO y representan altos topográficos, que sobresalen del nivel promedio de las rocas graníticas del carbonífero.

CPg Intrusivos Carboníferos-Pérmicos tonalitas y granodioritas indiferenciadas

Se distribuyen como una franja continua de dirección general NNE-SSO, al oeste del SHAC y conformando gran parte de la Cordillera de la Costa. Está conformado por un complejo plutónico cuya composición petrográfica varía entre tonalita y granodiorita, con sectores menos extensos de diorita cuarcífera y granito. Este complejo plutónico fue definido por González-Bonorino (1970) y Hervé *et al.* (1976), como el Batolito de la Costa. Tiene una relación de contacto intrusivo con las rocas del basamento metamórfico e infrayace, con discordancia de erosión, a las series sedimentarias y sedimentario-volcánicas del Triásico.

En la Figura 4.2-2 se muestra la distribución espacial de estas unidades descritas para el SHAC del río Laja.



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2012).

Figura 4.2-2 Formaciones Geológicas SHAC río Laja

4.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA

La descripción hidrogeológica buscó caracterizar las principales unidades hidrogeológicas dentro de la zona de estudio. Para ello, se procedió a identificar los sectores acuíferos presentes en el SHAC del río Laja.

4.3.1 Definición de Acuíferos

A lo largo de toda la cuenca, donde afloran las unidades geológicas terciarias superiores y cuaternarias, se reconoce la existencia de un solo acuífero de carácter freático. Se estiman altas permeabilidades que varían entre 45 y 2.000 m/día y una potencia de 40 m (DGA, 2012).

Esta gran unidad hidrogeológica, sin embargo, exhibe variaciones tanto laterales como en profundidad de la permeabilidad lo que permitió reconocer en ella tres subunidades o sub acuíferos diferenciados entre sí por su composición y características permeables.

En el análisis realizado por DGA (2012), se tomó en consideración la información geológica procedente del acápite anterior, el cual según los diferentes tipos de relleno se encuentran las siguientes unidades acuíferas para el sector del SHAC del río Laja:

- Sub-acuífero 1: Unidad Q3av, depósitos de avalancha volcánica.
- Sub-acuífero 2: Unidades Q1, depósitos fluvio-aluviales y sedimentos de valles recientes; Q1fa, depósitos fluvio-aluviales antiguos; Q1t, sedimentos de terrazas fluviales y Hcrl, depósitos de conos fluviales.
- Sub-acuífero 3: Unidad PlHca, sedimentos glacio-lacustres.

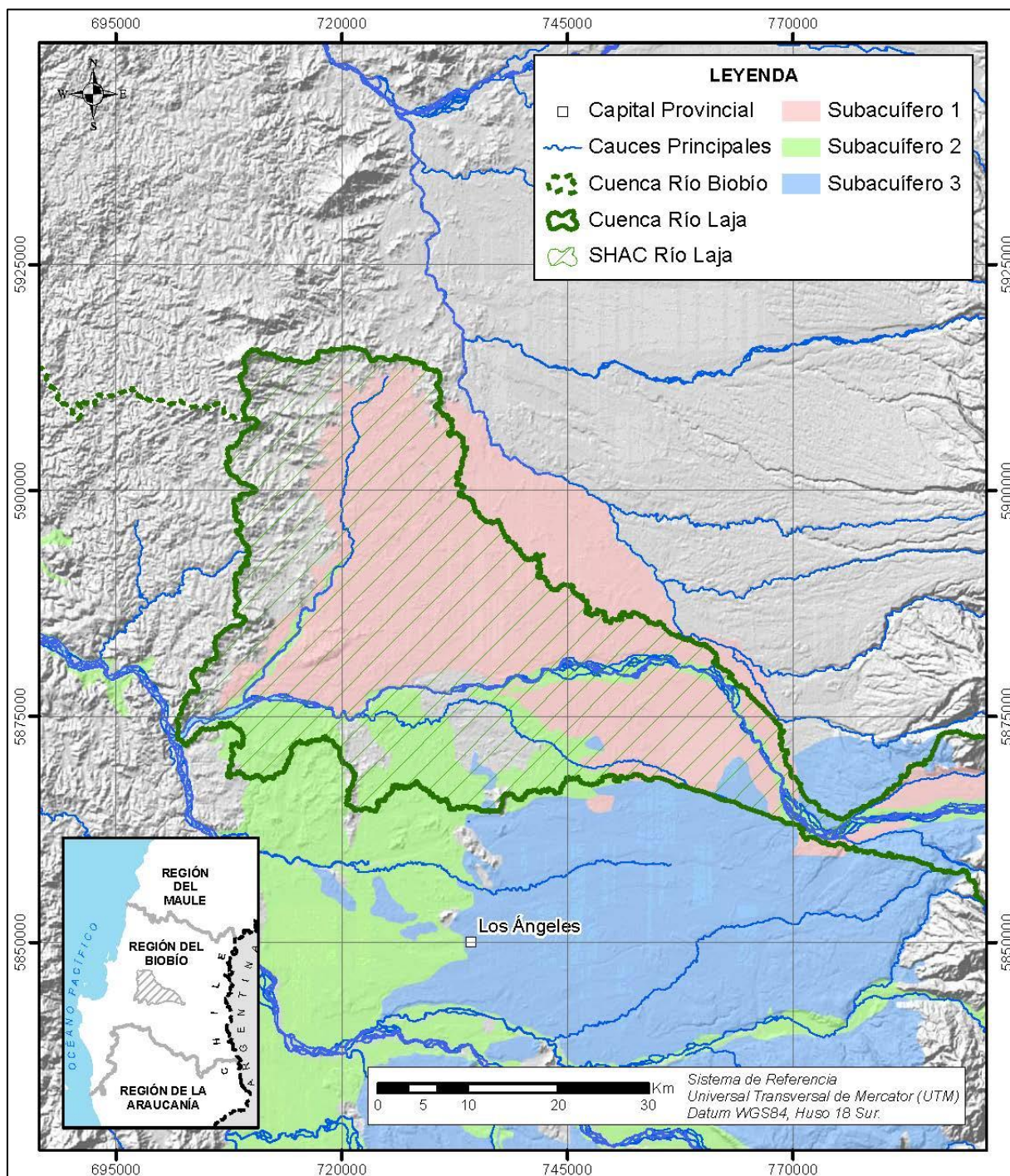
Espacialmente, el sub acuífero 1 presenta mayor extensión dentro de la zona de interés, abarcando gran parte del SHAC del río Laja, limitando al oeste con el borde oriental de la cordillera de la costa, representando una barrera natural para el flujo local de aguas subterráneas.

El sub acuífero 2 se ubica paralelamente al cauce principal de los ríos Laja y río Claro, ocupando solo una porción al extremo suroeste de la cuenca entera.

El sub acuífero 3 es el menos representativo dentro del SHAC. Se ubica al sur de la zona de estudio en pequeños sectores aislados y hacia el sureste, limitando al este con la precordillera.

En la Figura 4.3-1 se detalla la configuración espacial de estos sub acuíferos. Cabe mencionar que, según se aprecia en la imagen, para el sector del Salto del Laja, se presentan unidades

de roca consolidada, representada por areniscas pertenecientes a la Fm. Curanilahue, y que no se tomaron en cuenta para la configuración acuífera.



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012).

Figura 4.3-1 Sub-acuíferos presentes en el SHAC del río Laja

4.3.2 Unidades Hidrogeológicas

En el área de estudio correspondiente al SHAC de río Laja se definen tres unidades hidrogeológicas descritas en DGA (2012), las cuales fueron agrupadas según las categorías que van desde alta a nula importancia hidrogeológica, según su potencial para transmitir agua, ya sea que se encuentre saturada, parcialmente saturada o no saturada⁵.

i. Unidad de alta importancia hidrogeológica

Las unidades de mayor importancia hidrogeológica corresponden a los depósitos no consolidados del cuaternario tales como depósitos fluviales y fluvio-aluviales, actuales y antiguos, depósitos coluviales, sedimentos de terrazas fluviales y terrazas marinas.

Litológicamente está conformada por gravas y arenas polimícticas negras, de origen principalmente volcánico, en una matriz de arenas finas y escasos limos de espesor variable entre 4 y 25 m, que presentan una baja compactación.

La importancia hidrogeológica de esta unidad radica en que tiene la habilidad de conducir las aguas provenientes de la recarga hacia niveles inferiores saturados. Incluye principalmente gravas, arenas, depósitos detrítico-evaporíticos y depósitos limo-arenosos, parcialmente saturados.

ii. Unidad de media a baja importancia hidrogeológica

En esta categoría se han agrupado sedimentos que por su origen glacio-lacustre poseen porcentajes de finos superiores a 30%. Están genéticamente relacionados con procesos de glaciación y desglaciación de masas de hielo ubicadas a mayores elevaciones. Estos depósitos se reconocen en las riberas de los principales cauces, formando terrazas o lomajes suaves, que permiten un buen desarrollo de suelo y vegetación, lo cual resulta conveniente para la agricultura, ganadería o el emplazamiento habitacional.

Litológicamente consiste en depósitos estratificados, conformados por clastos angulosos, predominantemente volcánicos, de tamaño bloque a arena en una matriz arenosa-arcillosa.

iii. Acuícludos de nula importancia hidrogeológica

Esta unidad lo constituyen los intrusivos ígneos y rocas metamórficas que se reconocen en el área de estudio.

⁵ Esta distinción según categorías fue adoptada a partir del método propuesto por Struckmeyer y Margat (1995) y combina información acerca del potencial acuífero (productividad y extensión) con el tipo de régimen de flujo (intergranular o fisurado). Este método es utilizado por el SERNAGEOMIN para la elaboración de las cartas hidrogeológicas de la cuenca de Piedra Pómez, Salar de Maricunga y Salar de Pedernales, entre otras. (DGA, 2012)

De lo anterior se deduce una relación entre la anterior clasificación y los sub-acuíferos mencionados en el acápite 4.3.1:

- Unidad de alta importancia hidrogeológica: se relaciona con el sub -acuífero 1, caracterizado por depósitos de avalancha volcánica; tiene la mayor extensión dentro del SHAC del río Laja.
- Unidad de media a baja importancia hidrogeológica: se incluye en esta categoría los sub-acuíferos 2 y 3, siendo estos depósitos fluvio-aluviales y sedimentos de valles, terrazas y glacio-lacustres.
- Acuícludos de nula importancia hidrogeológica: corresponde a las áreas no incluidas como sub-acuífero 1, 2 o 3, y que se presentan principalmente al poniente del área definida como SHAC del Laja.

4.3.3 Niveles Freáticos

El registro de niveles freáticos en el valle del río Laja se obtuvo desde la información del catastro de pozos realizado durante la campaña de terreno realizada en DGA (2012), durante los meses de agosto y septiembre del mismo año. Del total de 200 pozos catastrados dentro de la región del Biobío para dicho estudio, se tomó en consideración para este análisis solo las captaciones ubicadas dentro del área de interés, correspondientes al SHAC del río Laja. El total de pozos con información de nivel estático disponible resultó en 49 pozos.

El resumen de esta información se presenta en el Cuadro 4.3-1, mientras su distribución espacial se observa en la Figura 4.3-2.

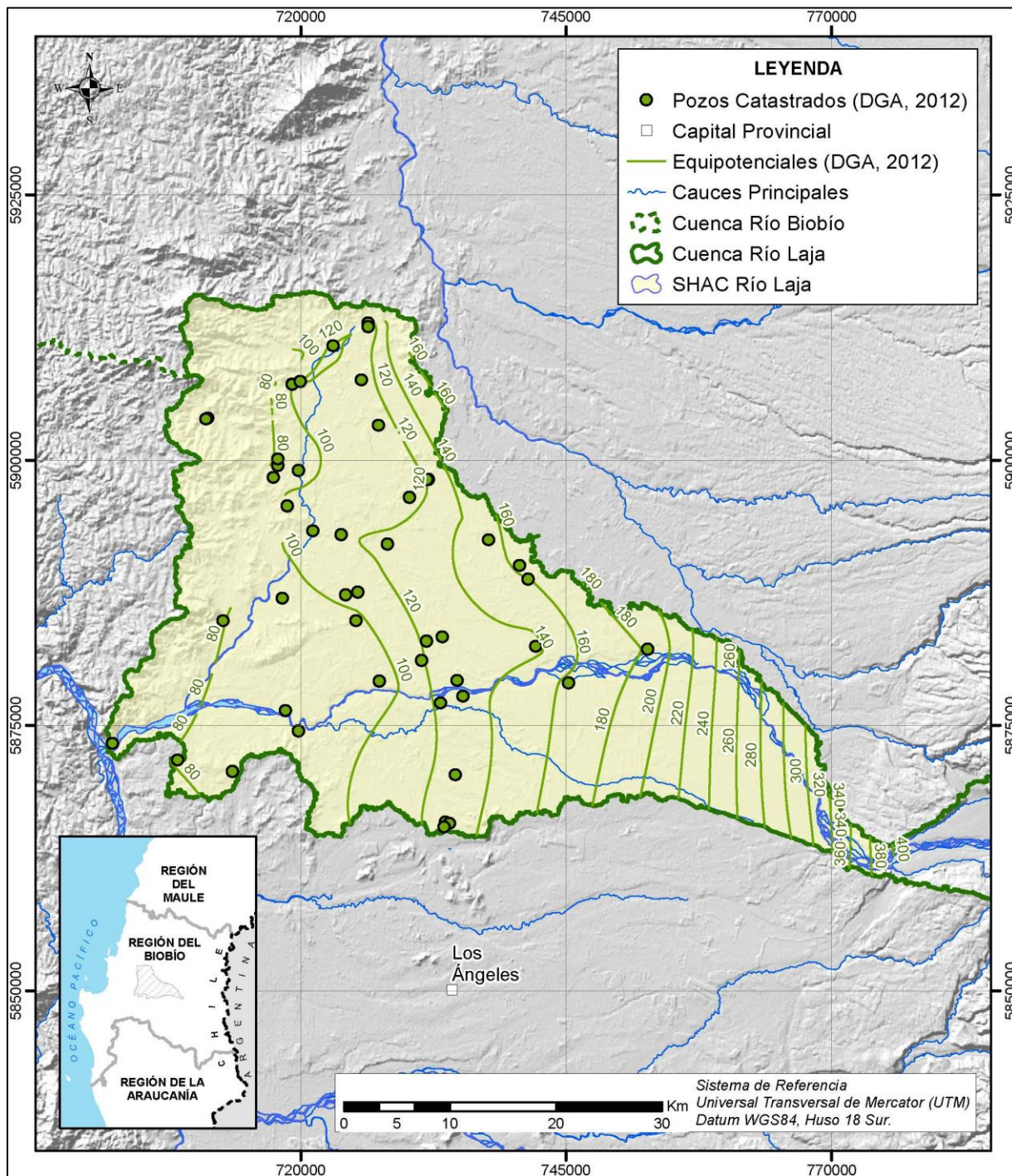
Cuadro 4.3-1 Profundidades Niveles Estáticos en SHAC río Laja, año 2012

Nombre Pozo	ID	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Cota NE (m.s.n.m.)	Profundidad (m)
8	1	737.725	5.892.456	157	154,15	2,85
22	3	719.220	5.907.120	101	99,9	1,1
23	4	719.210	5.907.107	101	99,6	1,4
26	6	719.801	5.898.985	99	93,9	5,1
28	7	731.884	5.882.941	125	122,7	2,3
29	8	733.361	5.883.289	129	126,9	2,1
31	9	732.025	5.898.149	123	119,8	3,2
31-A	10	731.929	5.898.148	129	126,1	2,9
32	11	741.451	5.888.772	164	158,5	5,52
46	12	733.658	5.865.878	141	133,92	7,08
46-A	13	734.033	5.865.723	139	131,42	7,58
49	14	728.189	5.892.080	126	124,7	1,3
54	16	725.230	5.884.816	95	93,5	1,5
55	17	734.756	5.879.183	140	133	7

Nombre Pozo	ID	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Cota (m.s.n.m.)	Cota NE (m.s.n.m.)	Profundidad (m)
56	18	712.710	5.884.829	81	79,5	1,5
65	22	727.406	5.879.141	104	88	16
71	23	740.635	5.890.011	168	165	3
109	28	734.585	5.870.322	133	125,5	7,5
121	29	702.273	5.873.293	56	50,4	5,6
129	30	752.707	5.882.170	201	181,78	19,22
143	31	730.266	5.896.447	114	111,2	2,8
144	32	723.811	5.892.952	123	118,5	4,5
145	33	718.276	5.886.956	90	88,84	1,16
147	34	713.607	5.870.662	96	92	4
148	35	708.439	5.871.696	89	84,6	4,4
150	37	719.806	5.874.456	90	87,7	2,3
168	40	718.767	5.895.656	110	106	4
168-A	41	717.437	5.898.311	11	6,9	4,1
169	42	721.145	5.893.305	122	115,3	6,7
173	43	733.165	5.877.068	127	124,7	2,3
173-A	44	735.296	5.877.717	143	135,55	7,45
P0	45	718.583	5.876.368	105	97,5	7,5
P-Pozo	49	719.988	5.907.382	131	121,78	9,22
30	65	731.421	5.881.091	123	118,9	4,1
102	73	733.527	5.865.400	140	136,7	3,26
177	90	745.248	5.878.995	183	164,35	18,65
I	95	725.404	5.887.535	115	110,96	4,04
J	96	724.268	5.887.287	111	107,5	3,5
6	140	717.840	5.899.468	90	84,69	5,31
6-B	144	717.847	5.900.055	90	83,02	6,98
P-1693	152	742.133	5.882.434	135	134,5	0,5
115-A	168	726.386	5.912.883	125	115,45	9,55
115-B	169	726.372	5.912.566	112	103,25	8,75
P-1717	175	723.061	5.910.737	136	125,6	10,4
P-1718	176	725.745	5.907.531	110	108,2	1,8
P-1719	177	727.339	5.903.245	111	108,8	2,2
P-1720-A	178	711.251	5.903.930	24	21,5	2,5
P-1720-B	179	711.254	5.903.931	24	21,5	2,5
P-1721	180	711.101	5.903.834	25	24,1	0,9

Nota: Coordenadas en Datum WGS84 18S.

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012).



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012).

Figura 4.3-2 Pozos catastrados y equipotenciales en SHAC del río Laja, año 2012

De acuerdo a lo observado, el patrón general de flujo subterráneo muestra una tendencia E-W, siguiendo la dirección de flujo de las aguas superficiales pertenecientes al río Laja. Además, de acuerdo a la densidad de pozos de catastrados al año 2012, se tiene que para la zona de estudio el rango de profundidades de niveles estáticos se maneja principalmente entre los primeros 5 m bajo el nivel de terreno (más del 60% de estos casos), tal como se muestra en el Cuadro 4.3-2.

Cuadro 4.3-2 Rangos de niveles estáticos en SHAC del río Laja, año 2012

Rango de profundidad del Nivel Estático	Nº pozos	Porcentaje de pozos sobre total
< 2 m	9	18,4%
≥ 2 m y < 5 m	21	42,9%
≥ 5 m y < 10 m	15	30,6%
≥ 10 m	4	8,2%
Total	49	100%

Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012).

4.3.4 Parámetros Hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de los acuíferos asociados al SHAC del río Laja, se empleó tanto la información técnica contenida en los expedientes de solicitudes de derechos de aguas subterráneas asociados a la zona de estudio como la disponible del “Estudio Hidrogeológico de la cuenca del Biobío” (DGA, 2012).

Específicamente, los antecedentes utilizados de los expedientes fueron: pruebas de bombeo, gasto variable y gasto constante incluidos en dichos documentos. En el Anexo 4.3.4-1 se muestra la totalidad de parámetros elásticos recopilados desde los expedientes del Catastro Público de Aguas (CPA en adelante) con dicha información, mientras que en el Anexo 4.3.4-2 se adjuntan la totalidad de expedientes disponibles en la web institucional dentro del área de estudio (94 casos), y que fueron objeto de revisión.

Del estudio DGA (2012) se recopilaron los datos resultantes de la determinación de permeabilidad y transmisividad de los pozos catastrados en la campaña de terreno.

De esta forma, se construyó el Cuadro 4.3-3, donde se muestran los rangos de parámetros obtenidos para todo el sector a partir de ambos antecedentes.

Cuadro 4.3-3 Rango de Parámetros Hidráulicos para SHAC del río Laja

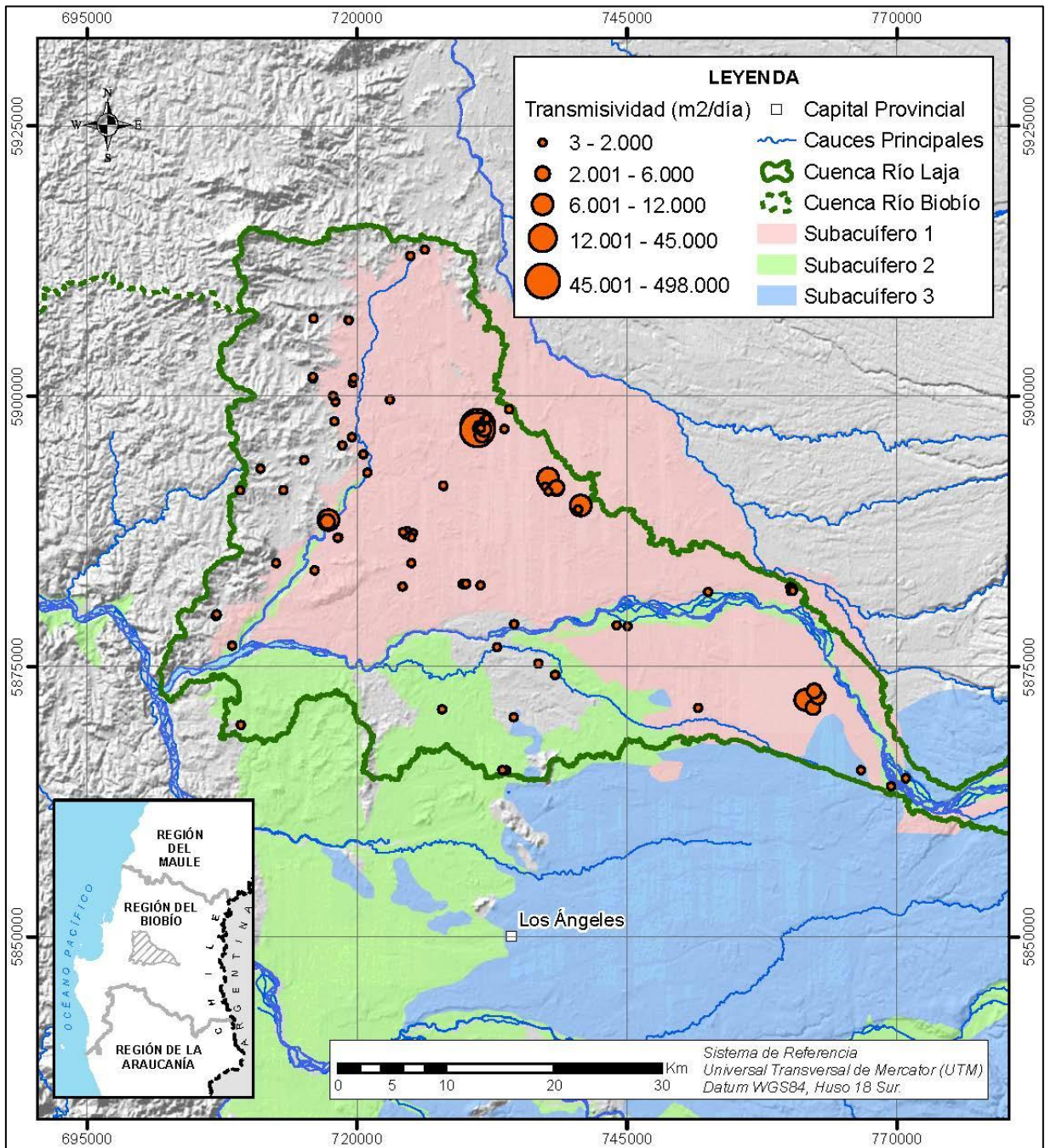
Parámetro Hidráulico	N° pozos con información	Mín.	Máx.	Unidad
Permeabilidad	39	0,173	829,44	(m/día)
Transmisividad	95	2,9	11.525	(m ² /día)
Almacenamiento	77	0,002	2,87	-

Fuente: Elaboración propia en base a expedientes del CPA y a DGA (2012).

En cuanto a la permeabilidad, los datos resultantes de la revisión de expedientes arrojaron un total de 39 valores para la zona del SHAC. Para este parámetro el rango de permeabilidad descrita se maneja en tramos similares a los calculados por DGA (2012), donde estimaron valores ubicados entre 4 y 2.000 m/día. Es importante destacar que dentro de la totalidad de valores permeables se obtuvo un valor máximo de 2.098,29 m/día, que no fue considerado para este análisis, debido a que el solicitante (Sociedad Biowood S.A.) ejecutó el cálculo de este parámetro sobre un sistema de 6 punteras, que en total mantiene un caudal de extracción de 22 l/s, por lo que este dato no representa la permeabilidad real de la unidad acuífera. En la Figura 4.3-3 se detalla la distribución de este parámetro, observándose que la mayor densidad de puntos se ubica dentro del denominado sub acuífero 1, correspondiente a sedimentos no consolidados de origen volcánico.

Para el caso de la transmisividad, se presentó la misma singularidad, siendo que los derechos otorgados a Masisa S.A. en el sector de Cabrero, manejaron valores entre 46.900 y 498.000 m²/día. Asimismo, estos datos, al igual que la permeabilidad, fueron tomados solo de referencia, ya que no necesariamente arrojan un resultado acorde a la realidad. En la Figura 4.3-4 se muestra la distribución espacial de estas transmisividades en relación a pozos vecinos.

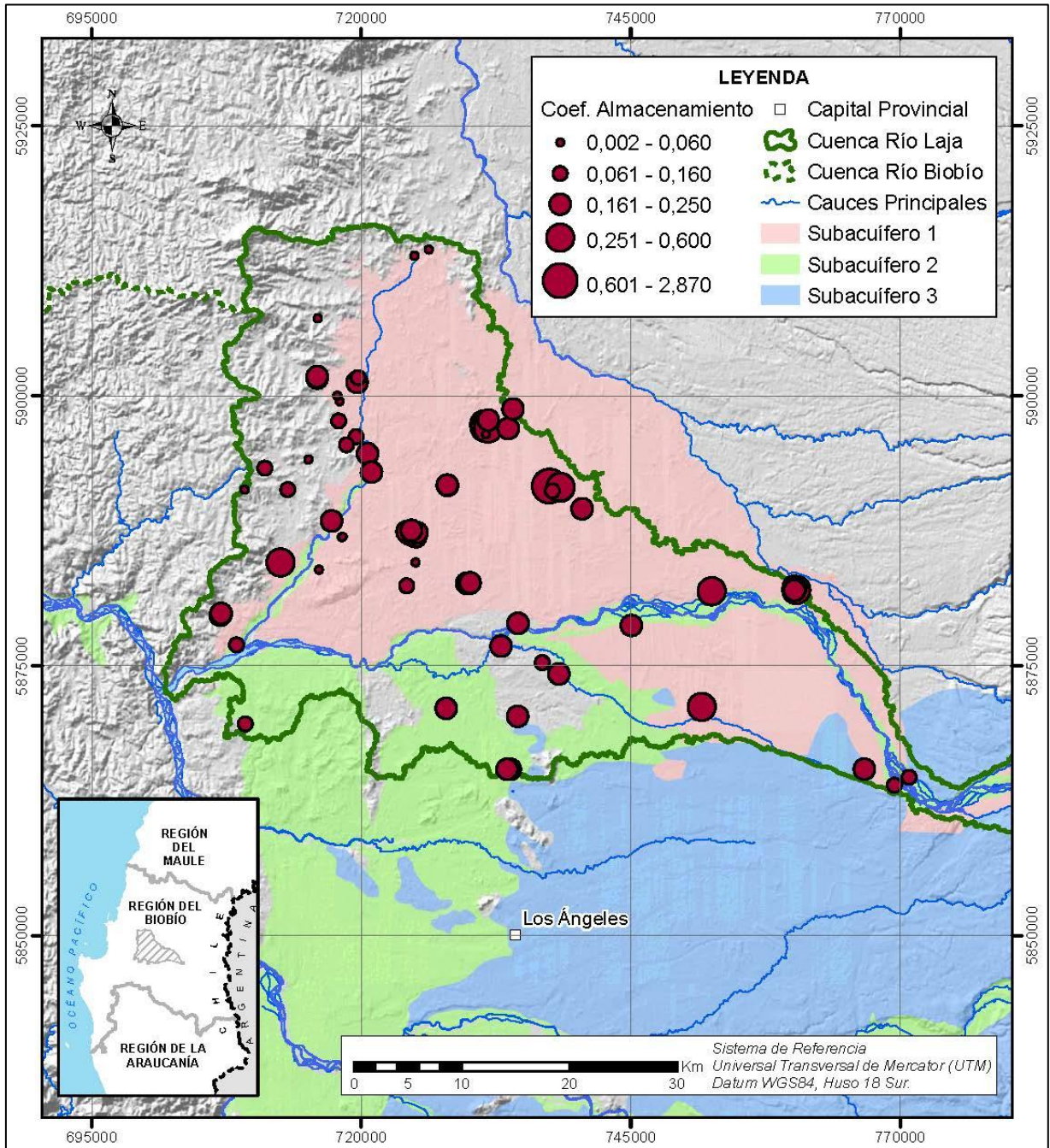
En términos de almacenamiento, se manejan valores calculados acordes a las permeabilidades obtenidas, siendo que el mayor registro se ubica dentro del mismo sub acuífero 1, dentro de la depresión central. En la Figura 4.3-5 se muestra la distribución de los registros obtenidos.



Nota: Delimitación de sub acuíferos 1, 2 y 3 en base a DGA (2012).

Fuente: Elaboración propia en base a expedientes del CPA y a DGA (2012)

Figura 4.3-4 Parámetros hidráulicos del SHAC del río Laja: Transmisividad



Nota: Delimitación de sub acuíferos 1, 2 y 3 en base a DGA (2012).

Fuente: Elaboración propia en base a expedientes del CPA.

Figura 4.3-5 Parámetros hidráulicos del SHAC del río Laja: Coeficiente de Almacenamiento

4.3.5 Extracciones Existentes

Dentro de la superficie del SHAC del río Laja existen derechos de aprovechamiento de aguas, tanto inscritos en el Catastro Público de Aguas como en trámite de registro. En base al CPA⁶ y a información proporcionada por la DGA⁷, los derechos de naturaleza subterránea ascienden a un total de 417 derechos otorgados y 84 derechos en estado de trámite. Éstos son de ejercicio mayoritariamente permanente y continuo, y en menor medida, permanente y discontinuo. No se encuentran derechos inscritos de ejercicio provisional. El listado completo de los mismos se encuentra en el Anexo 4.3.5.

A continuación, se presenta un mayor detalle de los derechos mencionados.

- **Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos inscritos en CPA**

De los 417 derechos otorgados, prácticamente la totalidad corresponden a derechos de ejercicio permanente y continuo (414 derechos), mientras que los 3 derechos restantes se identifican de ejercicio permanente y discontinuo.

El Cuadro 4.3-4 muestra un resumen de la cantidad de derechos, por comuna, existentes en la zona del SHAC del Laja, además de caudales asociados a estos derechos.

Cuadro 4.3-4 Cantidad de DAA subterráneos del SHAC del río Laja otorgados, por comuna

Comuna	Derechos			Caudales (l/s)		
	P/C	P/DC	N° Total	P/C	P/DC	Total
Cabrero	136	-	136	1.277	-	1.277
Laja	42	1	43	169	-	169
Los Ángeles	58	-	58	311	-	311
Pemuco	1	-	1	0	-	0
Quilleco	6	-	6	462	-	462
Quillón	45	-	45	22	-	22
San Rosendo	10	-	10	33	-	33
Tucapel	1	-	1	2	-	2
Yumbel	99	2	101	191	8	199
Yungay	16	-	16	108	-	108
Total	414	3	417	2.575	8	2.584

Nota: P/C Permanente y Continuo; P/DC: Permanente y Discontinuo.

Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información DGA.

⁶ Fecha de actualización 08/06/2018.

⁷ Fecha de actualización 10/07/2018.

En resumen, la zona en estudio posee 417 derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas inscritos por un total de 2.584 l/s. De estos, 414 derechos son de ejercicio permanente y continuo que corresponde a un caudal de 2.575 l/s.

Se aprecia que las comunas con una mayor cantidad de derechos corresponden a Cabrero y Yumbel. En el caso de la primera, se tiene un total de 136 derechos otorgados, siendo que ésta también corresponde a la comuna con el mayor caudal de explotación, con 1.277 l/s. La comuna que presenta mayor extracción de aguas subterráneas, luego de Cabrero, corresponde a Quilleco con 462 l/s.

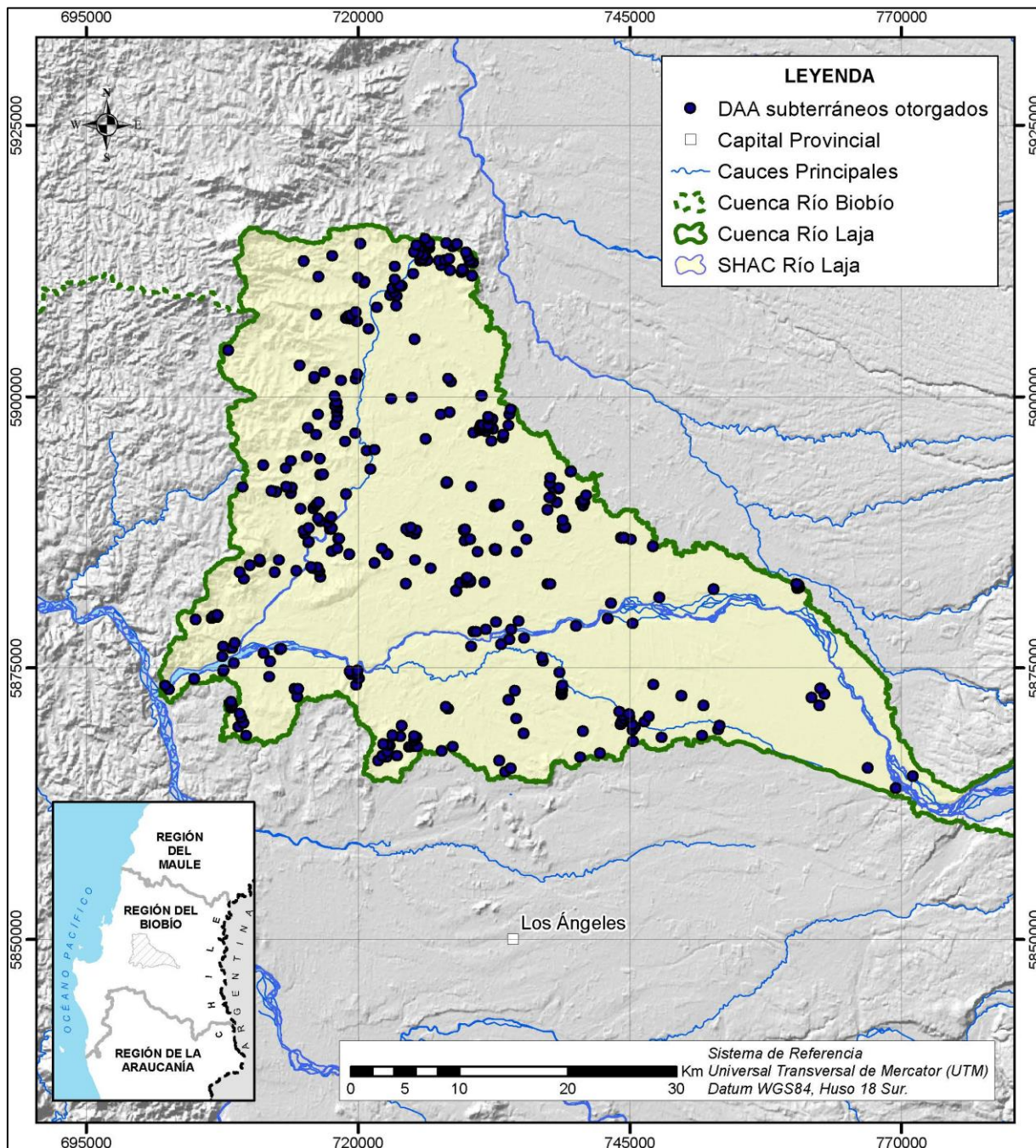
En cuanto a las aplicaciones para cada derecho, destaca mencionar que, en base a la información proporcionada por la DGA, una parte importante no cuenta con especificación de uso. De la totalidad de derechos otorgados, 77 de ellos están destinados para riego, encontrándose principalmente en las comunas de Laja, Cabrero y Los Ángeles. Otros 32 derechos poseen fines de uso doméstico, ubicándose en las comunas de Yumbel y Cabrero; 6 de tipo industrial únicamente dentro de Cabrero y por último 4 para otros usos sin definir. En el Cuadro 4.3-5 se detalla la información referente recopilada.

Cuadro 4.3-5 Aplicaciones de derechos inscritos

Uso	Cantidad
Bebida/Usos Domésticos/Saneamiento	32
Riego	77
Uso Industrial	6
Otros usos	4
Sin Información	298
Total general	417

Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información DGA.

En la Figura 4.3-6 se detalla la distribución espacial de los derechos subterráneos otorgados en el SHAC del río Laja.



Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información de DGA.

Figura 4.3-6 Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas otorgados en el SHAC del río Laja

- **Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos en trámite**

Respecto a los derechos de aprovechamiento subterráneos en trámite, en el Cuadro 4.3-6 se presentan la cantidad por comuna y el caudal asociado a la solicitud.

Cuadro 4.3-6 Cantidad y caudal de DAA subterráneos del SHAC del río Laja en trámite, por comuna

Comuna	Derechos			Caudales (l/s)		
	P/C	P/DC	N° Total	P/C	P/DC	Total
Cabrero	15	-	15	147,5	-	147,5
Laja	4	-	4	12,2	-	12,2
Los Ángeles	35	-	35	955	-	955
Quilleco	2	-	2	8,5	-	8,5
San Rosendo	2	-	2	1,6	-	1,6
Yumbel	25	1	26	187,6	0,4	188
Total	83	1	84	1.312	0,4	1.313

Nota: P/C Permanente y Continuo; P/DC: Permanente y Discontinuo.

Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información DGA.

En total se identifican 84 derechos en trámite, totalizando un caudal de 1.313 l/s. Para estos derechos la mayoría presentan un ejercicio de derecho permanente y continuo, mientras que solo 1, ubicado en la comuna de Yumbel, corresponde a ejercicio permanente y discontinuo. Se observa que, a diferencia del caso de los derechos inscritos, la mayor cantidad de solicitudes en trámite se encuentra en las comunas de Los Ángeles y Yumbel; el mayor caudal solicitado, 955 l/s, corresponde a la comuna de Los Ángeles.

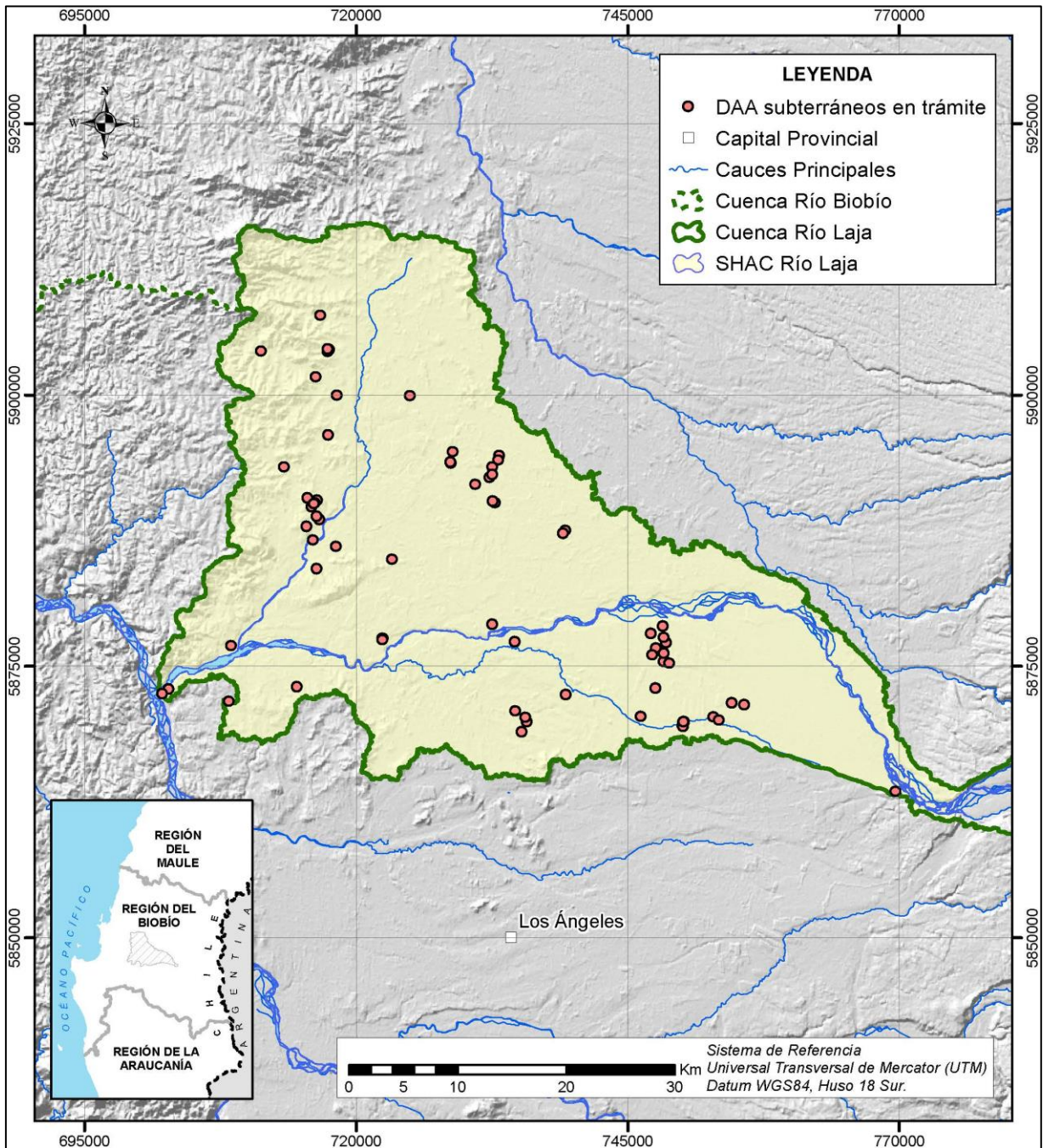
En cuanto a las aplicaciones para cada derecho en estado de trámite, se tiene que 61 de ellos estarían destinados a regadío una vez se encuentren aprobados. En segundo lugar, 12 solicitudes se hallan asociadas a actividades relacionadas con la piscicultura y por último 11 a consumo doméstico. En el Cuadro 4.3-7 se detalla la información referente recopilada.

Cuadro 4.3-7 Aplicaciones de derechos en trámite

Uso	Cantidad
Bebida/Usos Doméstico/Saneamiento	11
Riego	61
Piscicultura	12
Total general	84

Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información DGA.

La Figura 4.3-7 muestra la distribución espacial de los derechos en trámite, observándose una concentración mayor de ellos en la zona sur y oeste del acuífero.



Fuente: Elaboración propia en base a CPA e información de DGA.

Figura 4.3-7 Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en trámite en el SHAC del río Laja

4.4 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El análisis realizado a través de antecedentes geológicos e hidrogeológicos permitió determinar preliminarmente la extensión e influencia de los acuíferos existentes en la zona de estudio. El SHAC del río Laja se encuentra casi en su totalidad dentro de la depresión central, lo cual es coherente con las características litológicas observadas en el sector. Fueron definidos tres sub acuíferos para la zona del SHAC, de los cuales el primero representa el de mayor extensión y potencial hidrogeológico, en base a los valores de parámetros hidráulicos calculados. De manera secundaria, los sub acuíferos 2 y 3 aparecen en los extremos opuestos de la cuenca del río Biobío, siendo característicos en la zona de entrada y salida del SHAC. De forma inicial, se concluye, según antecedentes revisados, que los niveles freáticos se manejan dentro de los primeros 20 m bajo el nivel de terreno, principalmente entre los 5 y 10 m.

CAPÍTULO 5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

5.1 INTRODUCCIÓN

La caracterización hidrogeoquímica buscó determinar la calidad del agua subterránea contenida en el acuífero del SHAC del río Laja, y su relación con el agua superficial, a través del análisis de antecedentes.

La información recabada y su análisis se muestra en los acápite siguientes. En concreto, en el acápite 5.2 se presentan las estaciones de calidad físico-química consideradas en este estudio, mientras que en el acápite 5.3 se presenta el enfoque metodológico seguido, incluyendo la enumeración de los parámetros de calidad de aguas objeto de análisis.

5.2 INFORMACIÓN HIDROQUÍMICA EXISTENTE

En primer lugar, y considerando la interacción entre el sistema superficial y subterráneo que ocurre en el SHAC, se recopila información de la calidad del agua superficial del río Laja y sus afluentes en base a las estaciones de control DGA. Por otra parte, respecto de las aguas subterráneas, no existen estaciones de calidad físico-química de la Red Hidrométrica de la DGA en la zona de estudio; por este motivo, su caracterización se apoya en los registros de estaciones cercanas al SHAC, con la finalidad de analizar potenciales relaciones por proximidad.

Se revisó adicionalmente la información de calidad de aguas contenida en el protocolo PR018 de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Sin embargo, se descartaron los datos para la construcción de diagramas, ya que esta fuente no posee información de todos los iones principales (no hay mediciones de HCO_3^- , Ca^{++} , Na^+ y K^+), lo cual imposibilita realizar un balance iónico. Lo anterior es debido al objetivo del propio protocolo de la SISS, que se centra en otro tipo de parámetros.

También se consultó el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), no hallando series temporales o espaciales de monitoreos de calidad de agua superficial o subterránea que pudieran ser potenciales para complementar el análisis.

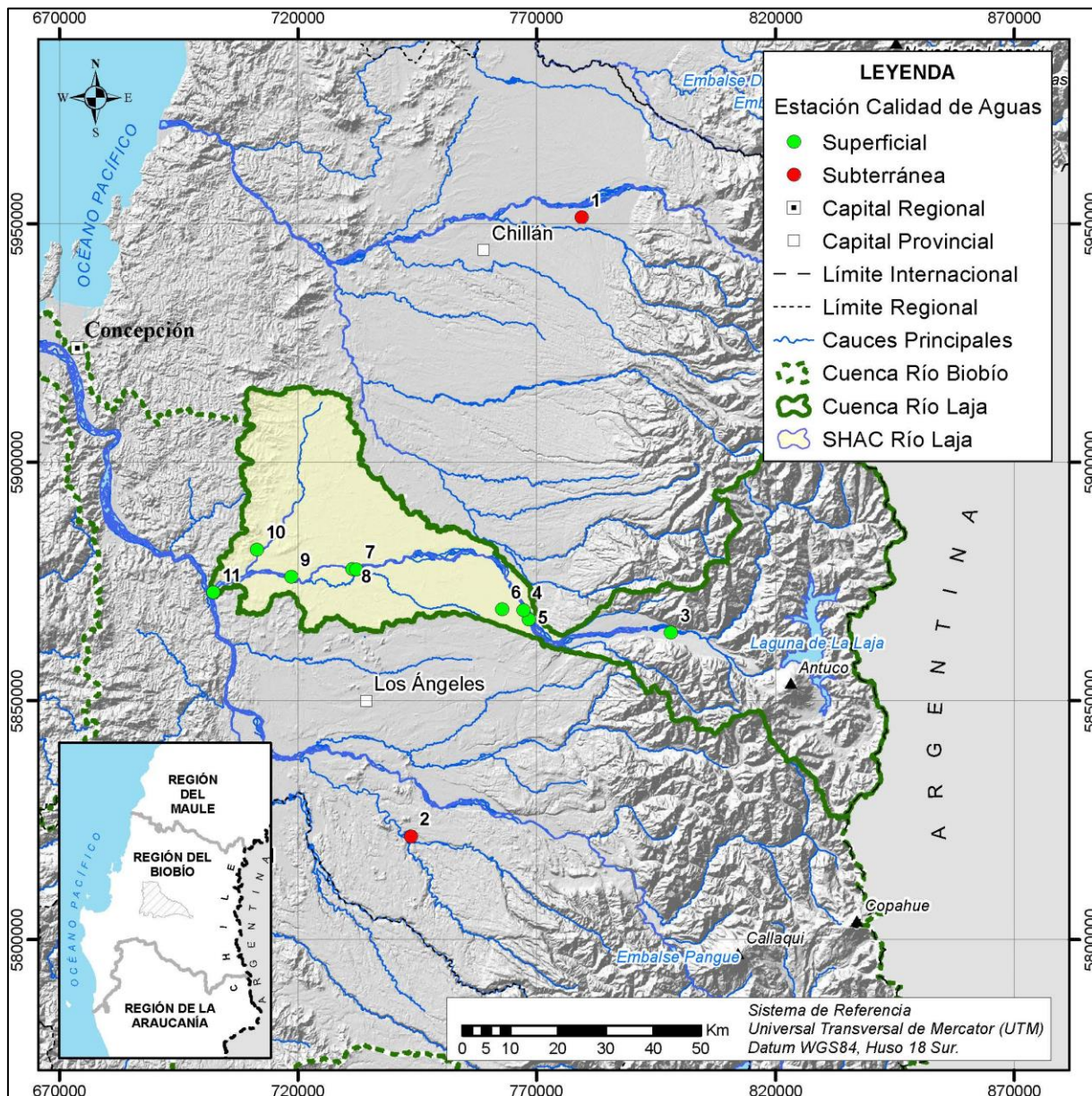
Las estaciones superficiales y de los pozos con información de parámetros físico-químicos considerados se presentan en el Cuadro 5.2-1 y su distribución espacial en la Figura 5.2-1.

Cuadro 5.2-1 Estaciones DGA de calidad de aguas superficiales y subterráneas analizadas

Identificación					Coordenadas UTM	
N°	Cód. BNA	Nombre	Tipo	Estado	Este (m)	Norte (m)
1	08113002-7	Pozo Chillán en Fundo Cato	Subterránea	Vigente	779.452	5.951.283
2	08330003-5	Pozo Mulchén o Sondaje N° 773 ESSBIO S.A.	Subterránea	Vigente	743.653	5.821.658
3	08375003-0	Río Laja bajo Descarga Central Antuco (CA)	Superficial	Vigente	798.120	5.864.321
4	08380001-1	Río Laja en Tucapel	Superficial	Vigente	767.188	5.869.039
5	08380002-0	Canal Laja Camino a Tucapel	Superficial	Suspendida	768.317	5.867.152
6	08380004-6	Canal Laja en La Lancha (CA)	Superficial	Vigente	762.779	5.869.209
7	08381010-6	Río Laja en Pte. Longitudinal (Rec.Laja)	Superficial	Suspendida	732.225	5.877.610
8	08381013-0	Río Laja Ag. Arr. Conf. Río Caliboro	Superficial	Vigente	731.417	5.877.651
9	08383001-8	Río Laja en Puente Perales	Superficial	Vigente	718.591	5.876.033
10	08385004-3	Río Claro en Puente Ferroviario (CA)	Superficial	Vigente	711.334	5.881.770
11	08386001-4	Río Laja en San Rosendo	Superficial	Suspendida	702.234	5.872.743

Nota: Coordenadas expresadas en Datum WGS84 18S.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2-1 Ubicación de estaciones DGA de Calidad Superficial y Subterránea analizadas

5.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

5.3.1 Enfoque metodológico

A continuación se exponen los pasos realizados para llevar a cabo el análisis de calidad de aguas tanto superficiales como subterráneas para la caracterización hidrogeoquímica del área relativo al SHAC del río Laja.

i. Sistematización de la información

Se sistematizó la información recopilada con el objetivo de corregirla, actualizarla, validarla, homologarla y homogenizarla. Como primera actividad, ésta se ordenó y clasificó según su origen, por ejemplo:

- Programa de muestreo sistemático:
 - registro con al menos 10 valores del parámetro analizado.
 - registro donde se tiene menos de 10 y más de 5 valores del parámetro analizado.
- Datos provenientes de campañas puntuales.
- Estimaciones teóricas.
- Otras a definir, luego de recopilada la información.

El procedimiento de verificación de datos, para validar su confiabilidad, consideró las siguientes labores:

- Detección de valores dispersos (*outliers*) para su eliminación.
- Cumplimiento de límites físicos identificando rangos. De acuerdo con la información bibliográfica especializada se tienen rangos de valores para la concentración de los parámetros que se han detectado en todo el mundo.
- Límites de detección, valores mínimos y máximos. Los datos de cada parámetro se contrastaron con los límites de detección estándar informados por los laboratorios.
- Identificación de relaciones físicas entre los parámetros.
- Cumplimiento del error aceptable para el balance iónico. Un aspecto importante para verificar la consistencia de los muestreos realizados es la determinación del error asociado al balance iónico de cada uno de ellos, de manera de comprobar si las muestras se encuentran equilibradas químicamente. Este procedimiento es una práctica estándar para evaluar la confiabilidad de los análisis de agua. La condición de electroneutralidad del agua indica que la suma de los cationes de la solución debe ser igual a la suma de los aniones. Los parámetros a utilizar en el balance iónico fueron los siguientes:
 - Aniones: CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^-
 - Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

Según la siguiente relación analítica:

$$\%error = \left(\frac{(\sum cationes (meq) - \sum aniones (meq))}{(\sum cationes (meq) + \sum aniones (meq))/2} \right) \times 100$$

se consideran como válidos sólo a aquellos análisis cuyo error en el balance iónico fue inferior al 10%.

Se realizó un análisis preliminar de los datos. Para verificar los valores de la base de datos, se tuvieron presente las siguientes consideraciones:

- Los límites de detección dependen del método de medición empleado; para cada parámetro están identificados los valores límites inferiores en la base de datos de la DGA, por lo que cuando el valor del parámetro medido es menor al límite de detección se supone que el valor de dicho parámetro es el límite de detección.
- Se filtraron mediciones mediante el cumplimiento del error aceptable en el balance iónico, para el cual se consideraron los siguientes iones (si es que existía información):
 - Aniones: CO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^-
 - Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+
- Se filtran aquellas estaciones que poseen menos de 10 valores analizados, para que cumpla con la característica de ser un programa de muestreo sistemático. Estas estaciones no se descartan, si no que se identifica de forma de establecer su importancia en el análisis de resultados.
- Las mediciones de la DGA no poseen datos de sólidos disueltos totales, por lo cual se utiliza la conductividad eléctrica medida para calcular SDT a partir de la siguiente ecuación:

$$SDT(ppm) = 0,64 \cdot CE(\mu S/cm)$$

ii. Caracterización hidroquímica

Para la caracterización de la calidad de los cuerpos de agua, superficiales y subterráneos, se utiliza la información previamente validada y verificada. Esta información corresponde a lo siguiente:

- Elementos mayores, tales como:
 - Aniones: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^- , NO_3^-
 - Cationes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+
- Elementos menores, y que pueden ser indicadores de contaminación de las aguas (efectos adversos para la población o el medio ambiente):
 - Metales (actividad minera e industria): As, Pb, Cr, Hg (tóxicos) y Zn, Cu, Mo (positivos en bajas concentraciones).

- Otros orgánicos e inorgánicos (actividad agropecuaria, rellenos sanitarios, industrias): NH_4^+ , Cl^- , PO_4^{3-} , DQO, DBO, CO_3^{2-} , Alcalinidad total (CaCO_3).
- Elementos físico químicos generales: pH, conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TSD).

De los parámetros anteriormente mencionados, se cuenta con información de la totalidad de ellos en el BNA, salvo el caso de la Alcalinidad Total (CaCO_3), que no ha sido medida frecuentemente y por lo que se ha desestimado su utilización.

La información de los elementos mayores se representa en forma gráfica a través de los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller y Box-Whisker. Los elementos menores se analizan y se presentan sólo los resultados destacables respecto las normas chilenas de calidad; el análisis completo se adjunta en el Anexo 5.3. En cualquier caso, la aplicación de los tipos anteriores se hizo dependiendo de la cantidad y calidad de la información procesada.

5.3.2 Análisis de aguas superficiales

Se analizó la serie de datos de calidad de aguas superficiales registrada por la DGA según la metodología expuesta anteriormente. En el Cuadro 5.3-1 se resume el número de registros obtenidos después de la sistematización de la información descrita en el acápite 5.3.1; como puede observarse, los valores de calidad válidos para la creación de los diagramas se extienden de forma variable según cada estación entre los años 1966 y 2016.

Cuadro 5.3-1 Registros en estaciones de calidad de aguas superficiales con balance iónico válido

N°	Cód. BNA	Nombre	Tipo	N° Registros (*)	Periodo Registros (*)
1	08375003-0	Río Laja Bajo Descarga Central Antuco (CA)	Superficial	45	1984-2006
2	08380001-1	Río Laja en Tucapel	Superficial	2	1966
3	08380002-0	Canal Laja Camino a Tucapel	Superficial	2	1966-1973
4	08380004-6	Canal Laja en La Lancha (CA)	Superficial	2	1966
5	08381010-6	Río Laja en Pte. Longitudinal (Rec.Laja)	Superficial	2	1973-1978
6	08381013-0	Río Laja Ag. Arr. Conf. Río Caliboro	Superficial	0	-
7	08383001-8	Río Laja en Puente Perales	Superficial	47	1966-2006
8	08385004-3	Río Claro en Puente Ferroviario (CA)	Superficial	10	1998-2006
9	08386001-4	Río Laja en San Rosendo	Superficial	1	1973

(*) Con balance iónico con error inferior a 10%.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis se centra inicialmente en la caracterización de las aguas superficiales de la cuenca del río Laja, específicamente en los sectores del Laja alto y Laja bajo, tanto antes de su confluencia con el río Claro como aguas abajo de éste, hasta su confluencia con el río Biobío; también se considera la información disponible en el río Claro.

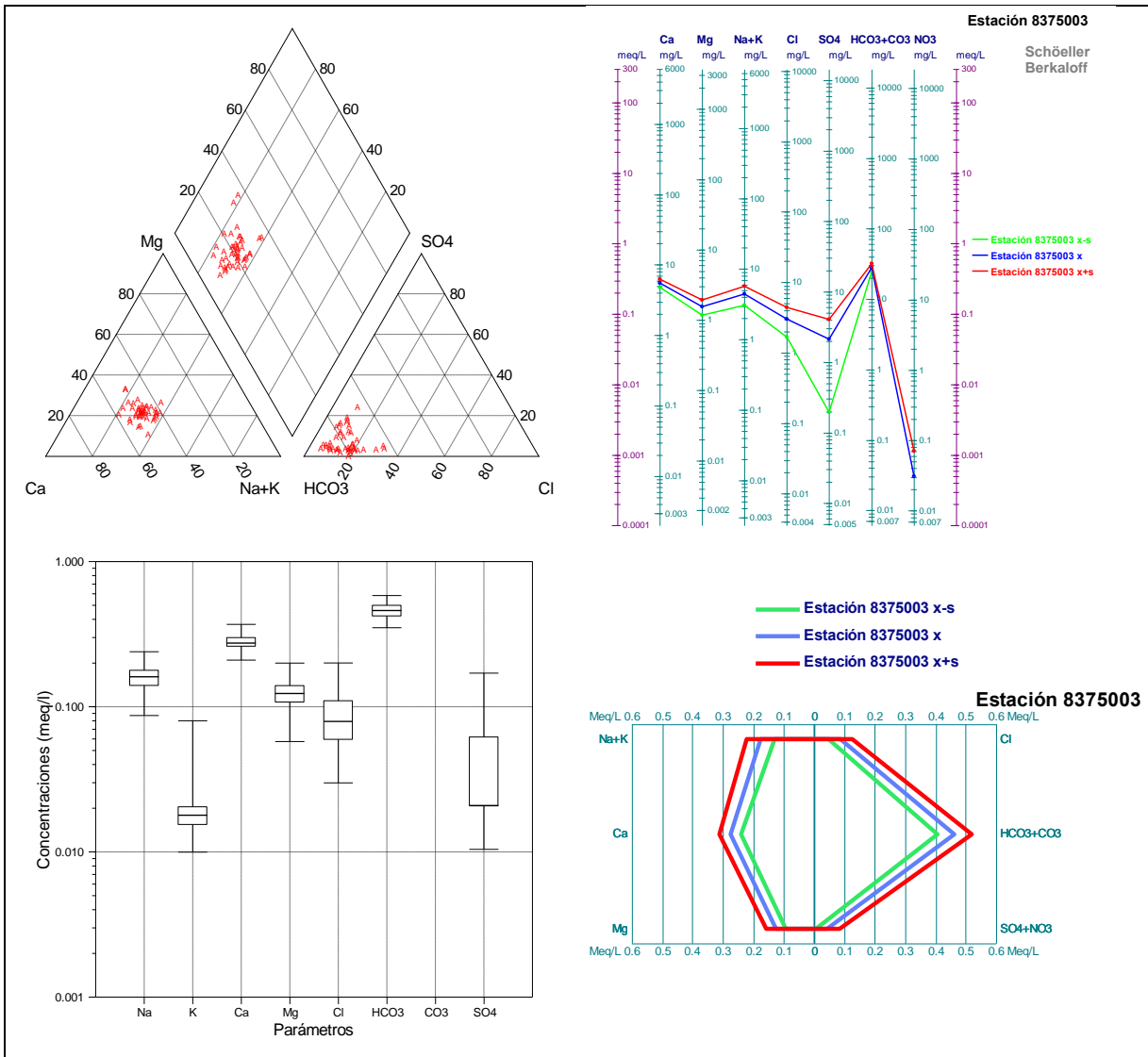
Dada la reducida cantidad de registros de algunas de las estaciones, se seleccionó una por cada sector anteriormente mencionado para su análisis detallado, tal como se resume en el Cuadro 5.3-2.

Cuadro 5.3-2 Estaciones DGA de calidad de aguas superficiales representativas

Cód. BNA	Nombre	Sector
08375003-0	Río Laja Bajo Descarga Central Antuco (CA)	Río Laja alto
08383001-8	Río Laja en Puente Perales	R. Laja bajo aguas arriba de R. Claro
08385004-3	Río Claro en Puente Ferroviario (CA)	Río Claro
08386001-4	Río Laja en San Rosendo	R. Laja bajo aguas abajo de R. Claro

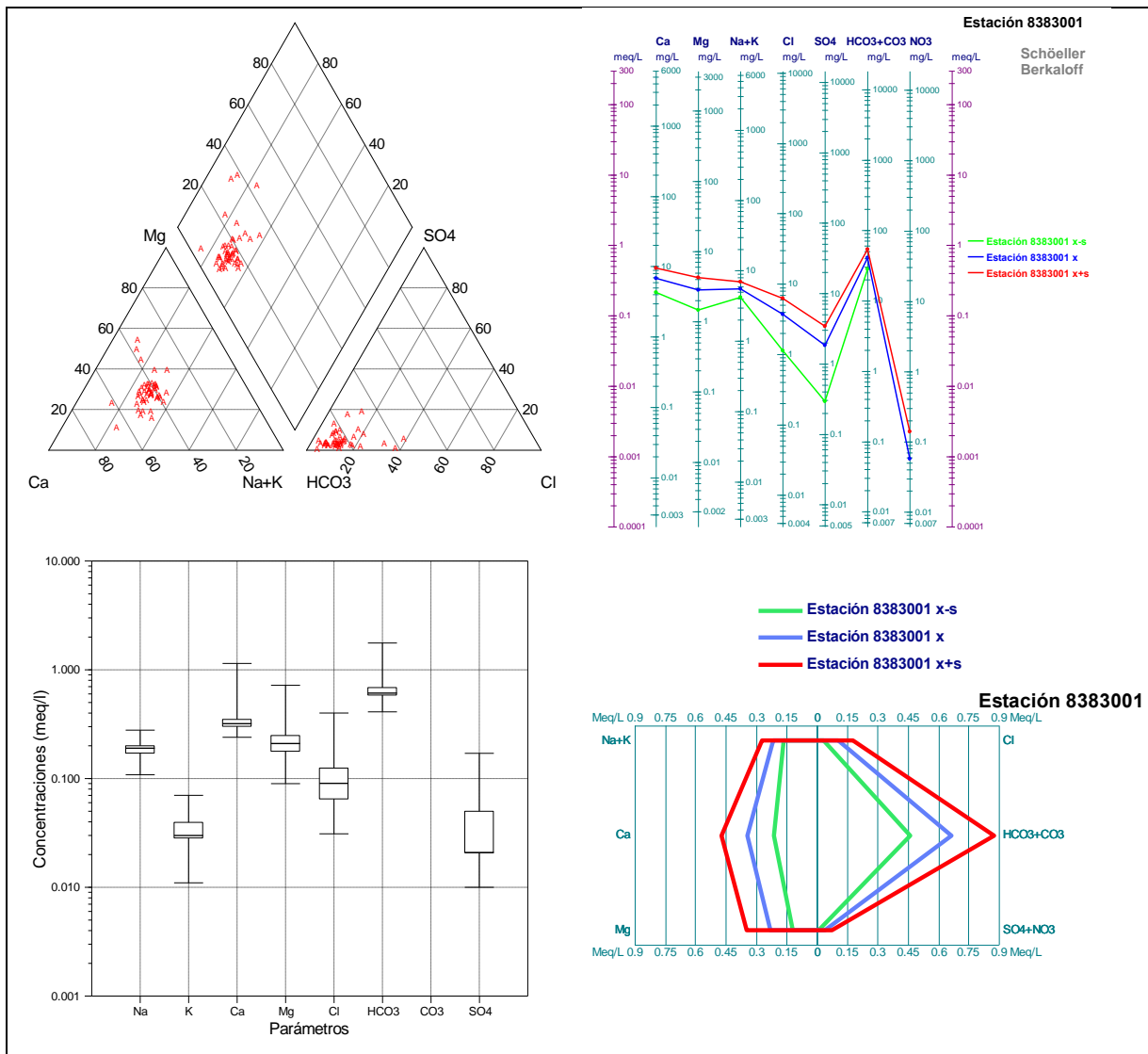
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 5.3-1, 5.3-2, 5.3-3 y 5.3-4 se presentan los diagramas (de izquierda a derecha, de arriba abajo) de Piper, Schoeller, Box-Whisker y Stiff, para cada una de estas estaciones.



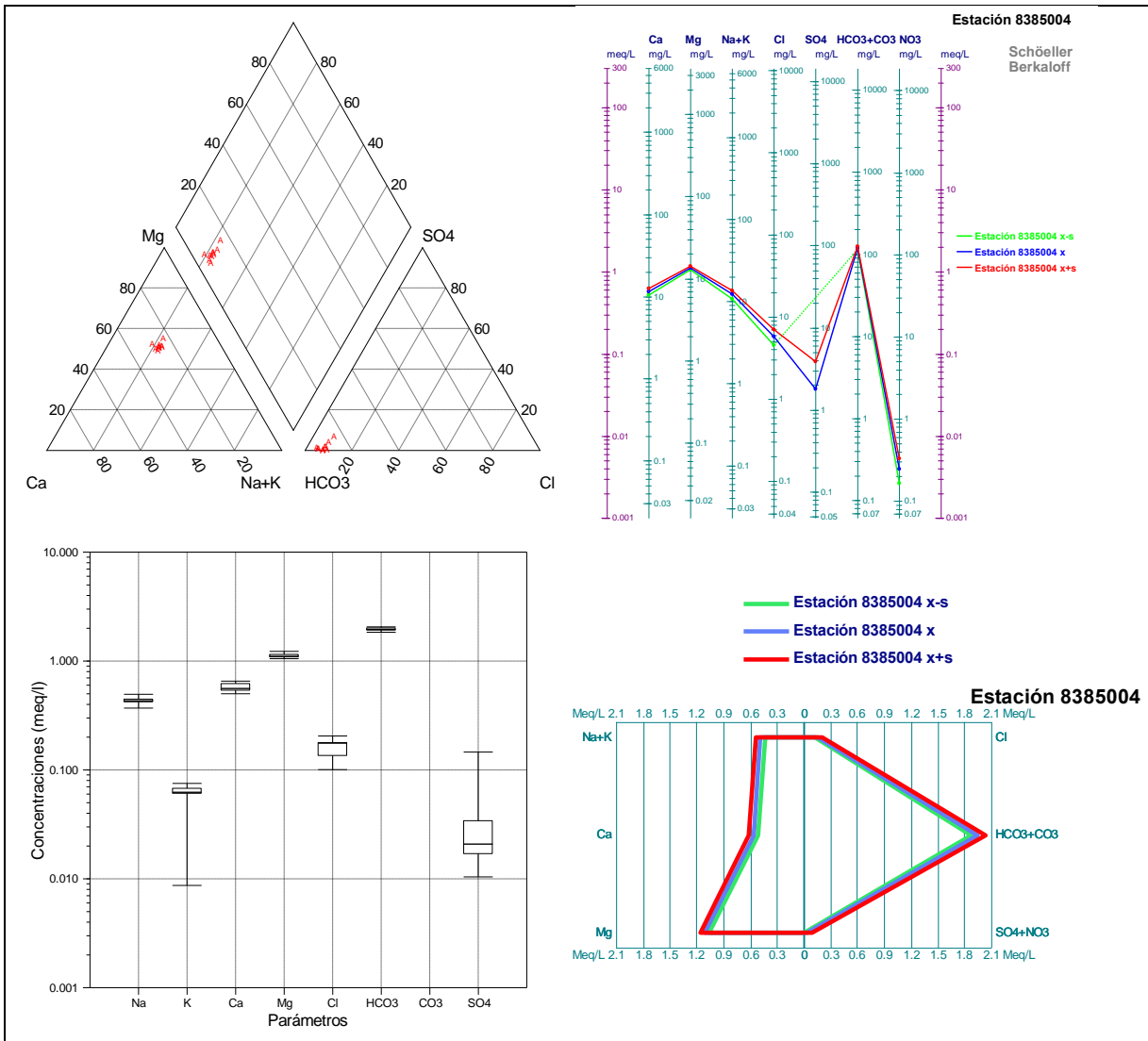
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-1 Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08375003-0 (río Laja alto)



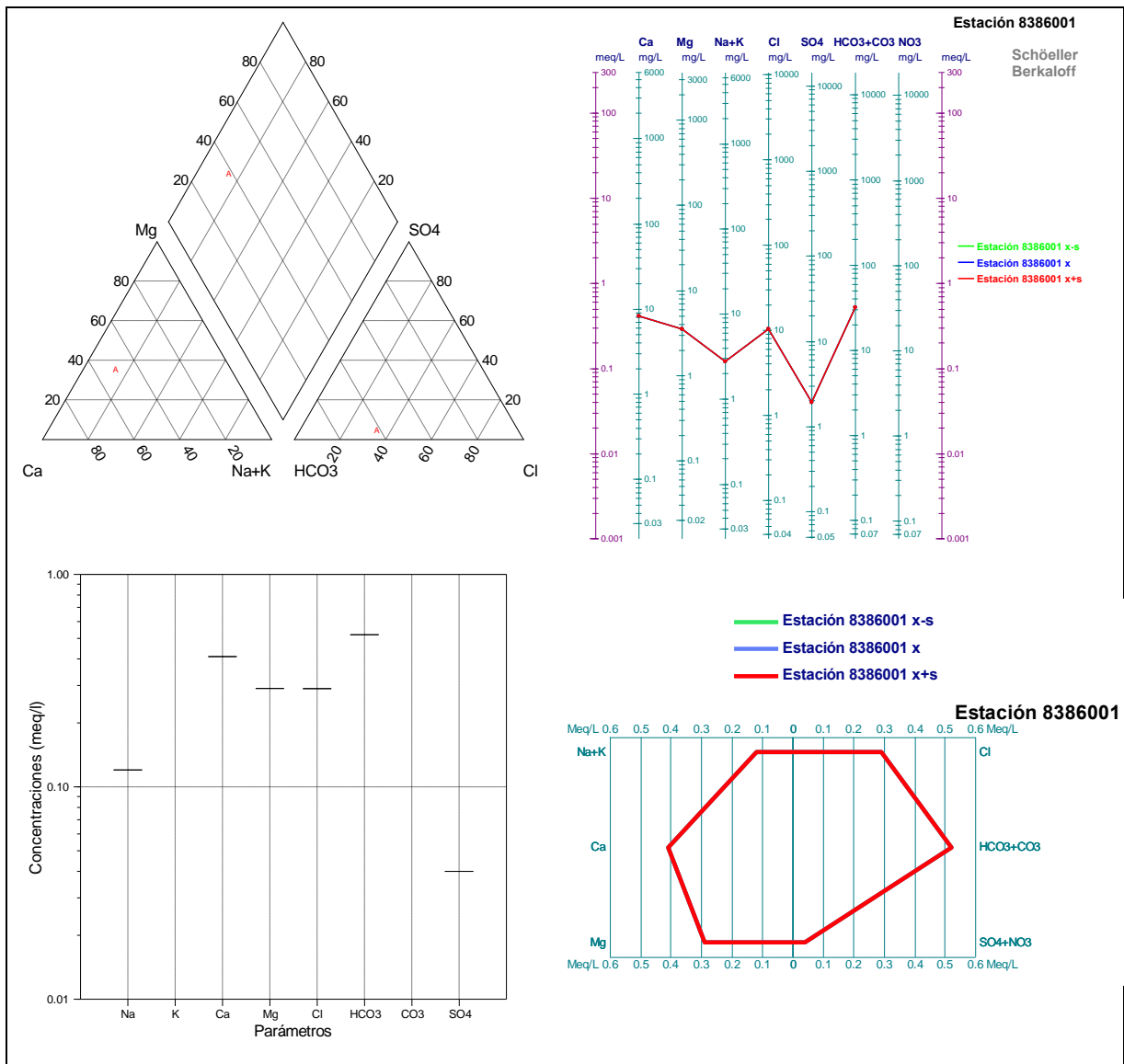
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-2 Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08383001-8 (río Laja bajo aguas arriba de río Claro)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-3 Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08385004-3 (río Claro)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-4 Diagramas Calidad Agua Superficial de Estación 08386001-4 (río Laja bajo aguas abajo de río Claro)

Los resultados analíticos de la estación río Laja bajo Central Antuco, la cual se encuentra en la parte alta de la cuenca, aguas arriba del SHAC, presentan una composición de agua bicarbonatada cálcica, sin mayor presencia de sulfatos y composición sódico-potásica.

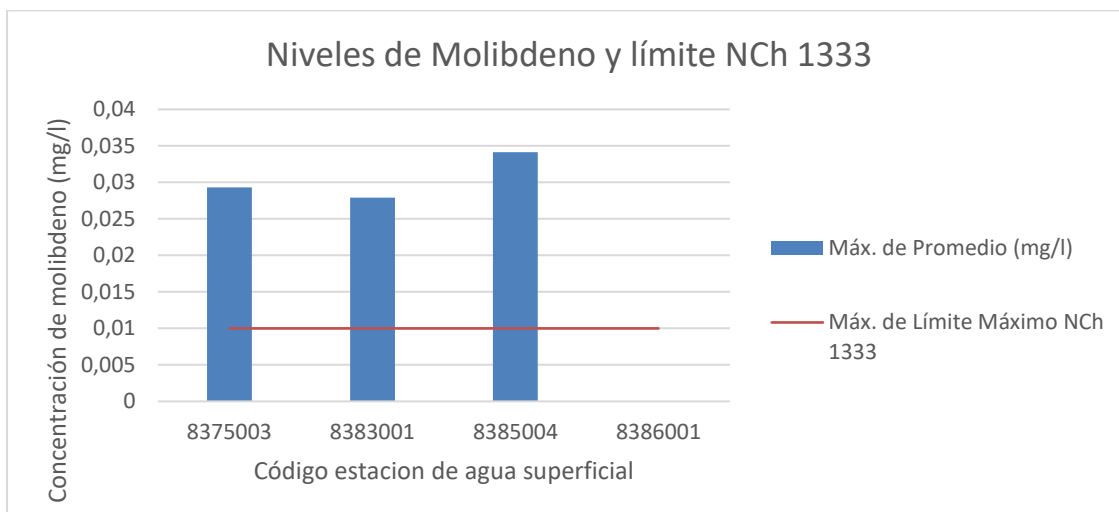
Aguas abajo, en la estación río Laja en Puente Perales, se observa que en términos generales el río tiene una composición similar a la de la estación río Laja bajo Central Antuco, presentando una componente bicarbonatada cálcica importante; sin embargo, aumenta de forma leve la concentración de magnesio.

Luego de esta estación, el río Laja se ve afectado por el afluente aportado por el río Claro, representado por la estación río Claro en Puente Ferroviario. Se observa que el río Claro presenta también una composición donde predominan los bicarbonatos, pero a diferencia de las estaciones mencionadas anteriormente del río Laja, se observa una mayor concentración de magnesio que de calcio y sodio/potasio.

Finalmente, del análisis de la estación río Laja en San Rosendo, si bien se extrae que la concentración de bicarbonato disminuyó levemente al igual que la de sodio/potasio, y se mantuvo el porcentaje de calcio parecido a lo obtenido en las estaciones presentes en el río Laja aguas arriba, cabe destacar que al tener un solo registro el resultado es poco representativo.

Para estas cuatro estaciones se cuenta también con información recabada de mediciones realizadas por la DGA de los siguientes parámetros químicos: Cl, SO₄, NO₃, As, Pb, Cu, Mo, Cr, Hg, Zn, pH, Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (SDT). En la norma NCh409 correspondiente a la Norma Chilena de Agua Potable y la NCh1333, respectiva a Riego, se encuentran estipulados los límites máximos y/o mínimos para distintos parámetros que influyen en la calidad de agua superficial.

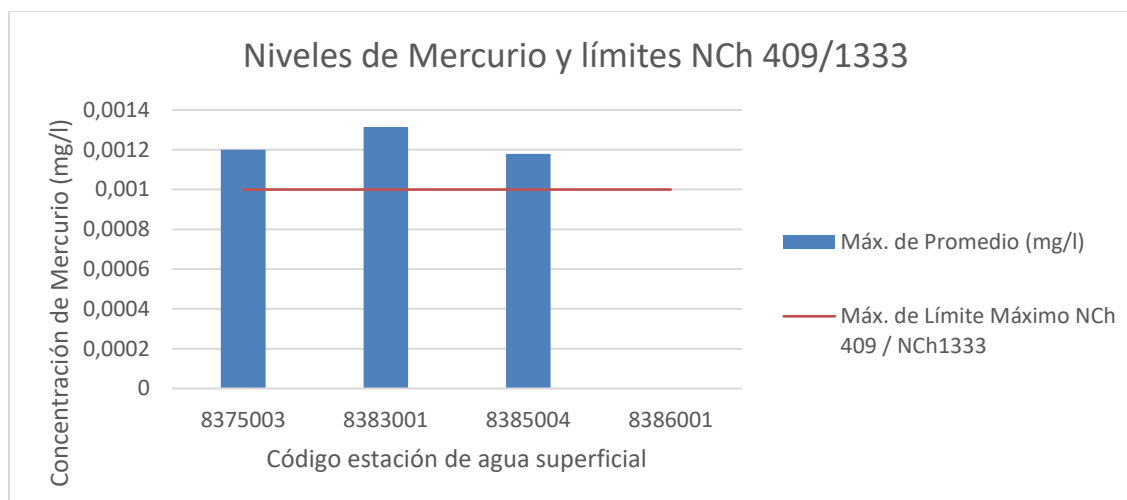
A partir de esto se realiza un análisis comparativo entre el promedio de los datos obtenidos y las normas mencionadas, dentro del cual se observa que el molibdeno y mercurio son los únicos elementos químicos que se encuentran fuera de los límites. Es importante mencionar que para la estación 08386001 no hay datos suficientes para realizar un análisis representativo. En las Figuras 5.3-5 y 5.3-6 se observan los niveles de concentración obtenidas para ambos elementos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-5 Niveles de molibdeno en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja

El molibdeno solo se encuentra presente en la NCh1333 debido a su casi nulo efecto en la salud humana, en donde el límite de 0,01 mg/l se ve sobrepasado en las tres estaciones analizadas. A pesar de esto, la concentración encontrada se presenta en un rango entre 0,025 y 0,035 mg/l en promedio, lo cual no se considera como una concentración alta que pueda tener efectos dañinos en la salud humana o en los cultivos dentro de la zona de estudio.

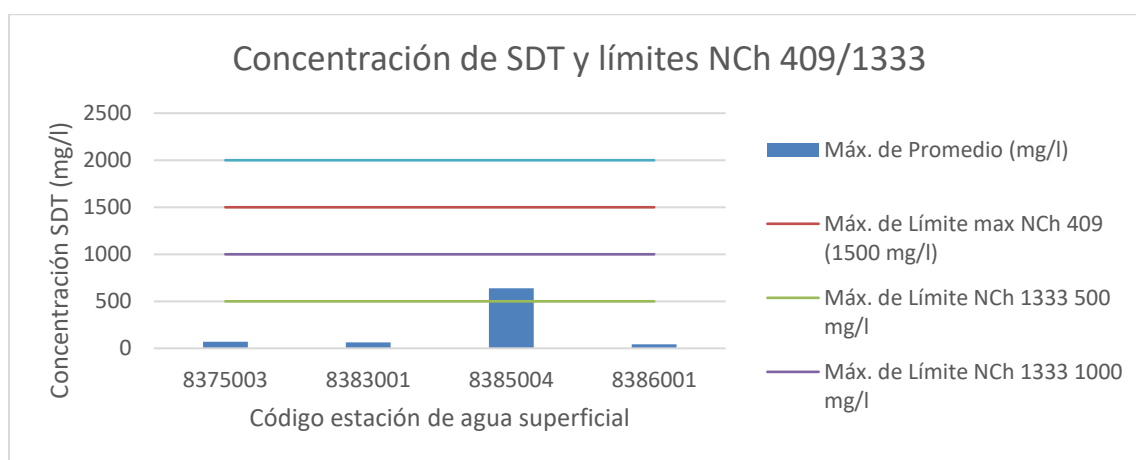


Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-6 Niveles de mercurio en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja

El mercurio tiene un límite máximo de 0,001 mg/l tanto en la norma de agua potable como la de riego debido a que éste puede tener efectos negativos en la salud humana si se consume en concentraciones altas. En el caso de las estaciones de agua superficial presentes en el río Laja, los niveles de mercurio sobrepasan de forma leve el límite propuesto en ambas normas. Las altas concentraciones de este contaminante se podrían deber al efecto que tuvo el volcán Antuco en la formación de la cuenca del río Laja.

En la Figura 5.3-7 se observan los valores de sólidos disueltos totales en las estaciones de agua superficial en la zona del Laja. Para este parámetro, la norma de riego NCh. 1333 presenta distintos rangos de valores en los cuales varía el efecto de la conductividad eléctrica sobre los cultivos; a diferencia de esta, la norma de agua potable NCh. 409 presenta como valor máximo de agua para consumo humano de 1.500 mg/l.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-7 Concentración de sólidos disueltos totales en estaciones de agua superficial de la cuenca del río Laja

Se observa que la única estación que sobrepasa el primer límite de SDT es la correspondiente a Río Claro en Puente Ferroviario. Según lo estipulado, esta agua puede tener efectos adversos en cultivos sensibles, pero no presenta riesgos para la salud humana, estando por debajo de la norma de agua potable en una cantidad considerable.

5.3.3 Análisis de aguas subterráneas

No existen estaciones de calidad de aguas subterráneas de la DGA en el área que comprende el SHAC del río Laja. Tampoco se disponen de antecedentes de calidad de agua subterránea que comprendan registros físico-químicos que permitan caracterizar las aguas del acuífero.

En esta situación, el análisis de la calidad de agua subterránea se realiza a partir de dos pozos de monitoreo de la DGA que cuentan con información química del agua. Si bien estos pozos no se encuentran en la zona del acuífero, esta información se revisó por considerarse potencialmente útil debido a su relativa proximidad. Estas dos estaciones de calidad de aguas subterráneas, las cuales se presentaron en el Cuadro 5.3-1, se encuentran en la cuenca del río Biobío (pozo Mulchén) y en la cuenca del río Itata (pozo Chillán en Fundo Cato), y se resume en el Cuadro 5.3-3 el número de registros obtenidos después de la sistematización de la información descrita en el acápite 5.3.1.

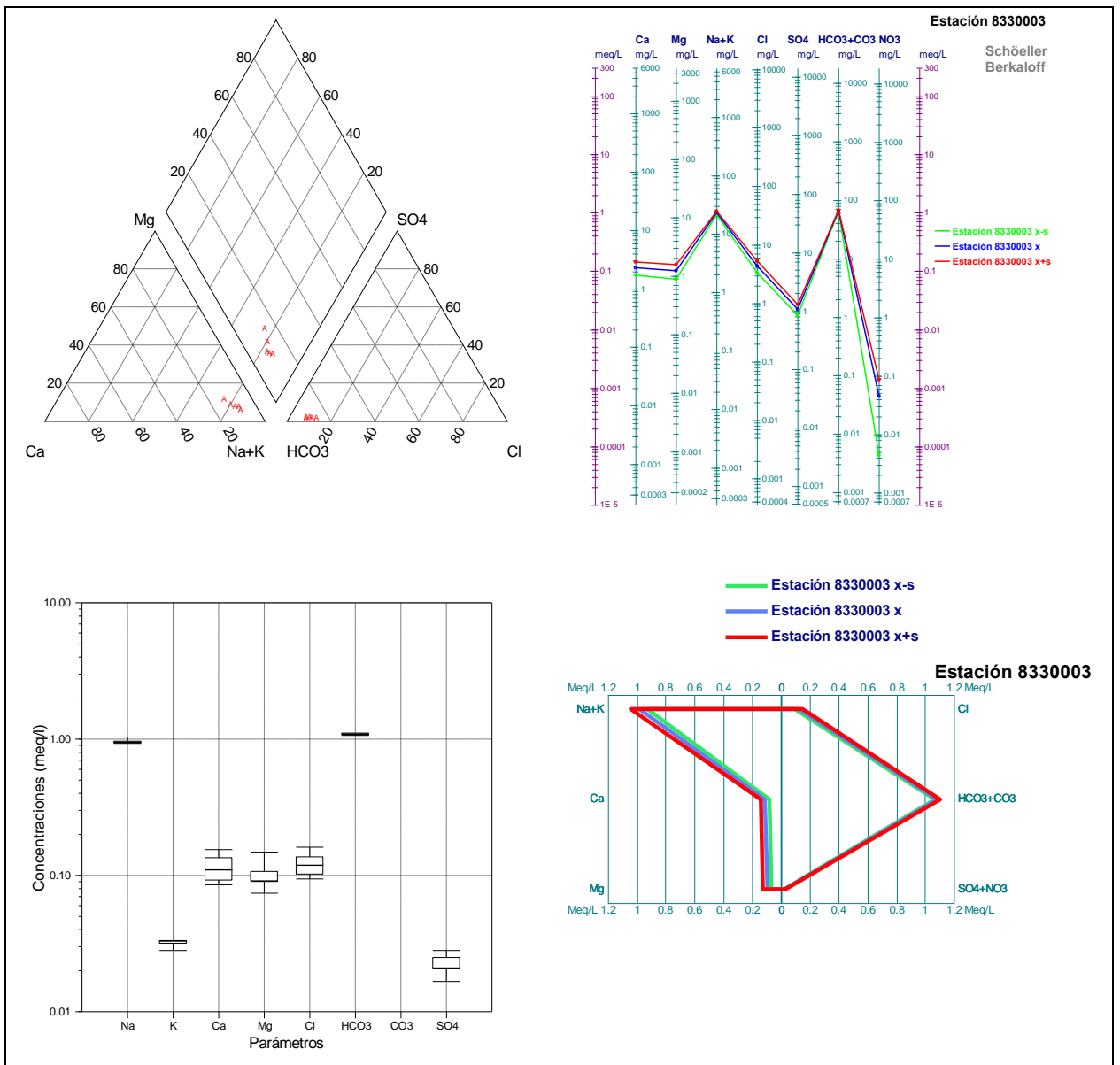
Cuadro 5.3-3 Registros en estaciones de calidad de aguas subterráneas con balance iónico válido

N°	Cód. BNA	Nombre	Tipo	N° Registros (*)	Periodo Registros (*)
1	08113002-7	Pozo Chillán en Fundo Cato	Subterránea	5	2002-2006
2	08330003-5	Puzo Mulchén o Sondaje N° 773 ESSBIO S.A.	Subterránea	5	2002-2015

(*) Con balance iónico con error inferior a 10%.

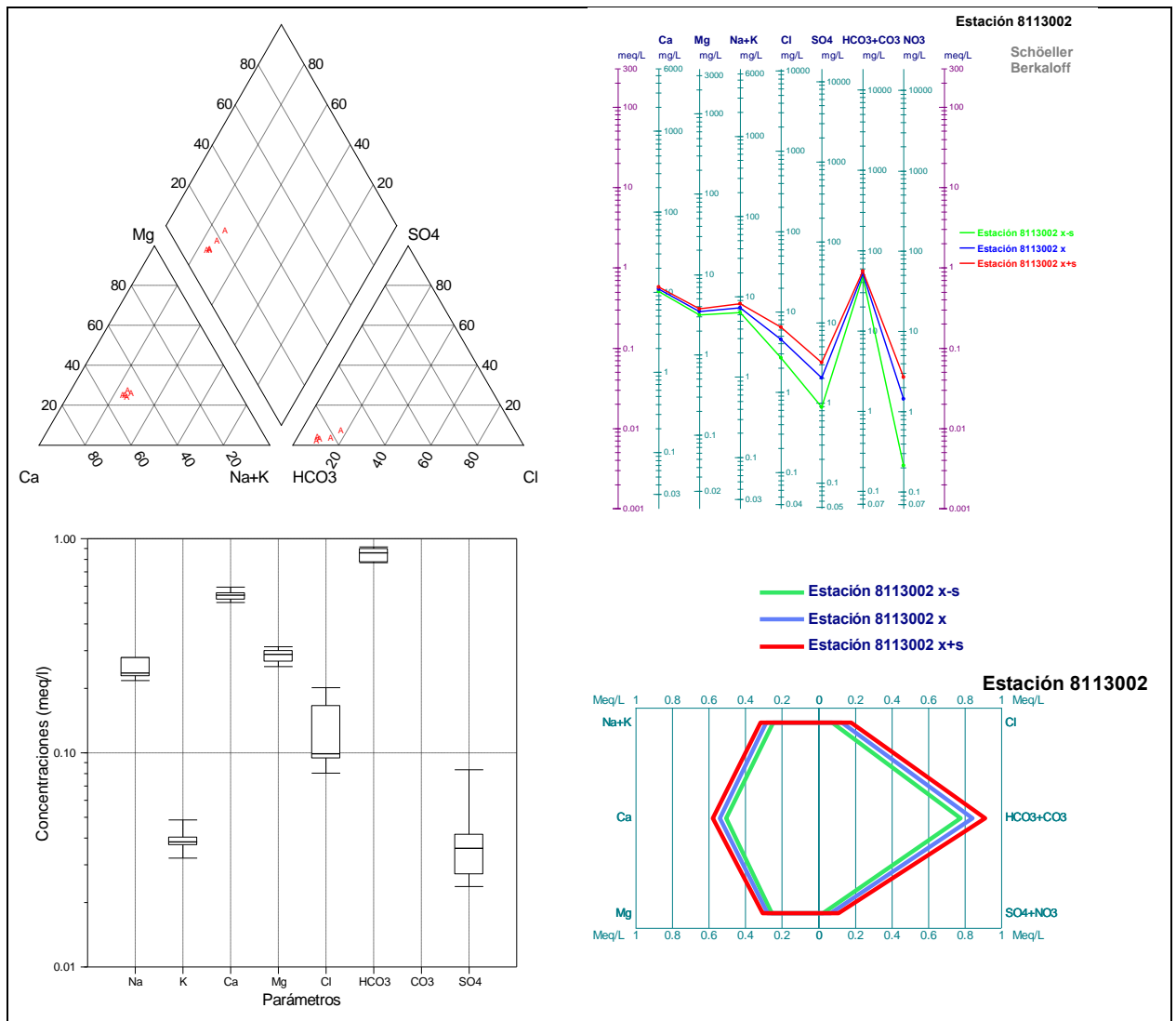
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.3-8 se presenta el análisis químico del pozo Mulchén mediante los diagramas de Piper, Schoeller, Box-Whisker y Stiff, mientras que, para el pozo en Chillán en Fundo Cato, éstos se muestran en la Figura 5.3-9.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-8 Diagramas Calidad Agua Subterránea de Estación 0830003-5 (en cuenca río Biobío)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.3-9 Diagramas Calidad Agua Subterránea de Estación 08113002-7 (en cuenca río Itata)

De los diagramas del pozo Mulchén se desprende que el agua presenta una composición bicarbonatada sódica, con una presencia casi nula de calcio y magnesio. Esto muestra una diferencia en la constitución de elementos químicos con respecto a las aguas superficiales del río Laja, ya que estas últimas, en general, presentaban mayor porcentaje de calcio.

Los diagramas del pozo Chillán muestran una composición química con leve disimilitud a las observadas para el agua superficial del río Laja, en donde los bicarbonatos son el compuesto predominante con una alta concentración de calcio y con casi nula presencia de sulfatos. Así pues, aun estando ubicado en la cuenca del río Itata, estas aguas se corresponden de

mejor manera con el agua superficial que circula por el río Laja comparado con el pozo Mulchén de la cuenca del río Biobío.

Los valores obtenidos de los gráficos analizados se corresponden con los antecedentes revisados, específicamente con la publicación “Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile” (González *et al.*, 2003). En este estudio se define la composición química del acuífero del Laja como bicarbonatada con un cambio de tipo cálcico por un tipo mixto cálcico-magnésico desde la plataforma Piedemonte Andino hacia el contacto de la Depresión Central con la cordillera de la Costa.

En el Anexo 5.3 se recopila la información de calidad de aguas anteriormente citada y el análisis correspondiente.

5.4 CONCLUSIONES DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Por medio de la caracterización hidroquímica, se determinó la composición del cauce principal de la cuenca del río Laja, además de su cauce afluente principal en el sector del SHAC, el río Claro. De esta forma, se constató que la calidad de agua superficial del río Laja es del tipo carbonatada cálcica sin mayor presencia de sulfatos y sodio/potasio. Se extrae también del análisis que el aporte del afluente del río Claro no tiene un efecto mayor en las aguas provenientes del río Laja debido a que su composición química no presenta grandes variaciones. Lo anterior se observa en la estación río Laja en San Rosendo, situada aguas abajo de la confluencia, donde la composición química permanece del tipo carbonatada cálcica.

Al no tener información acerca del agua subterránea en la zona debido a la inexistencia de estaciones de medición de esta naturaleza, se deben considerar los pozos cercanos al acuífero. De los dos que se encontraron cercanos a la zona se infiere que la calidad de agua subterránea presente en el SHAC del Laja tendrá una composición similar a la del pozo Chillán en Fundo Cato, debido a que las concentraciones de químicos en este punto son similares a las del agua superficial que cruzan la zona. Esto también se correlaciona con el estudio “Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile” (González *et al.*, 2003), en donde se define que la composición química del agua del acuífero del Laja es bicarbonatada cálcica con un cambio de tipo cálcico por un tipo mixto cálcico-magnésico hacia el sector poniente.

CAPÍTULO 6 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

6.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente capítulo consistió en caracterizar de manera preliminar la distribución acuífera dentro de la zona de estudio, a partir de la información recopilada desde antecedentes geofísicos existentes y la elaboración y análisis de perfiles estratigráficos. Asimismo, se consideró identificar, en base a la estratigrafía descrita, la profundidad estimada a la cual se encuentra la formación acuífera, para finalmente y con ayuda de ensayos geofísicos, determinar su extensión vertical en profundidad.

Para ello, se procedió posteriormente a definir zonas propicias donde realizar nuevos ensayos geofísicos en aquellos sectores donde se encontró falta de datos. En general, las mediciones han estado enfocadas en caracterizar la porción acuífera que ocupa el SHAC del río Laja dentro del gran acuífero conceptualizado para la región del Biobío.

La principal fuente de información para la definición de las zonas donde realizar trabajos geofísicos se basó en el reconocimiento de la geofísica ya existente dentro del sector, con el fin de complementarlos con estos nuevos trabajos en aquellos sectores con una menor densidad de mediciones.

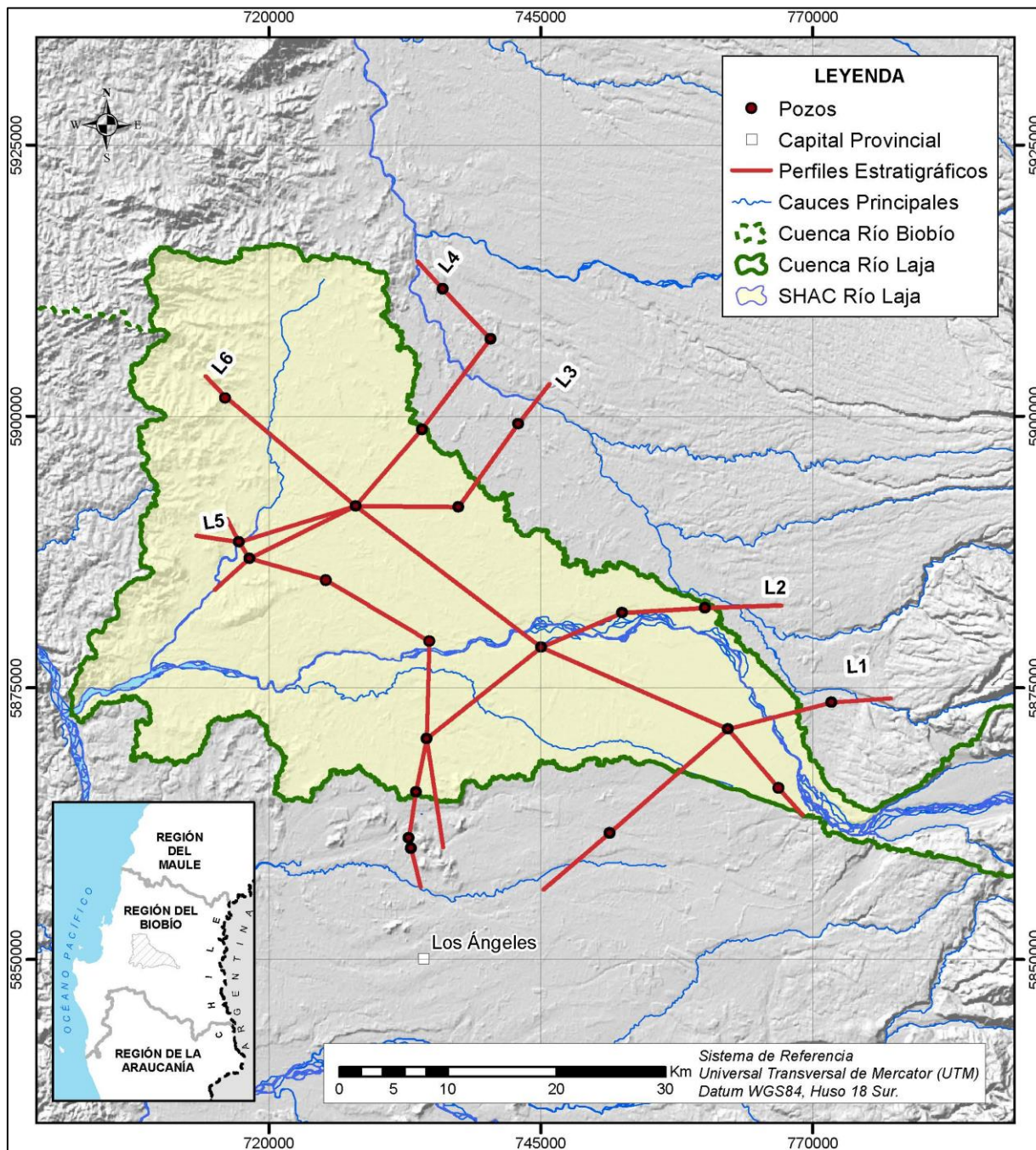
En el acápite 6.2 se presenta el análisis de los perfiles estratigráficos revisados. El acápite 6.3 describe la información geofísica existente para la zona del SHAC en estudio y la campaña de terreno correspondiente. En el acápite 6.4 se presenta tanto la metodología llevada a cabo para las prospecciones como sus resultados.

6.2 ANÁLISIS DE LA ESTRATIGRAFÍA EXISTENTE

A partir de la información de expedientes de derechos de aprovechamiento de agua subterránea de la DGA se recopilaron los datos de las estratigrafías observadas durante el proceso de perforación de cada pozo. En total, se analizaron 22 expedientes a partir de los cuales se generaron 6 secciones litológicas a manera de estimar la distribución y la extensión de las posibles formaciones acuíferas dentro del SHAC del río Laja. Asimismo, se incorporó para este análisis información de pozos ubicados fuera del SHAC, a modo de caracterizar el comportamiento e interacción de las unidades permeables hacia los límites de la zona de estudio.

En la Figura 6.2-1 se muestra la distribución en planta de los perfiles determinados.

Es importante mencionar que dicha interpretación mantiene su base en la calidad de la descripción litológica realizada para la solicitud de derecho de agua. Cada columna estratigráfica fue digitalizada y se detalla en el Anexo 6.2. Para este análisis se consideró correlacionar los topes formacionales de las unidades definidas como permeables para así estimar su espesor y extensión lateral.



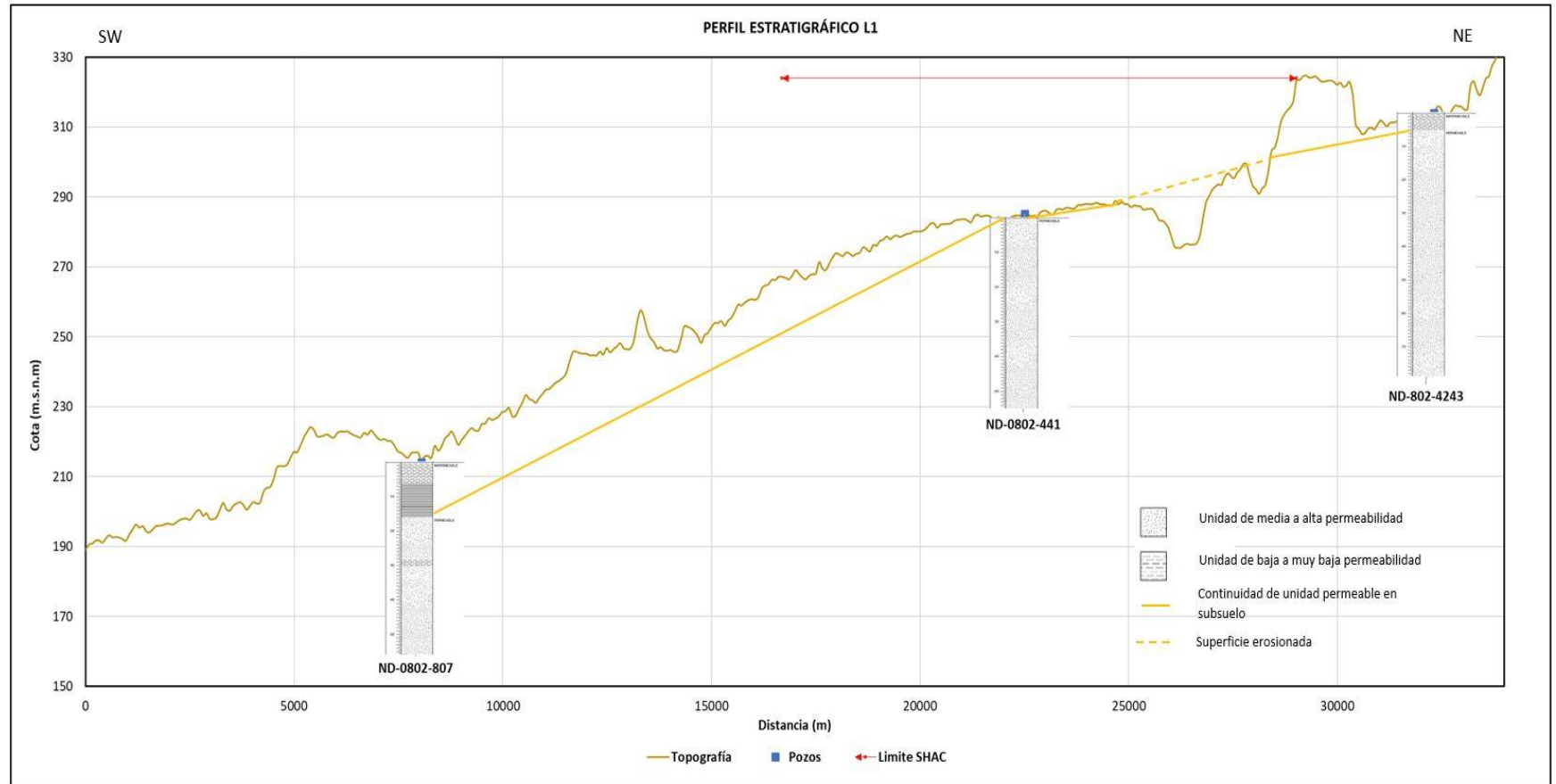
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-1 Ubicación perfiles estratigráficos analizados

La primera línea de sección, L1 (ver Figura 6.2-2), se extiende por aproximadamente 38 km con una orientación SW – NE, en la zona de entrada del SHAC. Se tomaron como referencia los sondeos ND-0802-4243 y ND-0802-807, ambos ubicados fuera de los límites del sector, al norte y sur respectivamente.

En el perfil L1 se muestra que para el pozo ND-0802-807 se desarrolla una unidad de media a alta permeabilidad por debajo de los 16 m bajo el nivel de terreno, infrayaciendo delgados estratos arcillosos solidificados que vendrían a comportarse como zonas de muy baja permeabilidad.

Hacia el este, dentro del SHAC, desaparece esta condición en el pozo ND-0802-441, donde se reconoce desde escasa profundidad presencia de un estrato de alrededor de 50 m de espesor compuesto enteramente por sedimentos de granulometría variada, desde partículas tamaño arena a ripios, gravas y bolones, conformando un medio propicio para el flujo de agua subterránea. Finalmente, esta unidad caracterizada como zonas de medias a altas características permeables se extiende hasta el pozo ND-0802-4243, ubicado fuera del SHAC, donde se registraron arenas de tamaño principalmente medio y grueso además de ripios y gravas con bajos porcentajes de limo y arcilla.



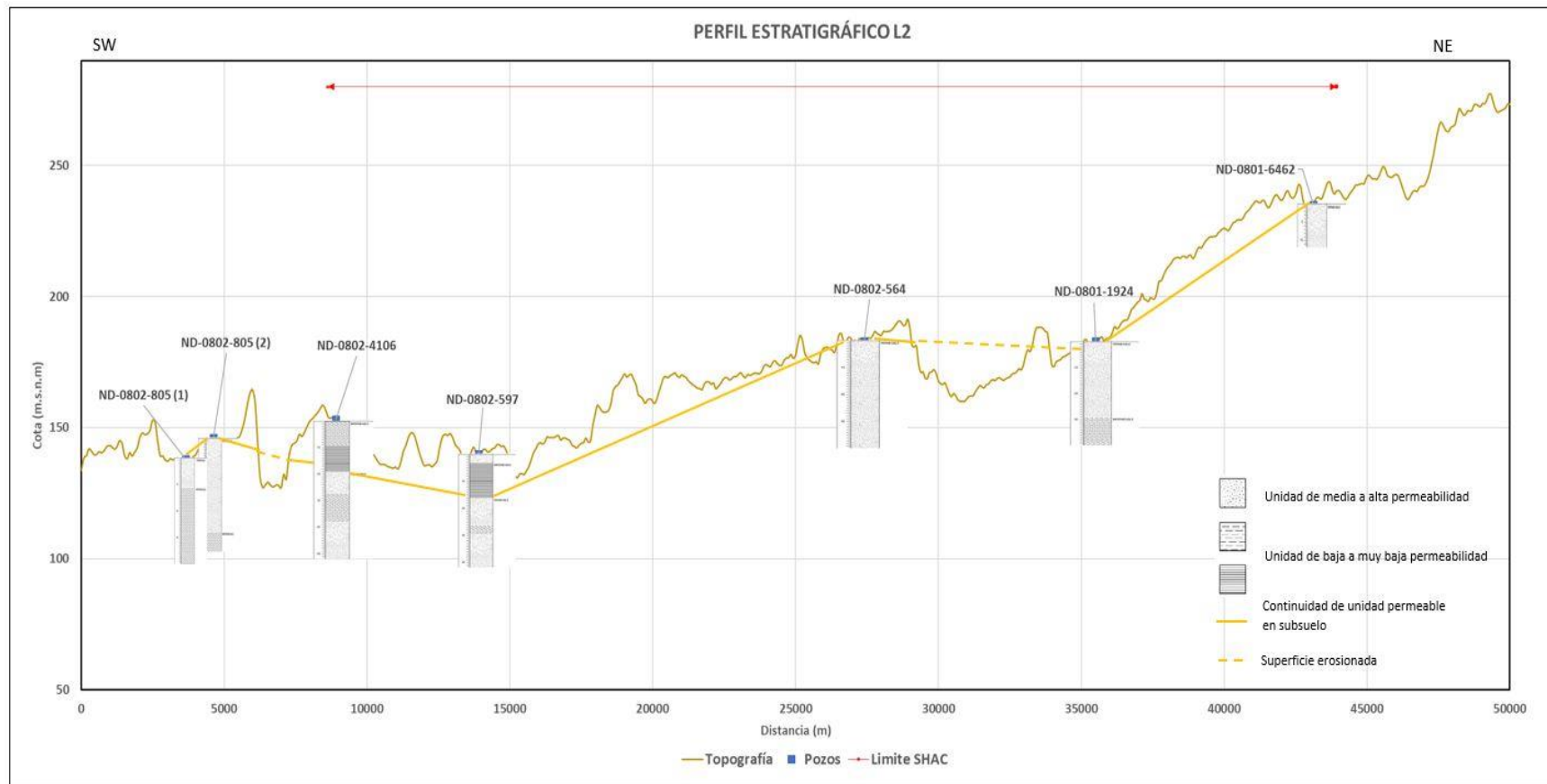
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-2 Sección estratigráfica L1

La sección L2 (ver Figura 6.2-3) se ubica en la zona central del SHAC, manteniendo una longitud de 50 km aproximadamente. A lo largo de todo el perfil se reconocen tramos de significativo potencial hidrogeológico, conformada por arenas medias a finas descritas de color gris oscuras que se hallarían asociadas a los depósitos de avalanchas volcánicas "Arenas del Laja".

Hacia el extremo occidental de la sección, fuera del área de estudio, se observa una tendencia al acúñamiento de esta unidad, siendo que los sondajes ND-0802-805 (1) y (2) registran importantes niveles de material arcilloso en profundidad, reflejando un cambio a facies deposicionales más lacustres.

De manera intercalada se presentan lentes de arcillas y limos de espesor variable, manifestándose hacia el borde oeste del SHAC. Hacia el extremo este, el pozo ND-0801-6462, si bien no presenta una profundidad equivalente al resto de los pozos de la sección, permite la distinción de una existente continuidad entre capas de arenas gruesas y finas a cotas más elevadas.

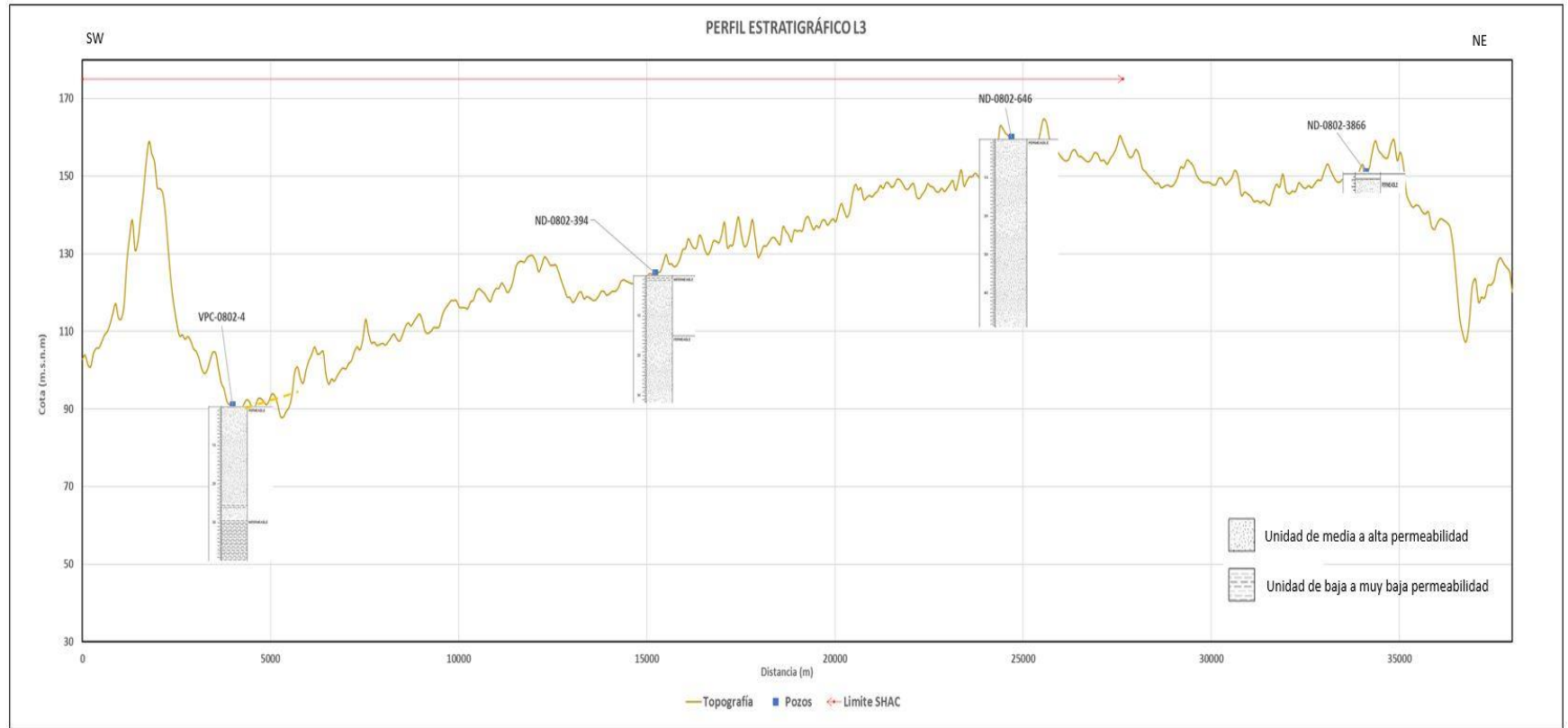


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-3 Sección estratigráfica L2

Las líneas de sección L3 y L4 (ver Figuras 6.2-4 y 6.2-5, respectivamente) se ubican hacia el sector centro-norte del SHAC, teniendo su origen en las cercanías al río Claro. En primer lugar, el perfil L3 mantiene una extensión de 38 km aproximadamente. El sondaje VPC-0802-4 presentó dentro de sus primeros 25 m de profundidad un estrato compuesto por gravillas y arenas finas, reposando sobre una capa de arcillas que se extiende hasta la profundidad total perforada de 40 m. Los pozos ND-0802-394 y ND-0802-646 ubicados en la zona central presentan características acuíferas similares, siendo posible correlacionar la misma unidad hidrogeológica en los sondajes vecinos. Se observa poca presencia de arcilla en una matriz principalmente arenosa de gradación predominantemente normal.

En el extremo norte, se señala que es probable que esta unidad se extienda fuera de los límites del SHAC. Si bien el pozo tipo zanja ND-0802-3866 no resulta de gran aporte litológico, se presta para identificar las mismas secuencias arenosas en niveles superficiales en la zona adyacente al área de interés.



Fuente: Elaboración propia.

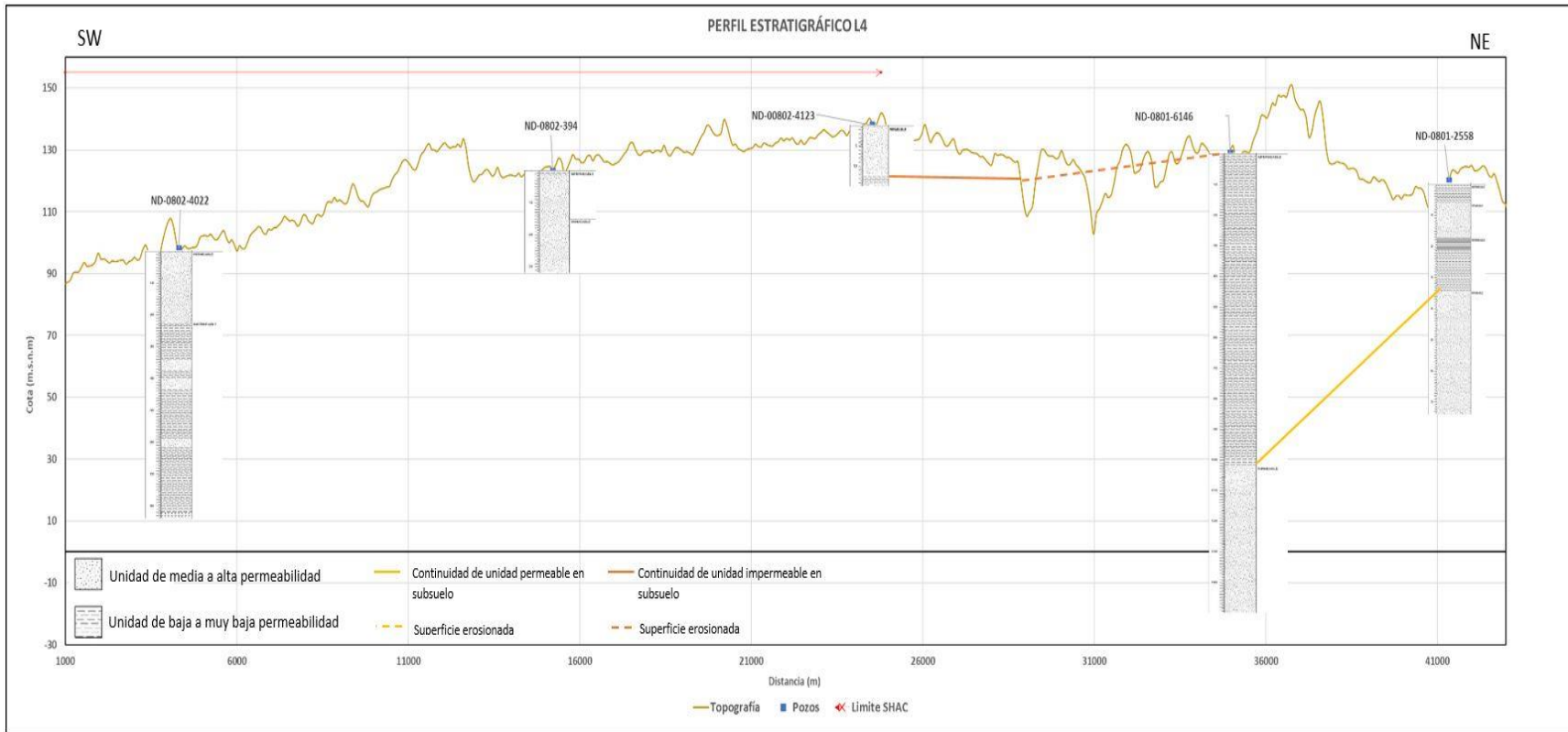
Figura 6.2-4 Sección estratigráfica L3

El perfil L4 muestra, en su extremo occidental (sondaje ND-0802-4022), sedimentos de origen principalmente fluvial, definiéndose una primera unidad de permeabilidades considerables, compuesta por arenas finas a muy finas de aproximadamente 20 m de espesor. Esta unidad sobreyace a estratos arcillosos intercalados con delgados lentes de arena que conforman secuencias de baja permeabilidad.

Debido a la profundidad alcanzada por este pozo, fue posible identificar que cercanos a los 80 m por debajo de la superficie se encontraría roca consolidada, que bien podría estar asociada al basamento de la cordillera de la costa.

En la zona central, los pozos ND-0802-394 y ND-0802-4123 exhiben presencia de capas de detritos arenosos finos de color gris, bien gradados con poca gravilla. Se observa una disminución de esta unidad hacia el límite del SHAC, siendo no reconocible en el pozo ND-0801-6146, ubicado hacia el norte, donde los primeros 80 m corresponden a material limo-arcillosos. Para este mismo sondaje se identifican capas de alto potencial hidrogeológico, formada por arenas, ripios y bolones, solo por debajo de esta cota, y presentando un espesor considerable de 70 m.

En el final de la sección, se correlaciona hacia el norte esta unidad descrita en el sondaje ND-0801-2558 a niveles más someros.



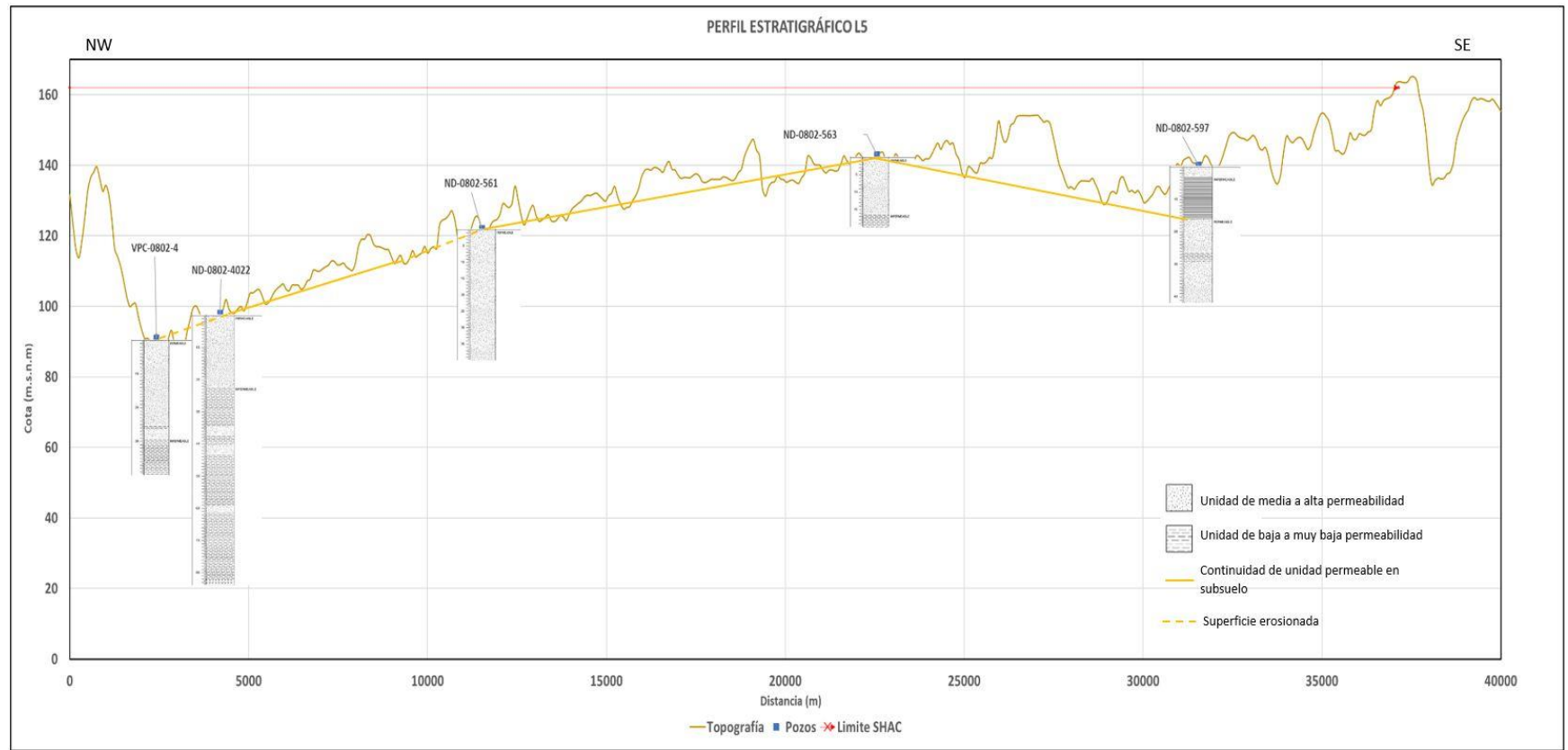
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-5 Sección estratigráfica L4

Asimismo, se generaron líneas transversales a la extensión total del SHAC; L5 y L6. Se observa que para el perfil L5 (ver Figura 6.2-6), hacia el límite occidental, los sondajes VPC-0802-4 y ND-0802-4022 definen un acortamiento en las secuencias permeables, apareciendo una continua reducción de espesores en dirección NW. Se detallan sedimentos de carácter principalmente fluvial con presencia capas arcillosas a escasa profundidad. En la zona central se tiene mayor desarrollo de estratos arenosos, típicamente de color gris, hasta las adyacencias al río Laja, donde esta unidad se profundiza bajo series arcillo-limosas consolidadas, tal como se observa en el sondaje ND-0802-597.

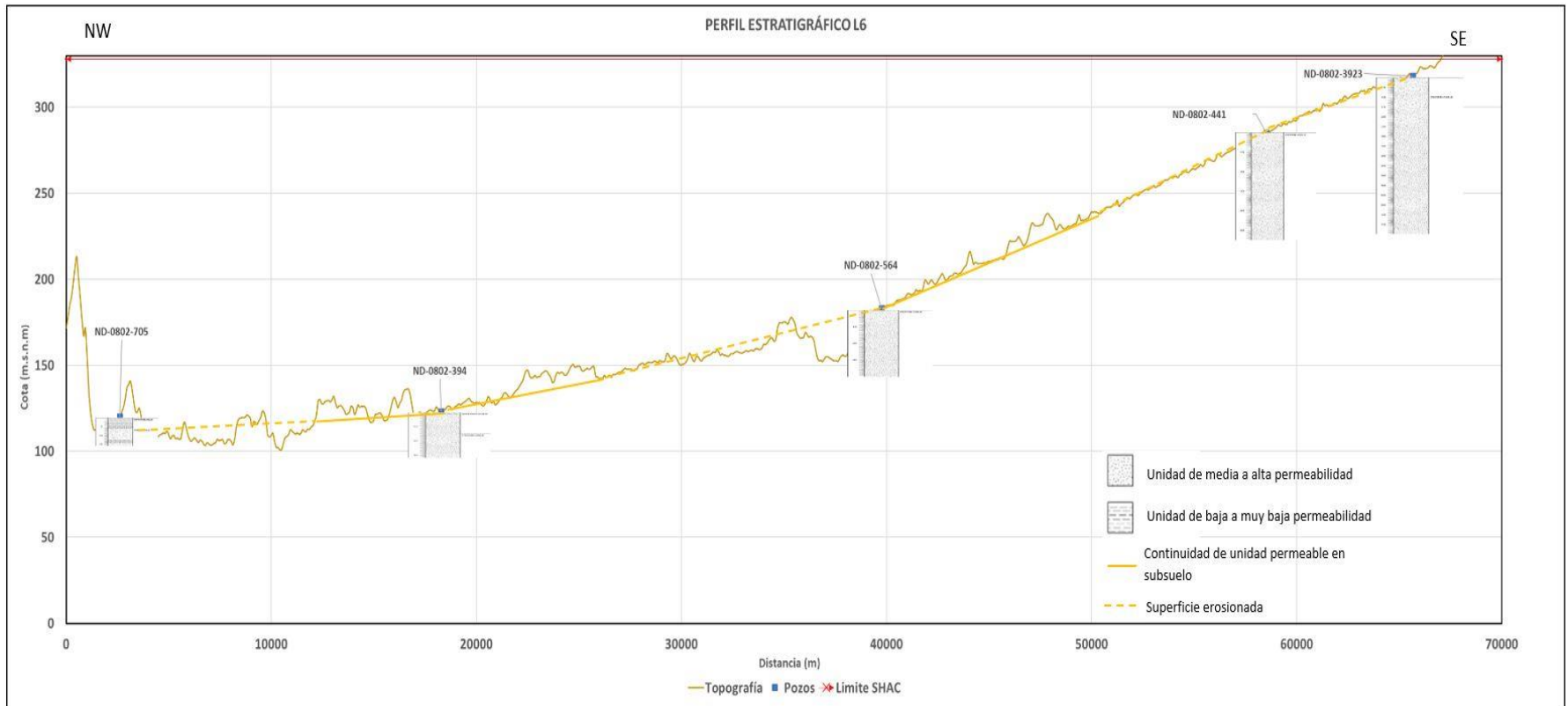
El perfil L6 presenta a su vez una extensión de aproximadamente 69 km en dirección NW-SE, siendo el más amplio de todas las líneas de sección elaboradas. A lo largo de todo su recorrido se observa gran continuidad lateral en cuerpos detrítico, principalmente de granulometría fina, siendo que solo en el sondaje ND-0802-705, ubicado en el sector norte, presentó espesores de aproximadamente 4 m y algunos niveles arcillosos someros.

Por lo general, se observó una tendencia de aumento de espesores hacia el SE, donde sondajes como ND-0802-441 y ND 0802-3923 fueron perforados hasta profundidades de 60 m y 80 m respectivamente, consistiendo casi en su totalidad en arenas limpias con nula presencia de arcillas. En la Figura 6.2-7 se muestra el corte realizado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-6 Sección estratigráfica L5



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2-7 Sección estratigráfica L6

Finalmente se indica que, debido a las profundidades totales perforadas para cada pozo, no se alcanzó a identificar el basamento rocoso, con excepción de los perfiles L4 y L5, indicando que al menos en el sector noroeste del SHAC, el basamento se halla a cotas más someras, profundizándose progresivamente hacia el SHAC. Por lo general, la gran mayoría de derechos concedidos dentro del SHAC se hallan habilitados en la unidad de arenas volcánicas, siendo muy escasos aquellos pozos que alcanzan profundidades mayores a los 30 m, a partir de la cual es posible encontrar sedimentos mayormente fluviales.

Se define así una importante unidad hidrogeológica caracterizada con permeabilidades medias a altas, correspondiendo a arenas de granulometría fina a media de origen volcánico, relacionadas a las arenas del Laja, junto a sedimentos más fluviales presentes a mayor profundidad. De manera intercalada aparecen lentes limo-arcillosos, en algunos casos de manera consolidada, que se comportan como medios de baja a muy baja permeabilidad; estas capas pudiesen estar relacionadas con la definición del autor MacPhail (1966) como “depósitos laháricos”.

Debido a ello, se interpreta que, dentro de la zona del SHAC, se presenta una gran capa potencialmente acuífera, a escasa profundidad, que mantiene una tendencia al acuíñamiento hacia el sector oeste, presentando mayor desarrollo hacia el este.

6.3 SELECCIÓN DE PUNTOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

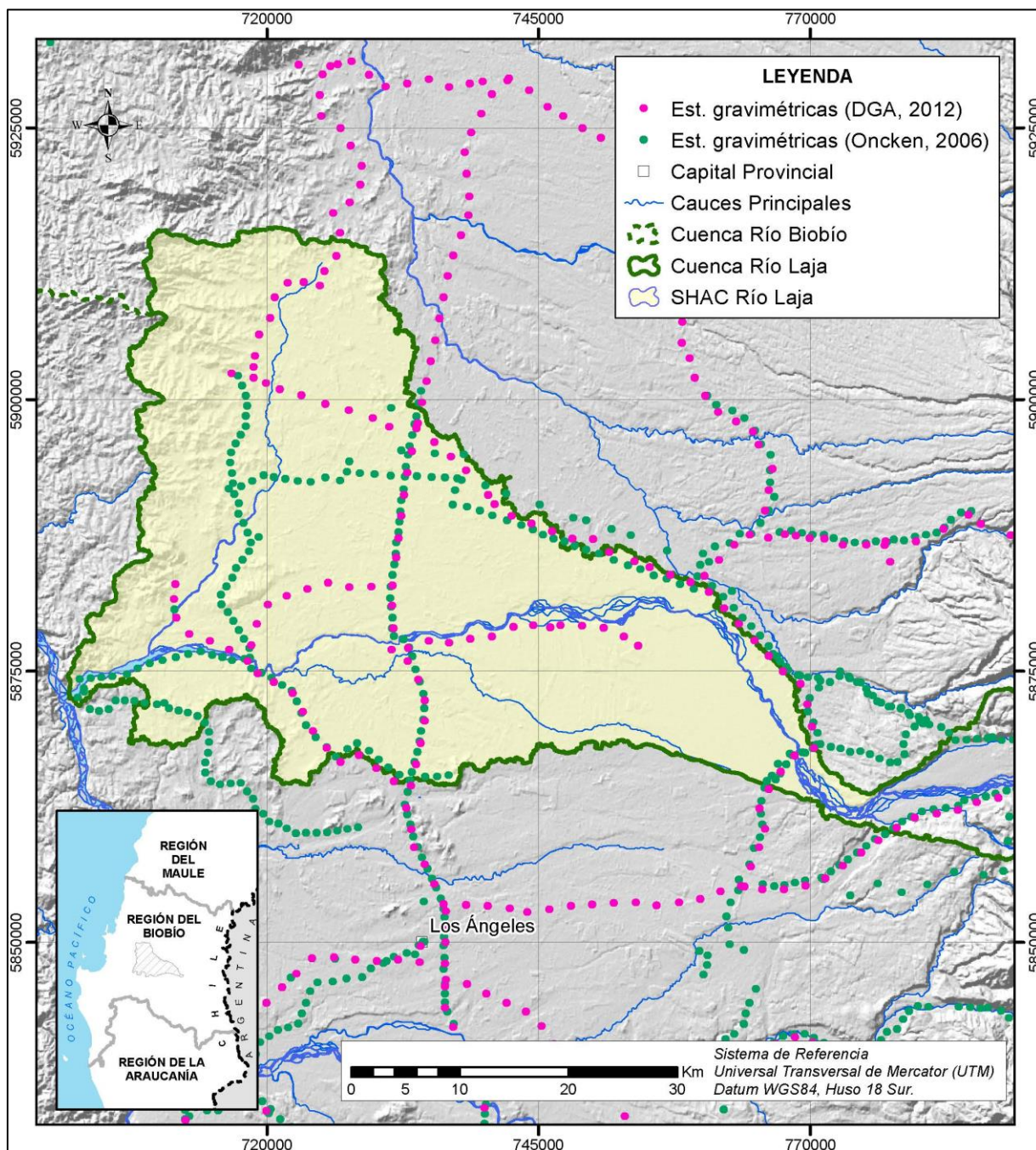
6.3.1 Información geofísica existente en el SHAC del río Laja

Durante la recopilación de antecedentes se identificaron dos estudios con información geofísica relevante dentro del SHAC del río Laja. Dichos estudios (las fichas de los cuales se pueden consultar en el Anexo 2.1) son:

- Estudio hidrogeológico cuenca Biobío (2012). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Realizado por: Aquaterra Ingenieros Limitada.
- *The Andes. Active Subduction Orogeny* (2006). Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Gotze, H. J., Ramos, V. A., Strecker, M. R. y Wigger, P. *Frontiers in Earth Sciences*. Springer-Verlag GmbH.

Cabe señalar que en ambos casos se trata de mediciones de tipo gravimétricas. En el estudio desarrollado por DGA (2012), se realizaron un total de 454 estaciones gravimétricas para la región del Biobío, generando un total de 15 perfiles gravimétricos, de los cuales 6 de ellos se ubican dentro del SHAC. En cuanto al segundo estudio citado, éste corresponde a un informe de carácter internacional, del cual se desprenden 168 mediciones gravimétricas en la zona de interés.

En general, la distribución de estas mediciones se dispone principalmente en los sectores SW, SE y N-S del SHAC del río Laja. En la Figura 6.3-1 se presenta la ubicación de los puntos gravimétricos existentes de los mencionados estudios.



Fuente: Elaboración propia en base a DGA (2012) y Oncken *et al.* (2006)

Figura 6.3-1 Antecedentes geofísicos en el SHAC del río Laja

6.3.2 Selección de ubicación para las prospecciones geofísicas

Como resultado al análisis de la información geofísica existente, se ha reconocido la existencia de una clara desproporción en cuanto a los registros recopilados. La totalidad de la información disponible corresponde a estudios gravimétricos ejecutados y ninguno a métodos TEM.

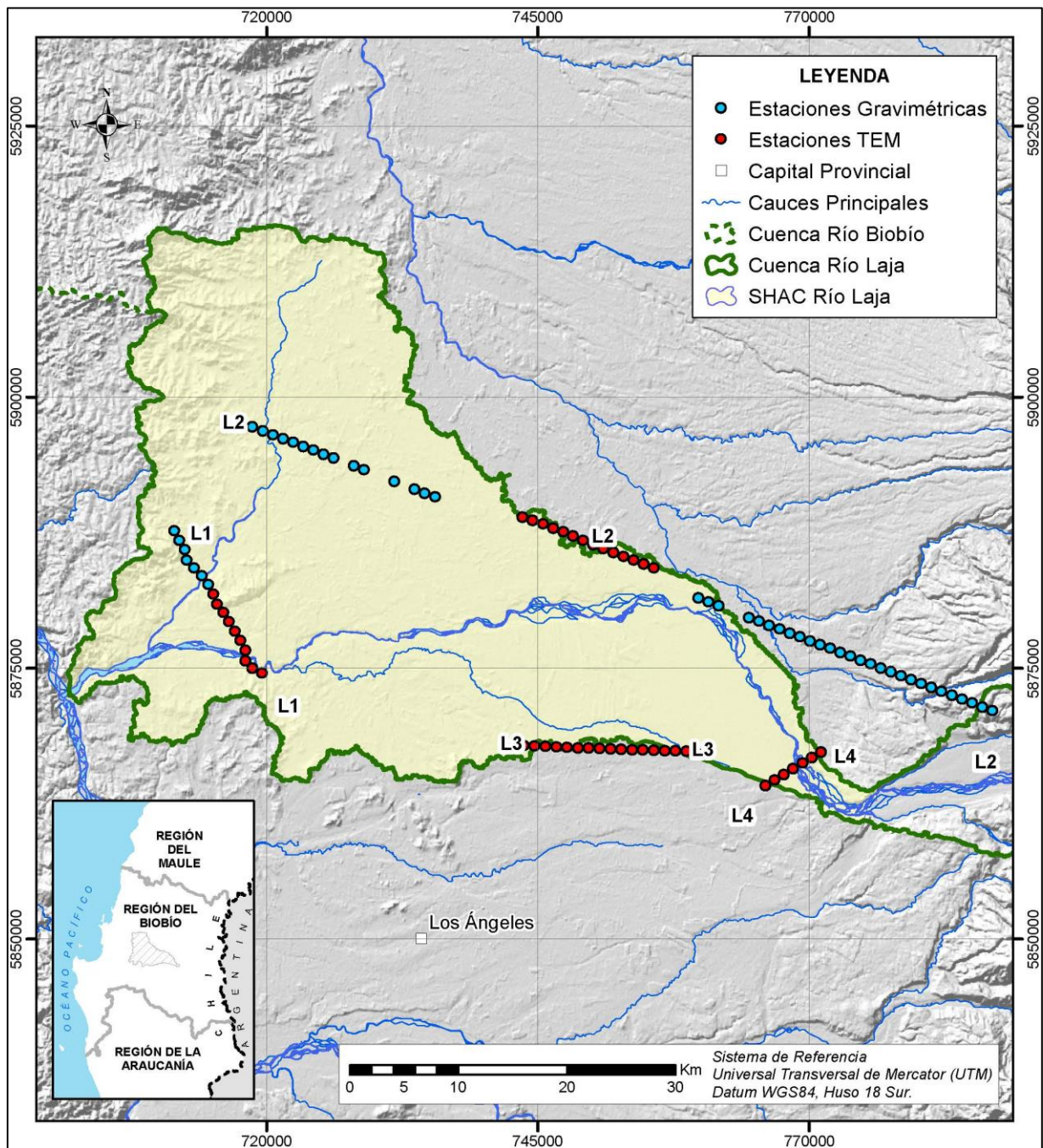
De acuerdo a lo anterior, se contempló la realización de 50 mediciones gravimétricas distribuidas en el acuífero del valle del río Laja complementando los perfiles existentes en los estudios hidrogeológicos anteriores. Para ello se consideró como factor indispensable las cercanías a afloramientos rocosos, debido a que este método necesita de un valor conocido de fuerza gravitacional en superficie a modo de referencia, a partir de la cual realizar las posteriores correcciones topográficas. Como resultado, se definieron 3 perfiles gravimétricos (ver Figura 6.3-2):

- L1: En el sector SW del SHAC, correspondiente a la zona próxima a la salida de la cuenca, este perfil parte de afloramiento rocoso y se complementa con información gravimétrica existente.
- L2 y L3: Estos perfiles forman parte de un gran perfil cruzando el SHAC en sentido WE entre afloramientos rocosos y considerando datos gravimétricos existentes.

Es importante destacar que la selección de la ubicación de las estaciones gravimétricas proyectadas también considero el factor de cercanía a caminos o lugares públicos de fácil acceso, que por lo general es lo común a aplicar para este tipo de mediciones.

Las 55 mediciones de tipo Transiente Electromagnético (TEM) se reparten en 4 perfiles de resistividad, distribuidos en los sectores más representativos de la cuenca a caracterizar (ver Figura 6.3-2); éstos son: entrada y salida del SHAC, y límites norte y sur, respectivamente. Esta última consideración se tomó con la finalidad de analizar el comportamiento y extensión del acuífero en las adyacencias de la zona de estudio.

A diferencia de las prospecciones gravimétricas, el método TEM resulta un poco más complejo en cuanto a la selección de ubicación, debido a que la superficie necesaria para realizar esta medición es mucho más acotada, lo que generalmente implica el ingreso a propiedades privadas para extensión de la instrumentación correspondiente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.3-2 Campaña geofísica en el SHAC del río Laja

En ambos casos (gravimetría y TEM) se tomó como referencia la geología local para establecer los puntos de medición; para TEM, se consideró en lo posible dentro del relleno sedimentario conocido, mientras que en la gravimetría se revisó la existencia de afloramientos rocosos que permitieran un adecuado desarrollo del trabajo en terreno y posterior interpretación de resultados.

6.4 TRABAJOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

6.4.1 Metodología de las prospecciones

i. Prospección Gravimétrica

Las mediciones gravimétricas se efectúan con un gravímetro, instrumento que debe colocarse en el punto exacto en que se debe efectuar la medición. Este instrumento es portátil, de pequeñas dimensiones, como lo muestra la Figura 6.3-1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-1 Medición gravimétrica

La medición gravimétrica se efectúa considerando lo siguiente:

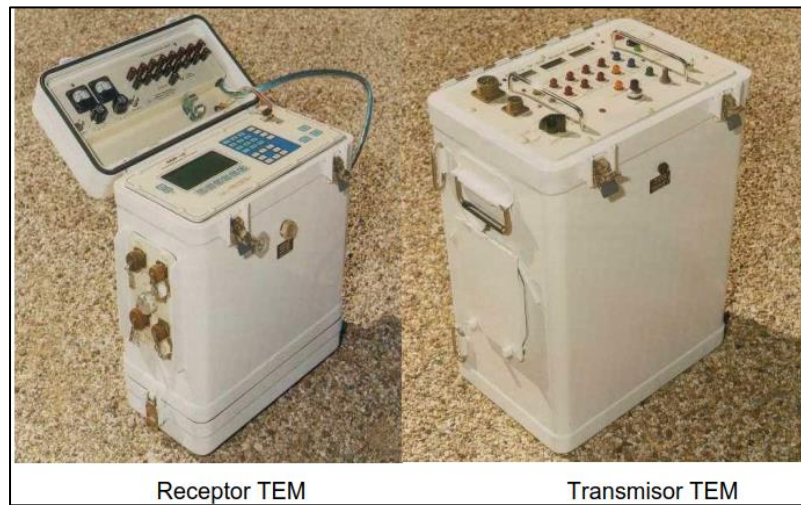
- El gravímetro requiere ser nivelado en la estación de medición al menos un minuto antes de tomar la medida con el fin de permitir su estabilización.
- Cada medición gravimétrica deberá ser repetida al menos una vez. En caso de exceder la precisión del equipo por causa de ruido cultural, se repetirá la medida las veces que sea necesario para obtener un buen promedio.
- Junto con la medición gravimétrica se debe tomar una medición topográfica mediante GPS diferencial donde se requiere una precisión de 10 cm en la cota.

ii. Prospección mediante Transiente Electromagnético (TEM)

En el caso de la medición tipo TEM, debido a que está orientada a determinar los cambios de resistividad eléctrica del terreno, es necesario producir un pulso electromagnético de alta intensidad que se introduzca en el terreno y luego de un instrumento receptor que permita tomar las mediciones. Para generar el pulso electromagnético y tomar la medición de una estación de TEM se requiere de:

- Un equipo transmisor que debe ser energizado con baterías o con un motor generador, dependiendo de las condiciones de terreno.
- Una espira de cable eléctrico (Loop) especial que se debe tender sobre el terreno y que tiene dimensiones de un cuadrado de 100 m x 100 m (400 m de cable).
- Un instrumento receptor que permita captar la respuesta del suelo.

Lo anterior significa movilizar un conjunto de equipos que ocupan un volumen importante y que suman alrededor de 200 kg. En la Figura 6.3-2 se muestra el receptor y transmisor de TEM.



Fuente: Elaboración propia.

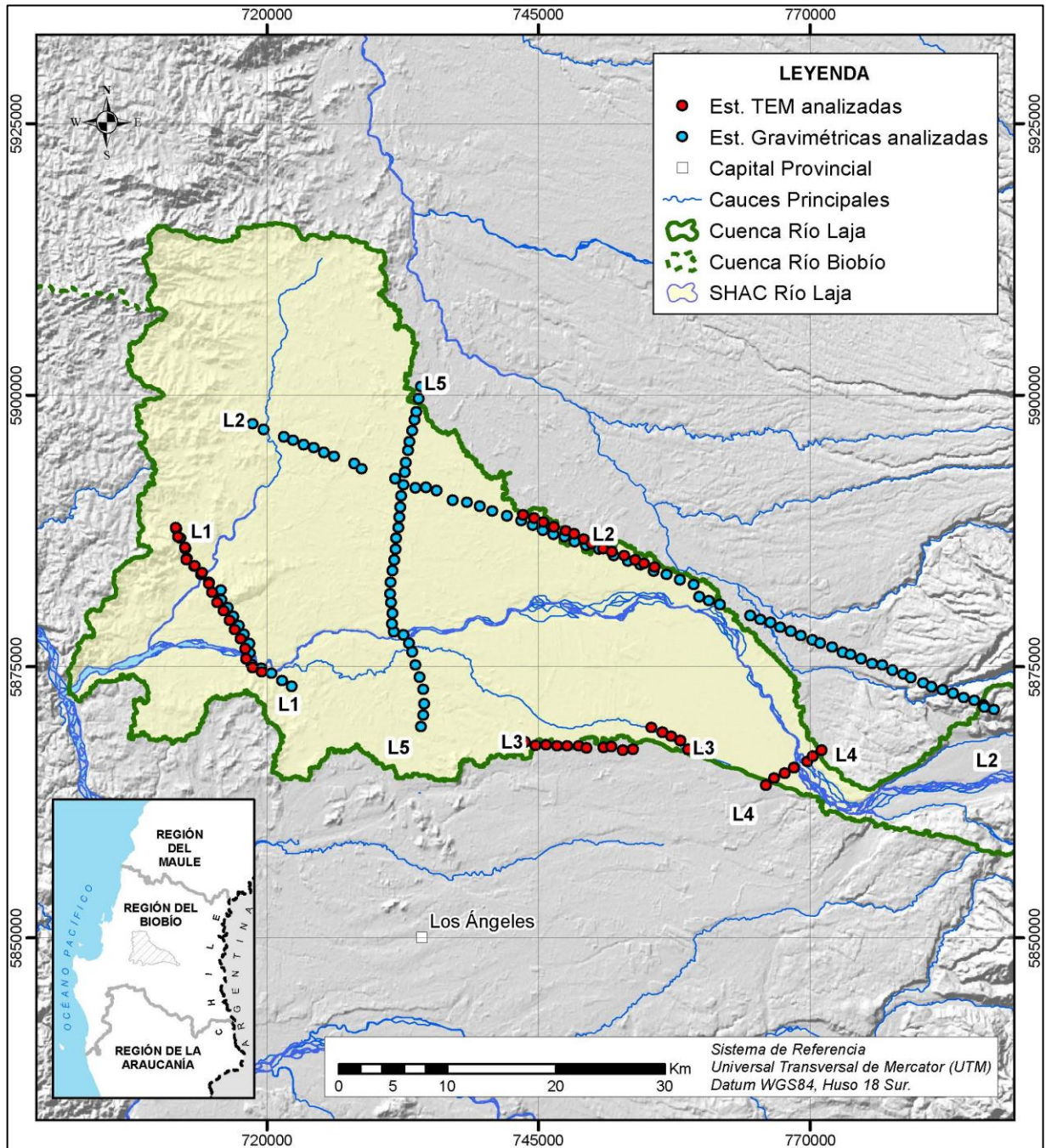
Figura 6.4-2 Equipos para medición TEM

Si se considera la preparación del equipo, la selección del lugar de medición, el tendido del Loop y las mediciones que deben repetirse para tres o cuatro frecuencias diferentes, la medición de la estación de TEM demora aproximadamente 45 minutos.

6.4.2 Resultados de las prospecciones

La campaña de mediciones geofísicas se inició el día 29 de julio de 2018 y se dio por concluida el 11 de agosto del mismo año. En ella se desarrollaron los dos estudios previstos (gravimetría y medición TEM), junto a sus respectivos levantamientos topográficos. Se señala que, si bien la zona de estudio se encuentra contenida entre los Husos 18 y 19 sur, se consideró por términos de uniformidad la referenciación de todas las estaciones en Datum WGS84 Huso 19S.

En el Anexo 6.4 se encuentra el informe en detalle de los métodos aplicados y los resultados generados. En la Figura 6.4-3 se ubican los puntos finales objeto de análisis, tanto de medición en terreno como de interpretación de antecedentes previamente existentes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-3 Perfiles gravimétricos y TEM analizados

A continuación, se presenta un resumen de los resultados.

i. Mediciones Gravimétricas

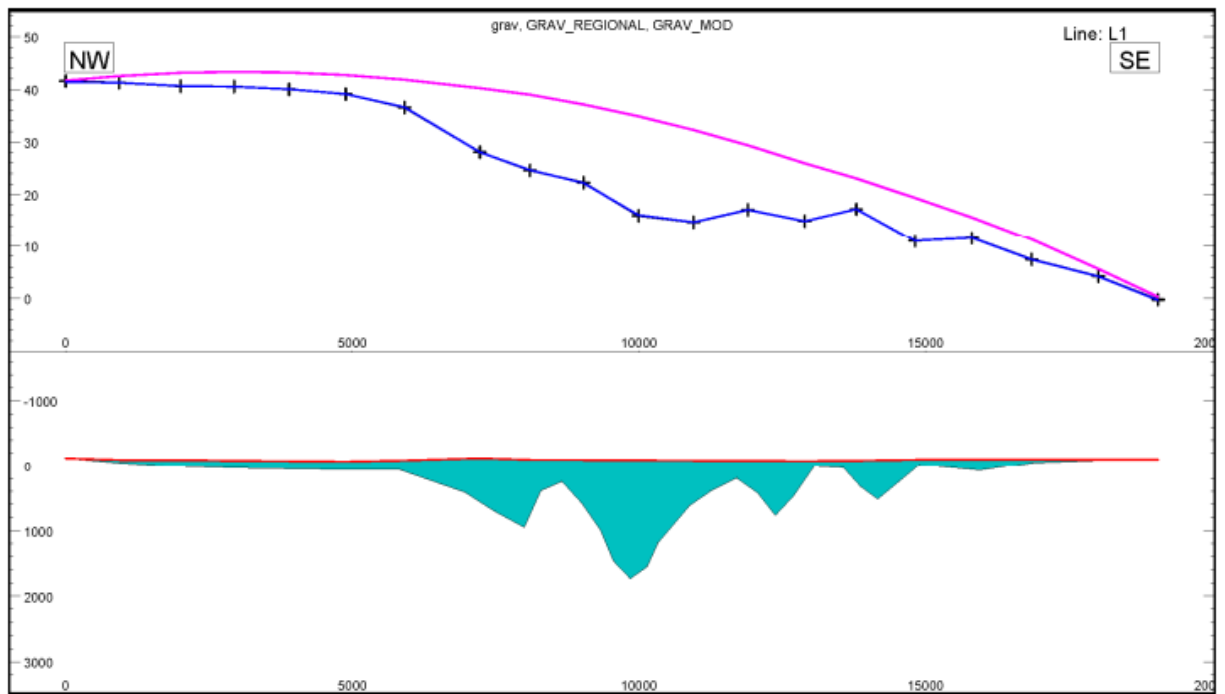
En base a la campaña propuesta, se realizó un total de 50 estaciones gravimétricas. Los datos fueron medidos con un gravímetro digital portátil Scintrex modelo CG-5 Autograv, tipo “microgravity meter”, con resolución de 1 microGal, que ejecuta la corrección automática de los efectos de marea, temperatura, presión y nivelación. En cuanto a los datos topográficos, éstos fueron obtenidos a partir de un GPS Diferencial marca Huace NAV modelo X-900.

Para el correcto levantamiento gravimétrico se usó como estación de base de gravedad absoluta la Base Gravimétrica de Los Ángeles, que posee un valor de gravedad conocido de 979905.186 mGal. Adicionalmente, fue necesario el amarre a rocas aflorantes en los extremos de cada línea gravimétrica realizada.

Los valores de gravedad obtenidos permitieron definir la extensión de la cubierta sedimentaria y la profundidad a la cual se encuentra el basamento. En las Figuras 6.3-3, 6.3-4 y 6.3-5 se muestran los modelamientos finales de los perfiles, considerando que la unidad representativa del basamento posee una densidad de 2,67 gr/cc y los sedimentos un promedio de 2,00 gr/cc.

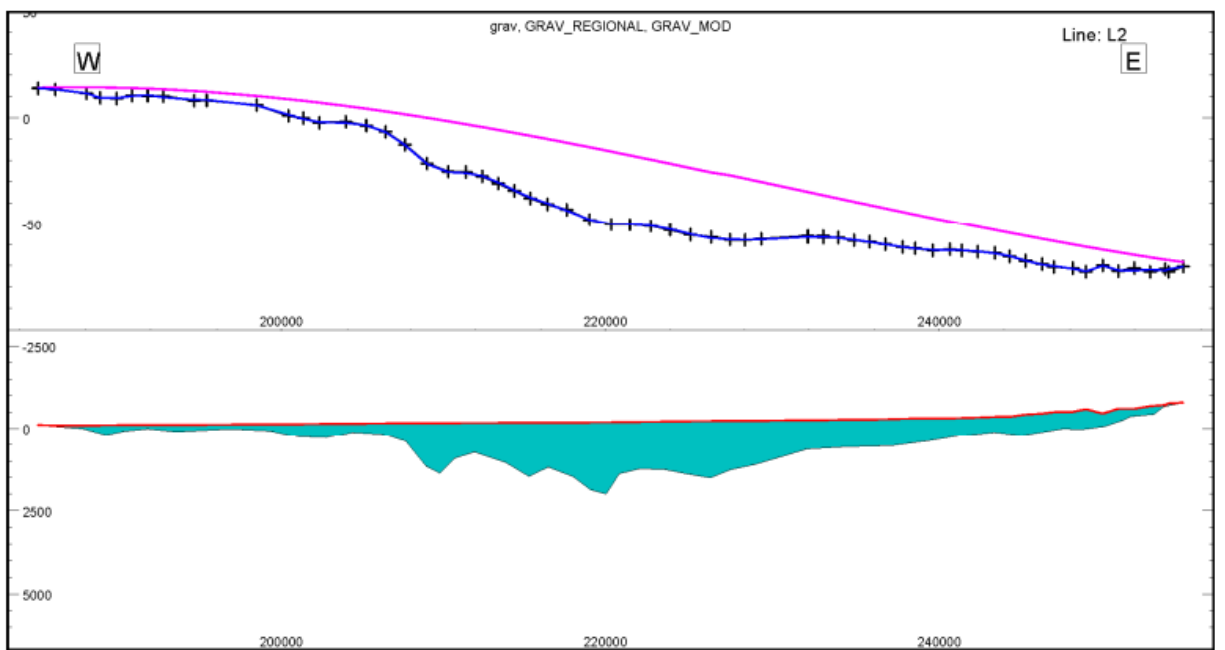
Adicionalmente, se procedió a interpretar los valores gravimétricos obtenidos a partir de los antecedentes antes citados, DGA (2012) y Oncken (2006), en una sola línea de sección de orientación N-S principalmente, denominada L5, donde ambos estudios caracterizan la zona central del SHAC. De esta manera, se complementó la información geofísica para todo el sector de interés.

En las Figuras 6.4-3 a 6.4-5 se presentan los modelamientos gravimétricos de los perfiles L1, L2 y L5, y posteriormente se detallan las líneas gravimétricas definidas para este estudio.



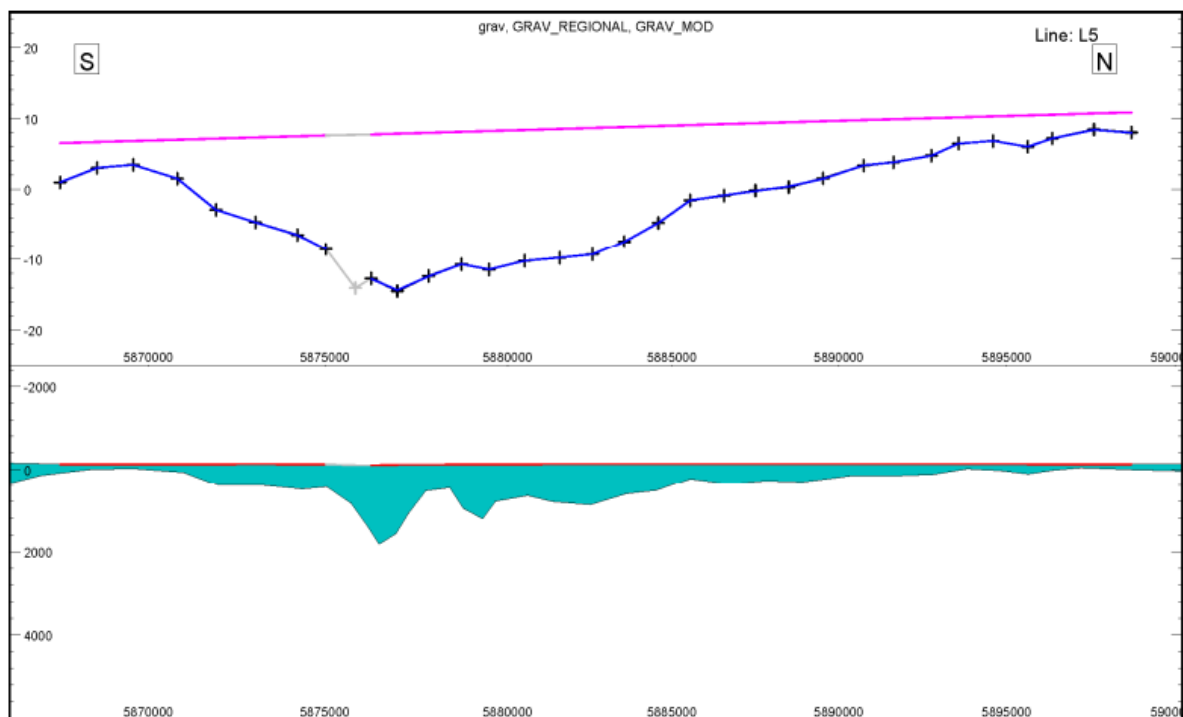
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-4 Modelamiento gravimétrico Línea L1



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-5 Modelamiento gravimétrico Línea L2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-6 Modelamiento gravimétrico desde antecedentes (L5)

En el perfil L1 el basamento tendría una profundidad promedio central de aproximadamente 500 m. En el centro del perfil L2 el basamento alcanza una profundidad promedio del orden de 1 km. En el sector centro-sur del perfil L5, se aprecian profundidades del orden de 1 km.

Estos resultados muestran el comportamiento del basamento a lo largo de cada línea, especialmente de su morfología y estimación cuantitativa de su profundidad. Sin embargo, es importante resaltar el carácter regional del presente estudio (perfiles de decenas de kilómetros, estaciones cada 1 km), por lo que la resolución de las características de forma y profundidad del basamento obtenidas están supeditadas a esta escala.

El mapa final correspondiente al modelamiento tipo cuenca de los perfiles L1, L2 y L5 se encuentran en el Anexo 6.4 como Mapa de isolíneas geofísicas sobre relieve topográfico SRTM 90 m.

ii. Mediciones de Transiente Electromagnético (TEM)

Como se mencionó en el acápite 6.2.2, se realizó un total de 55 estaciones TEM distribuidas en 4 perfiles. Se usó la configuración de Loop Coincidente, de 100 m de lado, excepto en 11 estaciones donde sólo se pudo extender cables de 50 m de lado.

Los equipos utilizados para la adquisición de los datos fueron un receptor multipropósito modelo GDP-32 y un transmisor TEM modelo ZT-30, ambos marca Zonge Engineering and Research Organization, USA.

Este tipo de método de prospección geofísica permite definir las diferentes capas sedimentarias en base a las variaciones de resistividad obtenidas, describiendo así las interfaces litológicas tanto verticales como horizontales y sus respectivas profundidades de manera eficaz. De esta manera, y a partir de la integración de los valores geoeléctricos obtenidos para todas las estaciones TEM generadas, se muestra la caracterización litológica en profundidad de todo el SHAC en estudio. En el Cuadro 6.4-1 se presenta la relación resistividad vs. litología considerada en la elaboración de las secciones de interpretación de los perfiles TEM.

Cuadro 6.4-1 Relación entre material litológico y resistividad

Litología	Resistividad (Ohm-m)
Sedimentos superficiales (húmedos y/o saturados)	≥ 60
Ripios, bolones y arenas, saturados	≥ 100
Gravas, ripios y limos, saturados	50 a 100
Gravas, arenas y arcillas, saturadas	10 a 50
Sedimentos finos y/o arcillas	≤ 10
Roca sana	≥ 1000
Posible roca alterada	≥ 100

Fuente: Elaboración propia.

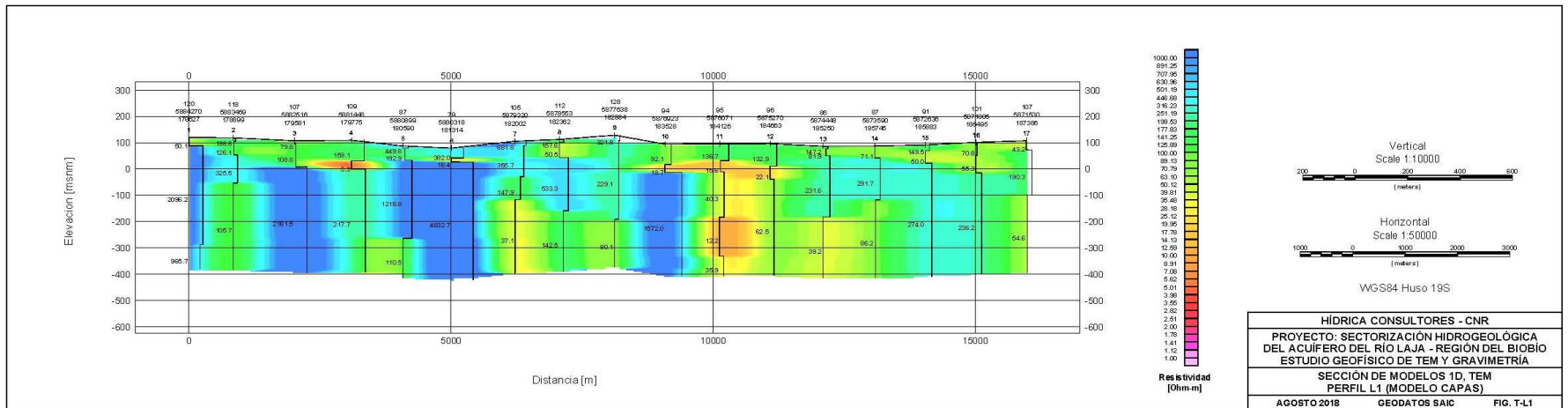
En la Figura 6.3-6 se muestra el modelo de capas 1D para el perfil L1, siendo éste mostrado a modo de ejemplo, como el modelo preliminar generado a partir de los datos en bruto. Este tipo de perfil se presenta para cada línea de sección dentro del Anexo 6.4.

Tal como se muestra en la Figura 6.3-7, para el mismo perfil L1, una vez realizada la modelación, se observa desde escasa profundidad una capa de mediana resistividad correspondiente a sedimentos superficiales (húmedos y/o saturados). Luego se aprecian diversas capas que se interpretan como sedimentos saturados de diferente granulometría, desde ripios, bolones y arenas (mayor resistividad) hasta materiales finos arcillosos (menor resistividad). Como substrato se distinguen unidades interpretadas como roca sana (muy resistiva) y posible roca alterada (resistiva).

Estos resultados son concordantes a los ensayos gravimétricos realizados y la litología observada en las cercanías al límite occidental y salida del SHAC, donde se constata que, si bien existe un espesor acuífero saturado, este presenta espesores reducidos por la presencia de basamento a poca profundidad.

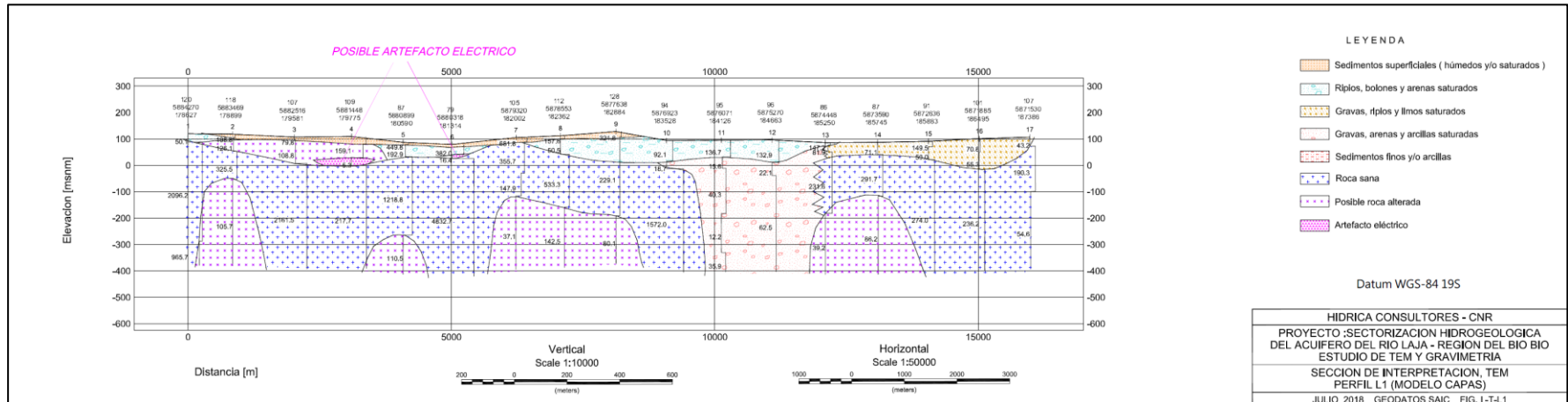
Para la línea L2, ubicado al límite norte, se presenta según la Figura 6.4-8 un mejor desarrollo de sedimentos saturados, donde se observó presencia de roca basal de manera sectorizada en la totalidad de la profundidad alcanzada.

Asimismo, las líneas L3 y L4 muestran, de acuerdo a los valores obtenidos para cada estación, demuestran que el relleno de la cuenca se hace mayor en esta zona, donde el basamento se profundiza hacia el este, observándose espesores de gran potencial hidrogeológico de al menos 400 m (Figuras 6.4-9 y 6.4-10, respectivamente). Esto indica que, para el SHAC del río Laja, se presenta una gran formación acuífera de composición litológica similar, con presencia de agua durante los primeros cientos de metros bajo la superficie.



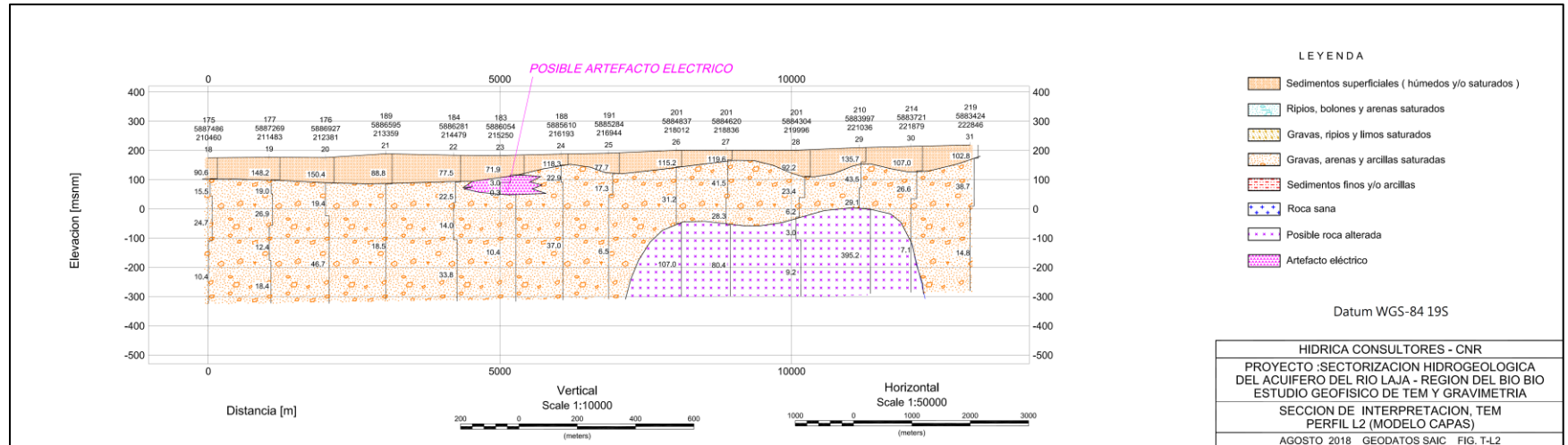
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-7 Sección TEM modelo 1D del perfil L1



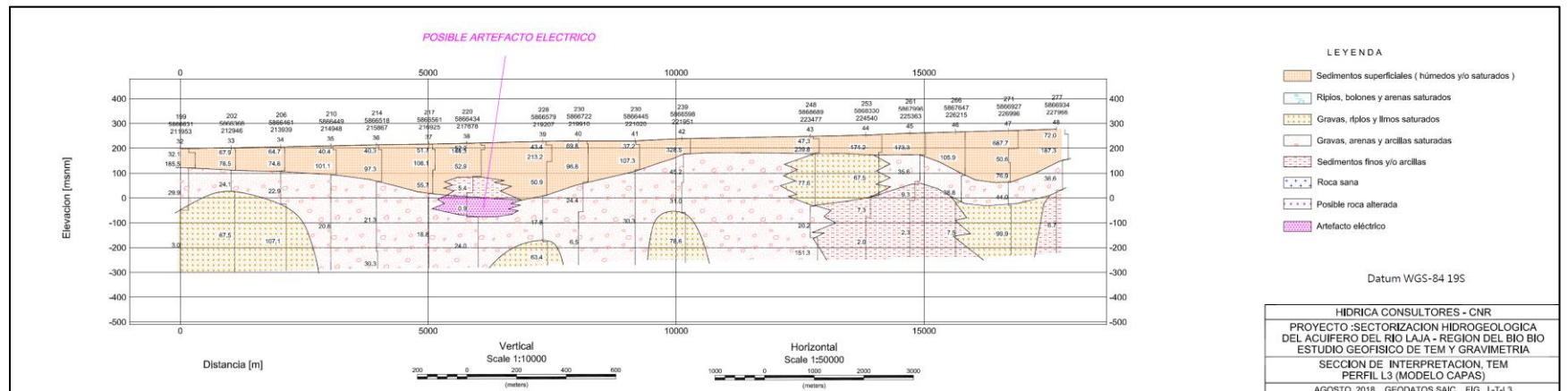
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-8 Sección de interpretación TEM del perfil L1



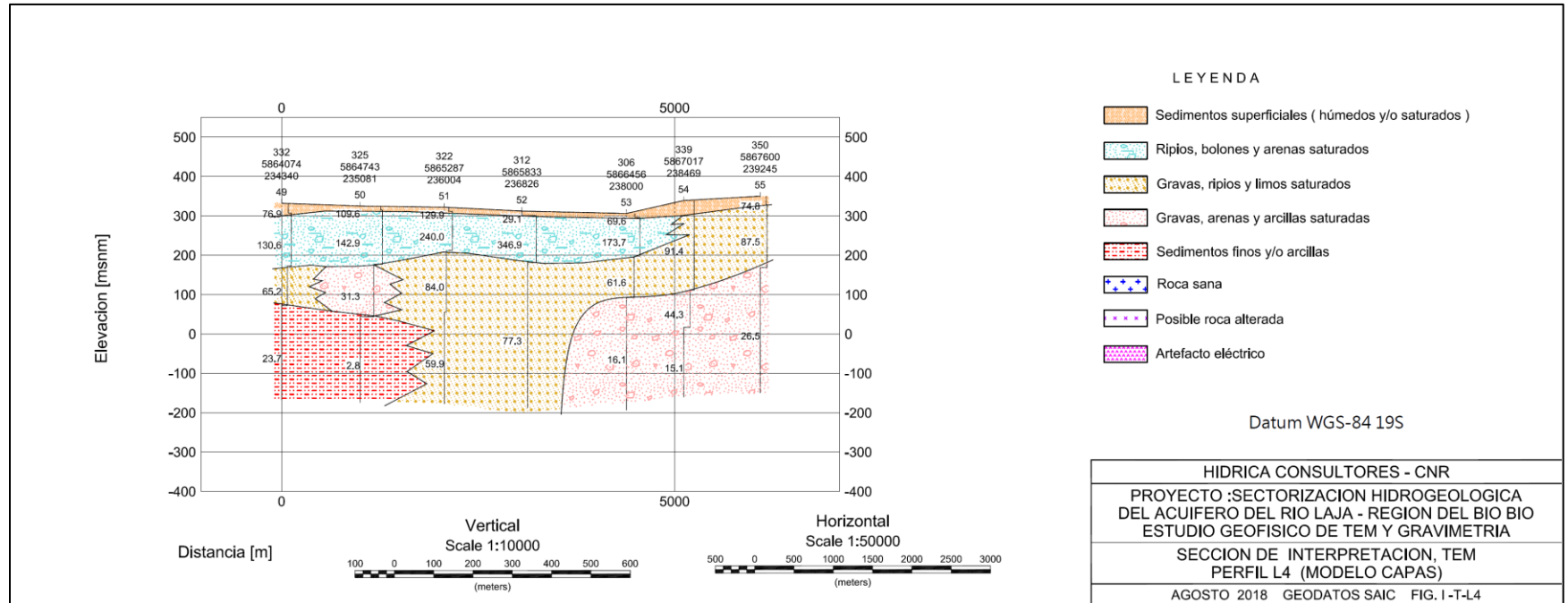
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-9 Sección de interpretación TEM del perfil L2



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-10 Sección de interpretación TEM del perfil L3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4-11 Sección de interpretación TEM del perfil L4

6.5 CONCLUSIONES DE LA DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO

Del análisis de columnas estratigráficas procedentes de la revisión de los expedientes de derechos de aprovechamiento de agua subterráneos se concluye que los suelos son de carácter arenoso en los primeros 80 metros de profundidad, con presencia puntual de lentes de arcilla.

En base a los ensayos geofísicos ejecutados en la zona de estudio (55 estaciones TEM y 50 puntos gravimétricos), se define que el acuífero del río Laja se emplaza en una depresión sedimentaria que mantiene una marcada tendencia de profundización hacia el este. Se identificaron rellenos saturados de hasta 400 m de espesor, donde el basamento se ubica de manera más somera al oeste y flancos del área de estudio. Asimismo, se distingue gran variedad granulométrica en la composición de las unidades que conforman el subsuelo, desde bolones y ripios húmedos que presentan medianas a altas resistividades, hasta materiales más arcillosos que arrojan menores resistividades y representan las zonas menos permeables dentro del sistema acuífero.

En resumen, los resultados geofísicos confirman de esta manera la existencia de una formación acuífera de gran continuidad tanto vertical como horizontal, de importante espesor, donde el basamento se hallaría por lo menos a 1 km de profundidad desde la cota de terreno.

CAPÍTULO 7 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO

7.1 INTRODUCCIÓN

A partir de los datos recopilados en el acápite 4.3.5 relativo a las extracciones existentes en la zona de estudio, donde se recabó información acerca de los derechos de aguas subterráneas, se realizó un análisis de éstos con el fin de identificar los pozos convenientes para medir el nivel de agua en la campaña de terreno y que posteriormente permitieran obtener las líneas equipotenciales del acuífero del Laja.

7.2 CAMPAÑA DE INVENTARIO DE NIVELES EN POZOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la campaña de medición de nivel de agua en pozos del SHAC del río Laja, la cual dio inicio el día 17 de Julio de 2018 y se extendió durante 3 semanas aproximadamente.

7.2.1 Análisis de Derechos de Aprovechamiento inscritos

De manera previa al inicio de la actividad de terreno, se realizó un análisis de los derechos de aprovechamiento de agua sobre el SHAC del río Laja registrados en la Dirección General de Aguas. Cabe mencionar que, dado que la preparación de esta campaña se inició durante el mes de julio de 2018, el listado de derechos utilizados en el análisis corresponde a junio de 2018.

El total de derechos otorgados (417 casos en el SHAC del río Laja) se dividió en tres capas con el fin de priorizar pozos en los que existiera un mayor caudal de extracción, suponiendo que éstos corresponderían a pozos profundos. En la primera capa se consideraron todos los derechos otorgados con caudales mayores a 4 l/s, los cuales ascienden a 88 resoluciones. Para la segunda capa, se seleccionaron, de entre los puntos restantes, aquellos con un caudal mayor a 0,25 l/s y que estuvieran distribuidos espacialmente de forma conveniente con el objetivo de cubrir la zona de análisis y facilitar la posterior generación de equipotenciales. Estas dos primeras capas sumaron los 100 pozos objetivo. De ser necesario, se contó con la ubicación de los 317 puntos restantes, los cuales se escogieron

en caso de falta de datos de los anteriores, priorizando los que presenten mayor caudal o una ubicación estratégica para la generación de equipotenciales (por ejemplo, zonas con escasos pozos, límites de la zona de estudio, etc.). La división de las dos primeras capas mencionadas se presenta en el Cuadro 7.2-1.

Cuadro 7.2-1 Selección de pozos para campaña de terreno

Capa	Criterio de selección	Rango de caudal	N° de resoluciones
Pozos 1	Mayor caudal	> 4 l/s	88
Pozos 2	Ubicación estratégica	> 0,25 l/s y ≤ 4 l/s	12
Subtotal (objetivo):			100
Pozos 3	Alternativos en caso requerido por falta de mediciones	> 0,25 l/s y ≤ 4 l/s	317
Total (inscritos):			417

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, la optimización de la actividad en terreno asociada a la medición del nivel freático conllevó enfocarse en los 100 puntos de las capas 1 y 2. De no lograrse la medición de nivel de los puntos necesarios, se escogió de los pozos restantes (capa 3) los que aportaron mayor información al estudio.

7.2.2 Campaña de terreno

La campaña de terreno fue realizada en un lapso total de tres semanas, midiendo el nivel del espejo de agua de un total de 103 puntos correspondientes a derechos de agua subterránea inscritos en el CPA, dividiéndose en dos periodos separados entre sí por un espacio de descanso de una semana. La primera campaña se llevó a cabo entre el día 17 y 27 de Julio de 2018; la segunda campaña, planificada para lograr los puntos restantes, se desarrolló entre el día 06 y 11 de agosto de 2018.

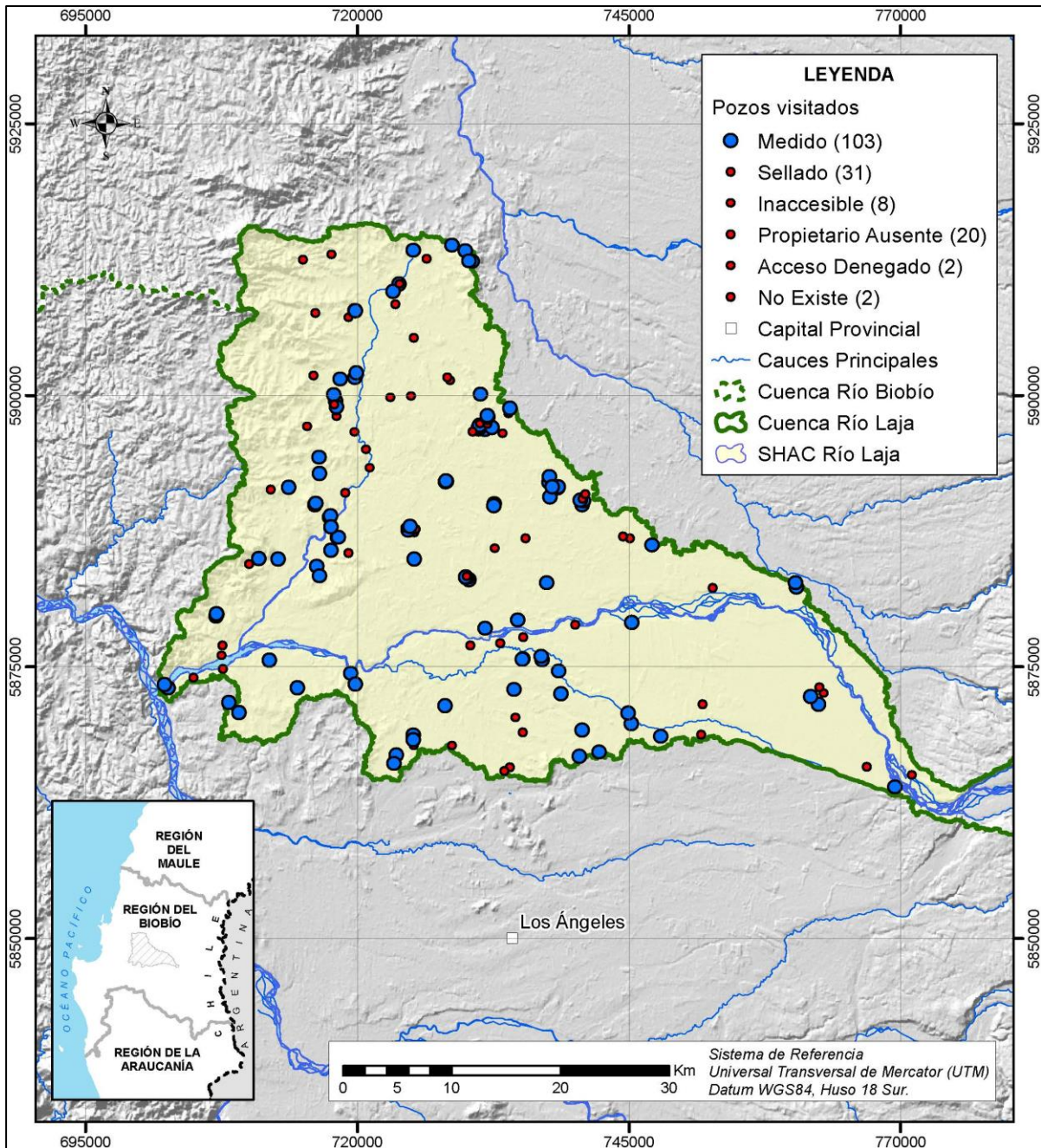
Durante las tres semanas que duró la campaña, se visitaron un total de 166 pozos; de éstos, se logró medir el nivel de agua en 103 pozos⁸. Los principales inconvenientes que se presentaron y que impidieron realizar la medición del nivel freático fueron los siguientes:

- Pozos sellados: En estos pozos no se presenta un orificio por el cual ingresar el pozómetro para medir la profundidad del espejo de agua.
- Accesibilidad o ausencia del propietario: La calidad de los caminos hizo imposible la llegada a estos pozos o el recinto donde se encuentra el pozo estaba cerrado y no se encontró a los dueños de éste.

⁸ Cabe señalar que 6 mediciones de nivel corresponden a pozos no inscritos en el CPA, y que se llegaron a éstos en el transcurso de la campaña por sugerencia de propietarios que espontáneamente facilitaban el acceso hasta éstos.

- Permisos o inexistencia: En alguna ocasión no se permitió el acceso o bien el pozo no se situaba en las coordenadas registradas.

En la Figura 7.2-1 se muestra la ubicación y distribución de los puntos visitados en la campaña de terreno; en ella se resume el número de casos en que no pudo efectuarse la medición de nivel.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2-1 Ubicación Pozos Visitados durante Campaña de Terreno

El inventario consistió inicialmente en verificar la identificación del pozo visitado, por entrevistado y propietario del mismo. Posteriormente, se validó la ubicación de la captación, detallando sus coordenadas tanto Norte como Este referenciadas en WGS84, huso 18S. Igualmente se constató la altura con respecto al nivel del mar a la que se encuentra el pozo. Estas mediciones fueron realizadas con instrumento GPS marca Garmín modelo eTrex 10⁹.

Luego, se procedió a realizar la medición del nivel freático mediante pozómetro. Se consideró medición de nivel estático en aquellos casos sin operación de bombeo en el último día; dadas las permeabilidades de la zona, los tiempos de recuperación de la napa no son especialmente altos. En general, se trató de obtener la mayor información por parte de propietarios o personal operativo con respecto al diseño, funcionamiento y uso de los pozos siempre que contaran con el respectivo conocimiento técnico. También se realizó registro fotográfico de la captación. Adicionalmente, en contadas ocasiones, se llevó a cabo toma de muestra para caracterizar las propiedades químicas *in situ* del agua subterránea¹⁰.

Si bien el objetivo de la campaña fue la medición de niveles, se recopiló mayor información según lo aportado por el personal. En la Figura 7.2-2 se muestra el formato del formulario correspondiente. En el Anexo 7.2 se recopilan todas las fichas completas de la campaña de terreno.

⁹ Cabe señalar que el GPS utilizado en la campaña de monitoreo no contó con sistema de corrección diferencial. Ello puede generar menor precisión en los resultados obtenidos, por lo que hay que considerar que las medidas tienen un error asociado a la propia lectura (coordenadas de ubicación y altura, en este caso).

¹⁰ Se midió pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos en 3 pozos. La medición de los parámetros de calidad citados, como adicional al monitoreo de niveles, no pudo hacerse extensivo a la mayoría de puntos por reticencias de los propietarios al muestreo y por un criterio de efectividad en terreno dado el tiempo de demora en cada punto de muestreo (distancia entre puntos, contacto y acceso con el propietario, charla de seguridad al acceso en terrenos pertenecientes a empresas, etc.).

GOBIERNO DE CHILE
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

SECTORIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL RÍO LAJA, REGIÓN DEL BIOBÍO

FORMULARIO CAMPAÑA DE TERRENO: INVENTARIO NIVELES FREÁTICOS

IDENTIFICACIÓN DE LA FICHA

Código Ficha _____ Código Expediente _____

Fecha _____ Entrevistado _____

Hora _____ Propietario _____

UBICACIÓN DE LA CAPTACIÓN

UTM Norte _____ (m) Datum _____ Huso _____

UTM Este _____ (m) Predio _____

Cota Terreno _____ (m.s.n.m.) Comuna _____

CARACTERÍSTICAS DE LA CAPTACIÓN

Nivel Estático _____ (m) Caudal explotado _____ (l/s) Prof. Perforada _____ (m)

Nivel Dinámico _____ (m) Caudal (del derecho) _____ (l/s) Prof. Habilitada _____ (m)

Diámetro _____ (m) Revestimiento _____ Tipo _____

USO DE LA CAPTACIÓN

Agua Potable Riego

Industrial Sin Uso

Otro Uso _____

FOTOGRAFÍA

OBSERVACIONES

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2-2 Formato del formulario Ficha Campaña de terreno: Inventario Niveles Freáticos

A partir de la información de los pozos que sí se logró la medición de nivel de agua, se presentan los siguientes análisis:

- **Nivel Estático:** Del total de 103 pozos medidos, se midieron niveles estáticos excepto en 11 casos en que los pozos se encontraron en funcionamiento en el momento de la visita, por lo cual se midió su nivel dinámico. De los pozos que se encontraron en reposo y se obtuvo su nivel estático, la profundidad varió dependiendo de su ubicación, mostrando generalmente niveles someros. En el Anexo 7.2 se incluye el listado completo de dichas mediciones.

En el Cuadro 7.2-2 se observa un resumen de la distribución de niveles de agua de los pozos, mientras que en la Figura 7.2-3 se visualizan los lugares donde se encontraron niveles a mayor profundidad y en los que el nivel de agua se acerca más a la superficie.

Cuadro 7.2-2 Profundidades del nivel estático de los pozos

Rango de profundidad del Nivel Estático	N° pozos
< 2 m	49
≥ 2 m y < 5 m	30
≥ 5 m y < 10 m	8
≥ 10 m	5
Total	92

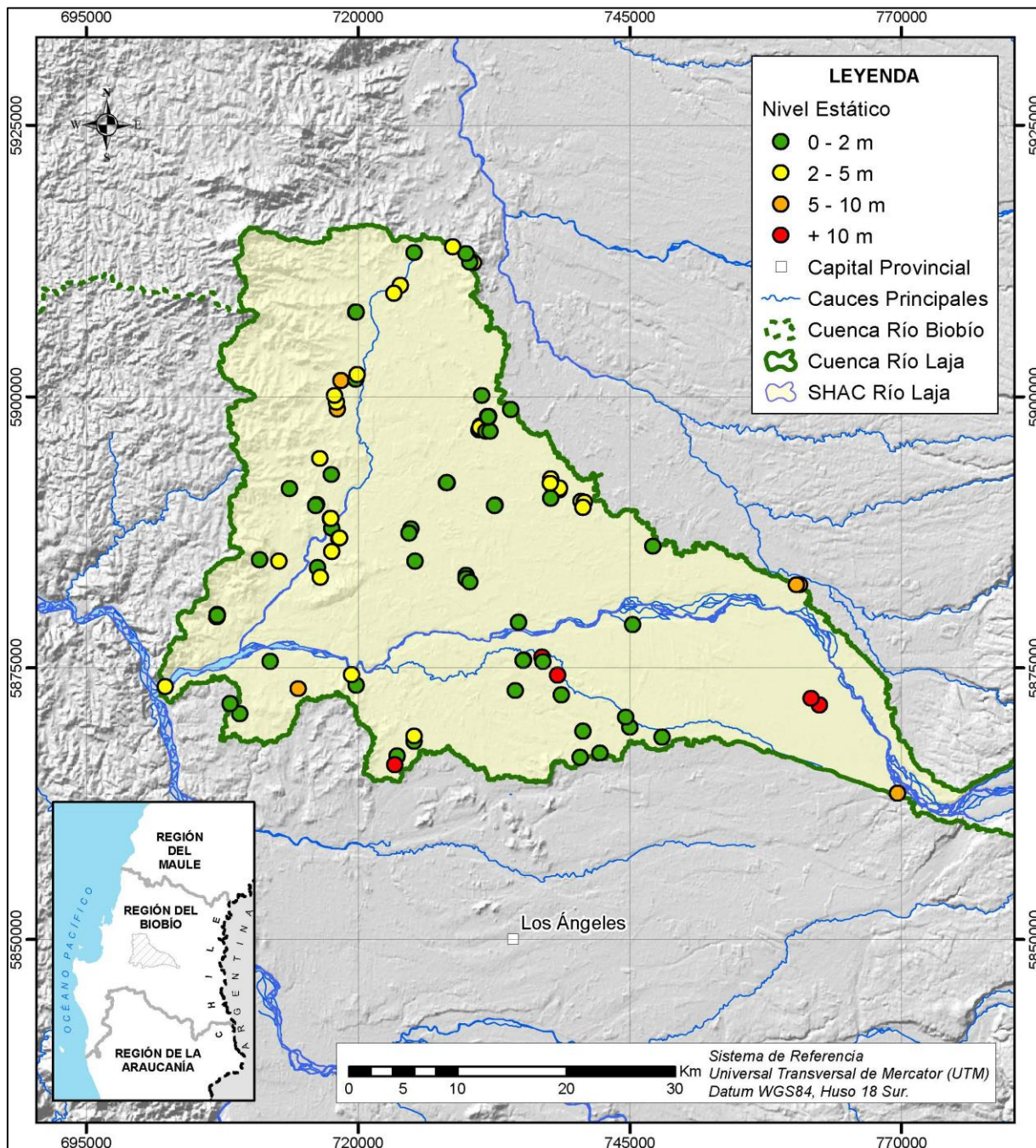
Fuente: Elaboración propia.

- **Tipología del pozo:** Según la profundidad y/o tipología de construcción del pozo de extracción de agua subterránea, estos se han clasificado, para la zona del SHAC del río Laja, como pozo profundo, puntera, noria o zanja. En el Cuadro 7.2-3 se muestra su cuantificación, mientras que en la Figura 7.2-4 se presenta su distribución espacial.

Cuadro 7.2-3 Tipología de las captaciones con medición de nivel

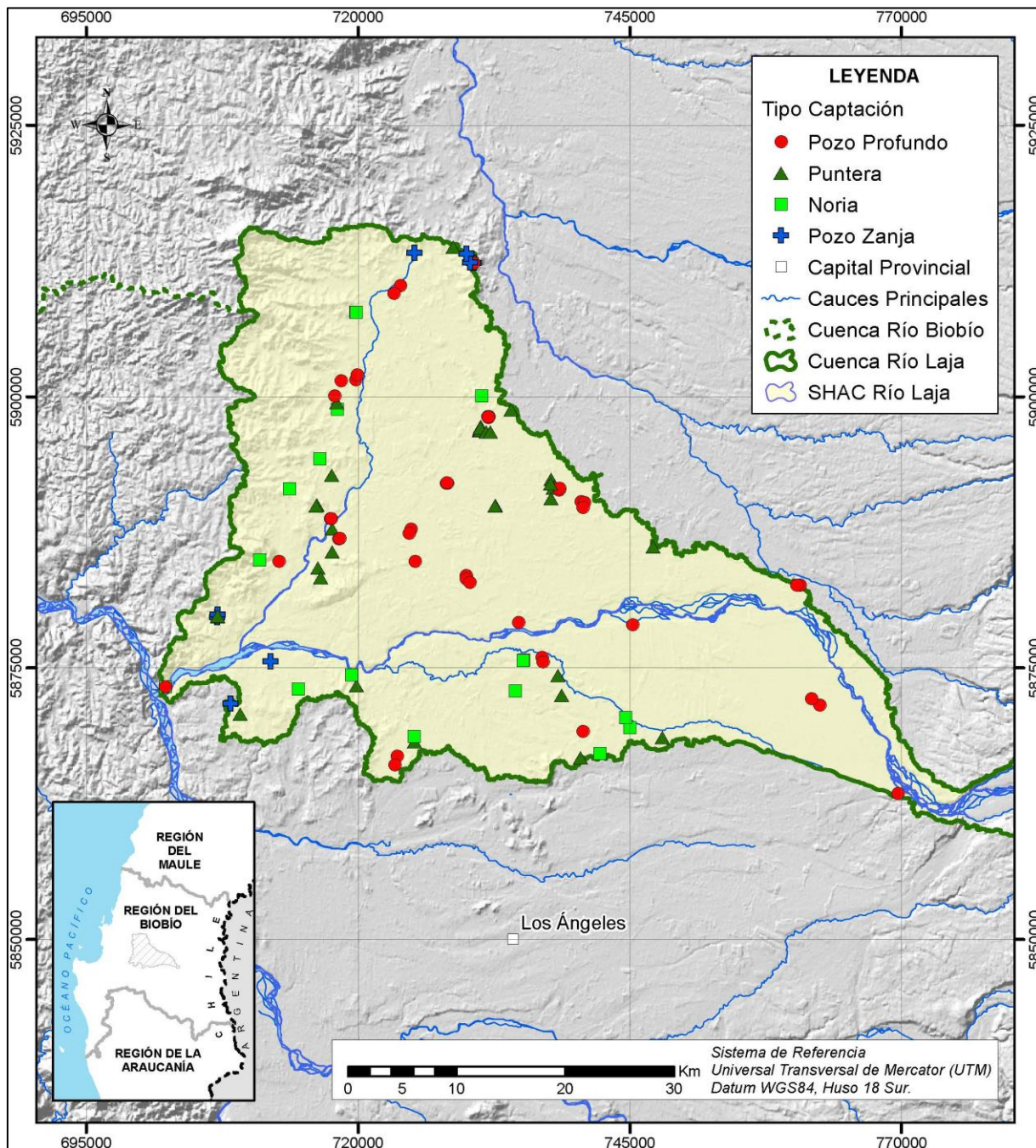
Tipo de captación	N° pozos
Pozo profundo	44
Puntera	34
Noria	17
Pozo zanja	8
Total	103

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2-3 Distribución espacial de los niveles estáticos de los pozos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2-4 Distribución espacial de la tipología de las captaciones

Con la información recabada en este acápite se procede a desarrollar las curvas equipotenciales para el SHAC del Laja.

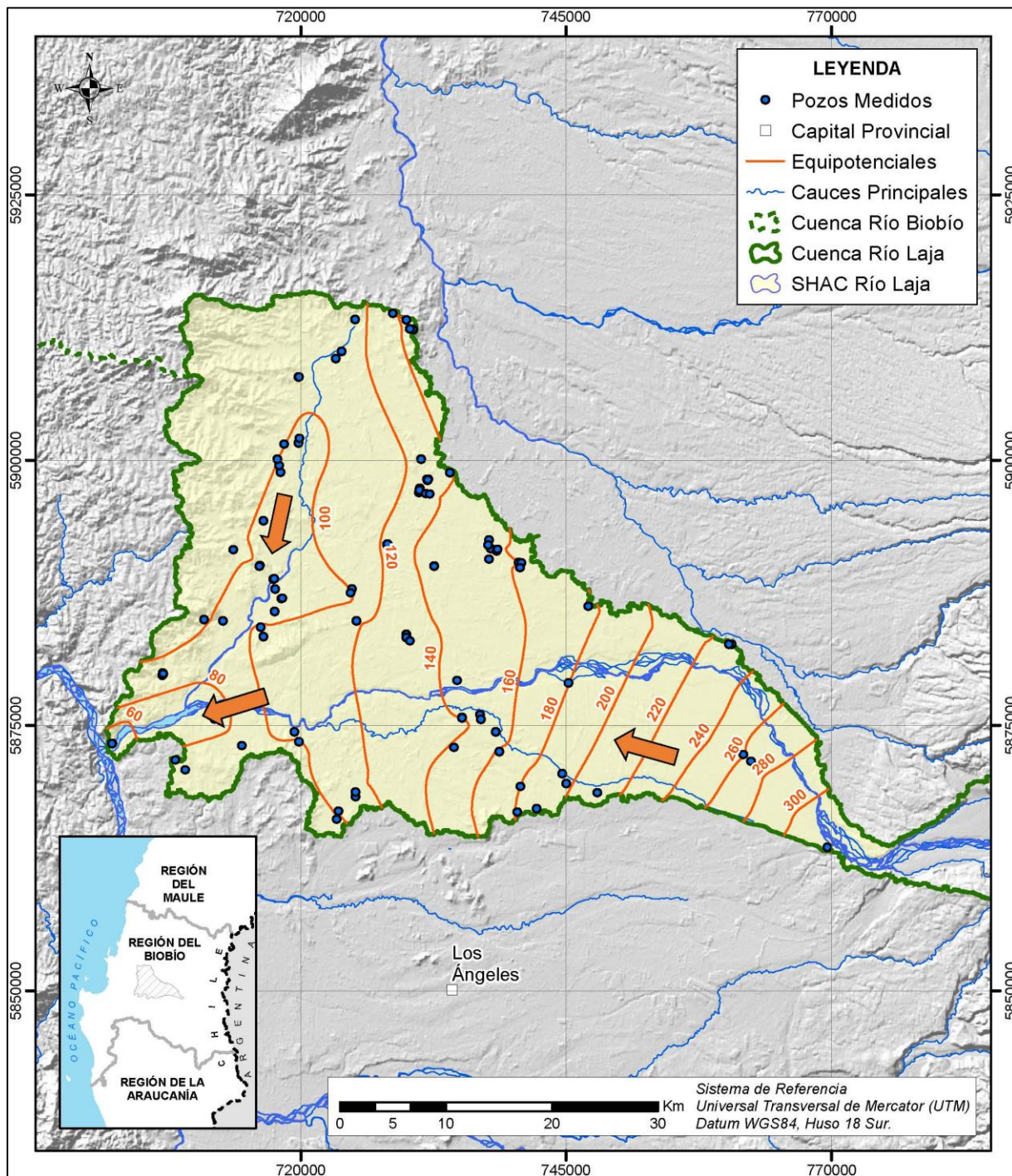
7.3 GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES

A partir de la información de nivel estático de los pozos procedentes de la campaña de terreno, se estiman las curvas equipotenciales del acuífero. Para generar dichas curvas, se interpolaron los datos de cotas de los niveles estáticos mediante el método *Natural Neighbor* con herramientas SIG, para posteriormente generar las curvas de nivel. Éstas se graficaron cada 20 m, resultando un rango comprendido entre los 320 m.s.n.m. y 40 m.s.n.m. en el sector estudiado. Los resultados se presentan en la Figura 7.3-1.

En términos generales, el flujo subterráneo transcurre de forma similar a la dirección y sentido de escurrimiento de los cauces superficiales de la subcuenca. Así pues, se observa que el sentido de escurrimiento avanza en sentido E-W, como el río Laja, hasta el sector del río Claro, en que las aguas subterráneas se mueven de norte a sur. La salida del acuífero se presenta en el extremo SW del área de estudio, coincidente con la zona de confluencia del río Laja en el río Biobío.

Comparando los resultados obtenidos de la campaña de monitoreo de niveles estáticos en pozos durante el estudio (Julio - Agosto 2018) con la campaña realizada durante los trabajos asociados al estudio DGA (2012) en la misma área (Agosto - Septiembre 2012) y presentada en el acápite 4.3.3, se observan las siguientes consideraciones:

- i. Se identifica una diferencia del valor del nivel freático en algunos sectores entre curvas equipotenciales de ambas campañas. Cabe señalar al respecto la diferencia temporal de la medida (2012 vs 2018), la diferencia en la cantidad y distribución de puntos medidos (49 vs 92 pozos), el error propio asociado a los instrumentos de medición (principalmente el GPS en la determinación de la Cota de Terreno) y la propia interpolación de los resultados que permiten generar las curvas isofreáticas.
- ii. Sin embargo, la dirección y sentido del flujo es similar en ambos casos (E-SW), salvo en la zona del río Claro en que las equipotenciales quedan mejor definidas en el presente estudio (sentido N-S del flujo claramente identificado).
- iii. Los niveles de agua en el presente estudio se detectaron en los primeros 5 m de profundidad (86% de los pozos), mientras que en el estudio DGA (2012) se obtuvieron profundidades de entre 0 y 5 m en el 61% de los casos; en cualquier caso, es la franja mayoritaria de ubicación de la napa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.3-1 Curvas equipotenciales y sentido de escurrimiento del SHAC del río Laja

7.4 CONCLUSIONES DE LA GENERACIÓN DE EQUIPOTENCIALES Y CAMPAÑA DE TERRENO

La campaña de terreno de monitoreo de niveles de agua en 103 pozos realizada entre Julio y Agosto de 2018 permitió recopilar los niveles freáticos en la mayor parte de la zona de estudio, de los cuales se observó que los niveles generalmente se presentan entre los 0-5 metros. Con las medidas tomadas en terreno se generaron las curvas equipotenciales, mostrándose un flujo subterráneo en sentido E a SW, excepto en el sector del río Claro, el flujo en el cual avanza de N a S, siguiendo la dirección y sentido del flujo de agua superficial.

CAPÍTULO 8 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO

8.1 INTRODUCCIÓN

En base a toda la información recopilada y analizada en los capítulos anteriores, se ha realizado la construcción del modelo conceptual del SHAC del río Laja, el cual considera los siguientes componentes:

- Representación hidrogeológica:
 - Formaciones acuíferas
 - Parámetros elásticos
 - Superficie piezométrica
 - Singularidades
- Balance hídrico:
 - Flujos entrantes al sistema
 - Flujos salientes del sistema

A continuación, se detalla cada uno de los anteriores aspectos.

8.2 REPRESENTACIÓN HIDROGEOLÓGICA

8.2.1 Formaciones acuíferas

Para el sector del SHAC del río Laja se ha determinado la existencia de distintas unidades geológicas que conforman el relleno de la depresión central, principalmente de edad cuaternaria, que a su vez controlan las características geomorfológicas de la zona. Estas unidades corresponden a un extenso abanico de abertura hacia el oeste, constituido por depósitos volcanoclásticos originados por colapso lateral del antiguo volcán Antuco, depositándose a su vez, sobre secuencias detríticas fluviales de importante potencial hidrogeológico.

En base a la definición de acuíferos descritos en DGA (2012), para el sector de estudio se define una sola formación acuífera, cuyas características tanto litológicas como hidráulicas

permiten derivarla en tres subunidades: Sub-acuífero 1, Sub-acuífero 2 y Sub-acuífero 3. Esta delimitación se presentó en la Figura 4.3-1.

En vista a esta descripción y adicional a las actividades de monitoreo de niveles en pozos realizadas en la campaña de terreno, se pudo constatar que la litología asociada al Sub-acuífero 1 efectivamente corresponde a secuencias volcánicas representadas por suelos de arenas de composición andesíticas a basálticas y gravas muy finas de color gris oscuro a negro (ver Figura 8.2-1). Estas características corresponden a la denominada unidad “Arenas del Laja”, asociada a los deslizamientos gravitacionales provocados por episodios volcánicos, y que fue definida por Thiele *et al.* (1998).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.2-1 Suelos de arenas observados durante la campaña de terreno en la zona central del área de estudio

En términos hidrogeológicos, esta primera formación figura con un importante potencial acuífero al representar sedimentos poco consolidados y de adecuada extensión lateral, principalmente en la zona centro-norte del SHAC, aun cuando se presentan algunos horizontes arcillosos¹¹ que contrastan la alta permeabilidad del medio.

Hacia el extremo sur del SHAC, y en las proximidades de los ríos Laja y Claro, aparecen sedimentos no consolidados fluvio-aluviales recientes. Se identifica como parte del sub-acuífero 2, compuesto principalmente por gravas, y arenas gruesas con poca presencia de limos y arcilla, además de bolones de composición principalmente lávica y en menor proporción, graníticas. Debido a esta misma composición heterogénea, se asignan

¹¹ Horizontes arcillosos observados a raíz de la revisión de los perfiles estratigráficos realizada en el acápite 6.2 Análisis de la estratigrafía existente.

potenciales hidrogeológicos medios a altos para las adyacencias de los cursos principales y hacia el sector sur del SHAC.

En menor medida aparecen detritos de origen glacio-lacustre asociados al descrito sub-acuífero 3, definido igualmente en DGA (2012). En general, esta unidad no presenta gran desarrollo dentro de los límites de la zona de estudio, manifestándose hacia la entrada del SHAC, siendo poco característico en el conjunto del área del mismo¹².

Por último, hacia el límite occidental del SHAC del río Laja (y en un reducido sector del sur), aparecen cuerpos intrusivos ígneos, representativos de la Cordillera de la Costa, los cuales debido a su misma naturaleza cristalina representan unidades de muy baja a nula relevancia hidrogeológica; en estos, el potencial acuífero podría estar focalizado sobre posibles suelos residuales de escaso espesor (ver Figura 8.2-2) y/o fisuras en rocas meteorizadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.2-2 Suelos residuales observados durante la campaña de terreno en la zona NW del área de estudio

- **Análisis de la geometría del acuífero**

Los resultados provenientes de la caracterización geoelectrica del relleno detrítico que ocupa el SHAC del río Laja confirmó las propiedades litológicas observadas desde el análisis de la estratigrafía presente en la zona.

¹² Cabe recordar que el estudio DGA (2012) analiza los sub acuíferos de la cuenca completa del Biobío.

La interpretación de los perfiles TEM permitió establecer la existencia de sedimentos saturados, principalmente de tipo granular, hasta (como mínimo) una profundidad de 400 m por debajo de la superficie¹³.

Espacialmente, y en base a los resultados de los perfiles gravimétricos, se considera que la potencialidad acuífera aumenta desde el límite SW del subacuífero 1 hacia la zona E de área de estudio, y de manera directamente proporcional a la profundización del basamento. Lo anterior es debido a la reducción del espesor del relleno hacia el extremo sur-occidental por la presencia de basamento a escasa profundidad.

Además, la reinterpretación de los valores de resistividad derivados desde antecedentes revisados, materializados concretamente en la línea gravimétrica (L5) -la cual mantiene una dirección N-S a lo largo del SHAC-, permitió definir igualmente una conducta de acortamiento en las formaciones acuíferas en sus extremos. Específicamente, en el norte del sub-acuífero 1 y en el sur del sub-acuífero 2 se detecta dicha reducción, ampliándose a medida que se introduce hacia la zona central del SHAC, alcanzando profundidades de hasta 1 km de espesor.

Por lo anterior, es posible estimar que, de acuerdo a la profundidad a la cual fue encontrada el basamento para la zona del SHAC del río Laja, se presentan rellenos sedimentarios de gran continuidad vertical.

8.2.2 Parámetros elásticos

En base a la recopilación de los distintos parámetros elásticos procedentes de la revisión de antecedentes tal como se describió en el acápite 4.3.4 del presente informe, se cuenta con un total de 39 pozos con información de permeabilidad, 95 con datos de transmisividad y 77 con valores de coeficiente de almacenamiento, todos ellos ubicados dentro de los límites de la zona de estudio. El rango de valores recopilados para cada uno se presentó en el Cuadro 4.3-3, y la ubicación de los pozos correspondientes en las Figuras 4.3-3 a 4.3-5.

Con el fin de obtener una representación espacial de estos parámetros en el área completa del SHAC, se seleccionaron expedientes de derechos de aprovechamiento de agua subterránea ubicados fuera de los límites de la zona de estudio, cercanos a ésta, que detallaran cálculos de las constantes elásticas en base a las pruebas de bombeos correspondientes. A raíz de esta revisión se añadieron 12 valores de permeabilidad adicionales, 16 nuevas transmisividades y 5 valores de almacenamiento, cuyos expedientes figuran dentro del Anexo 4.3.4-2.

¹³ Los ensayos de transiente electromagnético (TEM) sólo alcanzan a registrar una profundidad de aproximadamente 500 m.

Para la modelación de los parámetros, se seleccionó el método de interpolación *Natural Neighbor* del software ArcGIS, el cual interpola tomando en consideración puntos cercanos entre sí, sin crear cambios bruscos que no se hallen representados por la información provista.

Seguidamente se presenta mayor detalle del análisis de cada parámetro.

- **Permeabilidad**

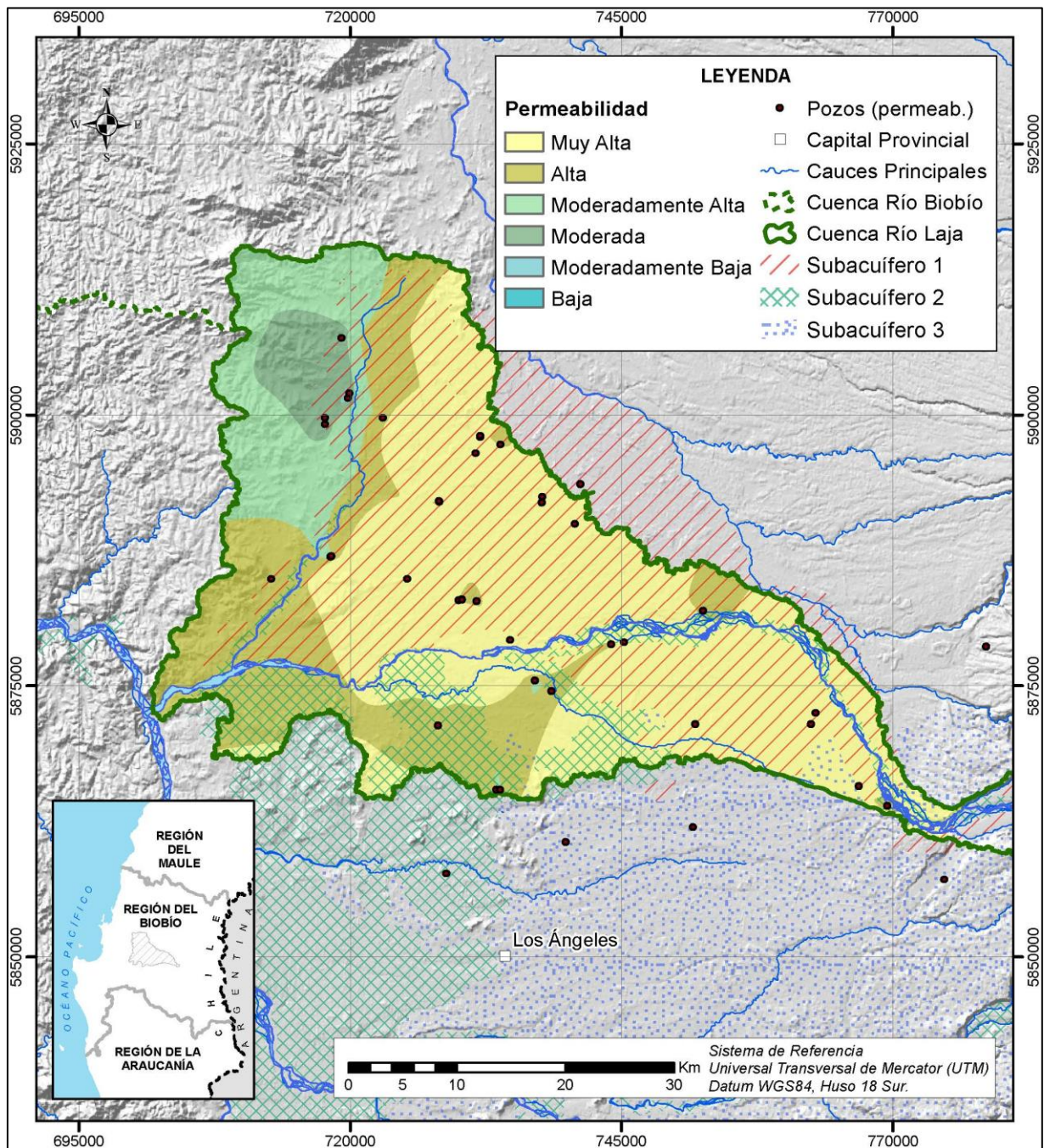
Para la modelación de los valores de permeabilidad, se utilizaron los rangos permeables establecidos por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1971), indicados en el Cuadro 8.2-1. La tabla de clasificación de la permeabilidad en base a los materiales sedimentarios fue seleccionada de entre varios autores que manejan clasificaciones similares principalmente por el rango de detalle para caracterizar el suelo, esto es, el número de clases (7) en que dividió la permeabilidad (entre “Muy Alta” y “Muy Baja”). Fueron descartadas otras clasificaciones, por ejemplo, de Custodio y Llamas (1983), por presentar un mayor grado de generalización, siendo que el principal objetivo de este estudio es realizar una sectorización en función de la posible variación en sus parámetros elásticos, entre otros.

Cuadro 8.2-1 Clasificación de materiales sedimentarios según permeabilidad

Clase de Permeabilidad	K (m/día)	Textura
Muy Alta	> 14,4	Arenas gruesas, gravas
Alta	3,84 - 14,4	Arenas arcillosas
Moderadamente Alta	1,2 - 3,84	Margas arcillosas
Moderada	0,384 - 1,2	Arcillas bien estructuradas, y ocasionalmente francos limosos
Moderadamente Baja	0,12 - 0,384	Limos y arcillas con apropiada condición estructural
Baja	0,0384 - 0,12	Arcillas pobremente estructuradas
Muy Baja	< 0,0384	Materiales limosos o arcillosos que carecen de vacíos orientados verticalmente; fuertemente cementados

Fuente: Elaboración propia modificada de USDA (1971).

En la Figura 8.2-3 se observa el comportamiento de este parámetro en relación a su ubicación espacial dentro del SHAC del río Laja.



Nota: Delimitación de sub acuíferos 1, 2 y 3 en base a DGA (2012).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.2-3 Permeabilidad en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja

En base a este análisis, se observa que gran parte de los valores manejados se ubican por encima de los 14 m/día, clasificándose como permeabilidades muy altas, características de suelos arenosos, lo cual se corresponde con las litologías revisadas para el sector. Acotándose a los sub-acuíferos descritos en DGA (2012) para el SHAC del río Laja, las permeabilidades más altas se distribuyen principalmente sobre el área cubierta por el sub-acuífero 1, asociados a arenas de granulometría fina, y ocupando algunas zonas de los sub-acuíferos 2 y 3. Para estos sectores se considera que la velocidad del flujo es “muy rápida” de acuerdo la clasificación antes descrita en el Cuadro 8.2-1 (del original, “*very rapid*” permeability class).

En menor proporción aparecen zonas con valores ubicados entre el rango “moderada” a “moderadamente alta” (0,384 – 3,84 m/día), coincidiendo con zonas donde se reconoce la existencia de cambios litológicos y acortamiento de espesores sedimentarios. Esta situación se aprecia hacia el límite occidental y hacia la zona de salida del SHAC.

- **Transmisividad**

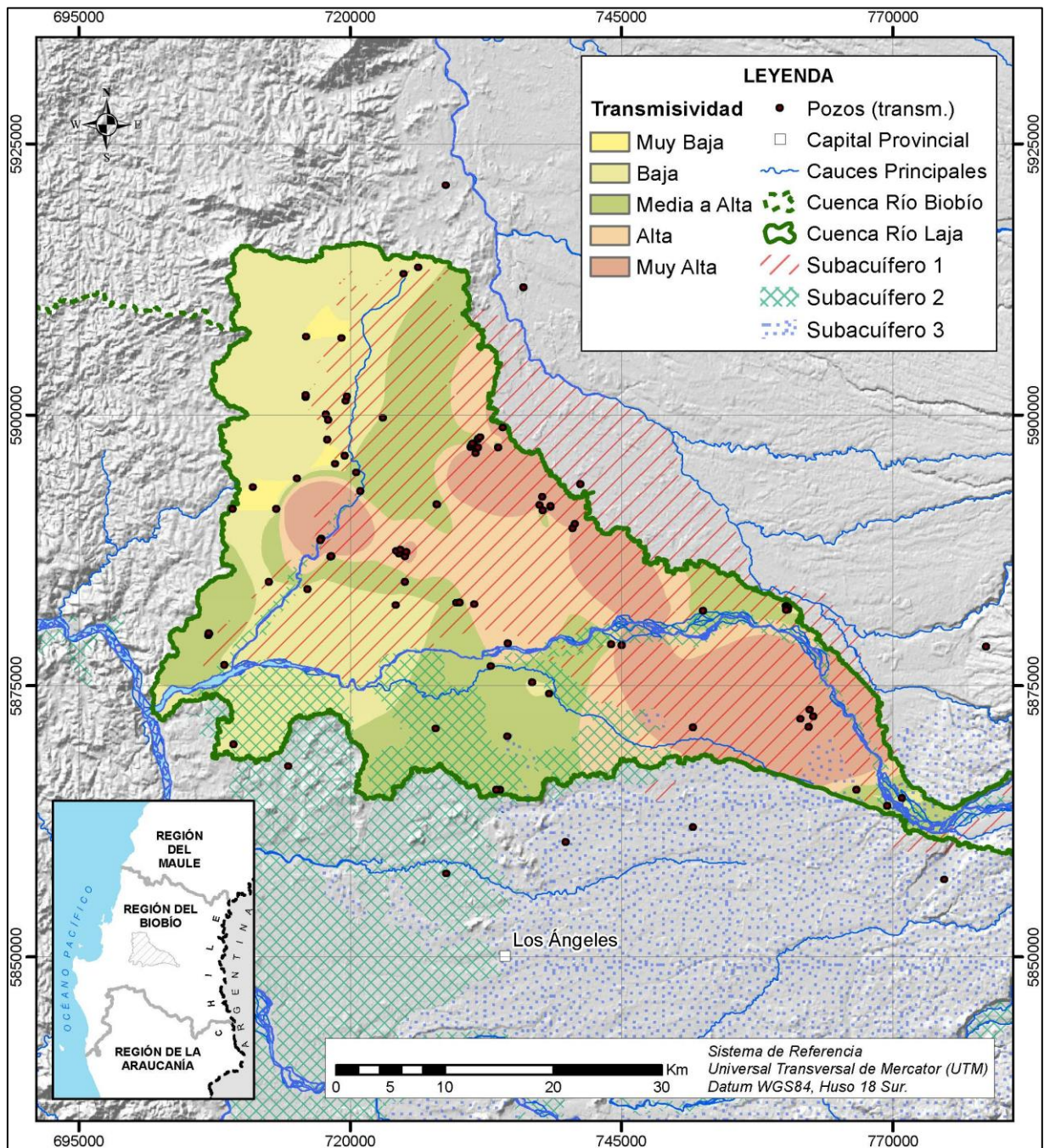
En cuanto a la transmisividad, se tomó como referencia la clasificación establecida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (Villanueva e Iglesias, 1984). Los valores típicos de transmisividad para acuíferos pobres o poco productivos aparecen como menores a 10 m²/día; asimismo, valores de 100 o más representan acuíferos de baja a media productividad, y mayor a 1.000 m²/día, acuíferos altamente productivos. En el Cuadro 8.2-2 se observa la clasificación en detalle. Se ha seleccionado, para el análisis espacial, esta clasificación sobre otras de otros autores porque es la que mejor se ajusta a una diferenciación de transmisividades entre 100 y superior a 1.000 m²/día; por ejemplo, Custodia y Llamas (1983) consideran el rango completo entre 100 y 1.000 m²/día terreno permeable y acuífero de regular a bueno, sin mayor especificación.

Cuadro 8.2-2 Clasificación de acuíferos en función de la transmisividad

T (m ² /d)	Calificación	Posibilidades del acuífero
< 10	Muy baja	Menos de 1 l/s con 10 m de depresión
10 - 100	Baja	Entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión
100 - 500	Media a Alta	Entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión
500 – 1.000	Alta	Entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión
> 1.000	Muy Alta	Más de 100 l/s con 10 m de depresión

Fuente: Elaboración propia en base a Villanueva e Iglesias (1984)

En la Figura 8.2-4 se observa la distribución de este parámetro de acuerdo a la modelación realizada.



Nota: Delimitación de sub acuíferos 1, 2 y 3 en base a DGA (2012).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.2-4 Transmisividad en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja

Los valores obtenidos son concordantes a las permeabilidades observadas. Si bien dentro de la zona de interés se tienen por lo general de medias a altas transmisividades (mayores a 100 m²/día), es posible definir zonas con mayores potenciales acuíferas hacia la entrada y centro del SHAC, donde se alcanzan máximos de hasta 11.450 m²/día. Ésta decrece de manera progresiva en sentido W, observándose bajas transmisividades hacia la salida de la zona de estudio y aún menores fuera de las áreas correspondientes a los sub-acuíferos (según DGA (2012)), esto es, hacia la cordillera de la costa, lo cual es esperable.

- **Almacenamiento**

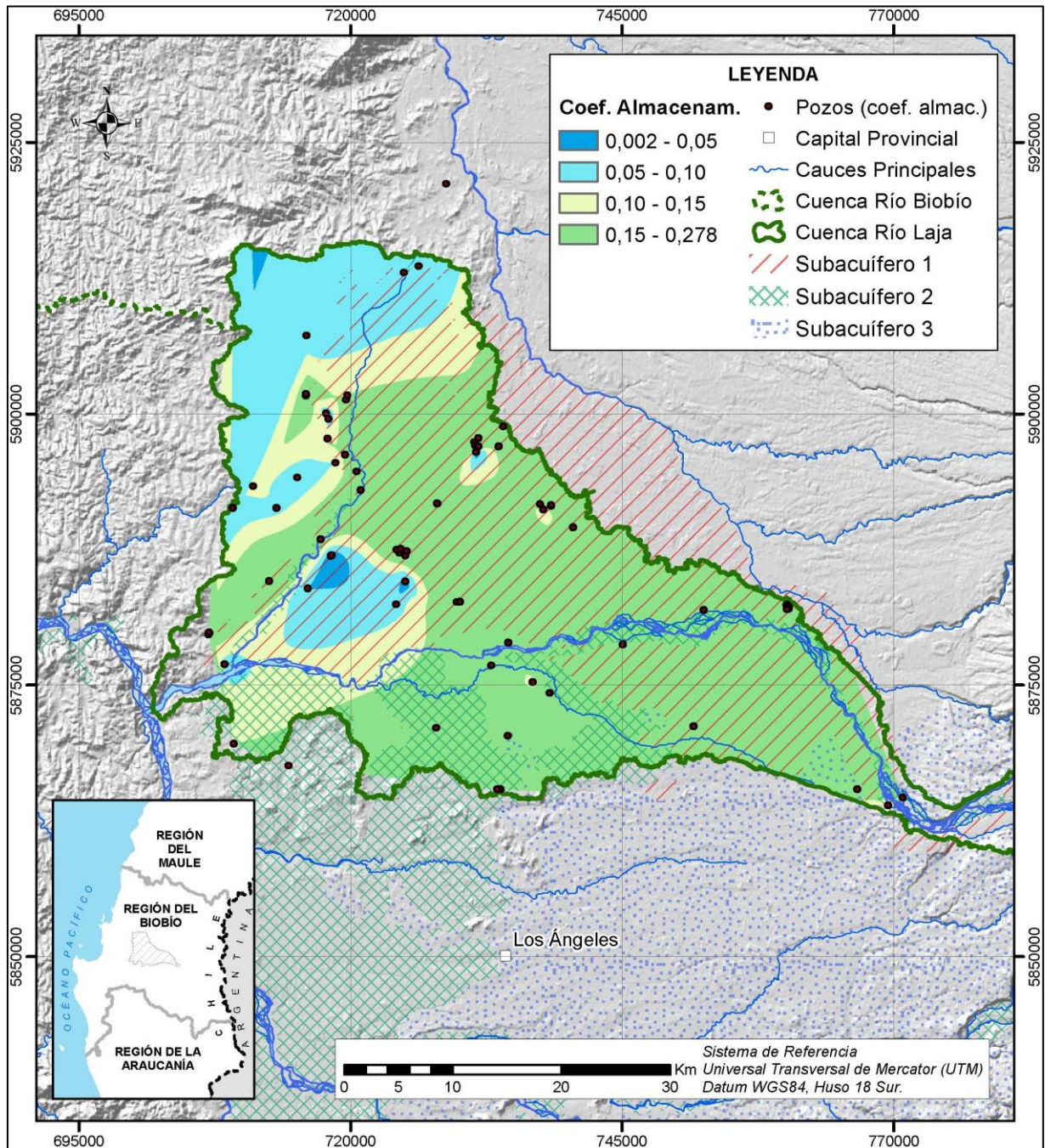
El coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que podría extraerse de un acuífero. Para el análisis de este parámetro se tomó igualmente como referencia la clasificación definida por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en Villanueva e Iglesias (1984) para materiales permeables de origen granular, tal como se observa en el Cuadro 8.2-3; esta clasificación se presentó acorde al tipo de descripción requerida para el presente estudio.

Cuadro 8.2-3 Coeficiente de almacenamiento en materiales porosos

Material Permeable	Acuífero	S (valores medios)
Poroso intergranular, gravas y arenas	Libre	5x10 ⁻² - 15x10 ⁻²
	Semi-confinado	10 ⁻³
	Confinado	10 ⁻⁴

Fuente: Elaboración propia modificada de Villanueva e Iglesias (1984)

En la Figura 8.2-5 se detalla la modelación del coeficiente de almacenamiento resultante para la zona de estudio.



Nota: Delimitación de sub acuíferos 1, 2 y 3 en base a DGA (2012).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.2-5 Coeficiente de almacenamiento en el área de estudio relativo al SHAC del río Laja

De acuerdo a la clasificación del Cuadro 8.2-3 y la Figura 8.2-5, el SHAC presenta en toda su extensión valores asociados principalmente a acuíferos libres, excepto por un pequeño sector anexo al cauce del río Claro que muestra una condición más cercana a tipo semi-confinado.

Sin embargo, el comportamiento general observado presenta una tendencia similar a los anteriores parámetros antes analizados; mejores potenciales acuíferos hacia el este y centro del SHAC, con notable decaída hacia el límite occidental.

8.2.3 Nivel freático y dirección de flujo

Tal como se indicó en el acápite 7.2.2, se realizaron 103 mediciones de niveles freáticos dentro del SHAC durante la campaña de terreno, correspondiendo a este total a 92 mediciones de niveles estáticos y 11 a niveles dinámicos. La profundidad de los niveles de aguas se manejó principalmente dentro de los primeros 5 m bajo la superficie, y en menor medida, entre los 5 m – 10 m y mayor a 10 m, respectivamente. Cabe señalar que las profundidades del nivel freático determinado en campañas de monitoreo de nivel de pozos no son directamente comparables con los resultados al respecto obtenidos de la interpretación de la geofísica realizada, ya que ésta arroja resultados a una escala mayor.

Con la información de niveles fue posible recrear el movimiento del flujo subterráneo, a través de la generación de curvas equipotenciales (ver Figura 7.3-1), con lo cual se observó una clara tendencia de escurrimiento análoga a los cauces superficiales. Específicamente, en la parte central del SHAC se mantiene un sentido de flujo E-W, siguiendo el curso superficial del río Laja, hasta su confluencia con el río Bío-Bío. Por otra parte, se observó un cambio en este flujo en las cercanías al río Claro, al oeste del SHAC, donde el agua subterránea discurre notoriamente en dirección N-SW, influenciada por cambios topográficos y por la presencia de formaciones rocosas de origen cristalino que actúan como barrera al movimiento de agua.

Esto último está acorde a lo mencionado por Arumí (2014a), el cual indica que el río Claro drena las aguas procedentes de la unión entre el sistema acuífero de las Arenas del Laja y la Cordillera de la Costa, escurriendo en una dirección Norte-Sur. Esto se refuerza analizando el balance hídrico del río Claro, en el cual este autor encontró que los caudales de verano eran anormalmente altos; considerando que durante la temporada de estiaje (octubre a abril) las precipitaciones tienen poco efecto en la generación de esorrentía, el caudal de verano casi constante es originado por el drenaje de las aguas subterráneas liberadas por los depósitos de arenas.

Este caso coincide con los resultados obtenidos en la modelación del flujo subterráneo a partir del monitoreo de los niveles estáticos de los pozos visitados en el área occidental del SHAC.

8.2.4 Singularidades

Como se expuso en el acápite 4.2.2, dentro del SHAC del río Laja se presentan condiciones litológicas que determinan la acumulación y movimiento del flujo subterráneo. Concretamente, existen dos formaciones que ameritan tratarse como singularidades del modelo conceptual del acuífero del río Laja, y que se mencionan seguidamente; éstas se identificaron en la Figura 4.2-2.

En primer lugar, la formación Curanilahue del Eoceno (Ec) está representada dentro del SHAC como capas de areniscas con presencia de algunas intercalaciones de arcillas bien consolidadas; dicha formación aflora en las cercanías al Salto del Laja, ocasionando la presencia de salidas de agua a modo de afloramiento a través de las rocas existentes.

En términos hidrogeológicos, esta formación compuesta principalmente por rocas detríticas presenta igualmente altas características permeables, por lo que se considera competente al acopio y traspaso de agua subterránea. Sin embargo, en comparación al potencial acuífero de todo el SHAC, estipulado especialmente en sedimentos no consolidados, su importancia quedaría relevada a un puesto más secundario.

En segundo lugar, en las cercanías a la salida de la zona de estudio, aparecen cuerpos ígneos intrusivos de edades Paleozoicas a Cretácicas cuyo aporte al potencial hidrogeológico del SHAC es más bien escaso. De acuerdo al comportamiento observado de la napa subterránea, se ha definido que estos grandes afloramientos granodioríticos sí condicionan la dirección de flujo en profundidad, y que la existencia de agua en estas zonas estaría más bien relacionada a flujos someros en suelos residuales provenientes del efecto de meteorización que actúa sobre estos cuerpos.

Se razona entonces tratar estos sectores intrusivos (CPg y Kiag) de forma particular en la posterior sectorización del acuífero, debido a la poca a la contribución hidrogeológica aportada.

8.3 BALANCE HÍDRICO

8.3.1 Entradas y salidas del sistema

El balance hídrico comprende la sumatoria de todos los flujos de entrada y salida que influyen e interactúan con la dinámica de un acuífero; los principales flujos en el SHAC del río Laja corresponden a:

- Entradas:
 - Flujo subterráneo de entrada al acuífero.
 - Recarga por precipitación.
 - Recarga desde cursos de agua superficial.
 - Flujos subterráneos de entrada desde acuíferos adyacentes.
- Salidas:
 - Afloramientos.
 - Extracciones (bombeos).
 - Flujos subterráneos de salida a acuíferos adyacentes.

Respecto de las entradas, existe un flujo subterráneo de entrada por el extremo E del acuífero; según Arumí *et al.* (2012a), la parte superior del río Laja corresponde a un río que infiltra agua hacia los sistemas de aguas subterráneas, gracias a que, en su curso superior, el río posee un cauce ancho, donde predomina el material gravo-arenoso.

Además, existe un componente de recarga por infiltración gracias a las precipitaciones; lo anterior fue cuantificado preliminarmente en el estudio DGA (2014) y presentado en el acápite 5.3 del presente informe. Igualmente, y dada la extensa red de canales existentes por la zona, y de acuerdo a los comentarios recogidos en la campaña de terreno, existe una componente de recarga de agua desde éstos durante la temporada de riego¹⁴.

Por otra parte, y en base a la información geofísica obtenida de los perfiles TEM, cabe señalar la factibilidad de flujo subterráneo desde acuíferos adyacentes, esto es, desde el SHAC Itata Superior en el N y del SHAC del Río Biobío en el S (ver Figura 1.3-2 con la situación de los acuíferos colindantes al SHAC del río Laja).

En cuanto a las salidas del sistema, cabría señalar los afloramientos de aguas subterráneas en el río Laja y en el río Claro; recordar que el río Claro actúa como eje de afloramiento de las aguas de las Arenas del Laja al encontrarse con el sistema de rocas intrusivas del W del sector, correspondiente a la Cordillera de la Costa.

¹⁴ Ciertos propietarios comentaron que, durante la temporada de riego, observaban un incremento del nivel freático de sus pozos.

Otro componente de salida del sistema acuífero corresponde a las extracciones por derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas otorgados, situadas en buena parte de la zona de estudio, excepto en el W en que éstas son menores (ver acápite 4.3.5).

Tal como se mencionó anteriormente, también se darían intercambios de flujo subterráneo entre acuíferos adyacentes (tanto de entrada como salida).

En principio, y en base a la información geofísica obtenida del perfil TEM situado en la salida del acuífero, se podría considerar que el flujo de agua subterráneo en la salida del acuífero es mínimo. La salida, en el SW del sector, coincide con un estrechamiento de la sección con afloramientos rocosos a ambos lados, y por tanto la sección acuífera potencial de conducir flujo subterráneo sería mucho menor (esto es, se considera que el flujo subterráneo aflora al río Laja).

8.3.2 Estimación del balance hídrico del sistema acuífero

El estudio DGA (2012) realizó, para la cuenca del río Biobío, un modelo hidrogeológico desarrollado mediante el software Visual Modflow 4.2, el cual resuelve las ecuaciones que rigen el movimiento del agua subterránea en un medio poroso aplicando el método de diferencias finitas.

A partir del citado modelo, se acotó el mismo exclusivamente a la zona de estudio del SHAC del río Laja, sin considerar en él las áreas de rocas intrusivas indicadas en el acápite 8.3.1.

Los resultados obtenidos, considerando un escenario “natural”, esto es, sin intervención antropogénica por las extracciones del acuífero se presentan en el Cuadro 8.3-1; así mismo, teniendo en cuenta los bombeos en el balance, los datos resultantes se muestran en el Cuadro 8.3-2.

Cuadro 8.3-1 Balance hídrico del acuífero del río Laja en condiciones naturales

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Desde límite E	2,43	8,77	-0,01
	Recarga superficial	5,11		
	Desde SHAC Itata	0,85		
	Desde SHAC Biobío	0,38		
Salidas	Afloramientos	8,14	8,78	
	Hacia SHAC Biobío	0,64		
	Pozos de bombeo	-		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Cuadro 8.3-2 Balance hídrico del acuífero del río Laja con extracciones

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Desde límite E	2,41	8,68	0,01
	Recarga superficial	5,11		
	Desde SHAC Itata	0,84		
	Desde SHAC Biobío	0,32		
Salidas	Afloramientos	7,52	8,67	
	Hacia SHAC Biobío	0,71		
	Pozos de bombeo ¹⁵	0,44		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Hay que tener en cuenta que elementos como el caudal de afloramiento o infiltración siempre presentan un grado de incertidumbre en su determinación.

Por otra parte, de los valores obtenidos, se desprende que la componente extractiva de agua por bombeos tiene relación directa con los afloramientos resultantes; es decir, al incorporar la acción de los pozos sobre el sistema (0,44 m³/s), el afloramiento pasa de 8,14 m³/s a 7,52 m³/s (0,62 m³/s de diferencia), disminuyendo el caudal aflorado correspondiente un 7,6% entre los dos escenarios considerados.

8.4 CONCLUSIONES DEL DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL ACUÍFERO

Teniendo en consideración la subdivisión de acuíferos realizada en el estudio DGA (2012) para la cuenca del río Biobío, fue posible delimitar zonas con mayor o menor potencial hidrogeológico dentro del SHAC del Laja. Parámetros como permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento analizados en toda la zona de estudio caracterizan, de manera general, que se maneja un potencial acuífero similar, siendo ligeramente menor en los extremos occidentales de los sub-acuíferos 1 y 2 respectivamente. Se presentan permeabilidades y transmisividades altas a muy altas principalmente en la zona central del SHAC del río Laja, típicas de suelos arenosos cuyos valores descienden ligeramente hacia el poniente, lo cual es coincidente con el adelgazamiento sedimentario observado en el análisis de los ensayos geofísicos efectuados. La profundidad de los niveles de agua se mantiene de manera regular dentro de los primeros 5 m bajo la superficie.

Se considera dar un tratamiento particular, debido a su comportamiento hidrogeológico con bajo potencial, a los cuerpos intrusivos ígneos que afloran al oeste del área de estudio. Por otra parte, cabe señalar la existencia de sedimentos consolidados al sur de la zona estudiada

¹⁵ El valor de extracción de los pozos fue obtenido del modelo del estudio DGA (2012), el cual incorporó las captaciones (pozos, drenes, punteras, etc.) con derechos asignados dentro del área de análisis, y el cual consideró un caudal de bombeo igual a los derechos otorgados por la DGA, ponderados por un factor de uso representativo de la eficiencia del uso del recurso.

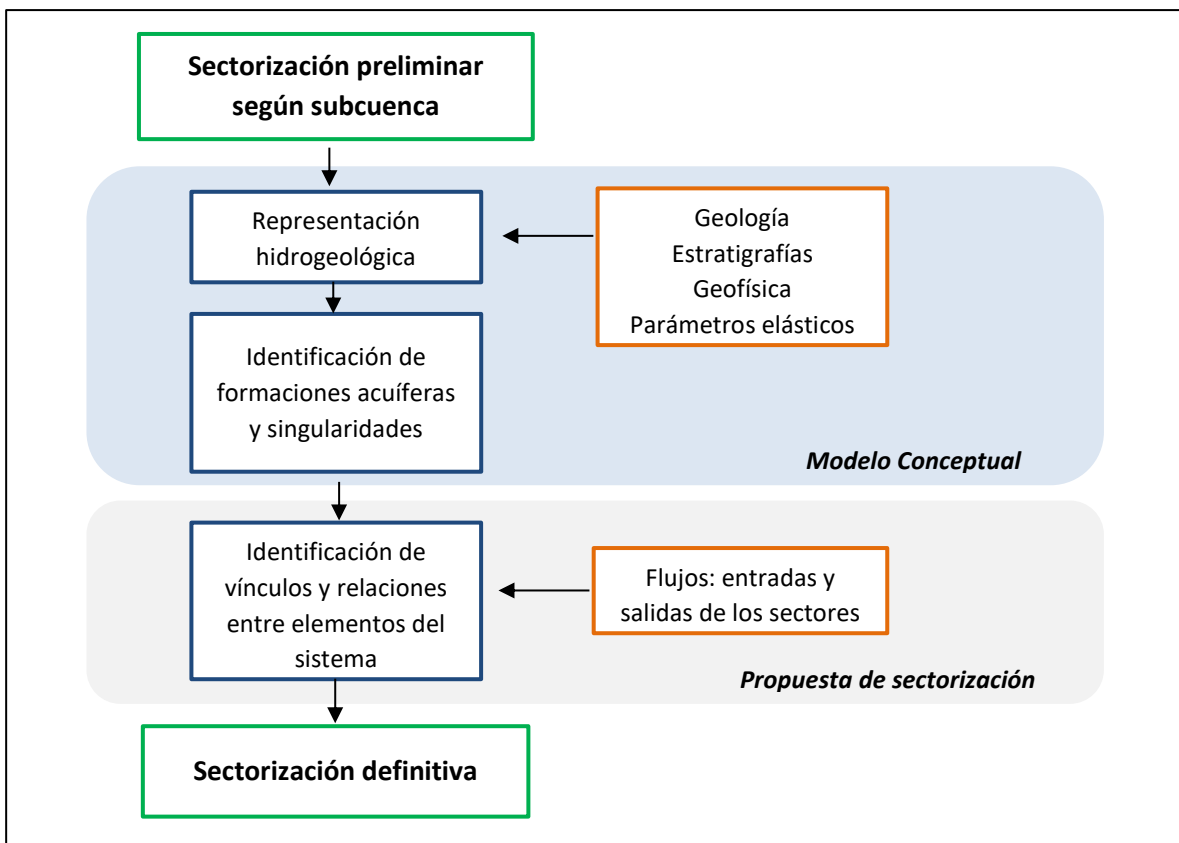
(correspondiente al entorno del Salto del Laja), los cuales, si bien tienen potencial hidrogeológico alto por ser rocas detríticas, se considera menor comparativamente al relleno no consolidado mayoritario en el resto del SHAC del río Laja.

Respecto del balance hídrico del acuífero, éste se obtuvo de la modelación numérica del estudio DGA (2012), del cual se concluye que la componente extractiva del agua por los bombeos existentes tiene una relación directa de afección sobre los afloramientos.

CAPÍTULO 9 PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN

9.1 INTRODUCCIÓN

En DGA (2014c) se recoge la metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos de Chile, en la cual se establece una secuencia de pasos a seguir para ello. En la Figura 9.1-1 se muestra la secuencia que se ha seguido y que se concluye en el presente capítulo para alcanzar la propuesta de sectorización del acuífero del río Laja.



Fuente: Elaboración propia modificada a partir de DGA (2014c).

Figura 9.1-1 Diagrama de flujo para la sectorización del acuífero del río Laja

En el presente estudio se ha partido de la sectorización preliminar según subcuenca, correspondiendo ésta a la subcuenca “Laja bajo” (código BNA 0838), el acuífero de la cual, tanto en el estudio DGA (2014) como en el Atlas del Agua (DGA, 2016c), se identifica como SHAC Río Laja.

9.2 SECTORIZACIÓN DEL ACUÍFERO

9.2.1 Delimitación del SHAC

En vista de las características hidrogeológicas analizadas en capítulos anteriores fue posible concluir que, dentro de la zona de estudio identificada preliminarmente como “SHAC Río Laja” en el estudio DGA (2014), se presentan tanto áreas de relleno (que conforman las unidades acuíferas) como zonas de rocas intrusivas.

Respecto de las zonas de relleno sedimentario, se presentan propiedades hidráulicas muy similares entre los sub-acuíferos definidos en DGA (2012), con permeabilidades y transmisividades que se manejan entre medias a altas en toda su extensión. Asimismo, el patrón de movimiento del agua subterránea observado no representa interrupciones o cambios abruptos en su dirección de flujo, manteniendo una dirección continua a lo largo de su paso por la zona de estudio. Por otro lado, el área comprendida por las rocas intrusivas del extremo oeste tiene, según su propia litología, un potencial hidrogeológico bajo o nulo.

Además, y en vista de las relaciones con SHAC colindantes (Itata, Biobío) presentados en el acápite 8.3.2 y los resultados de la interpretación geofísica de los perfiles TEM, tanto por el límite norte como por el sur del área de estudio existen intercambios de flujo de agua.

Cabe recordar que se define Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC), según el Art. 54 del Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas, como *“acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente”*.

Atendiendo a todo lo anterior, la delimitación del SHAC en este caso viene definida por las siguientes consideraciones:

- i. No se puede fijar un límite o contorno cerrado del acuífero del valle del río Laja, entendiendo como tal que éste quede circunscrito o rodeado en su totalidad de material impermeable, puesto que existen intercambios de flujo de agua con áreas adyacentes. Como referencia, el estudio DGA (2012) comprende un gran acuífero del Biobío en el valle central.

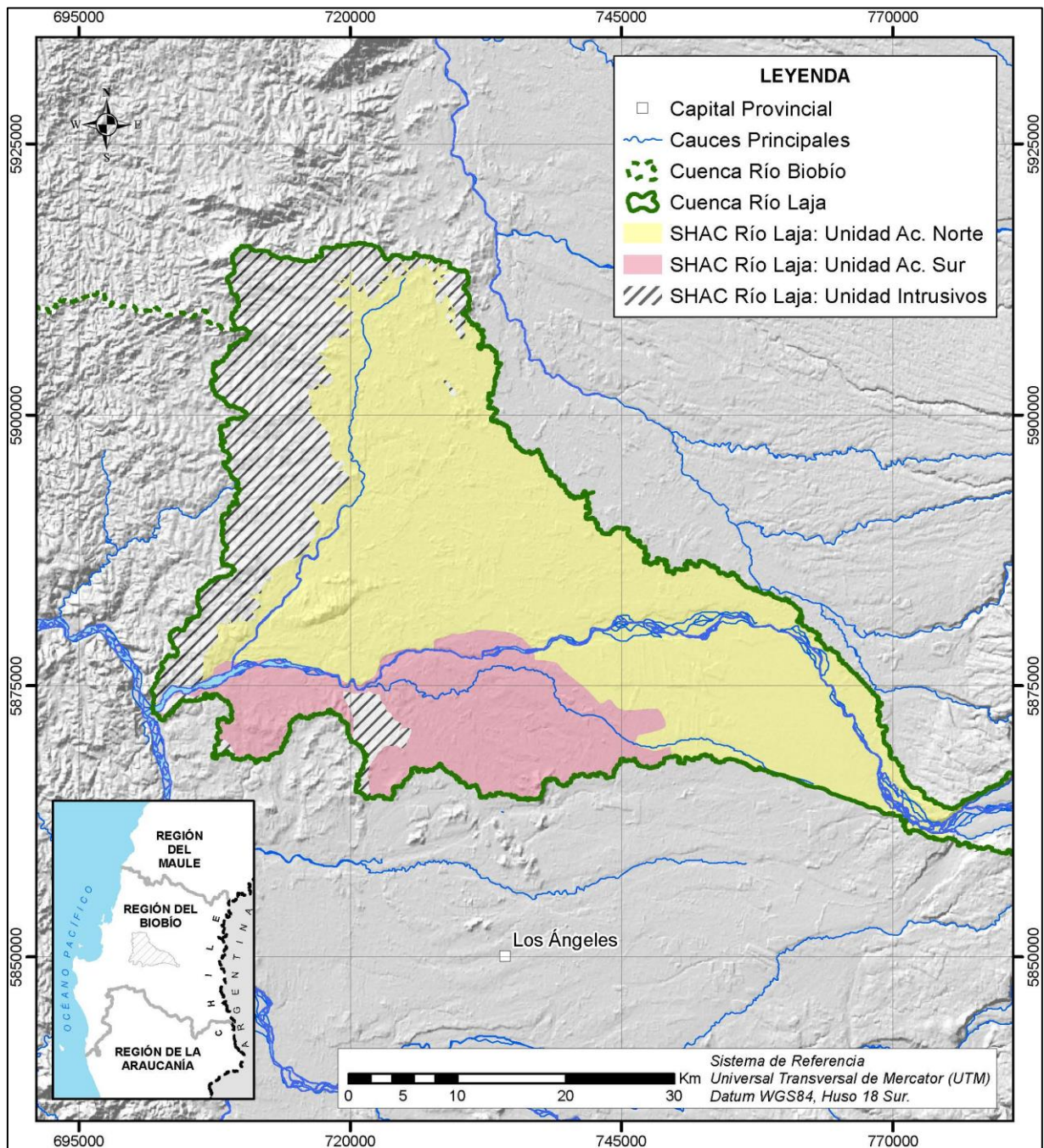
- ii. Existe una vasta zona de relleno sedimentario que conforma el acuífero del valle del río Laja, que parte desde el extremo oriental y ocupa gran parte del área de estudio.
- iii. Se identifica un límite rocoso en la zona oeste, caracterizado por rocas intrusivas, las cuales sí limitan el flujo de agua subterránea. En esta zona, si bien se no constituye como acuífero en términos hidrogeológicos, presenta extracciones existentes de carácter superficial (norias), las cuales se deben gestionar, pero de forma particular y/o local.

9.2.2 Unidades del SHAC

A través de la integración de los resultados obtenidos, fue posible establecer que, para la zona de relleno del SHAC del río Laja, los sub-acuíferos 1 y sub-acuífero 3 del estudio DGA (2012) presentan un comportamiento hidráulico muy similar, por lo que se considera factible unificar dichas secciones en un solo subconjunto que representa las zonas de alto potenciales acuíferos, en comparación a la conducta vista para el sub-acuífero 2, donde se manifiesta potenciales hidrogeológicos más bien medios. Esto no implica que la diferencia entre ambas zonas sea muy marcada, si no que se plantea como un criterio para la propuesta de sectorización del acuífero.

En la Figura 9.2-1 se muestra la propuesta de sectorización del acuífero asociado al SHAC del río Laja en base a los antecedentes recabados y análisis realizados en el presente estudio, dividiéndolo en 2 unidades acuíferas, además de la zona de rocas intrusivas del O de la zona estudiada. Un sector del acuífero asociado al SHAC del río Laja, nombrado como “Unidad Acuífera Norte”, abarca la mayor parte y se extiende del E hacia el NW, y tiene una superficie de 1.182,66 km². Por su parte, la “Unidad Acuífera Sur” está situada en el S como indica su nombre, y se extiende en 362,05 km², hasta la salida de la subcuenca. La “Unidad Intrusivos” comprende principalmente el sector poniente del SHAC, con un área total de 379,42 km², y caracterizada por un potencial hidrogeológico bajo y sólo a nivel superficial.

En el acápite 9.3 se presenta el análisis de vínculos entre unidades acuíferas y el balance hídrico de cada una.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9.2-1 Propuesta de sectorización del SHAC del río Laja

9.3 VÍNCULOS Y RELACIONES ENTRE ELEMENTOS DEL SISTEMA

La metodología recogida en el documento DGA (2014c) señala la necesidad de identificar los vínculos o conexiones entre los SHAC definidos en la Figura 9.2-1 para validar las dependencias entre los sectores colindantes. Por ello, si bien el balance general del SHAC del río Laja ha sido planteado en el acápite 8.3.2., los vínculos y relaciones entre elementos del sistema una vez determinados los sectores resultantes aportan una idea sobre los flujos particulares entre los mismos.

A partir del modelo hidrogeológico elaborado en DGA (2012), se analizó en forma separada las Unidades Acuíferas Norte y Sur, excluyendo la zona de intrusivos, obteniendo los siguientes balances, tanto en condición “natural” como en el escenario incorporando la componente extractiva de los pozos (Cuadros 9.3-1 a 9.3-4).

Cuadro 9.3-1 Balance hídrico de la Ud. Acuífera Norte en condiciones naturales

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Desde límite E	2,43	7,27	-0,01
	Recarga superficial	3,99		
	Desde SHAC Itata	0,85		
Salidas	Afloramientos	5,85	7,28	
	Hacia Unidad Ac. Sur	0,79		
	Hacia SHAC Biobío	0,64		
	Pozos de bombeo	-		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Cuadro 9.3-2 Balance hídrico de la Ud. Acuífera Sur en condiciones naturales

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Recarga superficial	1,12	2,29	0,00
	Desde Unidad Ac. Norte	0,79		
	Desde SHAC Biobío	0,38		
Salidas	Afloramientos	2,29	2,29	
	Pozos de bombeo	-		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Cuadro 9.3-3 Balance hídrico de la Ud. Acuífera Norte con extracciones

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Desde límite E	2,41	7,24	0,01
	Recarga superficial	3,99		
	Desde SHAC Itata	0,84		
Salidas	Afloramientos	5,33	7,23	
	Hacia Unidad Ac. Sur	0,79		
	Hacia SHAC Biobío	0,71		
	Pozos de bombeo	0,40		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Cuadro 9.3-4 Balance hídrico de la Ud. Acuífera Sur con extracciones

Flujo	Concepto	Caudal (m ³ /s)	Balance Parcial (m ³ /s)	Balance Total (m ³ /s)
Entradas	Recarga superficial	1,12	2,23	0,00
	Desde Unidad Ac. Norte	0,79		
	Desde SHAC Biobío	0,32		
Salidas	Afloramientos	2,19	2,23	
	Pozos de bombeo	0,04		

Fuente: Elaboración propia modificada de DGA (2012).

Tal como se observó en el balance general del SHAC Río Laja en el acápite 8.3.2, y según los resultados de la modelación numérica DGA (2012), la repercusión principal de la actividad extractiva de los pozos recae sobre el caudal de afloramiento en cada una de las unidades definidas. Queda también definida la relación entre sectores, en que el flujo, según el modelo, discurre desde la Unidad Acuífera Norte hacia la Unidad Acuífera Sur, probablemente en la parte final de la subcuenca, de acuerdo a las curvas equipotenciales obtenidas en la Figura 7.3-1.

9.4 CONCLUSIONES DE LA PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN

Respecto de la delimitación del SHAC del río Laja, se concluye que no puede fijarse un límite o contorno cerrado del acuífero dentro del área de estudio del presente informe, puesto que forma parte del gran acuífero del Biobío; así mismo, también se observan intercambios de flujo por el límite norte, desde la cuenca del río Itata. Sin embargo, se identifica una clara y vasta zona de relleno sedimentario que conforma el acuífero del valle del río Laja.

El SHAC del río Laja, entendido tal como el área analizada en el presente estudio y que parte de la delimitación de la subcuenca "Río Laja bajo", se ha dividido en 3 unidades. Las Unidades Acuíferas Norte y Sur poseen potencial hidrogeológico alto y medio, respectivamente. La

Unidad Intrusivos tiene un potencial hidrogeológico bajo o nulo, debido a su composición litológica.

En base a lo anterior, se analizan los vínculos y relaciones de las unidades entre sí y con los acuíferos adyacentes, identificando intercambio de flujo en los límites norte y sur de las Unidades Acuíferas con los SHAC del Itata y del Biobío, así como flujo entre estas 2 unidades propiamente. Se observa que la Unidad Intrusivos se comporta como una barrera en el flujo subterráneo, por lo que esta unidad debe enmarcarse en una explotación particular, mientras que las Unidades Acuíferas Norte y Sur están influenciadas entre ellas. Cabe destacar que, a partir del modelo del estudio DGA (2012), las extracciones (bombeos) en estas unidades afectan claramente sobre los afloramientos generados.

CAPÍTULO 10 DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

10.1 DEFINICIÓN DE OFERTA HÍDRICA

La oferta hídrica, en un acuífero, se corresponde con la cantidad de agua que entra al mismo, esto es, la recarga.

Sin embargo, de acuerdo al artículo 20 letra e del “Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas” (DGA, 2014b), la DGA constituirá derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas cuando sea legalmente procedente y siempre que “no se afecten derechos de aprovechamiento de aguas de terceros, considerando la relación existente entre aguas superficiales y subterráneas”. A su vez, el artículo 30 letra d del mismo reglamento establece que se declarará un determinado Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común como área de restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas, de oficio o a petición de cualquier usuario del respectivo sector cuando “los estudios técnicos indiquen que la demanda comprometida producirá una afección a los caudales de los cursos de aguas superficiales en más de un 10% del caudal medio mensual asociado al 85% de probabilidad de excedencia, durante 6 meses consecutivos”.

De este modo, la oferta hídrica de un acuífero puede estar limitada por el grado de afectación a cauces superficiales. Es por esto que, para el caso de la zona de estudio, la cual posee una importante componente de afloramientos, se considerará un análisis adicional de la afectación al río Laja.

10.2 ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

10.2.1 Recarga del acuífero

En primer lugar, de acuerdo a DGA (2014) y tal como se recogió en el acápite 3.5 del presente informe, el SHAC río Laja posee un volumen sustentable de 101.151.038 m³/año; este valor corresponde a la recarga total estimada en base a una precipitación media de aproximadamente 1.100 mm/año y un coeficiente de infiltración del 5%.

En segundo término, el estudio DGA (2012) realizó una estimación de la recarga para toda la cuenca del río Biobío mediante un modelo de simulación hidrológico simplificado, el cual

considera la interacción de sectores de riego, cauces superficiales, embalses y pozos de bombeo. De este modo, los valores de recarga superficial aplicados al modelo hidrogeológico corresponden a un valor estimado de 161.316.860 m³/año.

Por otro lado, bajo el supuesto que las extracciones subterráneas afectan directamente el caudal de afloramientos (como es reflejado en el modelo numérico del estudio DGA (2012) y observado en los balances hídricos resultantes para el SHAC del río Laja en acápites 8.3.2 y 9.3 del presente informe), se estima para cada mes el caudal correspondiente al 10% del caudal medio de 85% de probabilidad de excedencia para la estación Río Laja en Puente Perales¹⁶, tal como se presenta en el Cuadro 10.2-1.

Cuadro 10.2-1 Estimación del 10% del Q₈₅ en estación Río Laja en Puente Perales (08383001-8)

Mes	Caudal 85% (m ³ /s)	10% Q ₈₅	
		(m ³ /s)	(m ³ /año)
Ene	23,98	2,40	75.630.652
Feb	23,51	2,35	74.126.241
Mar	31,62	3,16	99.704.629
Abr	48,88	4,89	154.155.973
May	86,33	8,63	272.262.948
Jun	143,99	14,40	454.092.064
Jul	158,90	15,89	501.112.618
Ago	156,80	15,68	494.490.664
Sep	137,61	13,76	433.971.899
Oct	89,00	8,90	280.661.620
Nov	60,74	6,07	191.552.413
Dic	31,65	3,17	99.819.712

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo mostrado, la oferta hídrica para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se encontraría limitada por el grado de interferencia superficial-subterránea; esto sucede cuando el 10% del Q_{85%} es inferior al valor de descarga estimado en 101.151.038 m³/año. También se encontraría afecto el sistema superficial/subterráneo en el mes de abril tomando la referencia del valor de la recarga de DGA (2012), cuantificado en 161.316.860 m³/año. Sin embargo, esto no ocurre durante 6 meses consecutivos en ningún caso, por lo que se concluye que la oferta hídrica, en el caso del SHAC del río Laja, queda definida por la recarga al sistema.

¹⁶ Caudal determinado previamente en el acápite 3.4 Fluvimetría, valores recogidos en el Cuadro 3.4-3.

Si bien el cálculo preciso se debe realizar en el cierre de la cuenca, los registros de la estación río Laja en San Rosendo son escasos (1971-1983) y no permiten la realización de un análisis de frecuencias de manera correcta. Del mismo modo, no es posible considerar los aportes del río Claro (registros en el periodo 1985-2000). No obstante lo anterior, el cálculo realizado resulta conservador al considerarse un caudal menor que pudiera restringir la magnitud de la oferta y no afecta el resultado final, en vistas que se observan menos de 6 meses consecutivos en que el 10% del Q85% es inferior a la recarga de referencia, por lo se considera válido el anterior supuesto.

10.2.1 Recarga estimada de las unidades del acuífero

A continuación, se estima la recarga asociada a las unidades definidas en el acápite 9.2.2 tras el análisis de sectorización del área de estudio, a partir del valor estimado de recarga del SHAC del río Laja, valorada en 101.151.038 m³/año (DGA, 2014; DGA, 2016c). Se selecciona esta fuente ya que es la más conservadora entre las referencias de recarga al acuífero recopiladas en la revisión de antecedentes (DGA (2012) y DGA (2014)).

Se reproduce brevemente a continuación la metodología establecida en el “Estudio Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos” (DGA, 2014), así como el proceso de determinación de la recarga en cada unidad del SHAC del río Laja seguido.

- i. La ecuación para estimar la recarga al acuífero se define según la expresión:

$$R = A \cdot Pp \cdot C_i$$

donde:

- R: Recarga del acuífero (m³/año)
- A: Área de la cuenca (m²)
- Pp: Precipitación media (m/año)
- C_i: Coeficiente de infiltración (adimensional)

- ii. Los datos de superficie se han calculado a partir de las unidades establecidas en el presente documento: Unidad Acuífera Norte, Unidad Acuífera Sur y Unidad Intrusivos.
- iii. Los datos de precipitación media anual se han obtenido, para cada unidad, a partir de las isoyetas generadas en el presente estudio (ver Figura 3.2-2), de forma ponderada mediante el cálculo de las áreas y precipitaciones promedio anuales resultantes en cada caso.

- iv. El valor de coeficiente de infiltración para las Unidades Acuíferas Norte y Sur se ha mantenido en 5%, igual a lo considerado en el estudio DGA (2014) y atendiendo al hecho que se encuentran en el Valle Central y tienen carácter sedimentario. En el caso de la unidad identificada como “Intrusivos”, no se cree oportuno aplicar tal valor de infiltración, ya que el material rocoso presente no dispone de la capacidad infiltradora considerada en las otras unidades. Si bien puede presentar un potencial hidrogeológico bajo (justificado por la presencia de norias en ciertos puntos de la unidad), se estima apropiado asignar en esta unidad un coeficiente de infiltración del 1%¹⁷.
- v. Podría pensarse que el volumen de agua no infiltrada en la Unidad Intrusivos y generada como escorrentía superficial actuara como recarga sobre la napa de la Unidad Acuífera Norte, de acuerdo al sentido del flujo de agua; sin embargo, dicho supuesto no aplicaría, debido a la proximidad con el cauce del río Claro, el cual interceptaría cualquier escurrimiento superficial o subsuperficial proveniente de la unidad de intrusivos. Además, la consideración anterior corresponde a una definición conservadora.

En base a las consideraciones anteriores, los valores resultantes de estimación de recarga se presentan en el Cuadro 10.2-2.

Cuadro 10.2-2 Estimación de recarga en las Unidades del SHAC del río Laja

SHAC Río Laja	Área (km ²)	Precip. Media (m/año)	Coef. Infiltración (%)	Recarga estimada (m ³ /año)
Ud. Ac. Norte	1.182,66	1,07	5%	63.418.377
Ud. Ac. Sur	362,05	1,02	5%	18.448.790
Ud. Intrusivos	379,42	1,08	1%	4.108.563
	1.924,13			85.975.730

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados anteriores se observa que la recarga principal cuantitativamente se genera en la Unidad Acuífera Norte, debido a su mayor extensión de área aportante al acuífero. Se obtiene un volumen de recarga para el conjunto del área de estudio de 85.975.730 m³/año, cifra inferior a 101.151.038 m³/año, estimada preliminarmente en el estudio de DGA (2014), debido principalmente a la revisión a la baja (de 5% a 1%) del coeficiente de infiltración aplicado en la Unidad de Intrusivos del sector oeste, por su propia característica litológica.

¹⁷ En DGA (2014), los valores de infiltración considerados fueron: 5% en subcuencas del Valle Central, 2% en subcuencas de la Cordillera de la Costa y 1% en subcuencas de la Cordillera de los Andes. En la Unidad Intrusivos del SHAC del río Laja, dada la ausencia de zonas de relleno y siendo mayoritariamente terreno rocoso, éste se asemejaría al comportamiento de las subcuencas de Los Andes.

10.3 CONCLUSIONES DE LA DETERMINACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

Se comprueba que, en base a lo establecido en los artículos 20 e) y 30 d) del Reglamento sobre normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (DGA, 2014b), la oferta hídrica del acuífero del río Laja no está limitada por la afectación a cauces superficiales (el río Laja en este caso), por lo que se considera que la oferta hídrica corresponde a la propia recarga. Consecuentemente, se estima la recarga de agua proveniente de las precipitaciones según la metodología aplicada en el estudio DGA (2012) para cada una de las unidades del SHAC del río Laja definidas en el Capítulo 9, considerando factores de infiltración del 5% en aquellas de origen sedimentario, y del 1% en la unidad de material intrusivo. En total, se obtiene una recarga estimada de 85.975.730 m³/año.

CAPÍTULO 11 IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS

11.1 BRECHAS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA

Una de las brechas identificadas durante la elaboración del estudio se presenta en relación a la escasa información referente a ensayos geofísicos de tipo transiente electromagnético (TEM) en la zona del SHAC del río Laja. De acuerdo a los resultados obtenidos desde la revisión de antecedentes geofísicos, si bien se encontró una alta disponibilidad de información gravimétrica previa a la ejecución de las nuevas pruebas, existen escasas referencias a la disposición de los estratos que conforman el relleno de toda la cuenca baja del Laja.

Se recomienda entonces una futura campaña geofísica que contemple al menos 50 mediciones TEM adicionales, situadas en dirección norte-sur, por ejemplo, coincidente con la sección gravimétrica L5 generada, para así definir las características estratigráficas de la zona central del SHAC.

11.2 BRECHAS EN REGISTROS DE CONTROL HIDROMÉTRICO

Respecto del control hidrométrico, se han identificado diversas brechas a la hora de extraer información histórica espacial en el SHAC del río Laja. Las principales propuestas de mejora y/o ampliación en este ámbito son:

- **Control fluviométrico:** Sería interesante contar con registros fluviométricos del río Laja en la salida de la cuenca, puesto que actualmente no existe ninguna vigente; ello sería importante para determinar los afloramientos, ya que sí se dispone de estaciones fluviométricas en la entrada de la subcuenca (río Laja en Tucapel 2), en su tramo central (río Laja en Puente Perales). También se considera conveniente contar con registros de su afluente principal en este tramo, el río Claro.
- **Control de calidad de aguas subterráneas:** No existe ninguna estación de calidad de aguas subterráneas perteneciente a la Red Hidrométrica de la DGA. Ello supone un vacío de información físico-química de las aguas de los sectores acuíferos, por lo que se cree oportuno la instalación de una (o más de una) en lugares representativos de los sectores definidos y de acuerdo al sentido de escurrimiento de las aguas.

- **Control de nivel freático:** Si bien en el SHAC del río Laja existen 3 pozos de nivel freático (ver Cuadro 11.2-1), éstos disponen de una cantidad de registros muy limitada para realizar un análisis detallado de la evolución de la napa. Por ello, se estima oportuno seguir con las lecturas en los mismos y a su vez disminuir el periodo entre lecturas, para captar posibles oscilaciones interanuales. Además, cabe destacar que las tres estaciones se sitúan en el SHAC Río Laja Norte, por lo que sería valioso incorporar al menos un pozo en el SHAC Río Laja Sur.

Cuadro 11.2-1 Estaciones de control de nivel en pozos en el SHAC del río Laja

Cód. BNA	Nombre	Periodo de registro disponible	N° Registros
08381012-2	YUNGAY en Posta Campanario	02/04/2014 a 29/08/2016	9
08384000-5	CABRERO en Municipalidad	26/02/2015 a 22/06/2016	4
08385005-1	YUMBEL en Estadio Municipal	29/09/2015 a 22/06/2016	3

Fuente: Elaboración propia en base a los registros DGA (Red Hidrométrica).

11.3 CONCLUSIONES SOBRE BRECHAS DE INFORMACIÓN

En términos generales, los puntos críticos en cuanto a falta de información para el estudio del acuífero del río Laja son los relativos al control de nivel freático (por escasos registros históricos) y de calidad de aguas subterráneas (debido a la ausencia de estaciones de esta tipología en el área de estudio).

CAPÍTULO 12 IMPLEMENTACIÓN DEL SIG

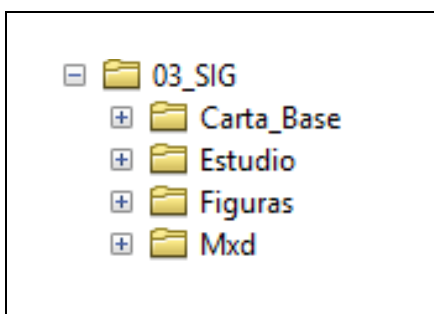
Se presenta a continuación una descripción de los trabajos realizados para generar el Sistema de Información Geográfica (SIG, en adelante). El SIG se ha desarrollado de manera que sea funcional, permitiendo el trabajo y manejo de la información, facilitando la visualización, consulta y procesamiento de la información recopilada en este estudio.

12.1 PLATAFORMA COMPUTACIONAL

Los trabajos SIG fueron elaborados con el software ArcGis 10.1 de Esri. La información recopilada, analizada y generada se muestra en una serie de capas temáticas, con lo cual es posible realizar un análisis de los datos. La cartografía final resultante para el presente estudio se presenta a través de proyectos *.mxd.

12.2 SISTEMATIZACIÓN Y ORDENAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

De acuerdo a los requisitos del estudio se ha desarrollado una serie de mapas bajo una estructura de carpetas en ambiente ArcGis, siguiendo el esquema de la Figura 12.2-1:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12.2-1 Estructura SIG del estudio SHAC Río Laja

A continuación, se describe el contenido de cada una de ellas:

- i. CARPETA “CARTA BASE”. La cartografía base corresponde a una serie de *shapefiles*, archivos ráster y geodatabase con información territorial del SIG de la Dirección General de Aguas (DGA).
- ii. CARPETA “ESTUDIO”. Contiene capas en formato *shapefile* y ráster de la recopilación y análisis geográfico realizado en el presente estudio. Se caracterizan por contener un nombre muy descriptivo que indica su contenido, o bien, lo que representan. Por ejemplo, “Formaciones_Geologicas.shp” corresponde a las formaciones geológicas presentes en el área de estudio. La información de esta carpeta se encuentra en el sistema de referencia UTM Huso 18 sur, conforme la mayor parte del área se encuentra en este huso UTM.

Name	Type
Coef_Almacenamiento_Modelo.shp	Shapefile
Cuenca_Rio_Biobio.shp	Shapefile
Cuenca_Rio_Laja.shp	Shapefile
Curvas_Equipotenciales_DGA2012.shp	Shapefile
Derechos_en_Tramite.shp	Shapefile
Derechos_Otorgados.shp	Shapefile
Equipotenciales.shp	Shapefile
Est_Calidad_Laja.shp	Shapefile
Est_Fluviom_Laja.shp	Shapefile
Est_Meteo_Laja.shp	Shapefile
Formaciones_Geologicas.shp	Shapefile
Geomorfologia.shp	Shapefile
Grav_DGA2012.shp	Shapefile

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12.2-2 Ejemplo de parte del contenido Carpeta “Estudio” del SIG

En el Cuadro 12.2-1 se describen las coberturas recopiladas y/o generadas para el presente estudio:

Cuadro 12.2-1 Coberturas SIG de la Carpeta “Estudio”

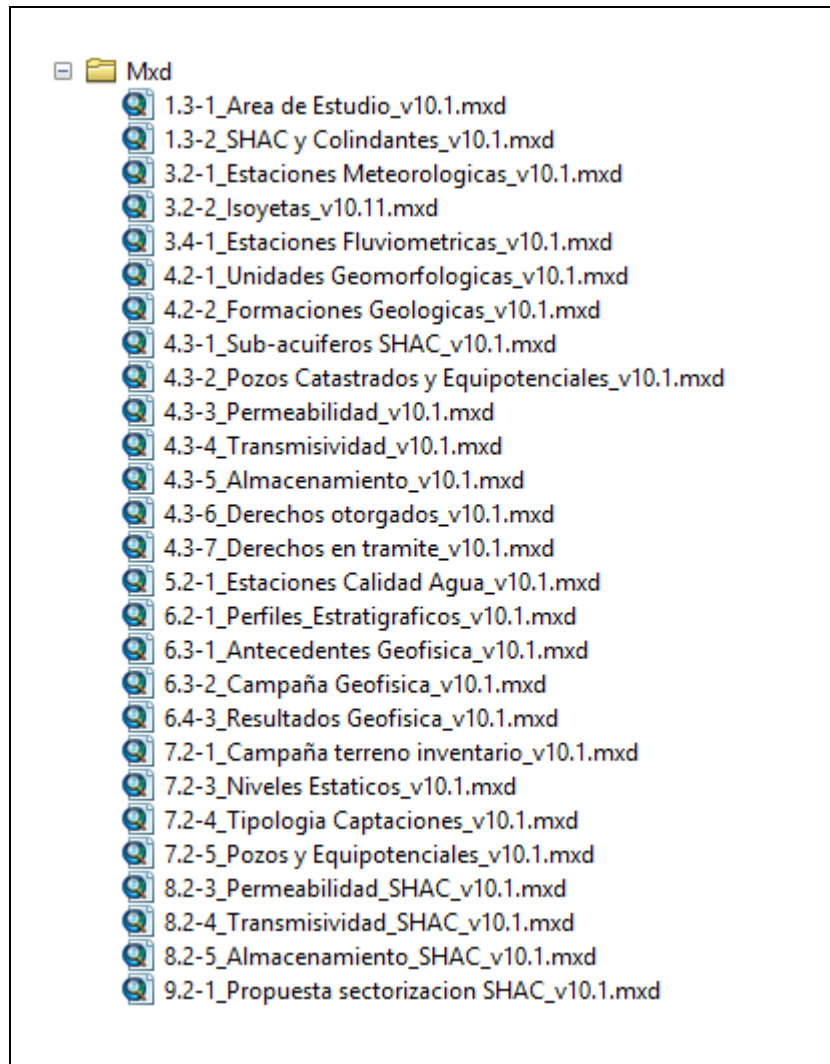
Origen	Nombre	Tipo de cobertura	Descripción
Mapoteca DGA	Cuenca_Rio_Biobio	SHP (polígono)	Delimitación de la cuenca del río Biobío
	Cuenca_Rio_Laja	SHP (polígono)	Delimitación de la cuenca del río Laja
	SHAC_Laja	SHP (polígono)	Delimitación del área de estudio del SHAC del río Laja
	Est_Fluviom_Laja	SHP (puntos)	Estaciones fluviométricas de la red hidrométrica de la DGA consideradas en el estudio
	Est_Calidad_Laja	SHP (puntos)	Estaciones de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la red hidrométrica de la DGA consideradas en el estudio
	Est_Meteo_Laja	SHP (puntos)	Estaciones meteorológicas de la red hidrométrica de la DGA y DMC consideradas en el estudio
	Isoyetas_SHAC	SHP (líneas)	Isoyetas generadas en el área de estudio del SHAC del río Laja a partir de la precipitación promedio de la cobertura Est_Meteo_Laja.shp
“Estudio Hidrogeológico Cuenca del Biobío” (DGA, 2012)	Acuíferos_Biobio_DGA2012	SHP (polígono)	Delimitación de los sub-acuíferos de la cuenca del Biobío
	Curvas_Equipotenciales_DGA2012	SHP (líneas)	Curvas equipotenciales de la campaña de terreno, año 2012
	Pozos_DGA2012	SHP (puntos)	Niveles estáticos de pozos de la campaña de terreno, año 2012
	Formaciones_Geologicas	SHP (polígono)	Geología del área de estudio del SHAC del río Laja 1:250.000
	Grav_DGA2012	SHP (puntos)	Gravimetría de la campaña geofísica, año 2012
“The Andes. Active Subduction Orogeny” (Oncken et al., 2006)	Grav_Oncken2006	SHP (puntos)	Gravimetría de la fuente citada.
Expedientes de DAA subterráneos	Derechos_Otorgados	SHP (puntos)	DAA subterráneos otorgados en el área de estudio del SHAC del río Laja
	Derechos_en_Tramite	SHP (puntos)	DAA subterráneos en trámite en el área de estudio del SHAC del río Laja
	Permeabilidad	SHP (puntos)	Información de permeabilidad de los expedientes de los pozos en el área de estudio
	Permeabilidad_Modelo	SHP (puntos)	Información de permeabilidad de los expedientes de los pozos en el área de estudio y fuera de ella, para generación del modelo conceptual

Origen	Nombre	Tipo de cobertura	Descripción
	Permeabilidad	Ráster	Cobertura de permeabilidad en el área de estudio generada a partir de Permeabilidad_Modelo.shp
	Transmisividad	SHP (puntos)	Información de transmisividad de los expedientes de los pozos en el área de estudio
	Transmisividad_Modelo	SHP (puntos)	Información de transmisividad de los expedientes de los pozos en el área de estudio y fuera de ella, para generación del modelo conceptual
	Trans	Ráster	Cobertura de transmisividad en el área de estudio generada a partir de Transmisividad_Modelo.shp
	Coef_Almacenamiento	SHP (puntos)	Información de almacenamiento de los expedientes de los pozos en el área de estudio
	Coef_Almacenamiento_Modelo	SHP (puntos)	Información de almacenamiento de los expedientes de los pozos en el área de estudio y fuera de ella, para generación del modelo conceptual
	S	Ráster	Cobertura de almacenamiento en el área de estudio generada a partir de Coef_Almacenamiento_Modelo.shp
	Pozos_Perfiles_Estrat	SHP (puntos)	Pozos que contienen información de la columna estratigráfica en su expediente, considerados para la definición del acuífero
	Perfiles_Estratigraficos	SHP (líneas)	Perfiles estratigráficos generados a partir de Pozos_Perfiles_Estrat
Campaña de monitoreo de nivel en pozos	Pozos_campaña	SHP (puntos)	Pozos visitados en la campaña de monitoreo de niveles de agua en pozos, año 2018
	Pozos_medidos	SHP (puntos)	Pozos con medición de nivel de agua del pozo en la campaña de terreno, año 2018
	Equipotenciales	SHP (líneas)	Curvas equipotenciales del área de estudio del SHAC del río Laja generadas a partir de Pozos_medidos.shp
Campaña geofísica	Gravimetria_campaña	SHP (puntos)	Gravimetría propuesta para la campaña geofísica
	Gravimetria_final	SHP (puntos)	Gravimetría realizada y/o interpretada en la campaña geofísica, año 2018
	TEM_campaña	SHP (puntos)	TEM propuestos para la campaña geofísica

Origen	Nombre	Tipo de cobertura	Descripción
	TEM_final	SHP (puntos)	TEM realizados e interpretados en la campaña geofísica, año 2018
Generación propia	Unidad_Ac_Norte	SHP (polígono)	Unidad Acuífera Norte del SHAC del río Laja
	Unidad_Ac_Sur	SHP (polígono)	Unidad Acuífera Sur del SHAC del río Laja
	Unidad_Intrusivos	SHP (polígono)	Unidad Intrusivos del SHAC del río Laja

Fuente: Elaboración propia.

- iii. CARPETA “MXD”. Esta carpeta contiene las composiciones cartográficas realizadas en ArcGis con su extensión *.mxd.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12.2-3 Contenido de la Carpeta “Mxd” del SIG

- iv. CARPETA “FIGURAS”. Por último, esta carpeta contiene la salida impresa en formato PDF de los mapas compuestos. Estos archivos fueron exportados con resolución de 300 dpi.

12.3 CONCLUSIONES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SIG

Se ha desarrollado un Sistema de Información Geográfica (SIG) para facilitar la visualización, consulta y manejo de la información generada, mediante el software ArcGis 10.1 de Esri, la cual se presenta en capas temáticas (coberturas tipo *shapefile* y ráster) y mapas presentados en figuras a través de proyectos *.mxd.

CAPÍTULO 13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

A continuación, se exponen las conclusiones de las actividades realizadas en el presente estudio:

- De la revisión de antecedentes realizada, se concluye que, además de los registros históricos de la red hidrométrica de la DGA y de los expedientes de Derechos de Aprovechamiento de Agua subterráneos del CPA, el antecedente principal al presente estudio corresponde al “Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Biobío” (DGA, 2012), en el cual se realizó un levantamiento de la información hidrogeológica y un modelo conceptual del acuífero de la cuenca del río Biobío.
- La caracterización hidrológica ha permitido verificar que las precipitaciones (con un valor promedio de 1.064 mm/año, calculado a partir de la generación de las isoyetas) se concentran entre los meses de mayo y agosto, asociados al periodo otoñal e invernal. La temperatura promedio anual es de 13,4°C, correspondiente a la estación Las Achiras. El caudal con probabilidad de excedencia del 85% en la Estación Río Laja en Tucapel es de 99,7 m³/s, mientras que en la estación Río Laja en Puente Perales asciende a 106,9 m³/s.
- Respecto de la caracterización hidrogeológica, del análisis de antecedentes se desprende que el área del SHAC del río Laja se encuentra casi en su totalidad dentro de la depresión central, lo cual es coherente con sus características litológicas. Del estudio DGA (2012) se extrae la identificación de tres sub acuíferos: el primer sub acuífero representa el de mayor extensión y potencial hidrogeológico, en base a los valores de parámetros hidráulicos calculados; de manera secundaria, los sub acuíferos 2 y 3 aparecen en los extremos opuestos de la cuenca del río Biobío, siendo característicos en la zona de entrada y salida del SHAC. Los niveles freáticos varían, de acuerdo a antecedentes, dentro de los primeros 20 m bajo el nivel de terreno, principalmente entre los 5 y 10 m.

- Sobre la caracterización hidrogeoquímica, se determinó la composición del cauce principal de la cuenca del río Laja y de su afluente principal en el sector del SHAC. Se constató que la calidad de agua superficial del río Laja es del tipo carbonatada cálcica sin mayor presencia de sulfatos y sodio/potasio. Del análisis se extrae que el aporte del afluente del río Claro no tiene un efecto mayor en las aguas del río Laja debido a que su composición química no presenta grandes variaciones. Cabe mencionar que no existe información de calidad de aguas subterráneas en la zona del SHAC. Sin embargo, su composición sería similar a la de las aguas superficiales, siendo la composición química del agua del acuífero del Laja bicarbonatada cálcica con un cambio de tipo cálcico por un tipo mixto cálcico-magnésico hacia el sector poniente (González *et al.*, 2003).
- Respecto de la definición de la geometría del acuífero, cabe mencionar las siguientes consideraciones:
 - De la revisión de columnas estratigráficas de los expedientes de DAA subterráneos se concluye que los suelos son de carácter arenoso en los primeros 80 metros de profundidad, con presencia puntual de lentes de arcilla.
 - En base a los ensayos geofísicos ejecutados (55 estaciones TEM y 50 puntos gravimétricos) se define que el acuífero del río Laja se emplaza en una depresión sedimentaria con una marcada tendencia de profundización hacia el E. Se identificaron rellenos saturados de hasta 400 m de espesor. Se distingue gran variedad granulométrica en la composición de las unidades que conforman el subsuelo, desde bolones y ripios húmedos que presentan medianas a altas resistividades, hasta materiales más arcillosos que arrojan menores resistividades y representan las zonas menos permeables dentro del sistema acuífero. En resumen, los resultados geofísicos confirman de esta manera la existencia de una formación acuífera de gran continuidad tanto vertical como horizontal, de importante espesor, donde el basamento se hallaría por lo menos a 1 km de profundidad desde la cota de terreno.
- La campaña de terreno de monitoreo de niveles de agua en 103 pozos realizada entre Julio y Agosto de 2018 permitió recopilar los niveles freáticos en la mayor parte de la zona de estudio, de los cuales se observó que los niveles generalmente se presentan entre los 0-5 metros. Con las medidas tomadas en terreno se generaron las curvas equipotenciales, mostrándose un flujo subterráneo en sentido E a SW, excepto en el sector del río Claro, el flujo en el cual avanza de N a S.

- Las conclusiones obtenidas del desarrollo del modelo conceptual del acuífero son las siguientes:
 - Teniendo en consideración la subdivisión de acuíferos del estudio DGA (2012), se delimitaron zonas con mayor o menor potencial hidrogeológico dentro del SHAC del Laja. Se presentan permeabilidades y transmisividades altas a muy altas principalmente en la zona central del SHAC del río Laja, típicas de suelos arenosos cuyos valores descienden ligeramente hacia el poniente. La profundidad de los niveles de agua se mantiene dentro de los primeros 5 m bajo la superficie.
 - Se considera dar un tratamiento particular, debido a su comportamiento hidrogeológico con bajo potencial, a los cuerpos intrusivos ígneos que afloran al oeste del área de estudio.
- Del capítulo correspondiente a la propuesta de sectorización, cabe señalar lo siguiente:
 - Respecto de la delimitación del SHAC del río Laja, no puede fijarse un límite o contorno cerrado del acuífero asociado al SHAC, entendiendo como tal que éste quede circunscrito o rodeado en su totalidad de material impermeable, puesto que forma parte del gran acuífero del Biobío; así mismo, también se observan intercambios de flujo por el límite norte, desde la cuenca del río Itata. Sin embargo, se identifica una clara y vasta zona de relleno sedimentario que conforma el acuífero del valle del río Laja.
 - El SHAC del río Laja, entendido tal como el área analizada en el presente estudio y que parte de la delimitación de la subcuenca “Río Laja bajo”, se ha dividido en 3 unidades. Las Unidades Acuíferas Norte y Sur poseen potencial hidrogeológico alto y medio, respectivamente. La Unidad Intrusivos tiene un potencial hidrogeológico bajo o nulo, debido a su composición litológica.
 - Se analizaron los vínculos y relaciones de las unidades entre sí y con los acuíferos adyacentes, identificando intercambio de flujo en los límites norte y sur de las Unidades Acuíferas con los SHAC del Itata y del Biobío, así como flujo entre estas 2 unidades propiamente. Se observa que la Unidad Intrusivos se comporta como una barrera en el flujo subterráneo, por lo que esta unidad debe enmarcarse en una explotación particular, mientras que las Unidades Acuíferas Norte y Sur están influenciadas entre ellas.

- A partir del modelo numérico realizado en el estudio DGA (2012), las extracciones (bombeos) en las Unidades Acuíferas afectan claramente sobre los afloramientos generados. Lo anterior se debe a que la zona de estudio posee niveles someros de aguas subterráneas (menores a 5 m de profundidad), los cuales se conectan de manera directa a los cauces superficiales, generando afloramientos en todo el tramo del río Laja y principalmente en la zona baja. De cualquier modo, actualmente no es posible evaluar con certeza la magnitud y distribución de los afloramientos, por lo que las modelaciones numéricas existentes son las que proporcionan la hipótesis actual, la cual puede ser corroborada con trabajos de terreno.
- En relación con la definición de los SHAC, es importante recordar que actualmente existe una metodología de definición de los mismos aprobada por la DGA el año 2014 y recogida en el estudio “Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional” (DGA, 2014c). Esta metodología toma como punto de partida la información más básica de una subcuenca y avanza en la delimitación del SHAC adicionando información relevante por etapas, siendo la componente hidrogeológica la más relevante de ellas. De este modo, y a juicio de este consultor, la definición de los SHAC debe considerar sólo aquellos sectores con un real potencial hidrogeológico para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, siendo los sectores rocosos, cerros o zonas de bajo o nulo potencial zonas excluidas del SHAC, cuya administración de recursos hídricos debe ser evaluada de manera separada, dada su condición particular, y en general, más compleja de evaluar.
- Se comprueba que, en base a lo establecido en los artículos 20 e) y 30 d) del Reglamento sobre normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (DGA, 2014b), la oferta hídrica del acuífero del río Laja no está limitada por la afectación a cauces superficiales. Debido a lo anterior, se considera que la oferta hídrica corresponde a la propia recarga. Se obtiene una recarga estimada de 85.975.730 m³/año para el área de estudio del SHAC del río Laja.
- Las principales brechas de información identificadas son las relativas al control de nivel freático (por escasos registros históricos) y de calidad de aguas subterráneas (debido a la ausencia de estaciones de esta tipología en el área de estudio).
- Se ha desarrollado un SIG, mediante ArcGis 10.1 de Esri, para permitir la visualización, la consulta y el manejo de la información recopilada y generada para el estudio, tanto a nivel de coberturas (*shapefile* y ráster) como mapas (proyectos tipo *.mxd).

13.2 RECOMENDACIONES

Para estudios de sectorización hidrogeológica, se estima conveniente tener presente las siguientes consideraciones:

- Iniciar el estudio de sectorización sin acotar el área de estudio a la subcuenca, ya que ésta se define según el drenaje superficial y, si bien generalmente el flujo subterráneo suele seguir la misma trayectoria, no siempre es así; ello permite estudiar (a nivel de revisión de antecedentes, pero sobre todo de planteamiento de las campañas de terreno, tanto de niveles freáticos como trabajos geofísicos) los límites más probables del acuífero.
- Para lo anterior, debería darse una revisión de antecedentes previa a la definición del área en que se enmarca un estudio; por ejemplo, en el caso concreto del SHAC del río Laja, el trabajo se podría abordar de mayor a menor escala, desde el gran acuífero del Biobío hasta los sub-acuíferos que lo conforman.
- Se debe tener presente que este planteamiento prioriza el conocimiento técnico del acuífero globalmente, y no siempre coincidente con la estructura administrativa relativa a la gestión de expedientes de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, la cual debe abordar la DGA.
- Sería muy conveniente (si no necesario) disponer de registros históricos de control de nivel freático de los SHAC a caracterizar, así como información sistematizada de calidad de aguas subterráneas, puesto que las medidas puntuales en el espacio y/o el tiempo no siempre permiten caracterizar confiablemente las aguas.
- El uso de GPS con corrección diferencial en las campañas de terreno para monitorear los niveles estáticos de los pozos permite minimizar los errores de medición respecto los equipos que no poseen esta característica. En el análisis histórico de los niveles de las napas, las diferencias de lecturas debido a los errores asociados a las limitantes técnicas de los equipos, como es el caso del GPS sin diferencial, arrojan resultados con menor grado de confiabilidad, aspecto relevante en la generación de las curvas equipotenciales y posterior comparativa entre diferentes estudios.

CAPÍTULO 14 BIBLIOGRAFÍA

Arumí, J. L., Rivera, D., Muñoz, E. y Billib, M. (2012) - Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos* 12, 4-13.

Arumí, J. L., Rivera, D. A., Rougier, A. y Díaz, R. (2012) - Estimación de pérdidas de agua en tramos de ríos del sistema Laja-Diguillín en la zona central de Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 3, pp. 135-141.

Barra, R., Popp, P., Quiroz, R., Bauer, C., Cid, H y Tümping, W. (2005) – Persistent toxic substances in soils and Waters along an altitudinal gradient in the Laja River Basin, Central Southern Chile. *Chemosphere*, vol. 58, issue 7, pp. 905-915.

Bevis, M., Kemdrick, E., Cser, A. y Smalley, R. Jr. (2004) - Geodetic measurement of the local elastic response to the changing mass of water in Lago Laja. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, vol. 141, issue 2, pp.71-78.

Börgel, R. (1983) – Geomorfología. Colección Geografía de Chile, Tomo II. IGM, Santiago.

DGA (2000) - Estudio de disponibilidad del río Laja / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas - VIII Región.

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

DGA (2004b) - Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Bío Bío / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

DGA (2010) - Análisis preliminar de niveles de aguas subterráneas: informe final / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

DGA (2010b) - Mejoramiento y ampliación de red aguas subterráneas, regiones VII a X: informe final / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Conic BF Ingenieros Civiles Consultores.

DGA (2011) - Estudio hidrogeológico cuencas Bío Bío e Itata / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Realizado por Aquaterra Ingenieros Ltda.

DGA (2011b) - Instalación de piezómetros operativos regiones del Maule y Bío Bío / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Compañía Chilena de Perforaciones Ltda.

DGA (2012) - Estudio hidrogeológico cuenca Bío Bío / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Realizado por: Aquaterra Ingenieros Limitada.

DGA (2012b) - Instalación de piezómetros operativos regiones del Maule y Bío Bío / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Compañía Chilena de Perforaciones Ltda.

DGA (2013) - Modelación hidrogeológica cuenca Itata bajo, región del BíoBío: informe final / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; realizado por Aqualogy Medioambiente Chile S.A.

DGA (2014) - Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, BíoBío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración y Recursos Hídricos, Santiago, Chile.

DGA (2014b) - Manual Decreto Supremo Nº 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (publicado en Diario Oficial 07/03/14), Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile

DGA (2014c) - Metodología para la delimitación y sectorización de acuíferos a nivel nacional / Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por GCF Ingenieros Ltda.

DGA (2015) - Análisis y aplicación metodológica para la delimitación y sectorización de acuíferos en la provincia del Ñuble/ Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación; Realizado por Subterránea SpA: VIII Región.

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

DGA (2016b) – Sistematización de la información Hidrogeológica para un futuro plan de gestión de recursos hídricos en cuencas de la región del Bio Bio Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

DGA (2016c) – Atlas del Agua. Chile 2016. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y Enel Generación Chile SA (2016) - Acuerdo de operación y recuperación Convenio del lago Laja de 1958 para temporada 2016-2017.

González, L., González, A. y Mardones M. (2003) - Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 30, N° 1, pp 3-22.

González, L., González, A. y Mardones, M. (2012) – Estudio de la interacción y regulación del sistema hídrico en la cuenca lacustre de laguna de la Laja, región del Biobío, Chile. Congreso Geológico Chileno, 13, Antofagasta, Chile, pp. 783-785.

González, L., Mardones, M., Silva, A. y Campos, E. (1999) - Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 26, N° 2, pp. 145-157.

González-Bonorino, F. (1970) - Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Publicación., N° 24, 119 p.

Hervé, F., Munizaga, F., Mantovani, M., Hervé, M. (1976) - Edades Rb-Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. Congreso Geológico Chileno, N° 1, Actas, Vol. 2, p. F19-F26. Santiago.

Mardones, M. y Vargas, J. (2005) - Efectos hidrológicos de los usos eléctrico y agrícola en la cuenca del río Laja (Chile centro-sur). Revista de Geografía Norte Grande, 33: 89-102.

MacPhail, D. (1966) - El gran lahar del Laja. Estudios Geográficos. Universidad de Chile, Departamento de Geología, p. 133-155.

Moreno, H., Lohmar, S., López Escobar, L. y Petit-Breuilh, M. E. (2000) - Contribución a la evolución geológica, geoquímica e impacto ambiental del volcán Antuco (Andes del Sur, 37°25'S). IX Congreso Geológico Chileno. Actas, vol. 2, sesión temática N° 6, pp 44-48.

Muñoz, E., Arumí, J. L., Rivera, D., Montecinos, A. Billib, M. y Álvarez, C. (2013) - Gridded data for a hydrological model in a scarce-data basin. Water Management, volume 167 Issue WM5, pp. 249-258.

Muñoz, E., Zúñiga, R. y Arumí, J. L. (2014) - Análisis hidrológico del sistema Laja. Impactos por cambios antropogénicos y análisis de una nueva regla de operación. IAHR AIH. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile.

Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Gotze, H. J., Ramos, V. A., Strecker, M. R. y Wigger, P. (2006) - The Andes. Active Subduction Orogeny. Frontiers in Earth Sciences. Springer-Verlag GmbH.

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

Thiele, R., Moreno, H. Elgueta, S. Lahsen, A., Rebolledo, S. y Petit-Breuilh, M. E. (1998) - Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. Revista Geológica de Chile, 25(2), pp. 229-253.

Tolorza, V., Carretier, S., Andermann, C., Ortega-Culaciati, F., Pinto, L. y Mardones, M. (2014) - Contrasting mountain and piedmont dynamics of sediment discharge associated with groundwater storage variation in the Biobío River. Journal of Geophysical Research: Earth Surface.

United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. (1971). Guide for interpreting engineering uses of soils. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Villanueva, M., e Iglesias, A. (1984) Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero Español (IGME). Madrid, 426 pp.