



**ESTUDIO BÁSICO
“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO
DE RECARGA ARTIFICIAL LONTUÉ”**

INFORME FINAL

Santiago, marzo de 2015



ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL LONTUÉ”

INFORME FINAL

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3	ÁREA DE ESTUDIO	16
2	METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO.....	18
3	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN, IDENTIFICACIÓN SITIOS Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA	20
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA.....	20
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	23
3.2.1	Unidades morfológicas y geología regional	23
3.2.2	Edafología	29
3.2.3	Hidrología	31
3.2.4	Hidrogeología.....	43
3.2.5	Calidad de aguas superficiales y subterráneas	47
3.2.6	Usos/derechos de aprovechamiento de aguas.....	54
3.2.7	Resumen y modelo hidrogeológico conceptual	59
3.3	IDENTIFICACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	62
3.4	METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL.....	68
3.4.1	Fase I.....	68
3.4.2	Fase II.....	70
3.5	EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO.....	70
3.5.1	Fase I.....	70
3.5.2	Propuesta de lugares potenciales para un PPRAA	80
3.5.3	Fase II.....	89
4	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO	90
4.1	TRABAJOS EN TERRENO.....	90
4.1.1	Metodología.....	92
4.1.2	Resultados trabajos en terreno.....	95
4.1.3	Medición de calidad de aguas.....	107

4.2	SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL	123
5	ANÁLISIS LEGAL	127
5.1	ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES.....	127
5.1.1	Conclusión y plazos análisis legal	128
5.2	CONVENIO DE COLABORACIÓN	129
6	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL	130
6.1	DETALLE DE LAS OBRAS	132
6.2	PERFORACIÓN DE POZOS	132
6.2.1	Pozo de observación LO-01	132
6.2.2	Pozo de observación LO-02	135
6.2.3	Filmación de pozo LO-01	137
6.3	DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS DEL PPRAA.....	139
6.3.1	Sistema de captación	139
6.3.2	Conducción 1: Entre captación y obra de decantación	140
6.3.3	Obra de decantación.....	141
6.3.4	Conducción 2: Entre decantador y dispositivo de medición	142
6.3.5	Dispositivos de medición	143
6.3.6	Piscina de infiltración	143
6.4	MEDICIÓN DE VARIABLES	146
6.4.1	Medición de caudal	149
6.4.2	Medición de nivel del acuífero	150
6.4.3	Medición de turbiedad	152
6.4.4	Control de efectos de la infiltración a través de la calidad química.....	153
6.4.5	Registros de precipitación	155
6.4.6	Sistema de medición por telemetría	158
6.5	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS.....	160
7	REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	162
7.1	DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO	162
7.1.1	Análisis de la prueba de bombeo	162
7.2	OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA	167
7.2.1	Procedimiento de pruebas de infiltración	167
7.2.2	Descripción de las pruebas.....	168
7.2.3	Caudal de infiltración y análisis de niveles.....	169
7.2.4	Calidad química	175
7.2.5	Análisis de la operación del sistema.....	189
7.2.6	Análisis de resultados PPRAA.....	194

7.3	ANÁLISIS DEL EFECTO PROYECTADO EN NIVELES DEL ACUÍFERO ..	194
7.3.1	Construcción del modelo	194
7.3.2	Resultados.....	198
8	DISCUSIÓN.....	202
8.1	HIDROGEOLOGÍA REGIONAL	202
8.2	DISPONIBILIDAD DE AGUA	203
8.3	METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE SITIOS.....	204
8.4	ANÁLISIS LEGAL	205
8.5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS	205
8.6	MONITOREO	208
8.7	PRUEBAS HIDRÁULICAS	208
8.8	OPERACIÓN DEL PPRAA.....	209
8.9	ANÁLISIS DEL EFECTO PROYECTADO EN NIVELES DEL ACUÍFERO ..	211
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	212
9.1	CONCLUSIONES	212
9.2	RECOMENDACIONES	214

ANEXOS

ANEXO A:	COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS LONTUÉ
ANEXO B:	DATOS DE CAUDAL MEDIO MENSUAL Y PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LAS ESTACIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO
ANEXO C:	NIVELES ESTÁTICOS AGOSTO-SEPTIEMBRE 2012 (AQUATERRA, 2012)
ANEXO D:	VISITAS A TERRENO
ANEXO E:	DATOS REGISTRADOS EN LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN
ANEXO F:	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUA PARA ANÁLISIS DE LABORATORIO
ANEXO F1:	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO (SET A)
ANEXO F2:	BALANCE IÓNICO
ANEXO F3:	ANÁLISIS QUÍMICOS ELEMENTOS MENORES Y COMPARACIÓN CON DS46
ANEXO G:	MINUTAS REUNIONES CNR-GEOHIDROLOGÍA

ANEXO H:	ANÁLISIS LEGAL
ANEXO I:	CONVENIO DE COLABORACIÓN
ANEXO J:	PREDISEÑO DE OBRAS INVOLUCRADAS EN EL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL
ANEXO K:	FILMACIÓN DE POZOS (DIGITAL)
ANEXO L:	CATÁLOGO DE EQUIPOS (DIGITAL)
ANEXO M:	PRUEBAS DE BOMBEO (DIGITAL)
ANEXO N:	RESULTADOS DE LABORATORIO ALS (SET B)
ANEXO O:	DATOS PRUEBA DE OPERACIÓN
ANEXO P:	PLANO PRE-DISEÑO (DIGITAL)
ANEXO Q:	PLANO AS BUILT (DIGITAL)
ANEXO R:	HERRAMIENTA SIG (DIGITAL)

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Antecedentes de la zona de estudio.	20
Tabla 3-2: Zonas Edáficas de Chile	29
Tabla 3-3: Estaciones meteorológicas en la zona de estudio.....	34
Tabla 3-4: Estadígrafos principales de las series de precipitación anual.....	34
Tabla 3-5: Caracterización de precipitaciones mensuales	36
Tabla 3-6: Caracterización de precipitaciones estacional.....	36
Tabla 3-7: Estaciones meteorológicas con información de evaporación	37
Tabla 3-8: Estadígrafos principales de las series de evaporación	37
Tabla 3-9: Caracterización de la evaporación (mm/día) a nivel mensual.....	37
Tabla 3-10: Estaciones meteorológicas con información de temperatura.....	38
Tabla 3-11: Estadígrafos principales de las series de temperatura	39
Tabla 3-12: Caracterización de temperaturas (°C) a nivel mensual.....	39
Tabla 3-13: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio	40
Tabla 3-14: Estadígrafos principales de las series de caudal medio anual.....	40

Tabla 3-15: Promedio mensual de caudales en las estaciones seleccionadas (m ³ /s)	42
Tabla 3-16: Estaciones de monitoreo en sector de estudio y características principales.....	45
Tabla 3-17: Estaciones calidad del aguas superficiales en la zona de estudio.....	48
Tabla 3-18. Parámetros a observar en aguas para infiltración y límite recomendado.....	50
Tabla 3-19: Canales de abastecimiento en la zona de estudio	54
Tabla 3-20: Distribución de los derechos de aprovechamiento otorgados según usos en el área de estudio	57
Tabla 3-21: Caudal medio mensual (m ³ /s) para diferentes niveles de probabilidad estación Río Palos en junta con Colorado	63
Tabla 3-22: Caudal medio mensual (m ³ /s) para diferentes niveles de probabilidad estación Río Colorado en junta con Palos	64
Tabla 3-23: Caudal medio mensual (m ³ /s) para diferentes niveles de probabilidad estación Estero Upeo en Upeo	64
Tabla 3-24: Casos en que las variables V ₁ a V ₃ toman sus respectivos valores.....	69
Tabla 3-25: Variación de ponderación de Variables Fase I	78
Tabla 3-26. Sector y dueño de potenciales sitios de recarga	80
Tabla 3-27: Características principales de los sitios con miras la evaluación de la Fase II ..	89
Tabla 3-28: Evaluación de los sitios (Fase II).....	89
Tabla 4-1. Niveles estáticos abril 2014, medidos durante los trabajos de terreno	95
Tabla 4-2. Niveles estáticos agosto-septiembre 2012, correspondiente a pozos ubicados en las cercanías de los pozos medidos en abril 2014, para efectos de comparación.....	96
Tabla 4-3: Resultados de la descripción de calicatas en Romeral.....	98
Tabla 4-4: Resultados del ensayo de permeabilidad en Romeral.....	98
Tabla 4-5: Resultados de la descripción de calicatas en Los Niches	101
Tabla 4-6: Resultados del ensayo de permeabilidad en Los Niches	101
Tabla 4-7: Resultados de la descripción de calicatas en sector Pichingal	104
Tabla 4-8: Resultados del ensayo de permeabilidad en Pichingal.....	104
Tabla 4-9: Parámetros mínimos de calidad del agua a medir.....	107

Tabla 4-10: Tasas de inactivación para coliformes para distintos rangos de temperatura..	110
Tabla 4-11: Lugares de muestra de agua	112
Tabla 4-12: Parámetros <i>in situ</i> en los puntos muestreados.....	112
Tabla 4-13: Resultados análisis elem. mayores y parámetros calidad. Comparación NCh 1333.	118
Tabla 4-14: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial	122
Tabla 4-15: Cálculo decaimiento coliformes fecales. Sectores Los Niches y Pichingal	123
Tabla 4-16: Resumen y análisis de sitios preseleccionados para el desarrollo del PPRAA	125
Tabla 5-1: Legislación vigente analizada para PPRAA	127
Tabla 6-1. Resumen de información de pozos perforados.	132
Tabla 6-2. Resumen de habilitación del pozo LO-01 (Stick Up* = 0,45 m).....	133
Tabla 6-3. Resumen de habilitación del pozo LO-02 (Stick Up = 0,42 m).	135
Tabla 6-4: Resumen de la filmación del pozo LO-01.....	138
Tabla 6-5: Canal de aducción	140
Tabla 6-6: Cuadro resumen de medición de variables.	148
Tabla 6-7: Elementos que componen el Kit Wisebox	158
Tabla 6-8: Costos de inversión PPRAA Lontué.....	160
Tabla 6-9: Costos de instrumentación PPRAA Lontué.....	161
Tabla 6-10: Valor referencial de agua infiltrada.....	161
Tabla 7-1: Resumen de pruebas realizadas previas a la operación	169
Tabla 7-2: Resumen de los caudales y volúmenes de entrada e infiltración.	170
Tabla 7-3: Puntos de muestreo Lontué	175
Tabla 7-4: Resumen de medición de parámetros.....	181
Tabla 7-5: Resumen muestreo set B.....	183
Tabla 7-6: Analitos de interés, pruebas de infiltración.	184
Tabla 7-7: Conductividad hidráulica	195
Tabla 7-8: Tiempo para que el 10% de la recarga sea captada por el río	198

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Área de estudio, acuífero río Lontué	16
Figura 1-2: Vías de acceso a proyecto piloto.	17
Figura 2-1: Metodología general de trabajo	19
Figura 3-1: Geomorfología de la zona de estudio	24
Figura 3-2: Geología del área de estudio	26
Figura 3-3: Perfiles hidrogeológicos.....	28
Figura 3-4: Drenaje en la zona de estudio	32
Figura 3-5: Estaciones meteorológicas en la zona de estudio.....	33
Figura 3-6: Mapa de Isoyetas medias anuales en la subcuenca del Río Lontué	35
Figura 3-7: Promedio precipitación mensual	36
Figura 3-8: Evaporación promedio mensual en la estación Potrero Grande.....	38
Figura 3-9: Temperatura promedio mensual en la estación Potrero Grande	39
Figura 3-10: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio	41
Figura 3-11: Promedio caudal medio mensual en estaciones seleccionadas	42
Figura 3-12: Unidades hidrogeológicas.....	44
Figura 3-13: Estaciones de monitoreo en el sector de estudio	45
Figura 3-14: Curvas equipotenciales promedio para el segundo semestre del año 2001 y pozos de monitoreo para la zona de estudio.....	47
Figura 3-15: Distribución estaciones de calidad química de aguas superficiales.....	49
Figura 3-16: Solidos disueltos totales	51
Figura 3-17: Solidos Suspendidos Totales.....	52
Figura 3-18: Conductividad Eléctrica	52
Figura 3-19: Oxígeno Disuelto	53
Figura 3-20: pH.....	53
Figura 3-21: Coliformes Fecales	54
Figura 3-22: Distribución y administración de la red de canales en la zona de estudio	56

Figura 3-23: Derechos de aprovechamiento de aguas aprobados en zona estudio	58
Figura 3-24: Variación mensual del caudal (m ³ /s) para diferentes prob. de excedencia.....	65
Figura 3-25: Diagrama unifilar río Lontué parte 1	66
Figura 3-26: Canales y ubicación predios preseleccionados.....	67
Figura 3-27: Variable 1 Conductividad hidráulica	72
Figura 3-28: Variable 2 Cercanía y conexión a fuente de agua.....	74
Figura 3-29: Variable 3 Profundidad del nivel freático	76
Figura 3-30: Valor de aptitud del territorio (VA), en la cuenca de Lontué	77
Figura 3-31: Resultados Fase I: Caso Base.....	79
Figura 3-32: Resultados Fase I: Simulación 1	79
Figura 3-33: Resultados Fase I: Simulación 2.....	79
Figura 3-34: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA en la cuenca de Lontué	81
Figura 3-35: Ubicación de Pozos con Estratigrafía	82
Figura 3-36: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1397, zona Romeral.....	84
Figura 3-37: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-2867, zona Romeral.....	85
Figura 3-38: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-2906, zona Los Niches	86
Figura 3-39. Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1450(1), zona Los Niches	87
Figura 3-40: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1388, zona Pichingal.....	88
Figura 4-1. Ubicación de calicatas y pozos con estratigrafía en alrededores, en los sectores pre seleccionados del área de estudio.....	91
Figura 4-2: Ubicación de pozos con niveles estáticos medidos durante trabajos de terreno, en el sector de las calicatas	92
Figura 4-3. Esquema de referencia prueba de infiltración del doble anillo a carga cte.	94
Figura 4-4: Instalación prueba de infiltración en terreno.....	94
Figura 4-5. Niveles estáticos para agosto-septiembre 2012 (Aquaterra, 2012). Los cuadros con detalle de cada zona muestran la comparación de niveles 2012 con los niveles medidos en abril del 2014	97
Figura 4-6: Trabajos en terreno- Romeral	99

Figura 4-7. Calicata 1, sector Romeral con estratigrafía descrita	100
Figura 4-8: Trabajos en terreno- Los Niches	102
Figura 4-9. Calicata 1, Los Niches con estratigrafía descrita.....	103
Figura 4-10: Trabajos en terreno- Pichingal	105
Figura 4-11. Calicata 1, Pichingal con estratigrafía descrita	106
Figura 4-12: Ubicación de las muestras de agua	113
Figura 4-13: Ubicación de las muestras Sector Pichingal	114
Figura 4-14: Ubicación de las muestras Sector Villa Los Niches.....	115
Figura 4-15: Ubicación de las muestras Sector Romeral	116
Figura 4-16: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Romeral	119
Figura 4-17: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Los Niches ...	120
Figura 4-18: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Pichingal	121
Figura 4-19: Estratigrafía del pozo ND-0701-1388, zona Pichingal	126
Figura 6-1. Vista en planta del diseño del sistema de infiltración	131
Figura 6-2. Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo LO-01.	134
Figura 6-3. Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo LO-02.	136
Figura 6-4. Imagen de filmación. Se observa a la izquierda el ingreso de agua turbulenta y a la derecha una ranura semi-tapada bajo el nivel estático.....	137
Figura 6-5. Sistema de captación	139
Figura 6-6: Esquema decantador.....	141
Figura 6-7: Conducción entre decantador y dispositivo de medición.....	142
Figura 6-8: Esquema dispositivo de medición.....	144
Figura 6-9: Esquema de piscina de infiltración.....	145
Figura 6-10: Diagrama de ubicación equipos de medición.....	147
Figura 6-11: Equipo usado para la medición de caudales.....	149
Figura 6-12: Equipo usado para la medición de niveles	151
Figura 6-13: Pozómetro para medir profundidad del agua subterránea en pozos	151

Figura 6-14: Equipo usado para la medición niveles (Izq) y turbidez (Der).....	152
Figura 6-15: Equipo para muestreo hidroquímico.	154
Figura 6-16: Equipo de medición multiparámetros	155
Figura 6-17: Pp. acumulada cada 24 horas en estación General Freire, Curicó Ad.	156
Figura 6-18: Estación de la DMC usada para el monitoreo de la precipitación.....	157
Figura 6-19: Sistema de telemetría.....	159
Figura 7-1: Curva de Agotamiento PGV pozo LO-01	163
Figura 7-2: Prueba de caudal variable – Pozo PO-1	164
Figura 7-3: Prueba de gasto constante en pozo LO-01.....	165
Figura 7-4: Ajuste de parámetros con los resultados de la prueba de gasto constante	166
Figura 7-5: Evolución del caudal de entrada en balsa de recarga, tasa infiltración y nivel de agua en balsa infiltración. A - Periodo completo de operación, B - Etapa 1 y C – Etapa 2.	171
Figura 7-6: Evolución de niveles en los pozos de observación y en las norias del predio. .	172
Figura 7-7: Ubicación de Puntos Muestreados.....	173
Figura 7-8: Evolución del nivel estático de los pozos de observación LO-01 y LO-02 corregidos a partir de la noria N2, y caudal de infiltración de la balsa.	174
Figura 7-9: Ubicación de Puntos Muestreados.....	176
Figura 7-10: Valores de Turbiedad y caudal de entrada en el vertedero.	177
Figura 7-11: Decaimiento de la Turbiedad en agua estancada en el vertedero.....	178
Figura 7-12: Evolución del ratio caudal de infiltración por altura de agua y valores de altura de agua en la balsa de infiltración.....	179
Figura 7-13: Acumulación de Sedimentos en balsa	180
Figura 7-14: Parámetros físico-químicos: pH	182
Figura 7-15: Parámetros físico-químicos: Temperatura	182
Figura 7-16: Parámetros físico-químicos: conductividad eléctrica - turbidez	183
Figura 7-17: Parámetros relevantes y normados (NCh 1333), pruebas de infiltración.....	185
Figura 7-18: Diagrama Piper.....	187
Figura 7-19: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA	192

Figura 7-20: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA	193
Figura 7-21: a) Discretización espacial y condiciones de borde modelo numérico. b) Detalle zona de recarga artificial	197
Figura 7-22: Ascenso nivel acuífero luego de 6 meses de recarga artificial para el año 1, año 26 y año 50	200
Figura 7-23: Perfil de niveles acuífero luego de 6 meses de recarga artificial, para el año 1, año 26 y año 50	201

1 INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas hoy en día juegan un rol fundamental en el abastecimiento de nuevas demandas por recursos hídricos para el desarrollo agrícola, debido principalmente al problema de seguridad hídrica. Este recurso tiene una recarga natural restringida, relacionada con la estacionalidad del agua superficial. Debido a lo anterior, es deseable analizar la posibilidad de efectuar una recarga artificial de acuífero en cuencas con potencial agroeconómico, y estudiarla como una alternativa factible a los embalses superficiales construidos para riego. La recarga artificial no es una técnica nueva a nivel mundial, aunque si es una tecnología de reciente aplicación en Chile. En efecto en países como Estados Unidos, Israel, España y Australia esta técnica es utilizada desde hace varios años como herramienta de gestión hídrica.

La provincia de Curicó fue señalada por la DGA como en situación de “Riesgo con Limitaciones Graves” en las temporadas 2012-2013 y 2013-2014. Por este motivo la CNR considera relevante el entendimiento del sistema subterráneo del acuífero que se desarrolla en la zona de interés, la identificación de sitios para recargar y el desarrollo de pruebas técnicas.

En este contexto, la Comisión Nacional de Riego (CNR) encargó a GeoHidrología Consultores Ltda. (GeoH) desarrollar un estudio de recarga artificial del acuífero en la cuenca del río Lontué. Este estudio de recarga artificial incluye la evaluación de posibles zonas y métodos de infiltración, junto a la implementación de un proyecto piloto y análisis de resultados en la cuenca del río Lontué, provincia de Curicó, Región del Maule.

El estudio contempló el levantamiento de información hidrogeológica relevante, tanto en terreno como en gabinete. A partir de los antecedentes recopilados en gabinete se desarrolló una metodología para evaluar la aptitud de sectores ubicados dentro de la cuenca, con miras a seleccionar el mejor sitio para realizar la recarga artificial. La metodología consideró el análisis de variables regionales tales como: 1) conductividad hidráulica horizontal, 2) conexión a una fuente o sumidero de agua y 3) profundidad del nivel freático. En terreno, las variables locales analizadas fueron: 1) disponibilidad de terreno, 2) disponibilidad de derechos de agua para realizar las pruebas, 3) calidad de agua competente para realizar la recarga artificial y 4) lejanía a fuentes de contaminación de aguas subterráneas. Como resultado la metodología definió el sector Pichingal como el sitio de emplazamiento del proyecto.

En el contexto de los trabajos en terreno, se desarrollaron trabajos preliminares a escala local para validar el sitio escogido por la metodología y pre-diseñar el Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuífero (PPRAA), siendo éstos excavación de calicatas, su descripción estratigráfica y pruebas de infiltración a distintas profundidades.

Luego, se perforaron los pozos de observación, a partir de los cuales se obtuvo información estratigráfica local, con la cual se validó el pre-diseño del sistema o bien se rediseñó en función de las características propias del sector. Además se desarrollaron pruebas de bombeo e infiltración, con lo que se determinaron los parámetros elásticos del acuífero.

Con la información obtenida se implementó un PPRAA en base a balsas, el cual se compone en su globalidad de: 1) un canal de aducción, 2) un decantador, 3) un cajón aforador, 4) una piscina de infiltración y 5) dos pozos de observación.

El plan de monitoreo del sistema contempló el seguimiento continuo de caudal de infiltración y turbiedad, a través de un sistema telemétrico. El seguimiento de los niveles del acuífero fue de manera continua, no obstante el rescate de datos se realizó de manera puntual. Adicionalmente se monitoreó la química del agua superficial y del acuífero, obteniendo datos para determinar su línea base y, durante la ejecución del proyecto, evaluar el efecto de la recarga sobre la calidad química del acuífero.

Con respecto a la operación del PPRAA, los resultados de las pruebas en general fueron promisorios y se cumplió con los objetivos del proyecto. En particular se realizaron una serie de experiencias de infiltración, con caudales variables entre 12 L/s y 25 L/s, los que permitieron definir la capacidad de infiltración y el impacto proyectado a los niveles estáticos del acuífero en estudio.

El presente documento contiene una completa revisión y análisis de antecedentes para describir la cuenca en estudio, el desarrollo de una metodología para identificar zonas aptas para desarrollar un proyecto piloto de recarga artificial, la descripción y análisis de trabajos de terreno a escala local para seleccionar el mejor sitio, el diseño del sistema de infiltración, las que consideran el diseño y perforación de pozos y la construcción de obras hidráulicas, la operación del sistema y su monitoreo, el análisis de las pruebas de infiltración y la respuesta del acuífero, entre otros. El capítulo 2: Metodología general del estudio, presenta un resumen de cada una de las etapas, que permite tener una mejor comprensión de las actividades y resultados obtenidos.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este estudio es caracterizar de mejor forma el acuífero de Lontué, identificar posibles zonas de recarga artificial y finalmente realizar un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuíferos (PPRAA). Para llevar a cabo este proyecto piloto, se realizó la construcción de obras de infiltración, la realización de las pruebas de infiltración y se analizaron sus resultados.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, este estudio busca:

- Analizar la información topográfica, geomorfológica, edafológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica existente para la identificación de sitios de emplazamiento para el PPRAA.
- Identificar la disponibilidad de aguas superficiales para las pruebas de recarga del piloto y estudiar la viabilidad legal de su utilización.

- Determinar la compatibilidad de la calidad del agua superficial a recargar con la del acuífero receptor.
- Identificar zonas potenciales de recarga y seleccionar el sitio para el PPRAA
- La confección de una metodología para la recarga artificial del sistema, incluyendo el diseño de obras necesarias para la construcción y buen funcionamiento del piloto, además del procedimiento de las pruebas a efectuar, considerando las condiciones hidrogeológicas existentes.
- Determinar las constantes elásticas del acuífero a recargar.
- Diseñar las obras hidráulicas necesarias para el desarrollo del PPRAA.
- Registrar las fluctuaciones del nivel estático (N.E.) del acuífero en forma continua durante 1 mes previo al inicio de las experiencias de recarga artificial.
- Realizar las experiencias en el PPRAA.
- Determinar las tasas de infiltración en el PPRAA.
- Evaluar el impacto proyectado a los niveles estáticos del acuífero en estudio.
- Generar conclusiones y recomendaciones para un eventual Proyecto de Recarga Artificial de mayor escala en la zona.

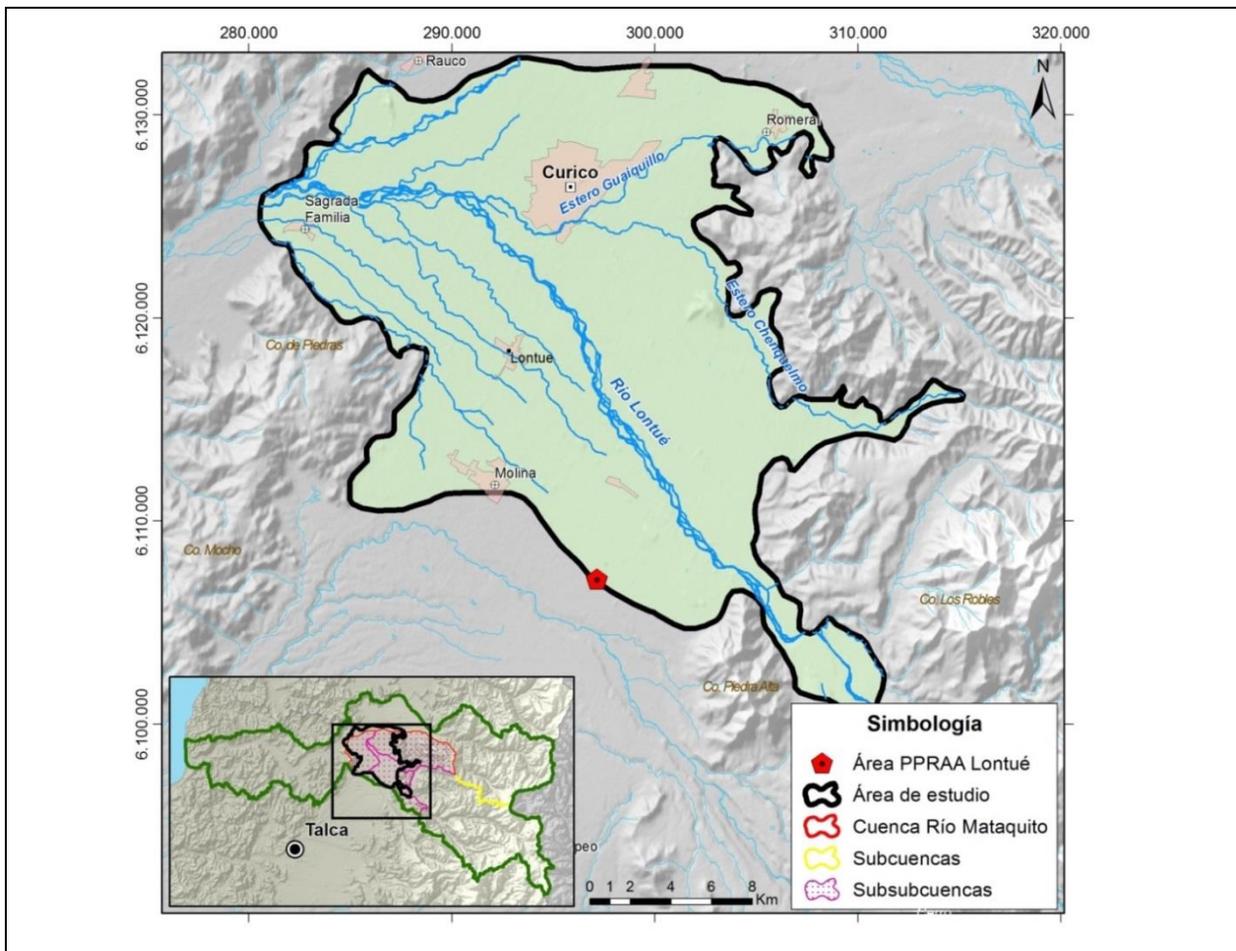
1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la cuenca del río Mataquito, en la subcuenca río Lontué, específicamente en las sub-subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA): Río Lontué Entre Estero Guaiquillo y Río Teno (al oeste), Río Lontué Entre Junta Ríos Colorado y Palos y Estero Guaiquillo (al sur) y Estero Guaiquillo (al este) (Figura 1-1).

Desde el punto de vista administrativo, el área de estudio se ubica en la Región del Maule, provincia de Curicó. Ésta contiene a las ciudades de Curicó, Romeral, Molina, Sagrada Familia y Lontué, además de ciudades cercanas al área de estudio, como Teno y Rauco.

El sector donde se desarrollaron las pruebas piloto de infiltración se ubica específicamente en la comuna de Molina, provincia de Curicó. El acceso al predio (Figura 1-2) se emplaza cercano a la ciudad de Molina, aproximadamente 6 Km al Sur Oriente, junto a la ruta K-175 (Camino a la Reserva Nacional Radal Siete Tazas).

Figura 1-1: Área de estudio, acuífero río Lontué



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA (Datum WGS84 H19S)

Coordenadas UTM de PPRAA Lontué E: 297.151 y N: 6.107.138

Figura 1-2: Vías de acceso a proyecto piloto.



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA (Datum WGS84 H19S)
Coordenadas UTM de PPRAA Lontué E: 297.151 y N: 6.107.138

2 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

El estudio Prueba Piloto Recarga Artificial del acuífero del río Lontué fue realizado en 4 etapas, según lo indicado en los términos de referencia de la CNR. Las etapas siguen un orden cronológico y son acordes a la metodología de trabajo desarrollados por GeoHidrología. No obstante, en el capítulo 0, se indican las recomendaciones del consultor para futuros proyectos de recarga, en cuanto modificar el orden de la realización de algunas actividades, en función de los requerimientos e información técnica para este tipo de proyectos.

La metodología de trabajo se presenta a continuación, separado por etapas, en la Figura 2-1 se presenta un diagrama, el cual explica de manera gráfica las principales actividades desarrolladas y presenta las entradas y salidas de información correspondiente.

1. Etapa 1:

- Revisión y Análisis de Antecedentes: Recopilación y análisis de información de antecedentes del área de estudio
- Metodología Identificación Zonas de Recarga: Desarrollo de una metodología que definió las mejores zonas para realizar recarga artificial
- Sitios Potenciales: Identificación de potenciales sitios y fuentes de recarga para realizar el proyecto. Realización de trabajos en terreno para verificar *in situ* la idoneidad de los sitios preseleccionados
- Análisis legal. Se generó convenio entre la CNR y los dueños de terreno y agua para entregar en comodato el terreno y derechos de agua respectivamente

2. Etapa 2:

- Selección de Sitio:
 - Selección del mejor sitio, basado en los análisis, caracterizaciones y resultados obtenidos en la etapa 1 y datos adicionales relacionados a calidad química de las aguas superficiales y subterráneas del sitio seleccionado.
 - Firma de convenio entre la CNR y los dueños de terreno y agua para entregar en comodato el terreno y derechos de agua respectivamente
- Pre-diseño PPRAA:
 - Desarrollo de metodologías de pruebas de bombeo e infiltración para determinación de constantes elásticas del acuífero
 - Pre-diseño de obras de infiltración (balsas de infiltración o pozos de inyección y obras hidráulicas) en base a revisión de antecedentes y trabajos en terreno
 - Metodología para la recarga artificial del sistema: contempla las pruebas a realizar durante la operación del proyecto

3. Etapa 3:

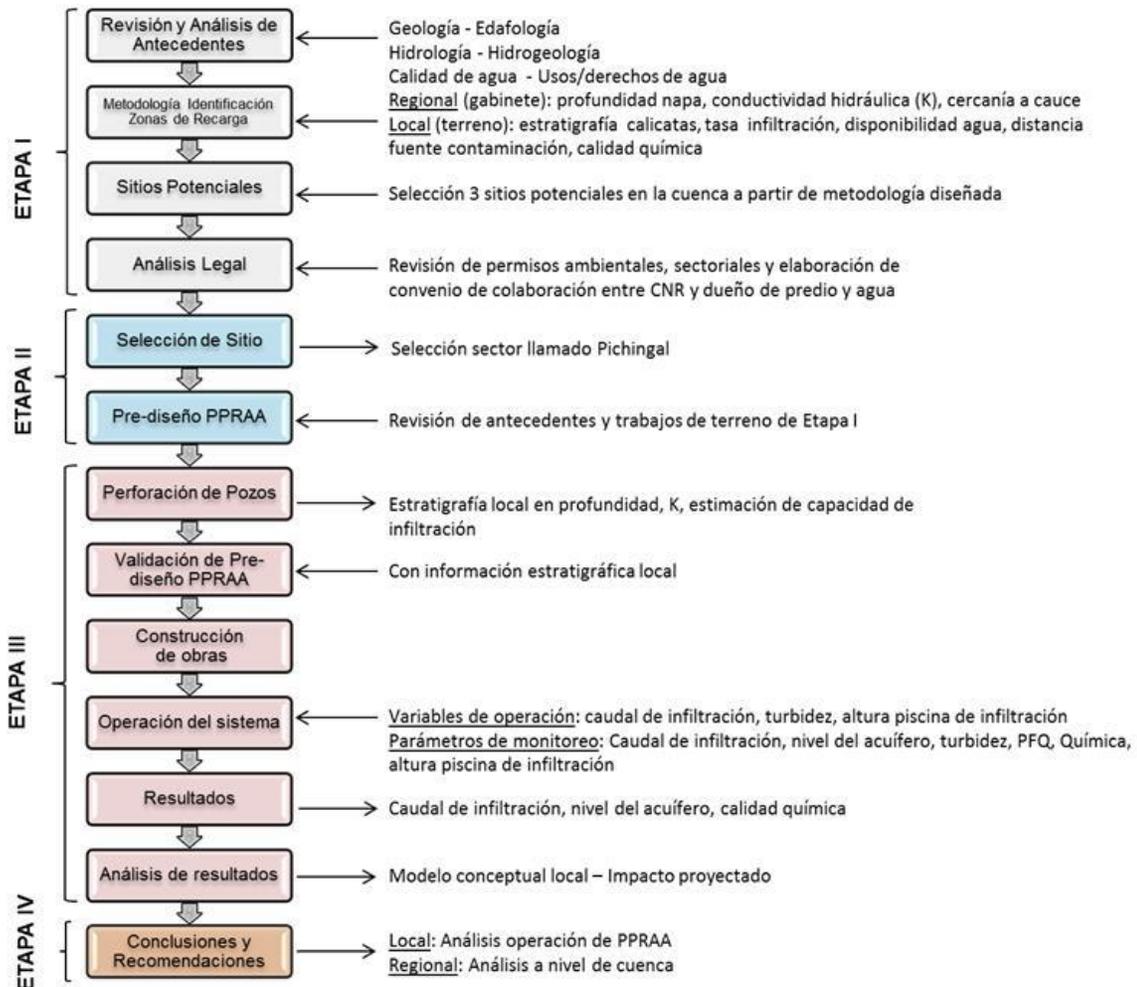
- Perforación de pozos: La construcción comenzó con la perforación de los pozos y con el análisis estratigráfico local. Además se hicieron pruebas de bombeo y de infiltración para determinar las constantes elásticas del acuífero.
- Re-diseño PPRAA: La información obtenida validó el pre-diseño o caso contrario se realizó análisis técnico económico en función de nuevos antecedentes para rediseñar obras del proyecto y velar por el éxito del proyecto

- **Construcción de obras:** Construcción de obras hidráulicas del sistema de infiltración, tales como: toma, canales de aducción, decantador, sistema de medición (cajón aforador y cámara de infiltración), canal de desagüe. Instalación de equipos de instrumentación del sistema (transductores de presión, turbidímetro)
- **Operación del sistema:** Realización de pruebas de infiltración
- **Resultados:** Registro de datos de las pruebas realizadas.
- **Análisis de resultados:** Análisis integrado de caudal infiltrado e impacto en los niveles del acuífero en estudio. Determinación de las tasas de infiltración en el PPRAA.

4. **Etapa 4:**

- **Recomendaciones:** Generación de conclusiones y recomendaciones generales del estudio, a nivel local y de cuenca. Configuración final del trabajo realizado.

Figura 2-1: Metodología general de trabajo



Fuente: Elaboración propia

3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN, IDENTIFICACIÓN SITIOS Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA

3.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA

Se presenta en este capítulo la recopilación y análisis de los antecedentes técnicos que fueron utilizados en la confección de este estudio. Se presenta en una revisión de los antecedentes correspondientes a la caracterización de la cuenca, los que contienen antecedentes de unidades morfológicas (geomorfología) y geología regional, edafología, hidrología, hidrogeología, calidad de aguas superficiales y subterráneas y usos o derechos de aprovechamiento de aguas. A continuación se presenta una lista (Tabla 3-1) con la información utilizada, seguido de un resumen uno de los antecedentes principales.

Tabla 3-1: Antecedentes de la zona de estudio.

Autor	Fecha	Nombre	Fuente	Utilidad para el presente trabajo
Aquaterra	2012	Estudio hidrogeológico cuenca del río Mataquito. Informe elaborado para la Dirección General de Aguas	www.sea.gob.cl/	Geología e hidrogeología
Confederación Hidrográfica del Guadiana	2008	Programa hidrológico Viabilidad de recarga de acuífero, Plan Especial del Alto Guadiana, España	www.chguadiana.es/	Calidad de aguas
DGA	1987	Balance hídrico de Chile	http://www.dga.cl/	Hidrología
DGA	2014	s/n	http://www.dga.cl/	Caudales mensuales, precipitaciones mensuales y temperatura mensual
DGA	2014	s/n	Oficinas DGA	Evaporación, aforos
DGA-BNA	2014	Estadística Hidrometeorológica	http://www.dga.cl/	Niveles estáticos
DGA-CPA	2014	Derechos de aprovechamiento	http://www.dga.cl/	Derechos de aprovechamiento
Ecosam	2009	Declaración de Impacto Ambiental "Explotación Mecanizada de Áridos Río Lontué Sector km 1.500 a 3.650 Aguas Abajo Puente Lontué"	www.sea.gob.cl/	Calidad de aguas
Hauser, A.	1995	Carta hidrogeológica de Chile, N°2, Hoja Talca, VII Región, 73 p, 2 mapas escala 1:100.000. SERNAGEOMIN	Mapa - Documento físico	Hidrogeología
Linsley, R.K., Kohler, M.A. y Paulus, J.L.H.	1977	Hidrología para Ingenieros, Segunda edición, Editorial McGraw Hill	Libro físico	Hidrología
Luzio, W., Casanova, M. y	2010	Suelos de Chile	Oficina CIREN	Edafología

Tabla 3-1: Antecedentes de la zona de estudio.

Autor	Fecha	Nombre	Fuente	Utilidad para el presente trabajo
Seguel, O.				
PUC	2009	Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile Regiones XV, I, II y III. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile	Informe en oficina	Hidrología
SERNAGEOMIN	2003	Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000. Versión digital. SERNAGEOMIN	Mapa digital SERNAGEOMIN	Mapeo geológico de superficie

Fuente: Elaboración propia

Aquaterra, 2012. Estudio hidrogeológico cuenca del río Mataquito. Informe elaborado para la Dirección General de Aguas.

El objetivo general del estudio fue desarrollar un modelo conceptual y numérico (de flujo) del acuífero de la cuenca del río Mataquito. Estos modelos se realizan a partir de la información hidrogeológica levantada y de la aplicación de programas computacionales.

El resultado de este estudio entregó 2 modelos numéricos Visual Modflow complementarios en la cuenca, cada uno desarrollado y calibrado de manera independiente.

El primer modelo corresponde a los acuíferos asociados a los ríos Teno y Lontué, desde el límite Este de la cuenca hasta la localidad de Sagrada Familia. Este modelo se denominó "Teno-Lontué". El segundo modelo corresponde al relleno fluvial asociado al valle del río Mataquito, desde la localidad de Sagrada Familia hasta su desembocadura. Este modelo se denominó "Mataquito".

Dada la carencia de limnigramas de niveles freáticos sostenidos en el tiempo, ambos modelos se desarrollaron y calibraron en régimen permanente. Los niveles utilizados en la calibración corresponden a aquellos obtenidos en una campaña de terreno durante agosto y septiembre del 2012.

Con el modelo ya calibrado se evaluó la dinámica de la cuenca bajo 3 escenarios:

- Escenario 1: Aumento de las recargas de 85% a 50% de probabilidad de excedencia.
- Escenario 2: Incorporación de todas las captaciones catastradas, con y sin derechos asociados y recarga de 85%.
- Escenario 3: Variación de factores de uso de pozos de bombeo.

El escenario 1, representativo de una condición hidrológica seca, muestra para el modelo "Teno-Lontué" un importante aumento del afloramiento neto con respecto a lo obtenido en el escenario de calibración (cerca de un 40%), lo que indica una sensibilidad de la respuesta

del acuífero frente a las variaciones de la recarga naturales generadas por la hidrología local. El escenario 1 muestra para el modelo “Mataquito” un afloramiento neto sobre los cauces de la subcuenca de 3,2 m³/s.

El escenario 2, representativo de una condición de máxima explotación sobre el acuífero, muestra para el modelo “Teno-Lontué”, una disminución de 50% de caudales de afloramientos sobre los cauces naturales. El escenario 2, muestra para el modelo “Mataquito” un afloramiento neto sobre los cauces de la subcuenca de 2,5 m³/s, menor al obtenido en el Escenario 1, debido al aumento de explotación considerada.

El escenario 3, consideró el aumento de los factores de uso iniciales, definiendo 3 sub-escenarios: (1) multiplicación de los factores de uso por 1,5, (2) multiplicación de los factores de uso por 3,0 y (3) todos los factores equivalentes a 1,0. Este escenario muestra para el modelo “Teno-Lontué” un descenso de niveles entre 2,7 y 9 m. El escenario 3, muestra para el modelo “Mataquito” un descenso de niveles entre 0,1 y 0,3 m.

Este trabajo abarca los siguientes temas de utilidad para el presente informe:

- Geología acuífero Mataquito
- Estudio Geofísico (Gravimétrico) Acuífero Mataquito
- Caracterización Hidrogeológica acuífero Mataquito.

Ecosam, 2009. Declaración de Impacto Ambiental Explotación Mecanizada de Áridos Río Lontué Sector km 1.500 a 3.650 Aguas Abajo Puente Lontué

Este informe describe los resultados y conclusiones del análisis ambiental del área de influencia del proyecto “Declaración de Impacto Ambiental Explotación Mecanizada de Áridos Río Lontué Sector km 1.500 a 3.650 Aguas Abajo Puente Lontué”, en el cauce del río Lontué, comuna de Curicó, Región del Maule. Este trabajo tiene como fin complementar la información contenida en la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto.

La metodología de trabajo se basa en: (1) un reconocimiento en terreno del área de estudio, (2) una recopilación de información (trabajos anteriores y levantamiento de información en terreno) y (3) confección de la línea base.

Los capítulos desarrollados son: Medio Físico y Medio Humano. Dentro del Medio Físico se contempla: clima, geomorfología y geología, hidrografía superficial y subterránea, suelo, flora, fauna, paisaje y protección ambiental. Dentro del Medio Humano se contempla: centros poblados y demografía, actividades económicas, equipamiento social, salud y educación, infraestructura vial y patrimonio cultural.

El capítulo de hidrografía superficial y subterránea del trabajo de Ecosam, 2009, es de utilidad para el presente estudio, ya que presenta datos de calidad de aguas superficiales en 2 puntos del río Lontué.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

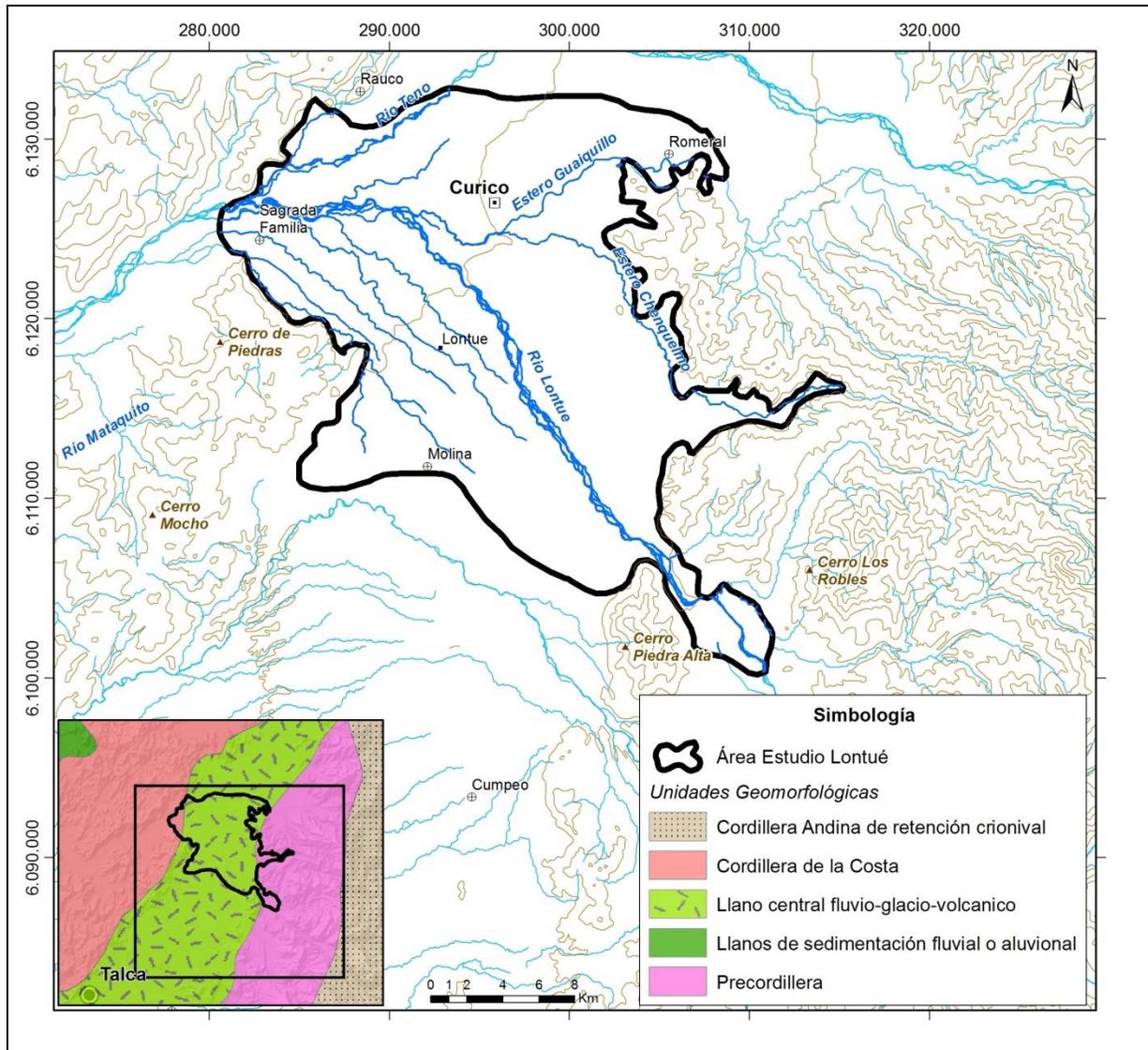
3.2.1 Unidades morfológicas y geología regional

3.2.1.1 *Unidades morfológicas*

El área de estudio se ubica principalmente en la unidad morfológica Depresión Intermedia, que en esta latitud es denominada Llano Central Fluvio-Glacio-Volcánico (Figura 3-1). Hacia el este, parte del área de estudio se localiza en la Precordillera (Figura 3-1). La zona de interés se caracteriza por ser relativamente llana con una cota promedio de 250 msnm, sin embargo, hacia el este, cerros pertenecientes a la Precordillera, presentan cotas mayores que 700 m, como los cerros Piedra Alta (1.061 msnm) y Los Robles (731 msnm). Muy cercano al límite oeste del área de estudio, el flanco este de la cordillera de la Costa está caracterizado por el cerro de Piedras y cerro Mocho (647 msnm).

El curso principal que drena el área, corresponde al río Lontué, el cual proviene desde el sureste en dirección noroeste. Recibe los aportes del estero Chenquelmo y Guaiquillo. Posteriormente y fuera del área de estudio, el río Lontué hace confluencia con el río Teno proveniente desde el noreste, naciendo en este punto el río Mataquito. De esta forma, el río Mataquito continua en dirección suroeste, bordeando el cordón de Palquibudi (Figura 3-1).

Figura 3-1: Geomorfología de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA

3.2.1.2 Geología de superficie

La geología del área de estudio se caracteriza por presentar unidades que varían en edad desde el Cretácico hasta el presente. Las principales litologías que caracterizan el área son rocas volcanosedimentarias y piroclásticas, sin embargo el relleno no consolidado ocupa gran parte de la superficie. A continuación se presenta la geología del área de estudio, según el mapa geológico escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN (Figura 3-2).

Rocas Estratificadas

Kia2: Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo. Secuencias sedimentarias y volcánicas: rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas.

OM2c: Oligoceno-Mioceno. Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas.

PI3t: Pleistoceno. Depósitos piroclásticos principalmente riolíticos, asociados a calderas de colapso. En la Depresión Central y valles de la Cordillera Principal, regiones V a VII.

Rocas Intrusivas

Kiag: Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo. Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita.

Mg: Mioceno. Granodioritas, dioritas y tonalitas. En la Cordillera Principal, regiones VII a X.

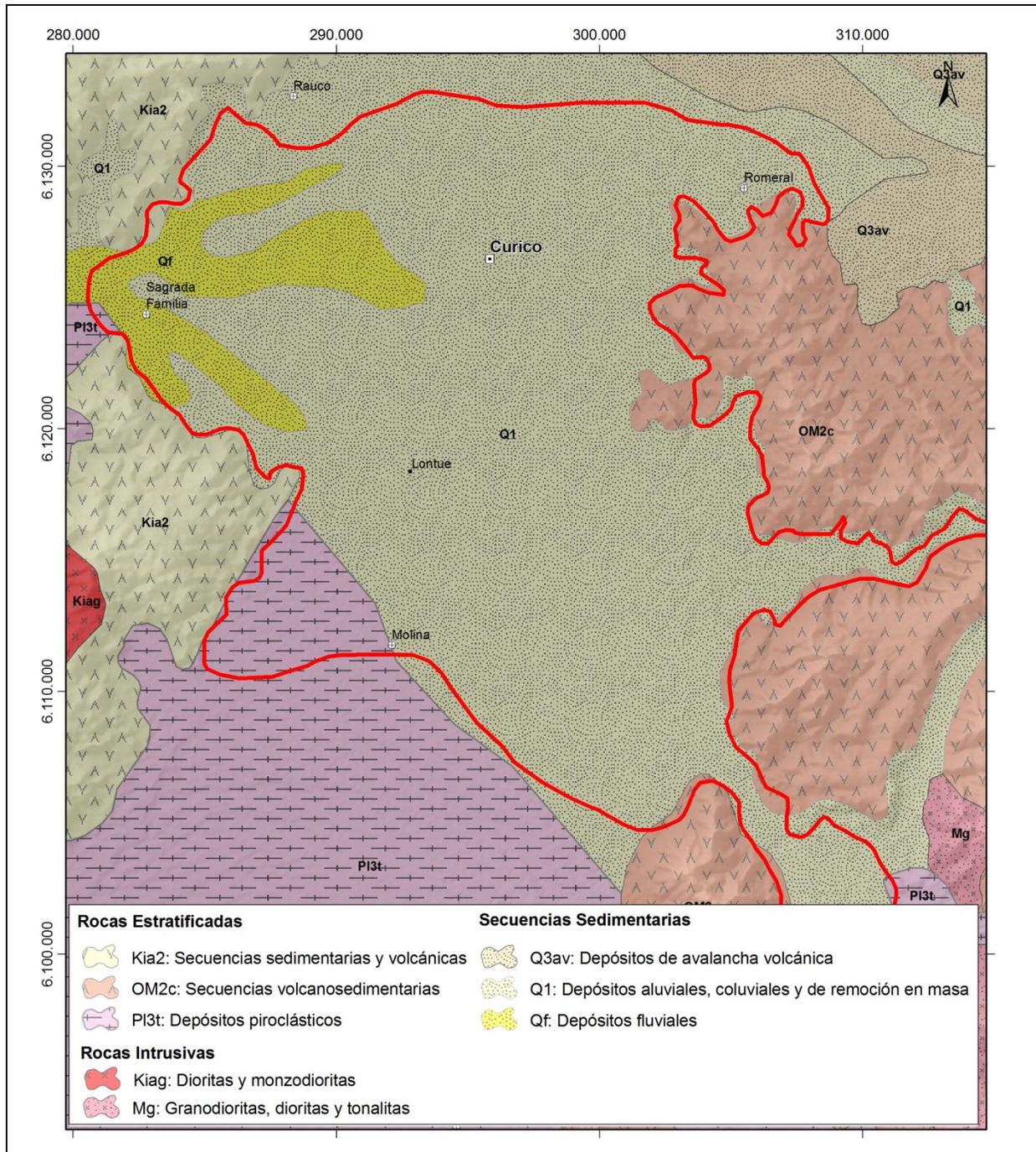
Sedimentos Actuales

Q3av: Cuaternario. Depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos.

Q1: Pleistoceno-Holoceno Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvio-glaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.

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

Figura 3-2: Geología del área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN, 2003

3.2.1.3 Geología de subsuperficie

El trabajo de DGA, 2012 presenta una serie de perfiles hidrogeológicos del sector de Lontué, elaborados a partir de datos geofísicos (gravimetría) y estratigrafía de pozos. Estos perfiles tienen una orientación este-oeste y de norte-sur (Figura 3-3).

Estos perfiles indican que el basamento rocoso reconocido por la geofísica bajo el relleno sedimentario es considerablemente irregular con desniveles de hasta 500 m en una distancia de 5 km (Figura 3-3, perfil DD'). El espesor del relleno tiene un valor típico de entre 100 y 200 m, con un máximo de 500 m hacia la zona norte del área de estudio.

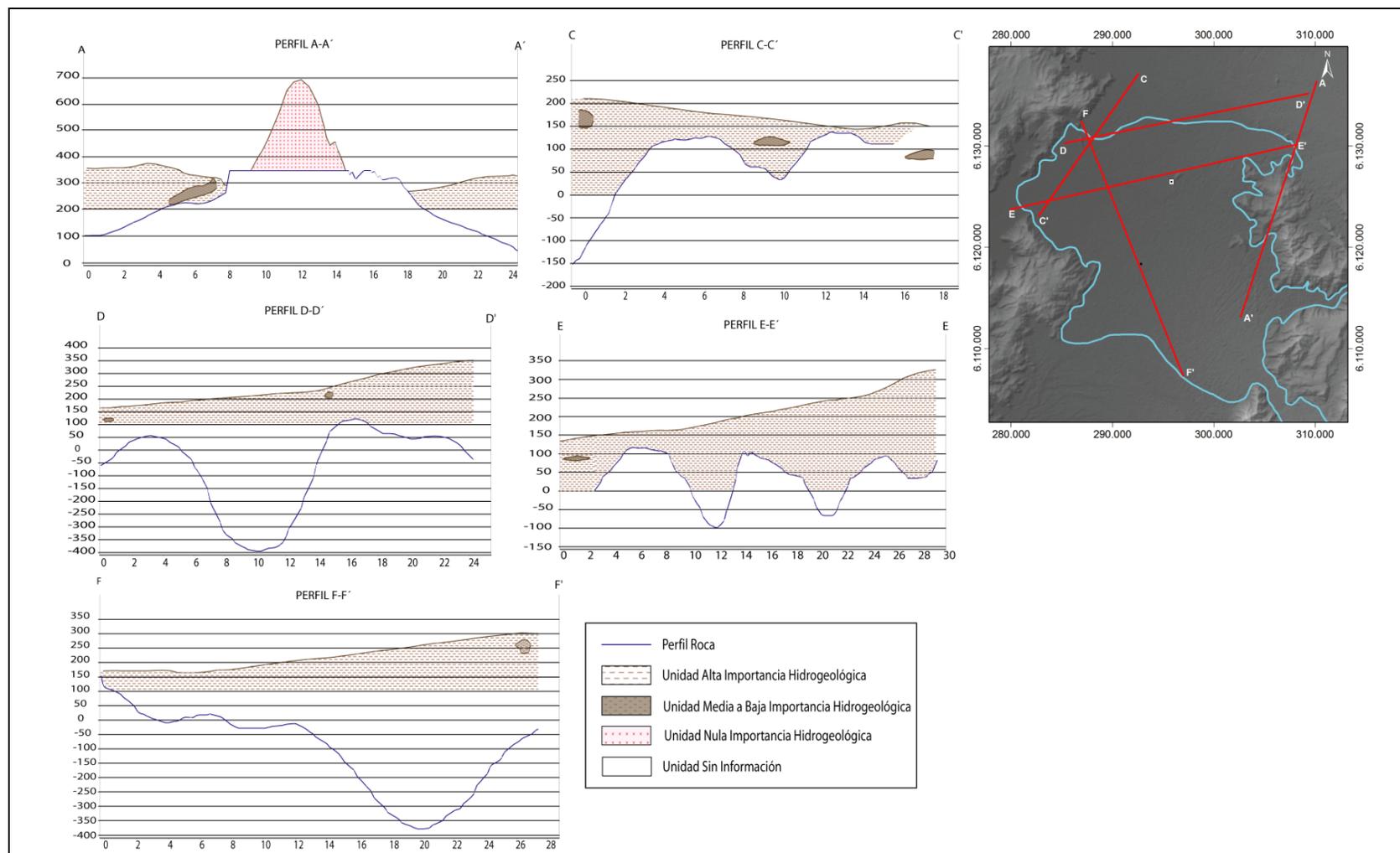
En este trabajo se reconocen tres unidades definidas de acuerdo a sus propiedades hidrogeológicas (Figura 3-3): 1) unidad de nula importancia hidrogeológica, 2) unidad de media a baja importancia hidrogeológica y 3) unidad de alta importancia hidrogeológica.

La primera unidad, de nula importancia hidrogeológica, puede correlacionarse con el basamento rocoso.

La segunda unidad, de media a baja importancia hidrogeológica, corresponde a una serie de intercalaciones arcillosas (indicadas de color café en Figura 3-3). Esta unidad corresponde a sedimentos mal seleccionados con hasta un 30% de arcilla, interpretados como depósitos de remociones en masa o corrientes de barro y en menor proporción sedimentos lacustres.

La tercera unidad de alta importancia hidrogeológica o relleno sedimentario corresponde principalmente a material aluvial de variada granulometría con clastos que van desde bolones a limo y bajo contenido de arcilla.

Figura 3-3: Perfiles hidrogeológicos



Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 2012

3.2.2 Edafología

Los suelos de Chile, según Luzio et al., 2010, se pueden clasificar por zonas edáficas. A continuación se describe el significado de éstas, sus características y la descripción de la zona edáfica a la cual pertenece la zona de estudio.

3.2.2.1 Zonas edáficas

El término zona edáfica, sugiere una uniformidad u homogeneidad de los cuerpos suelos que se encuentran enmarcados dentro de ella. Sin embargo, para una realidad geográfica y fisiográfica como la de Chile ello no ocurre, pues los paisajes han sido remodelados por diferentes agentes tales como el agua, el hielo, el viento, el volcanismo y, más recientemente, por el hombre. Teniendo presente la enorme variabilidad de suelos que se pueden encontrar en una misma zona edáfica, existen al menos dos elementos que pueden considerarse como relativamente constantes, que son, el contenido de agua y la temperatura media en la sección de control de los suelos (Luzio et al., 2010).

En base a trabajos anteriores en conjunto con los reconocimientos de suelos realizados entre la III Región de Atacama y la XI Región de Aysén por CIREN, entre 1996 y 2007, Luzio et al. (2010) asociaron los regímenes de humedad y de temperatura para los suelos en Chile, a las grandes regiones climáticas del país. Este trabajo se realizó tomando ambas variables en escalas generalizadas, esto es 1:500.000 o menor.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, Chile se puede subdividir en 8 Zonas Edáficas, las que se detallan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Zonas Edáficas de Chile

Zona Edáfica	Desde	Hasta
A- Suelos de la Zona Desértica	18° 00' LS	29° 00' LS
B- Suelos de la Zona Árida y Semiárida	29° 00' LS	32° 00' LS
C- Suelos de la Zona Mediterránea Árida	32° 00' LS	37° 45' LS
D- Suelos de la Zona Mediterránea Húmeda	37° 45' LS	43° 00' LS
E- Suelos de la Zona Húmeda	43° 00' LS	50° 00' LS
F- Suelos de la Zona de Magallanes	50° 00' LS	55° 00' LS
G- Suelos de la Zona Antártica	62° 00' LS	63° 00' LS
H- Suelos de la Isla de Pascua y de Juan Fernández	-	-

Fuente: Luzio et al., 2010

El área de estudio se ubica en la zona edáfica, suelos de la zona mediterránea árida, ubicada entre los 32° 00' y 37° 45' de latitud sur. A continuación se describen las principales características de esta zona edáfica.

3.2.2.1.1 Zona mediterránea árida

La zona mediterránea árida, puede ser subdividida, según su geomorfología en: Depresión intermedia, la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa. El área de estudio se ubica en la unidad morfológica Depresión Intermedia.

La Depresión Intermedia puede ser agrupada en: 1) Suelos en terrazas aluviales, 2) Suelos en posición de piedmont, 3) Suelos en cuencas de sedimentación lacustre, 4) Suelos sobre toba volcánica, 5) Suelos sobre sedimentos fluvio-glaciales, 6) Suelos de origen volcánico. La zona de estudio se encuentra en Suelos en terrazas aluviales, cuyas características se describen a continuación.

Suelos en terrazas aluviales. En las regiones de O'Higgins y Maule, se han descrito una gran cantidad de suelos que ocupan esta posición en el paisaje y que, además han tenido su origen en procesos relacionados con transporte y depositación aluvial. Como se puede esperar, se trata de suelos planos, con topografía que varía entre 1 y 2% y solamente en algunos casos el relieve puede variar a una pendiente de 2 a 3%. Para el caso de cuencas aluviales de menor tamaño, asociadas a cursos de agua también menores, la formación más frecuente es de terrazas aluviales de diferentes alturas y extensiones, pero siempre claramente diferenciadas como unidad geomorfológica independiente. En el caso de valles extensos, tales como los asociados a los ríos Cachapoal, Tinguiririca, Lontué y otros, los suelos se han desarrollado en posición de abanico aluvial de grandes extensiones.

La profundidad de los suelos es muy variable, desde los suelos delgados (menos de 50 cm) hasta suelos profundos (más de 100 cm). El sustrato está constituido, en la mayoría de los casos, por gravas redondeadas u subredondeadas de tamaño variable y en cantidad variable, con una matriz que es arenosa o franco arenosa. Esta matriz puede ser más fina, entre franco arcillosa, franco limosa o franco arcillo arenosa.

Las clases texturales de los horizontes superficiales pueden ser francas, franco limosa, franco arcillosa, franco arcillo limosa y, en una menor cantidad de suelos, puede ser de clases más gruesas, tales como franco arenosa o franco arenosa fina. En cambio, en el horizonte genético más profundo, en contacto con el sustrato, no se pudo establecer una tendencia clara, a causa de la gran variabilidad que se ha descrito (desde arcillosa hasta arena gruesa).

La mayoría de los suelos muestra una gran homogeneidad estructural, que se manifiesta por la presencia de bloques subangulares medios y finos con diferente consistencia. Escasos suelos muestran grado de no estructura (maciza o grano simple), en particular, en los horizontes más profundos. Tanto en superficie como en profundidad dominan los colores pardos y pardos oscuros. Los suelos con drenaje imperfecto pueden variar entre el pardo grisáceo, el gris oscuro y el negro; en cambio, aquellos suelos en los cuales se observa alguna influencia de materiales graníticos, pueden tener colores pardos rojizos oscuros.

La penetración radical es buena en todos los suelos, con un decrecimiento regular con la profundidad; solamente en los sustratos constituidos exclusivamente de gravas no se han descrito raíces.

El CO es siempre bajo en los epipedones, sin superar el 3%, decreciendo hasta 0.1% en los horizontes inferiores. La saturación de bases (SB), en todos los horizontes de la mayoría de los suelos, se encuentra sobre el 65%, sin una tendencia clara a aumentar o disminuir con la profundidad.

El pH se manifiesta sin grandes variaciones, entre 6 y 7. La presencia de carbonatos es ocasional en algunos horizontes de algunos suelos, sin que interfiera en su uso y manejo. En cambio, la presencia de rasgos redoximórficos es frecuente y se han descrito desde comunes a abundantes en los horizontes subsuperficiales. En general, el drenaje de los suelos es bueno, con Fases de drenaje moderado que puede llegar a imperfecto en algunas de ellas.

Desde el punto de vista taxonómico los Órdenes que se han descrito son: Alfisol (Gran Grupo Haploxeralf), Entisol (Grandes Grupos Xerofluvent y Xerorthent), Mollisol (Grandes Grupos HaploxerollPalexeroll y Argixeroll) e Inceptisol (Gran Grupo Haploxerept).

3.2.3 Hidrología

La caracterización hidrológica tiene el objetivo de disponer de antecedentes que permitan entender y cuantificar el comportamiento y disponibilidad de los recursos hídricos en las cuencas donde se emplazan las obras de recarga artificial y su interacción con el medio.

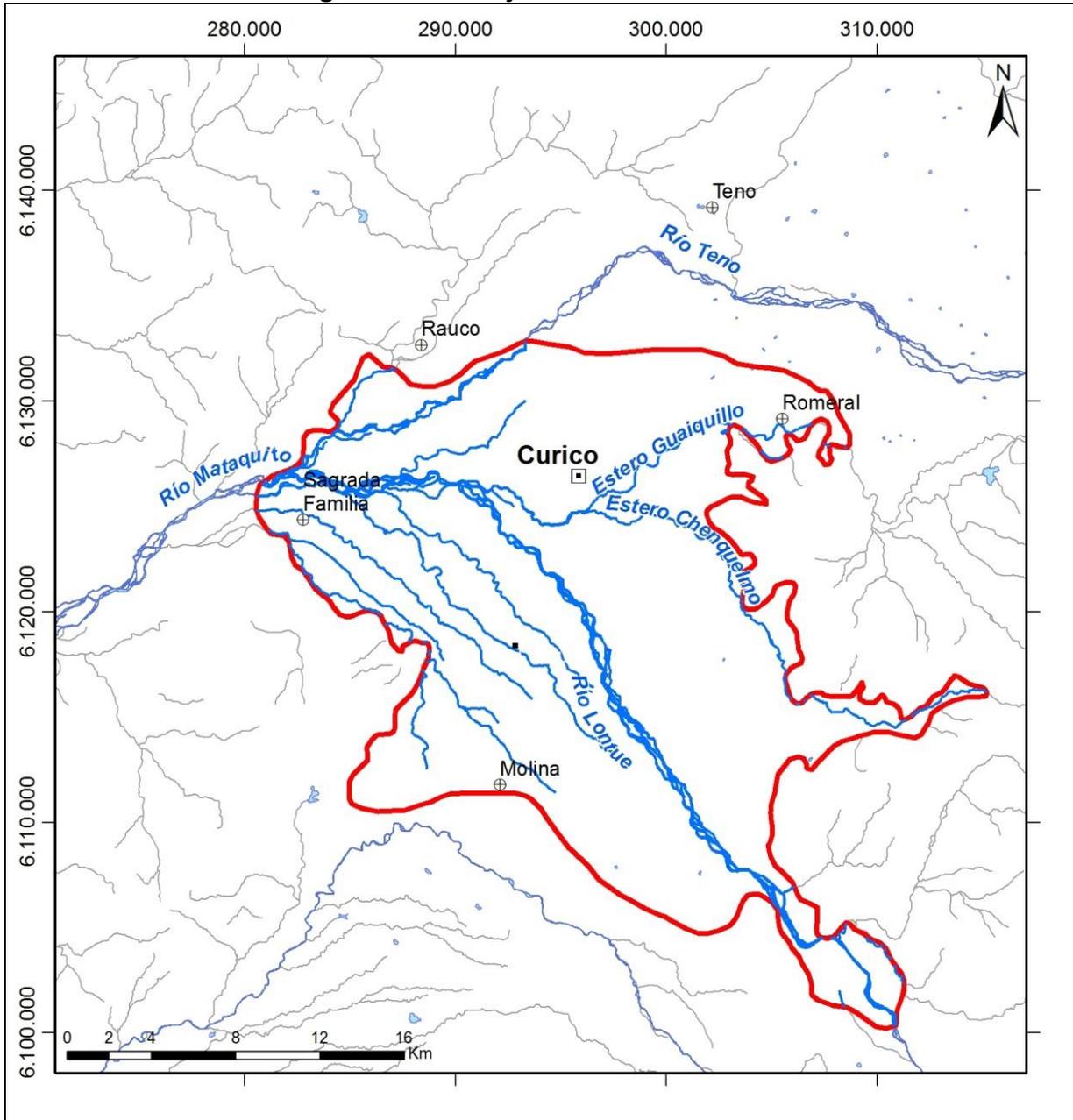
El curso principal que drena el área corresponde al río Lontué, el cual proviene desde el sureste en dirección noroeste. Recibe los aportes del estero Chenquelmo y Guaiquillo. Posteriormente y fuera del área de estudio el río Lontué se une con el río Teno proveniente desde el noreste, originándose en este punto el río Mataquito. De esta forma, el río Mataquito continúa en dirección suroeste, bordeando el cordón de Palquibudi (Figura 3-4).

Cabe señalar que la cuenca del río Mataquito ha sido señalada por la DGA como en situación de “Riesgo con limitaciones graves” en las temporadas 2012-2013 y 2013-2014.

3.2.3.1 Variables meteorológicas

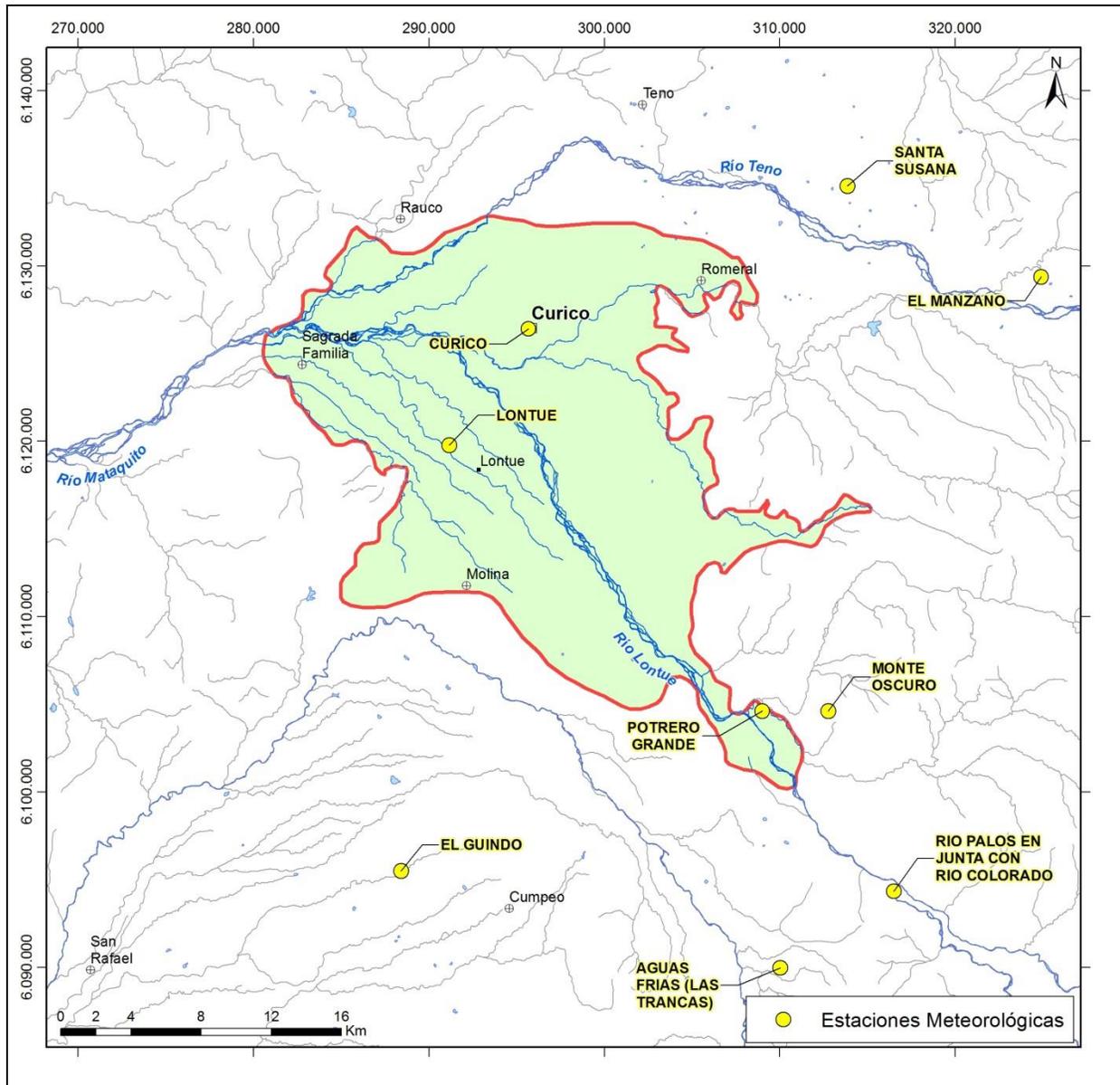
Se analizó a nivel local la información meteorológica y fluviométrica disponible (Anexo B) en la zona cercana al área de estudio, obteniéndose resultados de estadígrafos principales de los registros y estacionalidad de las series de precipitación, temperatura y evaporación. Se obtuvo la información en el Banco Nacional de Aguas (BNA) en la región del Maule, del total de la información disponible se seleccionaron aquellas estaciones cercanas al área de estudio (Figura 3-5) que presentan registros apropiados para su utilización, en cuanto a continuidad, homogeneidad y longitud.

Figura 3-4: Drenaje en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA

Figura 3-5: Estaciones meteorológicas en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA

3.2.3.1.1 Análisis de las precipitaciones

En la Tabla 3-3, se presentan las estaciones en las que se cuenta con información de precipitaciones.

En la Tabla 3-4 se presentan los estadígrafos principales de las serie de precipitación anual en las estaciones meteorológicas seleccionadas considerando el año hidrológico (abril a

marzo). Específicamente las estaciones Río Palos en junta con río Colorado, Lontué y Curicó se ubican dentro de la zona de estudio, en las que se observa que las precipitaciones promedio anual varían entre 650 y 986 mm, con desviaciones que equivalen a dos quintos del valor promedio. Esto indica variabilidad de la precipitación en la zona de estudio, en efecto, se han observado años secos asociados a bajas precipitaciones y años húmedos, asociados a altas precipitaciones.

Tabla 3-3: Estaciones meteorológicas en la zona de estudio

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
1	El Manzano	07104005-4	Vigente	1959-2013	574
2	Santa Susana	07106007-1	Vigente	1981-2013	410
3	Río palos en junta con río Colorado	07115001-1	Vigente	2001-2013	600
4	Monte Oscuro	07116004-1	Vigente	1994-2013	632
5	Potrero Grande	07116005-K	Vigente	1971-2013	445
6	Curicó	07118003-4	Vigente	1971-2013	195
7	Lontué	07119007-2	Vigente	1969-2013	199
8	Aguas Frías (Las Trancas)	07371002-2	Vigente	1992-2013	560
9	El Guindo	07373003-1	Vigente	1964-2013	250

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Tabla 3-4: Estadígrafos principales de las series de precipitación anual

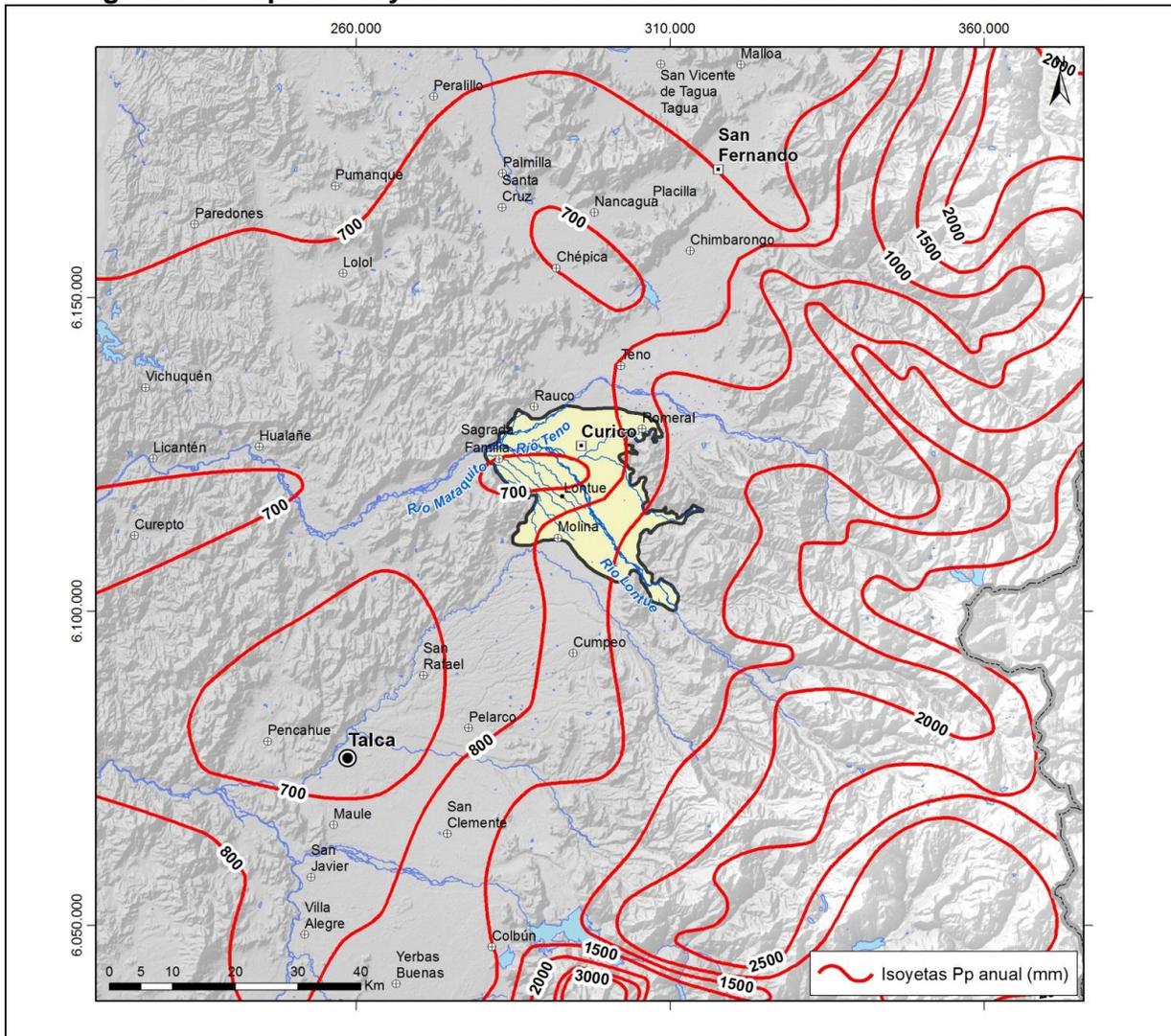
N°	Nombre	Años Completos*	Mín. (mm)	Máx. (mm)	Promedio (mm)	Desv. Est. (mm)	Coef. Asim.	Coef. Var.
1	El Manzano	43	307,1	2298,0	1247,5	474,6	0,5	0,4
2	Santa Susana	28	222,8	1434,4	779,1	299,5	0,2	0,4
3	Río palos en junta con río Colorado	12	415,1	1585,1	986,3	347,3	0,3	0,4
4	Monte Oscuro	19	408,0	2379,1	1352,2	512,9	0,3	0,4
5	Potrero Grande	42	311,3	2064,8	1096,6	390,6	0,4	0,4
6	Curicó	40	183,6	1502,0	675,3	261,4	0,7	0,4
7	Lontué	36	168,2	1151,5	649,7	228,5	0,1	0,4
8	Aguas Frías (Las Trancas)	21	289,6	2062,7	1185,2	506,8	0,1	0,4
9	El Guindo	49	186,4	1252,0	699,8	250,1	0,3	0,4

* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

En la Figura 3-6 se presenta el mapa de isoyetas de precipitación anual en la zona de estudio obtenidas del trabajo de DGA, 1987, en las que se observa que la precipitación media anual varía entre 700 y 1.000 mm para la zona de estudio.

En la Tabla 3-5 se presentan las precipitaciones promedio mensuales en las estaciones seleccionadas para la zona de estudio. En La Figura 3-7 se presenta gráficamente la distribución mensual del promedio de la precipitación mensual en las 3 estaciones que se encuentran dentro del área de estudio, en ésta se observa que la precipitación se concentra en los meses de invierno (mayo a agosto). Finalmente en la Tabla 3-6 se presenta la precipitación estacional donde se observa la estacionalidad en los meses de invierno, concentrándose el 75% de la precipitación del año hidrológico en ese periodo.

Figura 3-6: Mapa de Isoyetas medias anuales en la subcuenca del Río Lontué



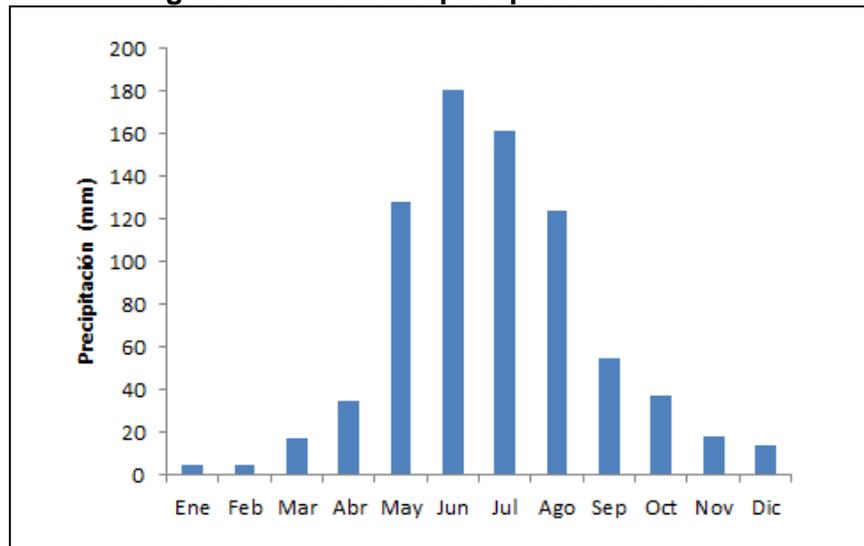
Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 1987

Tabla 3-5: Caracterización de precipitaciones mensuales

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	El Manzano	4	4	13	55	181	301	265	191	107	68	33	19
2	Santa Susana	2	4	11	37	128	188	149	132	61	40	15	12
3	Río Palos en Junta con Colorado	7	8	30	40	157	225	215	187	59	47	25	24
4	Monte Oscuro	5	12	21	65	183	342	238	247	116	60	22	17
5	Potrero Grande	5	6	18	53	190	255	223	160	88	58	31	14
6	Curicó	3	3	11	30	122	162	139	98	50	30	13	7
7	Lontué	3	4	11	34	104	155	131	85	54	33	17	10
8	Agua Fría	6	13	24	61	166	293	220	197	104	64	26	16
9	El Guindo	4	5	13	39	122	160	140	93	52	37	18	14

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Figura 3-7: Promedio precipitación mensual



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Tabla 3-6: Caracterización de precipitaciones estacional

Nº	Estación	Prec. Año Hid. (mm)	May-Ago		Sep-Abr	
			mm	%	mm	%
1	El Manzano	1.247	942	76	305	24
2	Santa Susana	778	596	77	182	23
3	Río Palos en Junta con Colorado	986	755	77	231	23
4	Monte Oscuro	1.352	1.029	76	323	24
5	Potrero Grande	1.100	828	75	272	25
6	Curicó	674	526	78	149	22
7	Lontué	641	475	74	166	26

Tabla 3-6: Caracterización de precipitaciones estacional

Nº	Estación	Prec. Año Hid. (mm)	May-Ago		Sep-Abr	
			mm	%	mm	%
8	Agua Fría	1.185	873	74	312	26
9	El Guindo	700	518	74	182	26

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

3.2.3.1.2 Análisis de la evaporación

La caracterización de la evaporación en la zona de estudio se realizó a nivel mensual y anual. Se utilizaron series de evaporación potencial diaria promediada a nivel mensual, obtenidas desde el BNA. En la Tabla 3-7 se presentan las estaciones con información de evaporación.

Tabla 3-7: Estaciones meteorológicas con información de evaporación

Nº	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
5	Potrero Grande	07116005-K	Vigente	1975-2013	445

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

La Tabla 3-8 contiene los estadígrafos principales de la serie de evaporación potencial en la estación potrero grande para el año hidrológico (abril a marzo), para la cual se obtuvo un promedio de 2,6 mm/d con valores mínimo y máximo de 2,1 y 3,7 mm/d. Es importante considerar que las estadísticas de la DGA corresponden a tanques evaporímetros, a cuyas mediciones se debe aplicar un factor de corrección (Linsley et al., 1977) para estimar la evaporación real según la superficie de evaporación (lagunas, suelo real, etc.). Esta corrección se debe a pérdidas o ganancias caloríficas a través de las paredes y fondo del tanque, y para la zona de estudio el factor varía entre 0,6 y 0,7 (PUC, 2009).

En la Tabla 3-9 se presentan los promedios mensuales de evaporación para la estación potrero grande y en la Figura 3-8 se presenta gráficamente la variación mensual de la evaporación diaria, en la cual se observa que las mayores tasas de evaporación potencial se registran en los meses de verano, siendo los valores máximos en los meses de diciembre, enero y febrero, con evaporaciones potenciales diarias que llegan a los 5,6 mm/día en promedio.

Tabla 3-8: Estadígrafos principales de las series de evaporación

Nº	Nombre	Años Completos*	Mín. (mm/d)	Máx. (mm/d)	Promedio (mm/d)	Desv. Est. (mm/d)	Coef. Asim.	Coef. Var.
5	Potrero Grande	37	2,1	3,2	2,6	0,3	0,1	0,12

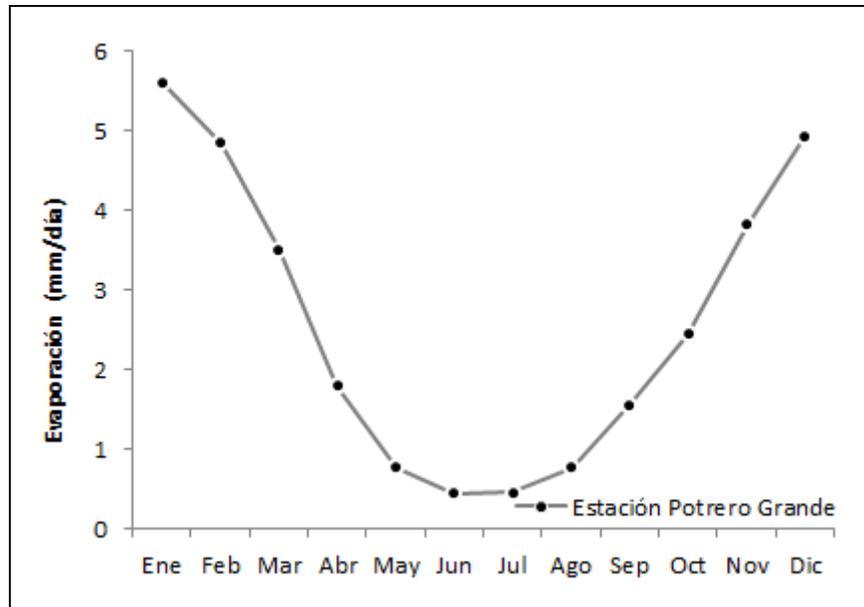
* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Tabla 3-9: Caracterización de la evaporación (mm/día) a nivel mensual

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	Potrero Grande	5,6	4,9	3,5	1,8	0,8	0,4	0,5	0,8	1,6	2,5	3,8	4,9

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Figura 3-8: Evaporación promedio mensual en la estación Potrero Grande



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

3.2.3.1.3 Análisis de la temperatura

La caracterización de la temperatura en la zona de estudio se realizó a nivel mensual y anual. Se utilizaron series de temperatura media absoluta obtenidas desde el BNA. En la Tabla 3-10 se presentan las estaciones con información de temperatura.

Tabla 3-10: Estaciones meteorológicas con información de temperatura

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
5	Potrero Grande	07116005-K	Vigente	1967-1993	445

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

La Tabla 3-11 contiene los estadígrafos principales de las series de temperatura anual en la estación Potrero Grande para el año hidrológico (abril a marzo). En la Tabla 3-12 se presentan los promedios mensuales de temperatura para la estación potrero grande y en la Figura 3-9 se presenta la variación mensual de la temperatura para la misma estación, en la cual se observa un comportamiento acorde al régimen estacional de la zona, con temperaturas mínimas en los meses de invierno (junio a agosto) y máximas en los meses de verano.

Tabla 3-11: Estadígrafos principales de las series de temperatura

Nº	Nombre	Años Completos*	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Promedio (°C)	Desv. Est. (°C)	Coef. Asim.	Coef. Var.
5	Potrero Grande	24	10,2	13,0	12,3	0,7	-1,7	0,05

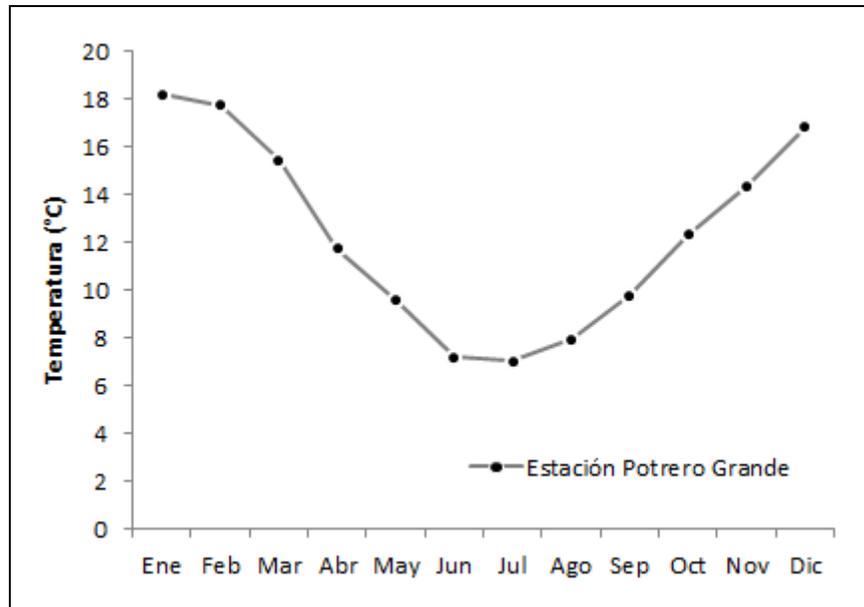
* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Tabla 3-12: Caracterización de temperaturas (°C) a nivel mensual

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
5	Potrero Grande	18,2	17,7	15,5	11,8	9,6	7,2	7,0	7,9	9,8	12,3	14,4	16,8

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

Figura 3-9: Temperatura promedio mensual en la estación Potrero Grande



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

3.2.3.2 Variables fluviométricas

Se analizó a nivel local la información fluviométrica disponible en la zona cercana al área de estudio, obteniéndose resultados de estadígrafos principales y estacionalidad de las series de caudales medios mensuales.

En la zona de estudio existen tres estaciones fluviométricas de interés ya que se ubican aguas arriba de la zona de estudio y miden el caudal aportante de los afluentes del río Lontué, estas son: Río Colorado en junta con Palos, Río Palos en junta con Colorado y Estero Upeo en Upeo.

La ubicación de las estaciones fluviométricas de monitoreo de la DGA, en torno al área de estudio, se presentan en la Figura 3-10 y en la Tabla 3-13 se presentan las estaciones fluviométricas tabuladas.

Tabla 3-13: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
1	Estero el manzano antes junta río Teno	07104001-1	Suspendida	1960-1984	690
2	Río Colorado en junta con Palos	07112001-5	Vigente	1930-2013	600
3	Río palos en junta con Colorado	07115001-1	Vigente	1947-2013	600
4	Estero Upeo en Upeo	07116001-7	Vigente	1963-2013	450
5	Río Claro en Camarico	07372001-K	Vigente	1936-2013	220

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

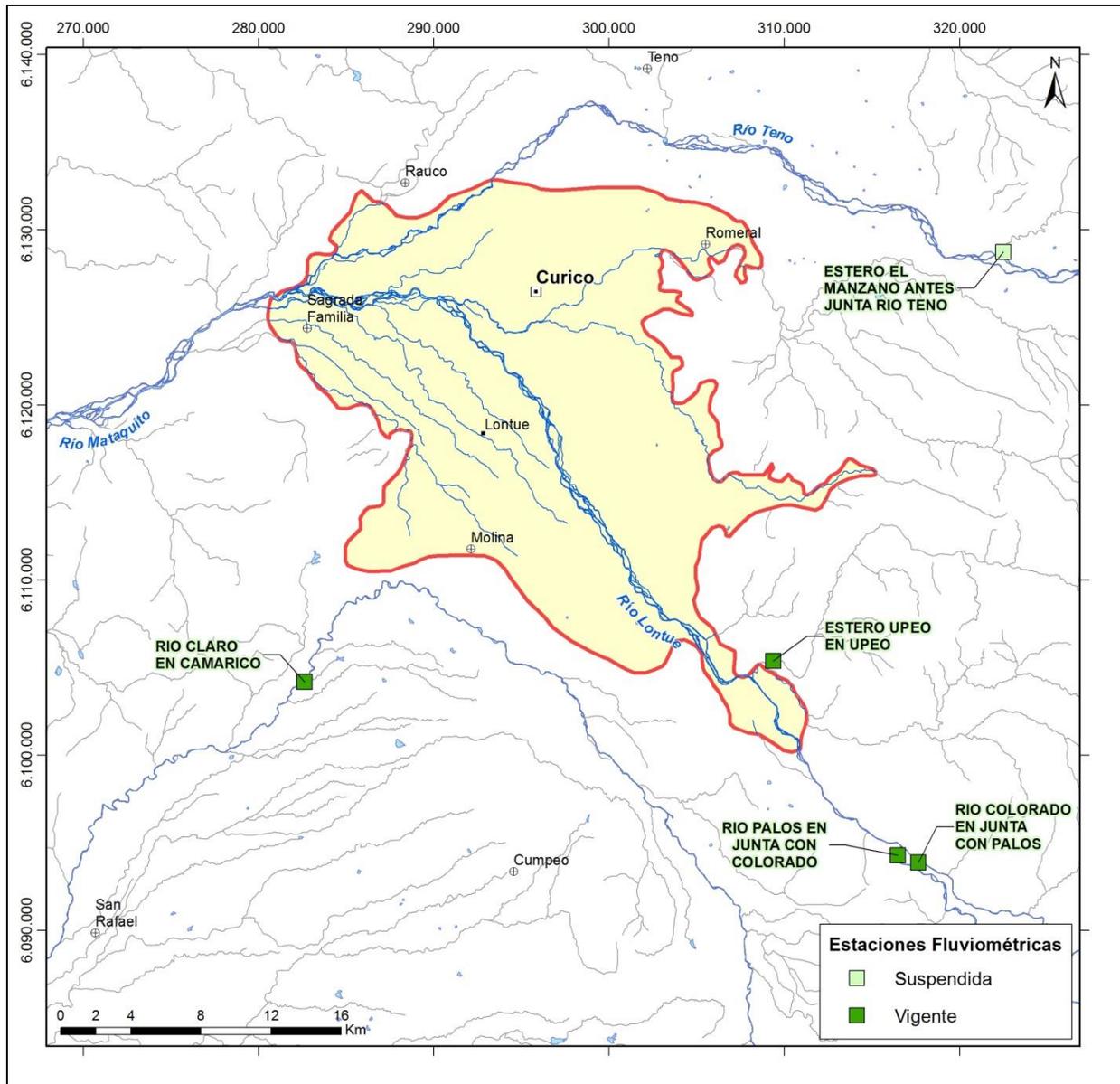
En la Tabla 3-14 presentan los estadígrafos principales de las series de caudales medios mensuales para el año hidrológico (abril a marzo) y en la Tabla 3-15 se presenta el promedio mensual de las series de caudal medio mensual. Se observa que el promedio del caudal medio anual varía entre 2,9 y 44,6 m³/s, con desviaciones que van entre uno y dos tercios del valor promedio. Esto indica la existencia de ríos y/o esteros con variabilidad de los caudales en la zona con años secos asociados a bajas precipitaciones y años húmedos, asociados a altas precipitaciones.

Tabla 3-14: Estadígrafos principales de las series de caudal medio anual

N°	Nombre	Años Completos*	Mín. (m ³ /s)	Máx. (m ³ /s)	Promedio (m ³ /s)	Desv. Est. (m ³ /s)	Coef. Asim.	Coef. Var.
1	Estero el manzano antes junta río Teno	24	0,1	8,0	2,9	1,9	0,9	0,7
2	Río Colorado en junta con Palos	48	13,9	103,4	44,4	16,6	1,1	0,4
3	Río palos en junta con Colorado	46	10,8	46,7	28,1	9,1	0,4	0,3
4	Estero Upeo en Upeo	47	0,7	16,8	7,0	3,7	0,5	0,5
5	Río Claro en Camarico	65	4,0	38,8	19,3	8,3	0,4	0,4

* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Figura 3-10: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA

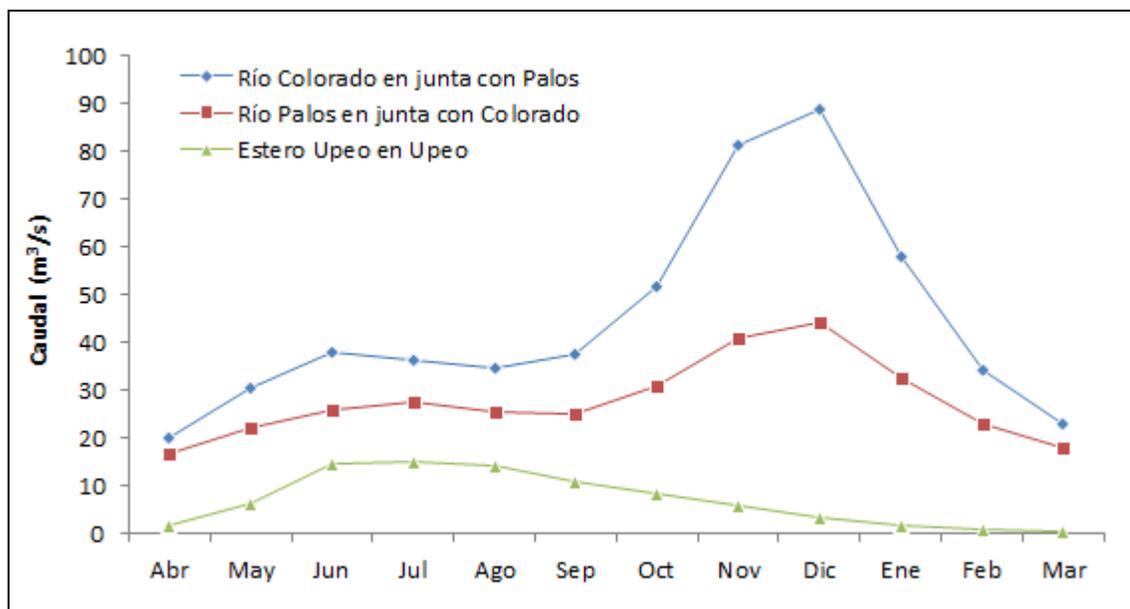
Tabla 3-15: Promedio mensual de caudales en las estaciones seleccionadas (m³/s)

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Estero el manzano antes junta río Teno	0,5	0,4	0,3	0,4	1,5	5,9	9,4	6,4	5,1	3,0	1,7	0,7
2	Río Colorado en junta con Palos	58,1	34,3	23,1	19,9	30,4	37,9	36,5	34,7	37,4	51,7	81,5	88,9
3	Río palos en junta con Colorado	32,5	23,2	18,1	16,7	22,2	25,9	27,7	25,7	25,3	30,8	41,0	44,3
4	Estero Upeo en Upeo	1,6	0,8	0,6	1,6	6,3	14,8	15,1	14,3	10,8	8,4	5,8	3,5
5	Río Claro en Camarico	5,7	4,9	7,7	7,4	20,7	34,2	38,6	37,0	29,4	21,4	16,8	11,0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

En la Figura 3-11 se muestra la distribución anual de los promedios de caudal medio mensual en las estaciones ubicadas en la cabecera de la zona de estudio y que monitorean los afluentes del río Lontué. Se observa la estacionalidad en los meses de verano debido a la influencia de los deshielos en las estaciones Río Colorado en junta con Palos y Río Palos en junta con Colorado generando un claro régimen nival con una baja influencia pluvia con su máximo en el mes de diciembre. Para el caso de Estero Upeo en Upeo se observa un claro régimen pluvial con su máximo en los meses de junio y julio.

Figura 3-11: Promedio caudal medio mensual en estaciones seleccionadas



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

3.2.4 Hidrogeología

3.2.4.1 Unidades hidrogeológicas

La carta hidrogeológica de Chile 1:100.000 (Hauser, 1995) indica que en el área de estudio la unidad hidrogeológica de mayor relevancia corresponde a depósitos sedimentarios no consolidados, compuestos por depósitos de abanico fluvial del río Lontué. Esta unidad corresponde a una secuencia de buena continuidad lateral, conformada predominantemente por bancos de ripios, gravas y gravas arenosas, con ocasionales intercalaciones lenticulares limo-arcillosas. El tamaño de la fracción clástica desciende en sentido este-oeste. Los clastos son heterocomposicionales y subredondeados. Estas unidades también son identificadas en el trabajo de DGA, 2012, como se describe en el capítulo Geología de superficie.

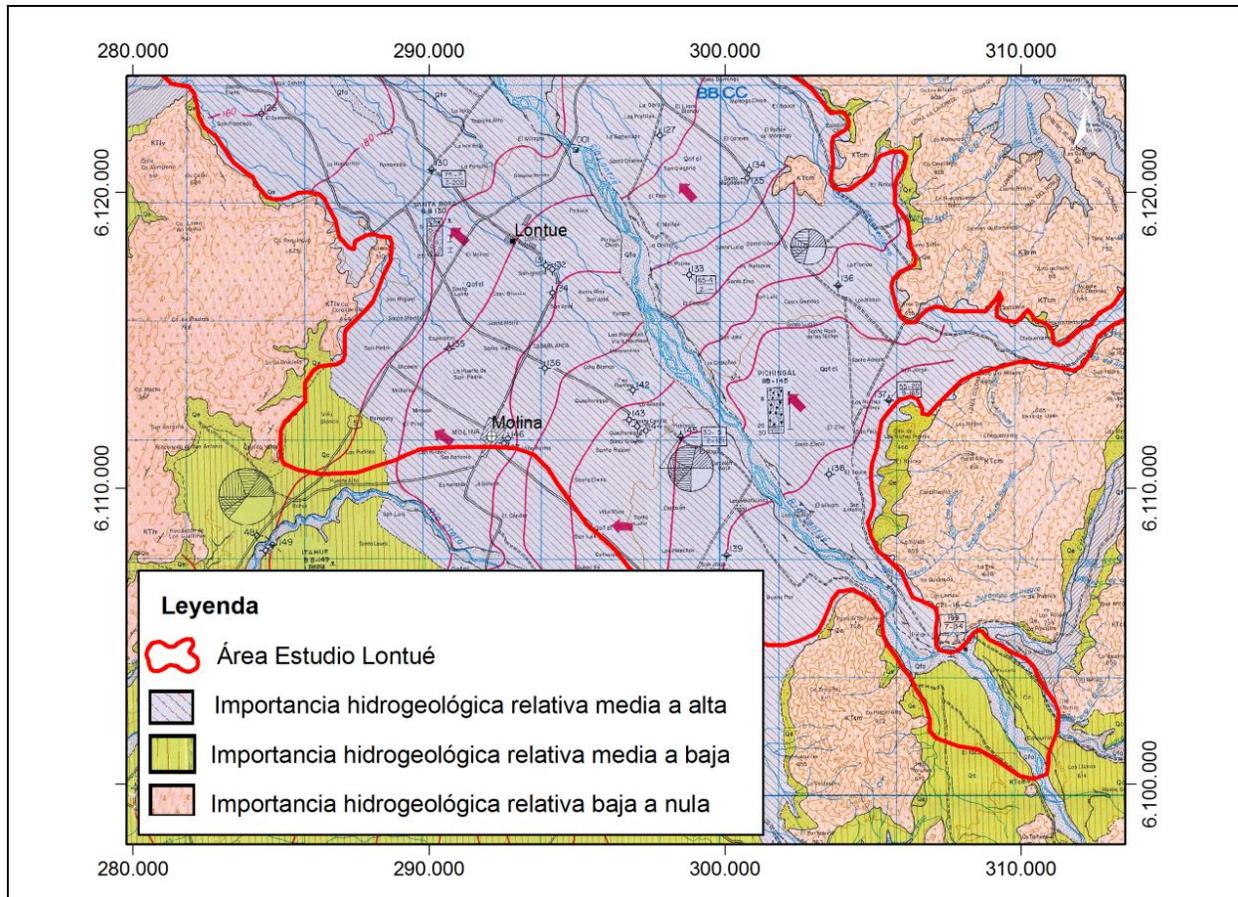
Según el estudio de DGA, 2012, este acuífero tendría un espesor típico de entre 100 y 200 m, alcanzando un máximo de 500 m hacia la parte norte del área de estudio (Figura 3-3).

Los acuíferos identificados por Hauser (1995) en ésta unidad, serían del tipo libres a semiconfinados, de gran extensión, con niveles estáticos someros (3-6 m), con escasas oscilaciones estacionales. Corresponden a acuíferos con alta transmisividad y una clara profundización del nivel estático en torno al borde preandino. Se caracterizan por una eficiente recarga pluvial y por retornos de riego en morfología llana. Poseen una transmisividad de $2.500 \text{ m}^2/\text{día}$ y almacenamiento de 10^{-2} .

En la Figura 3-12 se observan las unidades hidrogeológicas de la zona de estudio, donde el color violeta representa a zonas con ocurrencia de agua en depósitos porosos de importancia hidrogeológica relativa media a alta, el color verde corresponde a zonas con ocurrencia de agua en depósitos o rocas fracturadas de importancia hidrogeológica relativa media a baja. El color rosado corresponde a zonas con ocurrencia de agua en rocas porosas, fracturadas o alteradas, de importancia hidrogeológica relativa baja a nula.

Según se ha podido verificar, posteriormente a la recopilación de información de geología e hidrogeología del área de estudio, no existe un entendimiento detallado de la geometría y composición de los distintos estratos del subsuelo. Un modelo geológico de detalle es necesario para una primera aproximación a la naturaleza del relleno no saturado sobre la napa. Este modelo de detalle permitirá evaluar la capacidad de almacenamiento para las aguas infiltradas mediante la recarga artificial y reconocer el método de infiltración más adecuado para el área estudiada. Para la construcción de un modelo de detalle es necesario realizar campañas de perforación orientadas a describir la zona no saturada y con la densidad apropiada para distinguir la continuidad horizontal de las distintas unidades acuíferas.

Figura 3-12: Unidades hidrogeológicas



Fuente: Modificado de Hauser, 1995

3.2.4.2 Análisis de niveles del agua subterránea

3.2.4.2.1 Variación temporal de la profundidad del nivel de agua subterránea

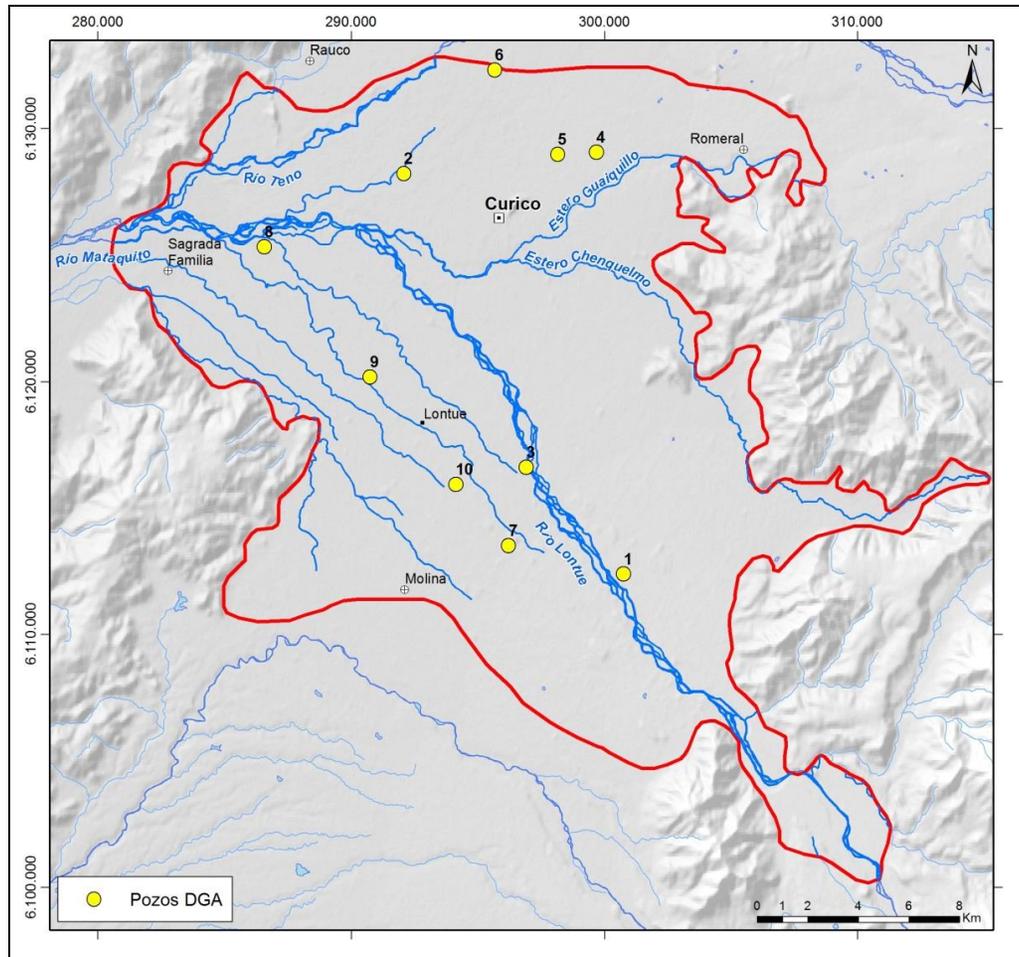
En el sector de estudio se encuentran 10 estaciones de monitoreo de la DGA, sin embargo, la única información disponible en el sector corresponde a 2 pozos (Vigna Casa blanca (Nº 10) y Asentamiento El Salvador (Nº3)) cuya extensión de los registros no supera los 4 años. Considerando esto, no se cuenta con información suficiente para realizar un análisis de la variación temporal de la profundidad de niveles. En la Tabla 3-16 y Figura 3-13. se presentan los pozos de monitoreo de la DGA.

Tabla 3-16: Estaciones de monitoreo en sector de estudio y características principales

Nº	Estación	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Registros
1	A.P. Molina	07117006-3	300755	6112385	01/01/1969- 16/01/2014
2	A.P. Pueblo Tutuquen	07106009-8	292084	6128222	01/01/1957- 16/01/2014
3	Asentamiento El Salvador	07117005-5	296911	6116616	01/01/1969- 16/01/2014
4	Fundo Montecristo	07106011-K	299679	6129070	01/11/1968- 16/01/2014
5	Fundo Santa Ana	07106013-6	298158	6128975	01/08/1969- 16/01/2014
6	Fundo Santa Gloria	07106010-1	295672	6132311	01/03/1969- 16/01/2014
7	Huerto Montecarlo	07117007-1	296220	6113517	01/12/1968- 16/01/2014
8	Pueblo Lo Valdivia	07119008-0	286568	6125320	01/11/1967- 16/01/2014
9	Pueblo Santa Rosa de Lontué	07117004-7	290746	6120176	01/10/1967- 16/01/2014
10	Vigna Casablanca	07117003-9	294138	6115937	01/07/1969- 16/01/2014

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

Figura 3-13: Estaciones de monitoreo en el sector de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

3.2.4.2.2 Cobertura de isopiezas y sentido del escurrimiento

La metodología utilizada para obtener el mapa de curvas equipotenciales en el área de estudio se describe a continuación.

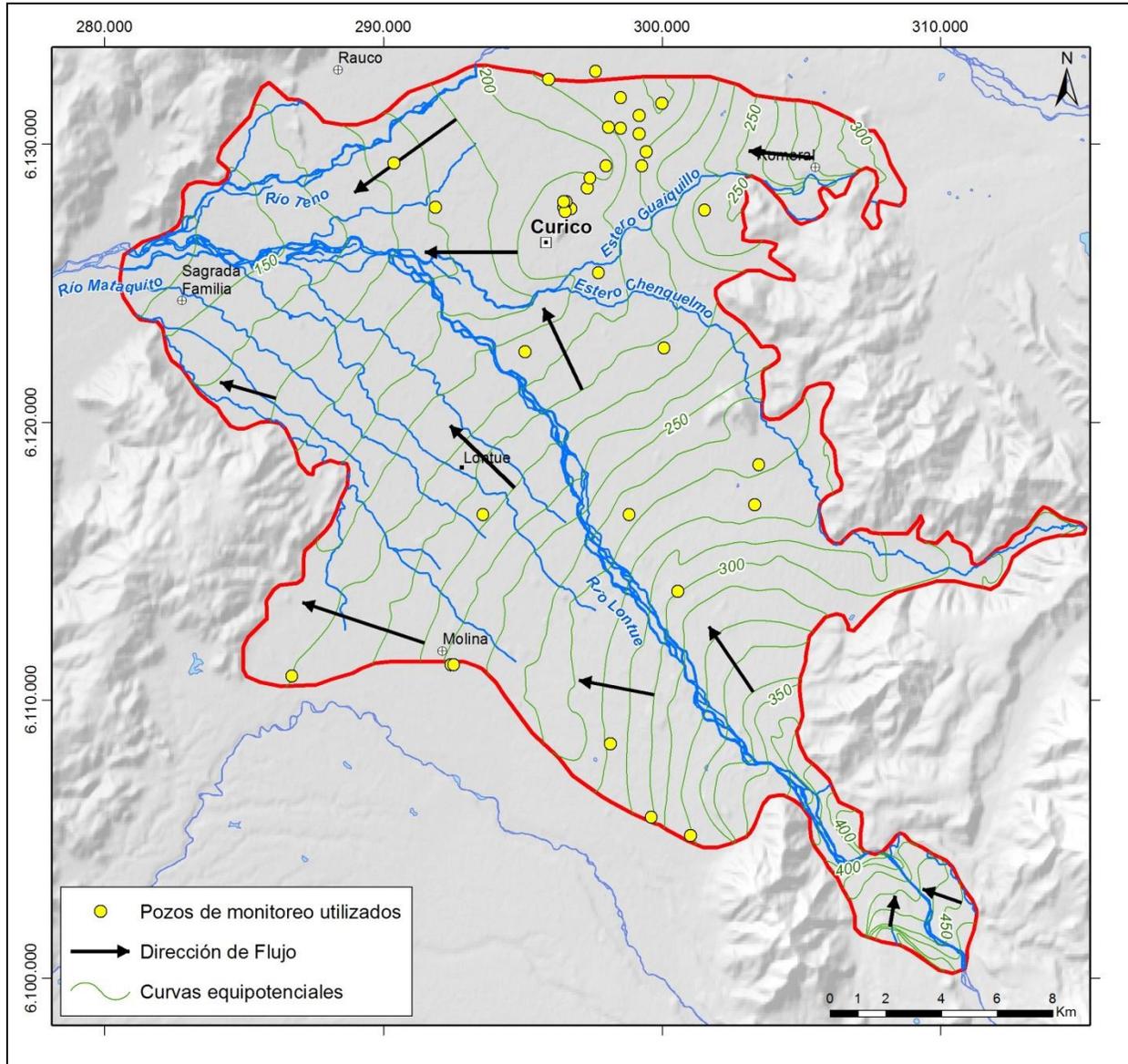
1. Los niveles estáticos representativos del área de estudio fueron obtenidos del catastro realizado por Aquaterra, 2012. Estos datos corresponden al promedio de los niveles estáticos registrados en pozos de monitoreo para el segundo semestre del año 2001.
2. Luego se identificó el área cubierta por relleno sedimentario dentro de la zona de estudio, y se consideró esta área como el área de extensión del acuífero.
3. Los datos de niveles estáticos en m de profundidad fueron traspasados a msnm usando los datos topográficos del Modelo de Elevación Digital (DEM) ASTER de resolución espacial 30 m.
4. Finalmente se interpolaron de los datos de niveles estáticos en msnm usando el software ArcGIS (herramienta Topo To Raster, utilizando la extensión del acuífero como frontera).

El catastro de Aquaterra, 2012, indica que los valores promedio de niveles estáticos para el segundo semestre del año 2001 fluctúan entre los 0,6 y 39 m de profundidad.

La piezometría obtenida indica que el flujo de agua subterránea tiene una dirección principal sureste-noroeste, paralelo al curso del río Lontué. En la zona de Romeral la dirección del flujo es este-oeste, y noreste-suroeste en la zona de Curicó, paralela al flujo del estero Guaquillo (Figura 3-14).

Adicionalmente, el trabajo de Aquaterra entrega valores de nivel estático medidos entre agosto y septiembre del año 2012, para 201 pozos en la cuenca del río Mataquito, de los cuales 88 se encuentran dentro del área del presente estudio (Anexo C). Estos datos indican que para el período invierno-primavera 2012, los niveles en el área de estudio se encuentran entre 0 y 92 m de profundidad.

Figura 3-14: Curvas equipotenciales promedio para el segundo semestre del año 2001 y pozos de monitoreo para la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Calidad de aguas superficiales y subterráneas

3.2.5.1 Datos en la zona de estudio

En la zona de estudio se cuenta sólo con datos de calidad química de aguas superficiales. Esta información proviene tanto de estaciones de monitoreo de calidad de aguas de la DGA como de trabajos anteriores. En particular se cuenta con la siguiente información:

- Datos de un muestreo realizado en la primavera del 2003 en dos sectores sobre el área de estudio (Río Lontué en Panamericana y Río Lontué a/j río Teno) (Ecosam, 2009)
- Datos de la red calidad química DGA en 4 estaciones superficiales a lo largo del área de estudio según información que se presenta en la Tabla 3-17

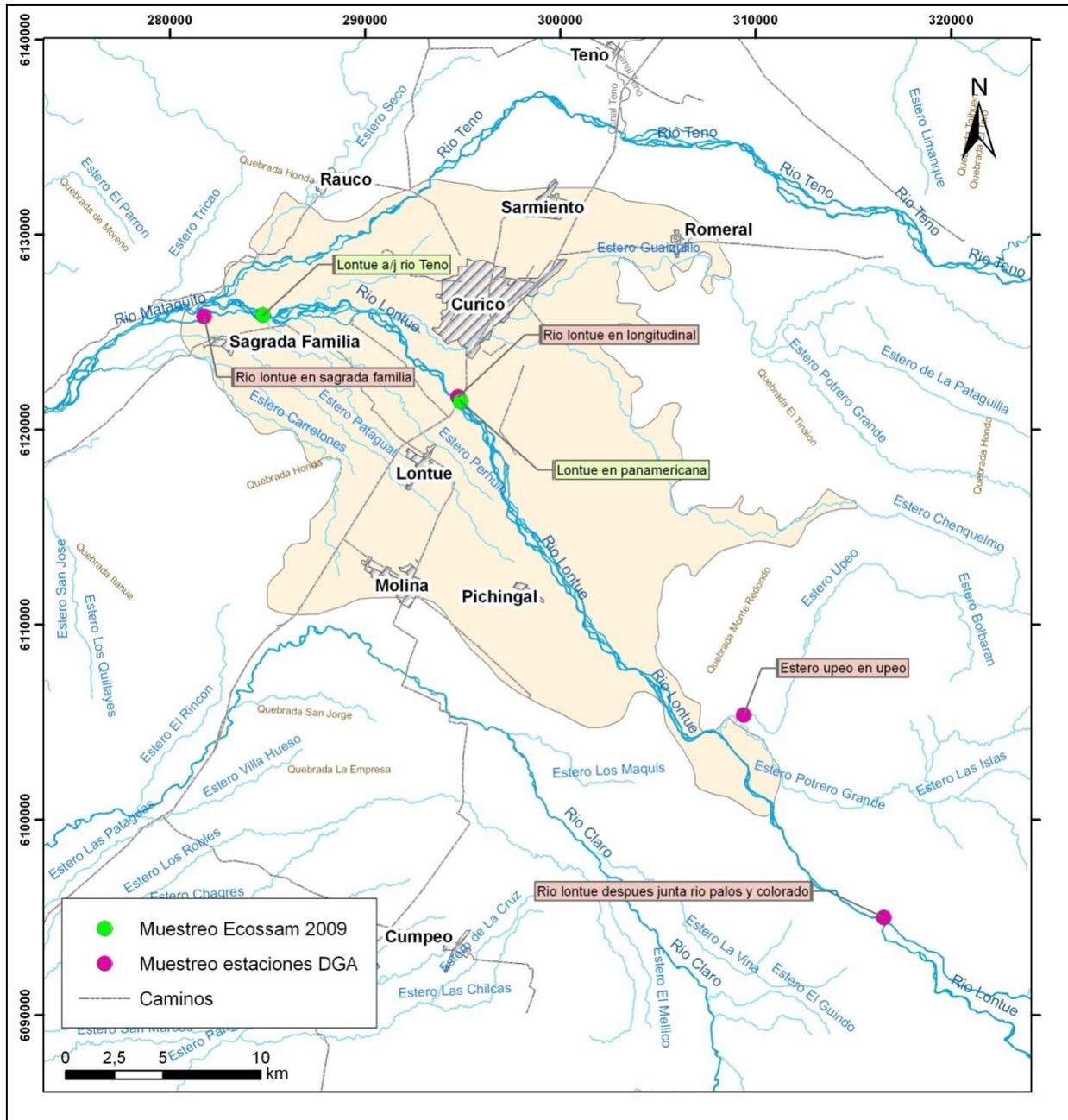
Tabla 3-17: Estaciones calidad del aguas superficiales en la zona de estudio

N°	Nombre	Código BNA	Periodo de registro	Estado
1	Estero Upeo en Upeo	07116001-7	(1981-1984) y 2008	Suspendida
2	Río Lontué en Longitudinal	07117001-2	1980-2013	Vigente
3	Río Lontué después junta río Palos y Colorado	07117002-0	1997-2013	Vigente
4	Río Lontué en Sagrada Familia	07119003-1	1980-2013	Vigente

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

La Figura 3-15 presenta la distribución de las estaciones DGA de interés, así como la ubicación de información de calidad de aguas que presenta el estudio 2009.

Figura 3-15: Distribución estaciones de calidad química de aguas superficiales



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

3.2.5.2 Metodología y validación de datos

Para las muestras de las estaciones DGA (259 análisis en 4 estaciones superficiales), la validez de los datos se determinó en función del error del balance iónico de cada una. El balance iónico se chequeó para todas las muestras en base a los análisis de los elementos mayoritarios Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ . De esta forma, se comprobó que todas las muestras de agua presentaron un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas, esto es, que la suma de mili-equivalentes de aniones fue similar a la suma de mili-equivalentes de cationes.

El error del balance iónico admitido se definió en un 10%, y su cálculo se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{error} (\%) = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

De los análisis completos (235 de las 259 muestras), finalmente fueron considerados válidos 140 análisis químicos (60% del total de los análisis completos) y todas las estaciones cuentan con más de 10 análisis correctos.

En términos de calidad química del agua para infiltración existen algunas recomendaciones operativas, las que se indican en la Tabla 3-18. Estas recomendaciones indican para sólidos totales disueltos (STD) < 150 ppm (o mg/l) y para sólidos totales suspendidos (SST) < 10 ppm (o mg/l), ya que estos pueden colmatar los acuíferos en proximidades del punto de recarga. Para la conductividad eléctrica (CE) se indica un valor límite < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para oxígeno disuelto (OD) el valor recomendado es < 8 mg/l y para el pH < 7,5-8 (Tabla 3-18). Además se debe evaluar la carga de contaminación orgánica en el contenido de coliformes fecales.

Tabla 3-18. Parámetros a observar en aguas para infiltración y límite recomendado

Parámetros	Límites
STD	150 ppm
SST	10 ppm
CE	200 $\mu\text{S}/\text{cm}$
OD	8 mg/l
pH	7,5-8

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2008.

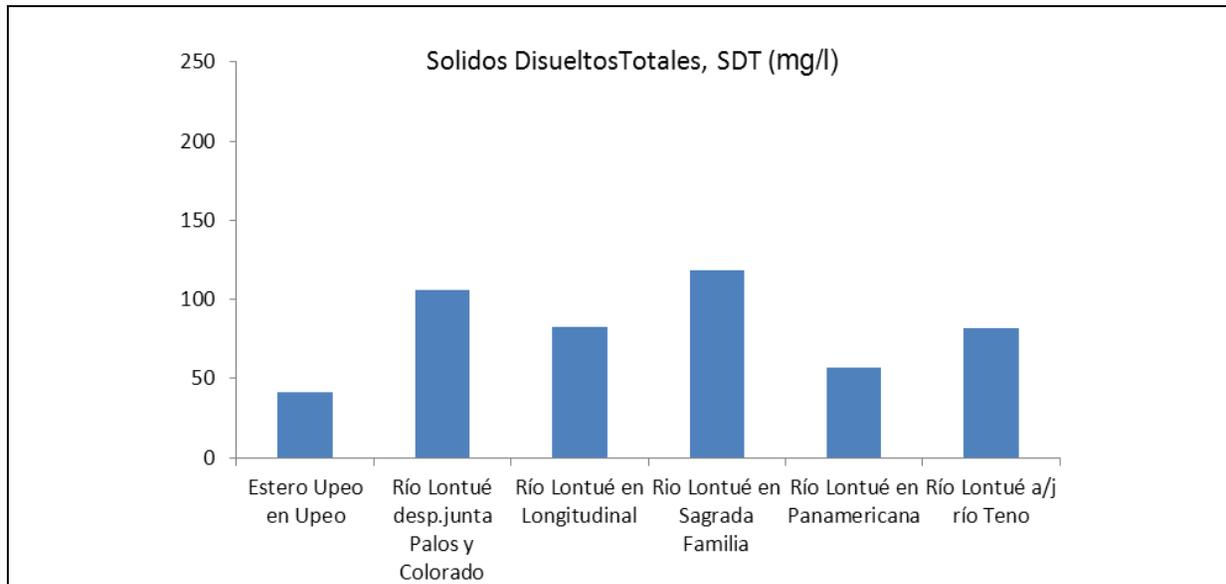
Finalmente, debe compararse la calidad de la fuente de infiltración (aguas superficiales) con la del cuerpo receptor (agua subterránea), sin embargo en la zona de estudio, no se cuenta con antecedentes de calidad química del agua subterránea.

Para clasificar y realizar una descripción físico química básica se utilizó el promedio de las concentraciones de parámetros físico-químicos y microbiológicos en los puntos de medición considerados en la Figura 3-15. Los análisis químicos de las estaciones DGA no presentan análisis de TDS por lo que este parámetro fue inferido a partir de la conductividad eléctrica.

3.2.5.3 Resultados

Sólidos Disueltos Totales: La cantidad de sólidos disueltos totales en la zona de estudio es relativamente baja, presentando valores más altos en los extremos (Río Lontué en río Palos y Colorado y en Sagrada Familia). En el sector intermedio (Río Lontué en Longitudinal y en Panamericana), los valores son menores. En ambos casos la cantidad de SDT no supera los 150 mg/l.

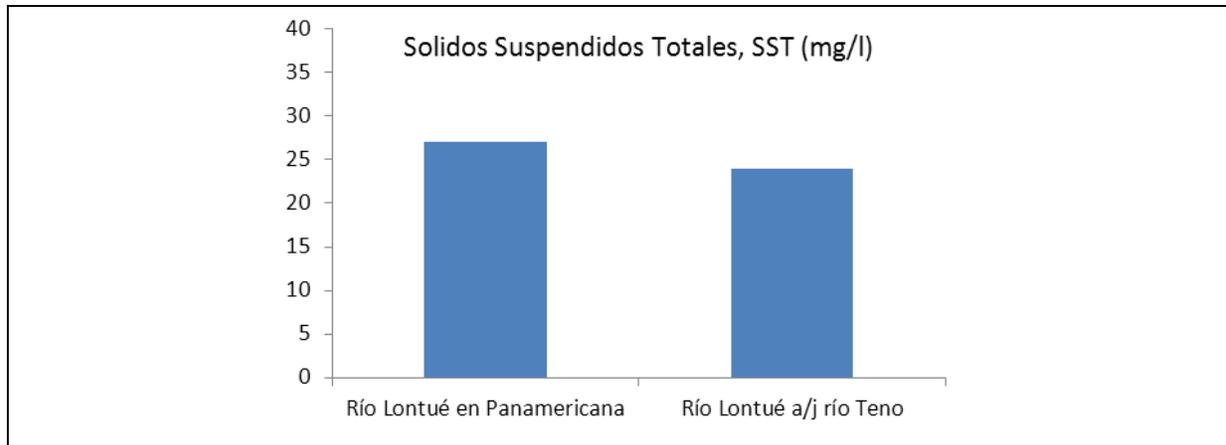
Figura 3-16: Sólidos disueltos totales



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

Sólidos Suspendidos Totales: Solo existe registro puntual de primavera en las estaciones del estudio Ecosam, 2009 en el cual se indican bajos niveles de sólidos suspendidos siendo estos algo mayor en la estación Río Lontué en Panamericana. Cabe destacar que el acceso a esta estación está aledaño a la Ruta 5 (Panamericana), la cual probablemente podría contribuir con sólidos suspendidos al agua. Si bien, la cantidad de SST es baja los valores superan los 10 mg/l recomendados.

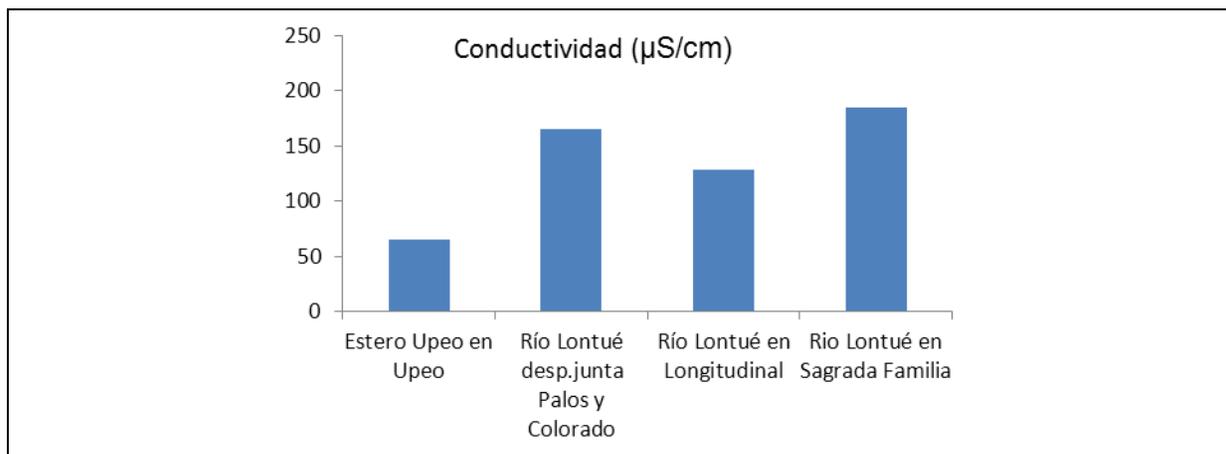
Figura 3-17: Solidos Suspendidos Totales



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

Conductividad eléctrica: Este parámetro es creciente hacia aguas abajo en Sagrada Familia, con una disminución leve en el sector intermedio (Río Lontué en Longitudinal) que se podría explicar por el aporte del Estero Upeo de baja conductividad eléctrica. En general las aguas presentan baja conductividad mostrando valores por debajo de los 200 $\mu\text{S/cm}$ recomendado.

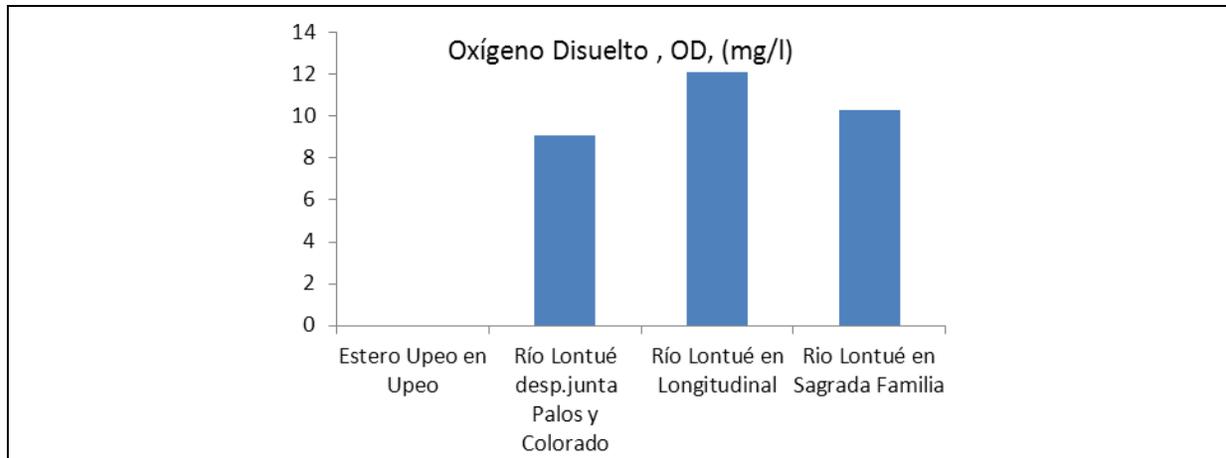
Figura 3-18: Conductividad Eléctrica



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

Oxígeno Disuelto: El comportamiento a través del río es relativamente constante. En la estación Lontué en Longitudinal observa un pequeño aumento a un valor de 12 mg/l para decrecer aguas abajo en Sagrada Familia a un valor cercanos a 10 mg/l. El valor promedio oscila en los 10,5 mg/l que se acerca al límite recomendado.

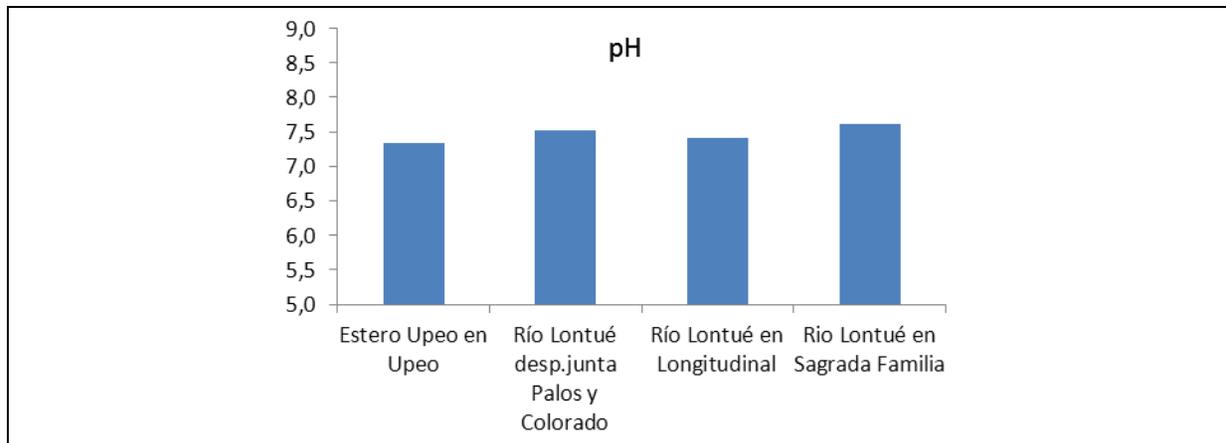
Figura 3-19: Oxígeno Disuelto



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

pH: El comportamiento es similar en las 4 estaciones DGA, con un valor promedio de 7,5 que se encuentra dentro de los límites recomendados.

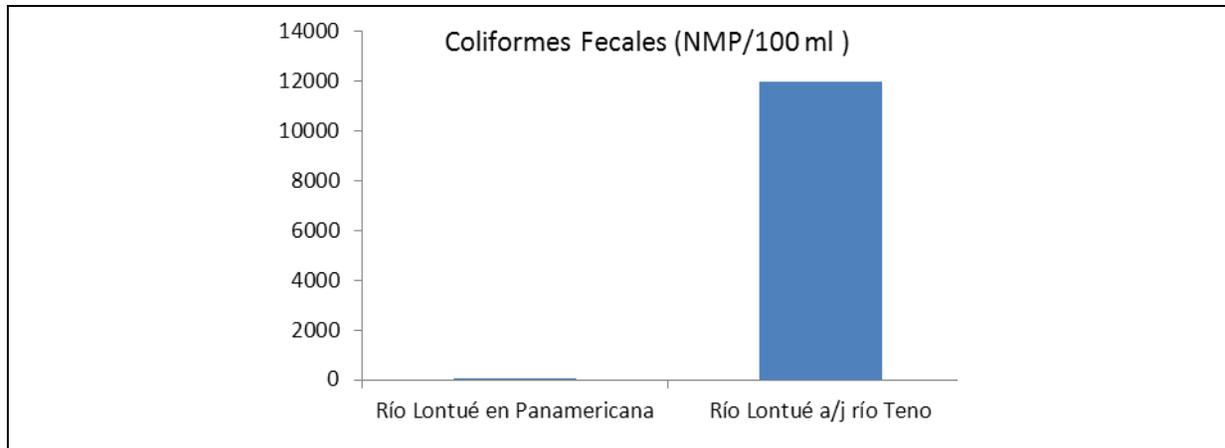
Figura 3-20: pH



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

Coliformes Fecales: Solo existe registro puntual de primavera en las estaciones del estudio Ecosam, 2009 donde se observa una baja concentración de este parámetro en la estación Río Lontué en Panamericana, el que se incrementa considerablemente en el Río Lontué antes de la Junta con el Río Teno, lo que probablemente se debe a la influencia de la ciudad de Curicó.

Figura 3-21: Coliformes Fecales



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA y Ecosam, 2009

3.2.6 Usos/derechos de aprovechamiento de aguas

La zona de estudio que corresponde al sector acuífero de Lontué tiene un área de 518 km² y es atravesada por el río Lontué junto a numerosos esteros.

La subcuenca del río Lontué tiene una área aportante de aproximadamente 2.700 km², de los cuales sólo cerca de 400 km² son aptos para riego y se localizan sobre el río Lontué en un tramo cercano a 50 km antes de la confluencia con el río Mataquito.

3.2.6.1 Canales en la zona de estudio

Específicamente en el área de estudio existen 2 Juntas de Vigilancia: Junta de vigilancia río Lontué y Junta de vigilancia estero Río Seco (Figura 3-22). La Junta de vigilancia del río Lontué reconocida por decreto supremo N° 1.368 del 9 de junio de 1952, posee 124,2 acciones sobre el caudal del río repartidas en 32 canales (Tabla 3-19). Por otra parte, la junta de vigilancia del estero Río Seco, que recibe sus aguas desde el estero Río Seco, para conformar un caudal que corre a lo largo de más de 100 km en dirección sur-oriente, posee 4.507 acciones, repartidas en 22 canales (Tabla 3-19). El Estero Río Seco permite el riego de numerosos predios agrícolas ubicados en diversas localidades, tales como Pichingal, Lontué y Sagrada Familia.

Tabla 3-19: Canales de abastecimiento en la zona de estudio

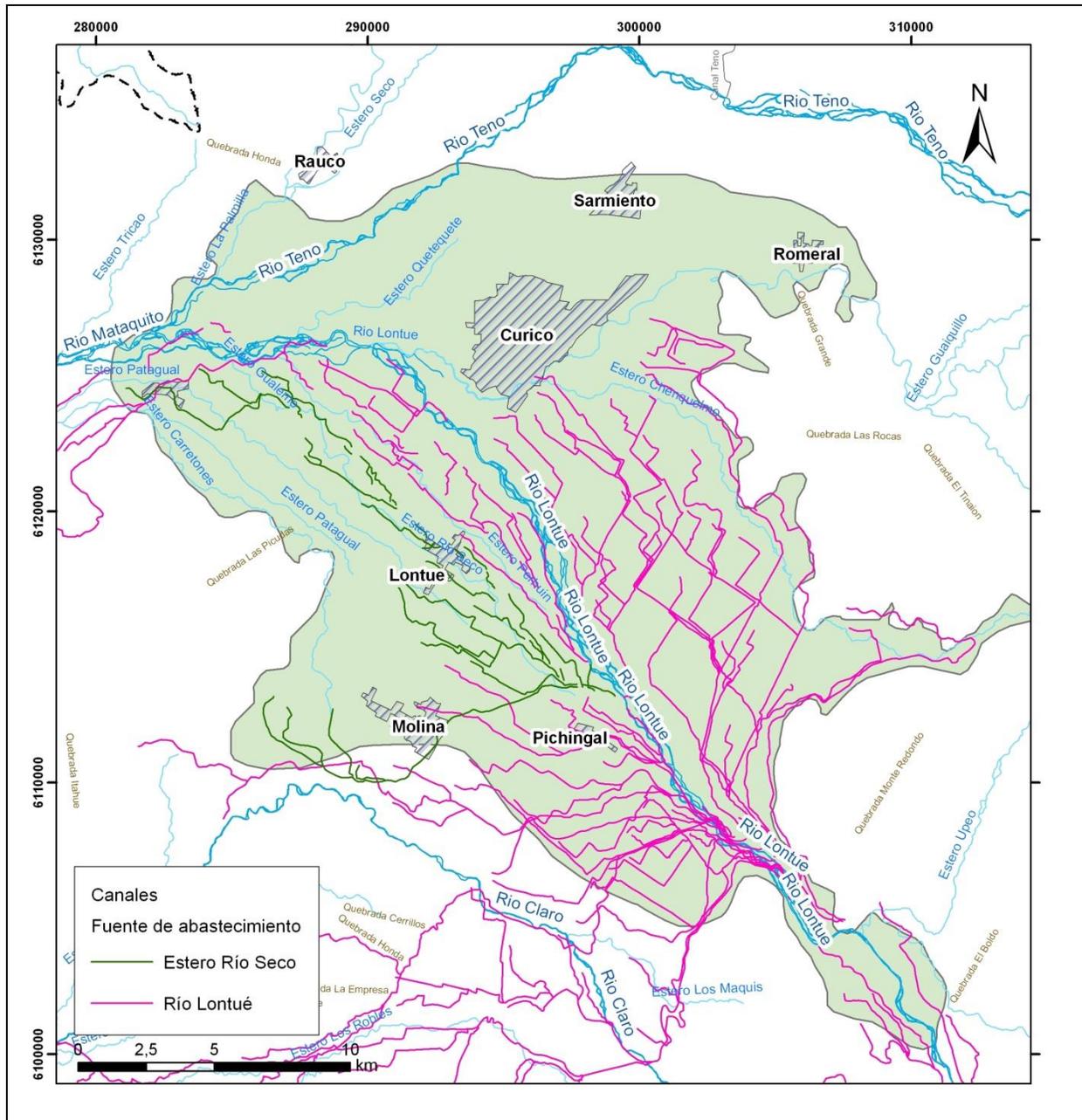
Fuente de abastecimiento: Río Lontué			Fuente de abastecimiento: Estero Río Seco		
Nº	Nombre Canal	Acciones	Nº	Nombre Canal	Acciones
1	Canal Aránguiz	1,1	1	Canal Primero	86,0
2	Canal Buena Fe	1,0	2	Canal La Ermita	30,0

Tabla 3-19: Canales de abastecimiento en la zona de estudio

Fuente de abastecimiento: Río Lontué			Fuente de abastecimiento: Estero Río Seco		
Nº	Nombre Canal	Acciones	Nº	Nombre Canal	Acciones
3	Canal Buena Paz	0,7	3	Canal El Alamo	168,0
4	Canal Cáceres	0,6	4	Canal el Cerrillano	1372,3
5	Canal Cumpeo	9,9	5	Canal El Aromo	30,0
6	Canal González Rana	0,9	6	Canal El Bosque	33,0
7	Canal Huañuñé	3,8	7	Canal Casablanca	310,4
8	Canal Iansa	3,1	8	Canal Quechereguas	641,8
9	Canal La Florida	1,3	9	Canal La Maravilla	71,9
10	Canal La Obra de Abajo	0,4	10	Canal Lira	81,3
11	Canal La Obra de Arriba	2,5	11	Canal San Ignacio Arriba	187,7
12	Canal La Obra del Medio	1,6	12	Canal San Ignacio Abajo	44,6
13	Canal Lazo	0,3	13	Canal Semillero Parroncillo	424,2
14	Canal Los Pobres – Pichingal	1,2	14	Canal Tomas Unidas Parroncillo	15,0
15	Canal Nuevo Los Niches	16,3	15	Canal Comunidad La Isla	50,0
16	Canal Nuevo Urzúa	3,0	16	Canal Correa Santa Rosa	8,9
17	Canal Opacino	0,4	17	Canal Ortega	53,0
18	Canal La Patagua	12,1	18	Canal La Isla	10,0
19	Canal Pelarco – Buena Unión	2,4	19	Canal La Higuera	80,0
20	Canal Peumo	3,9	20	Canal Ramos	92,0
21	Canal Pirihuín	4,1	21	Canal Maritata	455,0
22	Canal Potrero Grande	0,7	22	Canal Santa Rosa Los Treiles	262,0
23	Canal Purísima	8,5			
24	Canal Ramírez Martínez	3,0			
25	Canal Ramírez y Rinconada	4,4			
26	Canal Río Seco	12,9			
27	Canal Trapiche	1,7			
28	Canal Valdés Carrera	4,0			
29	Canal Viejo Los Niches	5,2			
30	Canal Yacal	2,7			
31	Canal Quillayes	8,0			
32	Canal San Pedro	2,5			
Total acciones Río Lontué		124,2	Total acciones Estero Río Seco		4.507,1

Fuente: Elaboración propia a partir de información CNR

Figura 3-22: Distribución y administración de la red de canales en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía CNR

3.2.6.2 Derechos de aprovechamiento

La recopilación de los derechos de aprovechamiento otorgados en el área de estudio se realizó en base a la información pública del Catastro Público de Aguas (CPA), perteneciente al Centro de Recursos Hídricos de la DGA disponible en su sitio web, la que considera la información disponible que deben proveer los Conservadores de Bienes Raíces a la DGA.

La Figura 3-23 presenta la distribución espacial de los derechos aprobados, donde se observa que la mayoría de los derechos otorgados son de carácter subterráneo y se distribuyen en forma relativamente homogénea en el área de estudio. Los derechos superficiales se encuentran principalmente sobre el río Lontué aguas arriba del sector Pichingal.

La Tabla 3-20 presenta un resumen del total de derechos en el área de estudio. Específicamente existen 5.383 l/s de caudal subterráneo aprobado y 197 l/s de caudal superficial. Estos derechos se utilizan entre los meses de enero a junio y en el mes de octubre. En cuanto a derechos no consuntivos existen 2 derechos aprobados por un caudal total de 3000 l/s correspondientes a uso hidroeléctrico.

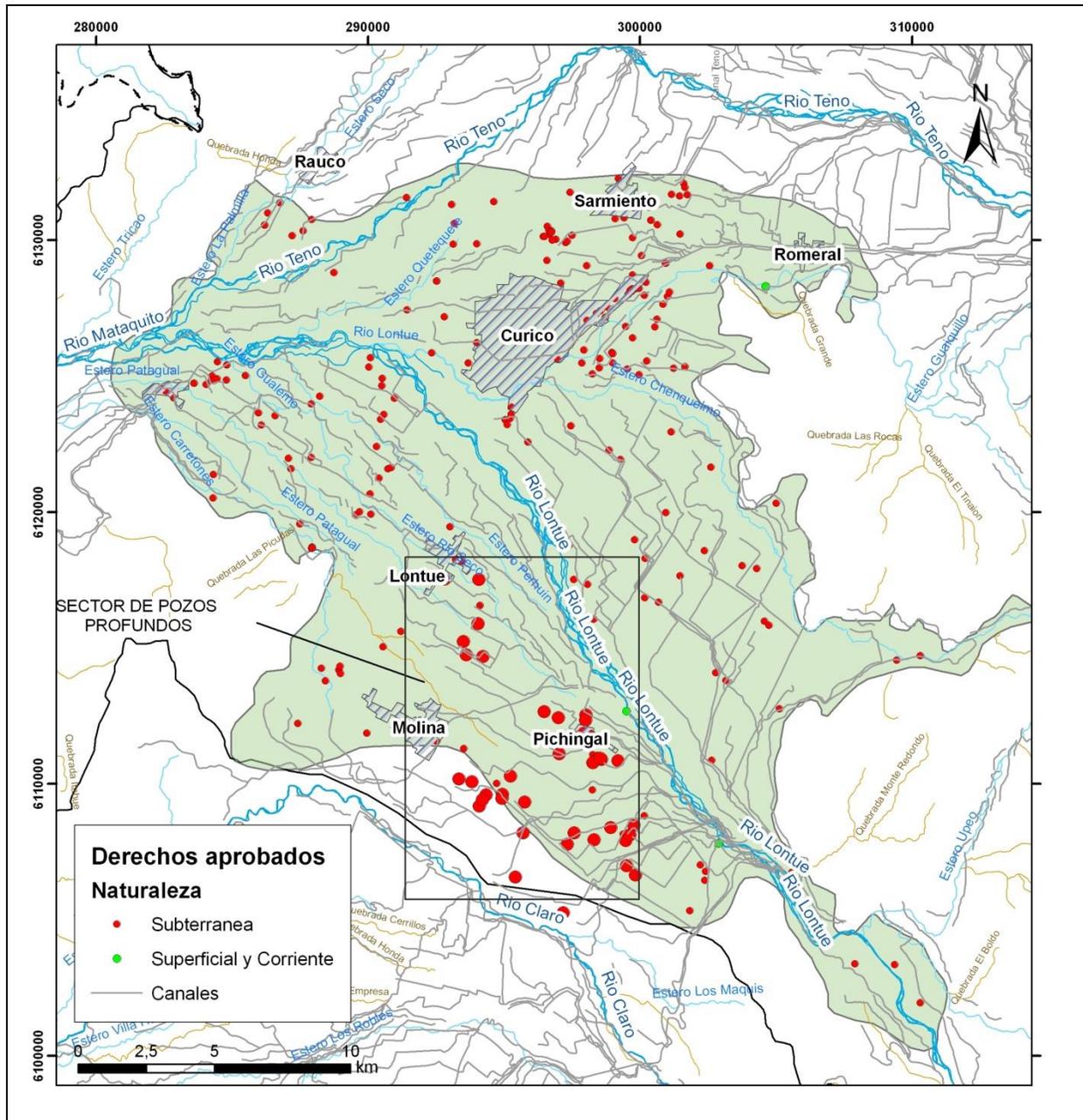
Tabla 3-20: Distribución de los derechos de aprovechamiento otorgados según usos en el área de estudio

Sector	Subterráneos*			Superficiales*		
	Derechos	Caudal l/s	%	Derechos	Caudal l/s	%
Riego	50	1.842	34%			
B/D/S	29	28	1%			
Industrial	5	53	1%			
Sin Info	154	3.461	64%	5	197	100%
Total	238	5.383	100%	5	197	100%

*No considera expedientes sin coordenadas de ubicación. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Como otro antecedente, la Junta de vigilancia del río Lontué, realizó un levantamiento de pozos profundos con información proporcionada por los propios usuarios en parte de la cuenca del Río Lontué. El área escogida para el levantamiento se muestra en la Figura 3-23. Se levantaron en total 40 pozos profundos (puntos rojos grandes en la Figura 3-23), de los cuales 9 no aparecen en el registro del CPA de la DGA, por otra parte, otros 5 registros aparecen en el CPA con un caudal diferente al indicado por la Junta de Vigilancia, lo que refleja una incongruencia con la información de los archivos públicos. El caudal total aprobado de este levantamiento de pozos corresponde a 1.407,41 l/s cuyo uso principal es para riego.

Figura 3-23: Derechos de aprovechamiento de aguas aprobados en zona estudio



El cuadrado indica la zona de levantamiento de información de pozos profundos realizado por la Junta de Vigilancia del río Lontué. Dentro de este cuadrado, los puntos rojos grandes indican la posición de estos pozos.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

3.2.7 Resumen y modelo hidrogeológico conceptual

El área de estudio se ubica principalmente en la unidad morfológica Depresión Intermedia. Hacia el este, parte del área de estudio se localiza en la Precordillera. La zona de interés se caracteriza por ser relativamente llana, con una cota promedio de 250 msnm, sin embargo, hacia el este, cerros pertenecientes a la Precordillera, presentan cotas mayores que 700 m. El curso principal que drena el área, corresponde al río Lontué, el cual proviene desde el sureste en dirección noroeste. Recibe los aportes del estero Chenquelmo y Guaiquillo. Posteriormente y fuera del área de estudio, el río Lontué hace confluencia con el río Teno proveniente desde el noreste, naciendo en este punto el río Mataquito.

La geología del área de estudio se caracteriza por presentar unidades que varían en edad desde el Cretácico hasta el presente. Las principales litologías que caracterizan el área son rocas volcanosedimentarias y piroclásticas, sin embargo el relleno no consolidado ocupa gran parte de la superficie.

En subsuperficie, trabajos anteriores reconocen una unidad de basamento rocoso, cuyo límite superior es bastante irregular, con desniveles de hasta 500 m en una distancia de 5 km. El espesor del relleno sobre este basamento tiene un valor típico de entre 100 y 200 m, con un máximo de 500 m hacia la zona norte del área de estudio. Este relleno está constituido principalmente por material aluvial de variada granulometría con clastos que van desde bolones a limo y bajo contenido de arcilla. En menor proporción se observan intercalaciones de sedimentos mal seleccionados con hasta un 30% de arcilla, interpretados como depósitos de remociones en masa o corrientes de barro.

Los suelos de la zona de estudio se encuentran ubicados en la zona mediterránea árida, específicamente en la zona de Depresión Intermedia, donde se desarrollan principalmente suelos en terrazas aluviales. Estos corresponden a suelos planos, con topografía que varía entre 1 y 2%. En valles extensos, como el del río Lontué, los suelos se han desarrollado en posición de abanico aluvial de grandes extensiones. La profundidad de los suelos es muy variable, desde los suelos delgados (menos de 50 cm) hasta suelos profundos (más de 100 cm). El sustrato está constituido, en la mayoría de los casos, por gravas redondeadas u subredondeadas de tamaño variable y en cantidad variable, con una matriz que es arenosa o franco arenosa. Las clases texturales de los horizontes superficiales son en general francas, franco limosa, franco arcillosa, franco arcillo limosa. En profundidad existe una gran variabilidad de clases texturales. La mayoría de los suelos muestra una gran homogeneidad estructural, que se manifiesta por la presencia de bloques subangulares medios y finos con diferente consistencia. Tanto en superficie como en profundidad dominan los colores pardos y pardos oscuros. La penetración radical es buena en casi todos los suelos, con un decrecimiento regular con la profundidad. En general, el drenaje de los suelos es bueno, con Fases de drenaje moderado que puede llegar a imperfecto en algunas de ellas.

La precipitación promedio anual en la zona de estudio, calculada con registro de estaciones con entre 12 y 40 años completos, varía entre 650 y 986 mm, con una desviación que equivale a dos quintos del valor promedio. Esto indica variabilidad importante de la precipitación en la zona de estudio, distinguiéndose años muy secos asociados a bajas precipitaciones y años muy húmedos, asociados a altas precipitaciones. Por otra parte, la

precipitación a nivel mensual se concentra en los meses de invierno (mayo a agosto), la que equivale al 75% de la precipitación del año hidrológico.

La evaporación potencial promedio anual, calculada con registro de estaciones con alrededor de 37 años completos, tiene un valor cercano a 2,6 mm/día. A nivel mensual, el promedio de la evaporación potencial varía, registrándose las mayores tasas de evaporación potencial en los meses de verano (diciembre, enero y febrero), cuyos valores máximos llegan a los 5,6 mm/día en promedio.

La temperatura promedio anual, calculada con registro de una estación con 24 años completos, varía entre 10,2°C y 13,0°C. La distribución mensual de las temperaturas promedio muestra un máximo cercano a los 18°C en el mes de enero y un mínimo cercano a los 7°C en el mes de julio.

El promedio anual de las series de caudal medio mensual, calculado para cinco estaciones del área de estudio, con registro completo de entre 24 y 65 años, es de entre 2,9 y 44,4 m³/s, con desviaciones que van entre uno y dos tercios del valor promedio. El valor de la desviación es resultado de la variabilidad en los caudales monitoreados con años secos, asociados a bajas precipitaciones y años húmedos, asociados a periodos de altas precipitaciones. La distribución mensual de los caudales promedio para tres estaciones ubicadas en la cabecera de la zona de estudio, que monitorean los afluentes del río Lontué, muestran un máximo principal que se alcanza durante los meses de verano (88,9 m³/s en diciembre para la estación del río más caudaloso), seguido por un máximo menos marcado durante los meses de invierno (37,9 m³/s en junio para la estación del río más caudaloso). Esto permite interpretar que el río Lontué en la zona de estudio presenta un régimen fluviométrico nival con una leve componente pluvial.

En el área de estudio la unidad hidrogeológica de mayor relevancia (unidad relleno) corresponde a depósitos sedimentarios no consolidados, compuestos por depósitos de abanico fluvial del río Lontué. Esta unidad corresponde a una secuencia de buena continuidad lateral, conformada predominantemente por bancos de ripios, gravas y gravas arenosas, con ocasionales intercalaciones lenticulares limo-arcillosas. El tamaño de la fracción clástica desciende en sentido este-oeste. Los clastos son hetero composicionales y subredondeados. Los acuíferos presentes en esta unidad serían del tipo libres a semiconfinados, de gran extensión, transmisividad del orden de 2.500 m²/día y almacenamiento del orden de 10⁻².

Según se ha podido verificar, posteriormente a la recopilación de información de geología e hidrogeología del área de estudio, no existe un entendimiento detallado de la geometría y composición de los distintos estratos del subsuelo. Un modelo geológico de detalle es necesario para una primera aproximación a la naturaleza del relleno no saturado sobre la napa. Este modelo de detalle permitirá evaluar la capacidad de almacenamiento para las aguas infiltradas mediante la recarga artificial y reconocer el método de infiltración más adecuado para el área estudiada. Para la construcción de un modelo de detalle es necesario realizar campañas de perforación orientadas a describir la zona no saturada y con la densidad apropiada para distinguir la continuidad horizontal de las distintas unidades acuíferas.

El promedio de niveles estáticos de pozos de monitoreo para el segundo semestre del año 2001 en la zona de estudio fluctúa entre los 0,6 y 39 m de profundidad.

La piezometría obtenida muestra que el flujo de agua subterránea tiene una dirección principal de flujo sureste-noroeste, paralelo al curso del río Lontué. En la zona de Romeral la dirección del flujo es este-oeste, y noreste-suroeste en la zona de Curicó, paralela al flujo del estero Guaquillo.

La variación temporal de los niveles freáticos está ligada a las diferencias estacionales provocadas por el riego. Esta información se obtuvo sólo por comunicación personal con agricultores locales puesto que no existe información disponible sobre la variabilidad temporal de los niveles freáticos en el tiempo.

La zona de estudio cuenta con una amplia infraestructura de riego, proveniente de 2 fuentes de abastecimiento: río Lontué y estero Río Seco. El río Lontué abastece un total de 32 canales, mientras que el estero Río Seco abastece 22 canales de riego.

La recopilación de los derechos de aprovechamiento otorgados en el área de estudio (Catastro Público de Aguas o CPA, perteneciente al Centro de Recursos Hídricos de la DGA) indica que existen 5.383 l/s de caudal subterráneo aprobado y 197 l/s de caudal superficial aprobado. Al comparar esta información un levantamiento efectuado por la junta de vigilancia del río Lontué en la parte sur del área de estudio, se infiere que los valores obtenidos de CPA no estarían actualizados, pudiendo ser el caudal subterráneo aprobado mucho mayor.

Estos derechos se utilizan entre los meses de enero a junio y en el mes de octubre. En cuanto a derechos no consuntivos existen 2 derechos aprobados por un caudal total de 3000 l/s correspondientes a uso hidroeléctrico.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE AGUA

Tal como se señaló anteriormente la zona de estudio se ubica en la cuenca del río Lontué, específicamente 10 km aguas abajo de la junta del río Lontué con el río Colorado hasta la confluencia del río Lontué con el río Teno donde nace el río Mataquito. Aguas arriba de la zona de estudio existen 3 estaciones fluviométricas que monitorean el caudal que ingresa al área de interés a través del río Lontué. Por lo anterior se realizó un análisis de frecuencia en dichas estaciones correspondientes a las estaciones río Palos en junta con Colorado, río Colorado en junta con Palos y estero Upeo en Upeo (Figura 3-10) con el objetivo de obtener los caudales mensuales asociados a distintas probabilidades de excedencia y cuantificar el caudal del río Lontué que es la fuente de los canales de riego de la zona.

Tabla 3-13: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
1	Esteros el manzano antes junta río Teno	07104001-1	Suspendida	1960-1984	690
2	Río Colorado en junta con Palos	07112001-5	Vigente	1930-2013	600
3	Río palos en junta con Colorado	07115001-1	Vigente	1947-2013	600
4	Esteros Upeo en Upeo	07116001-7	Vigente	1963-2013	450
5	Río Claro en Camarico	07372001-K	Vigente	1936-2013	220

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA

En la Tabla 3-14 presentan los estadígrafos principales de las series de caudales medios mensuales para el año hidrológico (abril a marzo) y en la Tabla 3-15 se presenta el promedio mensual de las series de caudal medio mensual. Se observa que el promedio del caudal medio anual varía entre 2,9 y 44,6 m³/s, con desviaciones que van entre uno y dos tercios del valor promedio. Esto indica la existencia de ríos y/o esteros con variabilidad de los caudales en la zona con años secos asociados a bajas precipitaciones y años húmedos, asociados a altas precipitaciones.

Tabla 3-14: Estadígrafos principales de las series de caudal medio anual

N°	Nombre	Años Completos*	Mín. (m ³ /s)	Máx. (m ³ /s)	Promedio (m ³ /s)	Desv. Est. (m ³ /s)	Coef. Asim.	Coef. Var.
1	Esteros el manzano antes junta río Teno	24	0,1	8,0	2,9	1,9	0,9	0,7
2	Río Colorado en junta con Palos	48	13,9	103,4	44,4	16,6	1,1	0,4
3	Río palos en junta con Colorado	46	10,8	46,7	28,1	9,1	0,4	0,3
4	Esteros Upeo en Upeo	47	0,7	16,8	7,0	3,7	0,5	0,5
5	Río Claro en Camarico	65	4,0	38,8	19,3	8,3	0,4	0,4

* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

En base a los estadígrafos principales calculados en la sección de hidrología, se realizó un ajuste de distribución de probabilidad para la serie mensual. A través del test Chi-Cuadrado

(5%) se estudió la bondad del ajuste de las distribuciones lognormal 2 y lognormal 3 para las 3 estaciones indicadas. Luego de aplicar el test Chi Cuadrado a las funciones de probabilidad, se comprobó que la distribución que mejor se ajusta a los datos de caudal medio mensual es la distribución lognormal 2, por lo que fue utilizada. En la Tabla 3-21 se presentan las curvas de variación mensual asociadas a probabilidades de excedencia de 15, 25, 50, 75 y 85% en las 3 estaciones indicadas anteriormente y en la Figura 3-24 en forma gráfica.

Tabla 3-21: Caudal medio mensual (m³/s) para diferentes niveles de probabilidad estación Río Palos en junta con Colorado

Nº	MES	Probabilidad de Excedencia					Caudal medio mensual (m ³ /s)
		15%	25%	50%	75%	85%	
1	Enero	22,42	19,82	15,75	12,52	11,06	16,69
2	Febrero	32,52	27,14	19,40	13,86	11,57	22,21
3	Marzo	38,42	32,05	22,90	16,37	13,65	25,90
4	Abril	40,95	34,25	24,59	17,65	14,76	27,68
5	Mayo	36,78	31,00	22,58	16,44	13,86	25,68
6	Junio	33,45	29,78	23,99	19,33	17,21	25,25
7	Julio	39,16	35,44	29,45	24,46	22,14	30,76
8	Agosto	53,58	48,00	39,13	31,89	28,56	40,96
9	Septiembre	64,18	54,50	40,25	29,72	25,24	44,31
10	Octubre	49,15	40,64	28,55	20,06	16,59	32,50
11	Noviembre	33,73	28,51	20,87	15,27	12,91	23,16
12	Diciembre	24,90	21,75	16,93	13,17	11,50	18,10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-22: Caudal medio mensual (m³/s) para diferentes niveles de probabilidad estación Río Colorado en junta con Palos

Nº	MES	Probabilidad de Excedencia					Caudal medio mensual (m ³ /s)
		15%	25%	50%	75%	85%	
1	Enero	27,18	23,74	18,46	14,36	12,54	19,91
2	Febrero	46,39	37,48	25,24	17,00	13,74	49,69
3	Marzo	59,51	47,39	31,06	20,36	16,22	37,85
4	Abril	55,32	45,59	31,85	22,24	18,34	36,50
5	Mayo	50,71	42,28	30,17	21,53	17,96	34,71
6	Junio	51,65	44,77	34,35	26,34	22,83	37,39
7	Julio	67,42	60,63	49,79	40,88	36,75	51,68
8	Agosto	110,82	97,82	77,61	61,57	54,34	81,47
9	Septiembre	137,16	113,02	78,91	55,09	45,40	88,86
10	Octubre	91,97	72,93	47,43	30,84	24,47	58,08
11	Noviembre	50,99	42,04	29,38	20,53	16,93	34,27
12	Diciembre	32,15	27,75	21,12	16,07	13,87	23,12

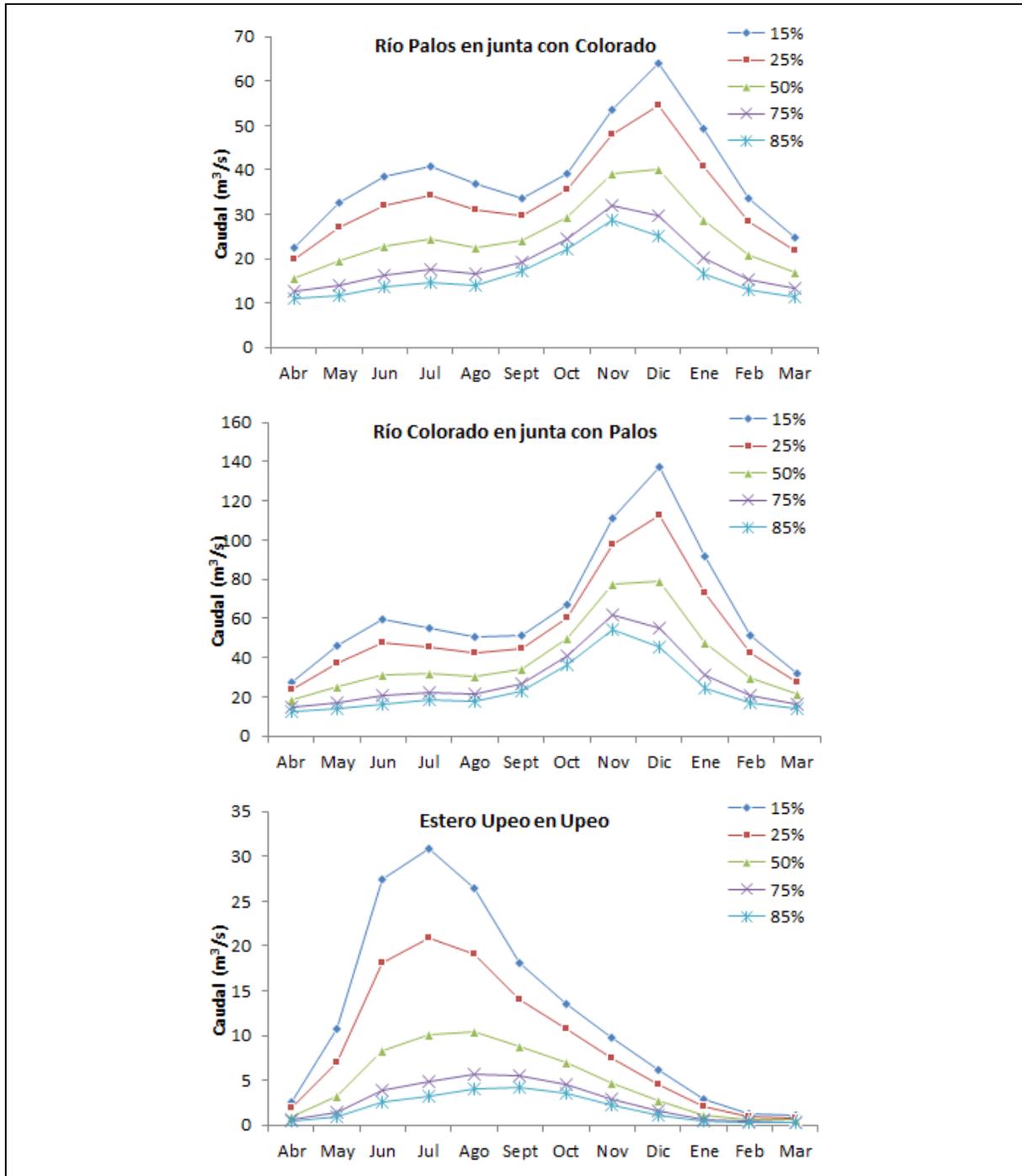
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-23: Caudal medio mensual (m³/s) para diferentes niveles de probabilidad estación Estero Upeo en Upeo

Nº	MES	Probabilidad de Excedencia					Caudal medio mensual (m ³ /s)
		15%	25%	50%	75%	85%	
1	Enero	2,56	1,84	0,99	0,54	0,38	1,63
2	Febrero	10,74	7,06	3,25	1,50	0,99	6,30
3	Marzo	27,37	18,07	8,37	3,88	2,57	14,76
4	Abril	30,94	20,84	10,03	4,83	3,26	15,09
5	Mayo	26,43	19,03	10,36	5,64	4,07	14,31
6	Junio	18,06	14,01	8,75	5,46	4,24	10,77
7	Julio	13,53	10,73	6,98	4,54	3,60	8,36
8	Agosto	9,71	7,49	4,62	2,85	2,20	5,76
9	Septiembre	6,20	4,61	2,66	1,53	1,14	3,51
10	Octubre	2,93	2,12	1,17	0,64	0,47	1,65
11	Noviembre	1,33	1,01	0,60	0,36	0,27	0,77
12	Diciembre	1,05	0,83	0,54	0,35	0,28	0,64

Fuente: Elaboración propia

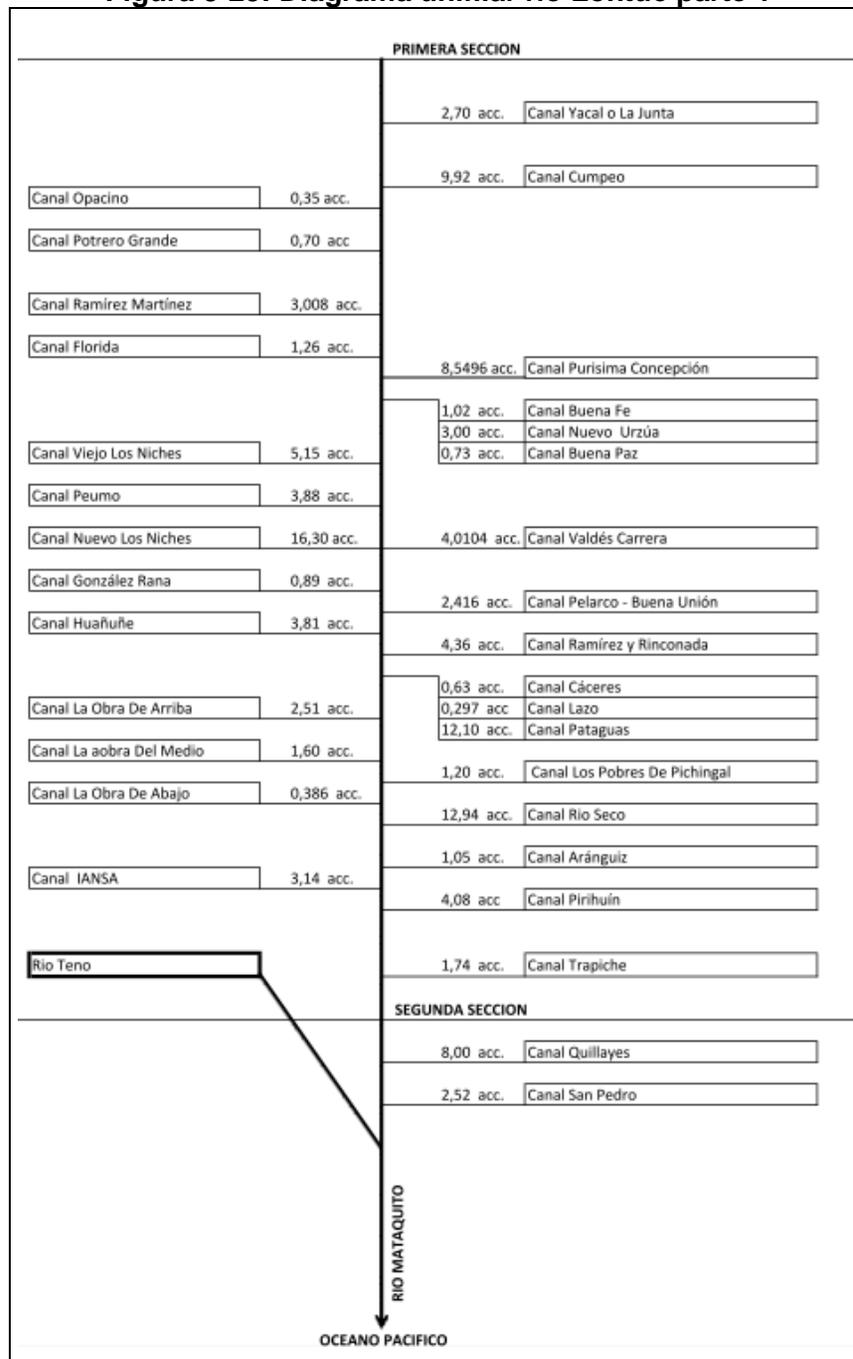
Figura 3-24: Variación mensual del caudal (m³/s) para diferentes prob. de excedencia



Fuente: Elaboración propia

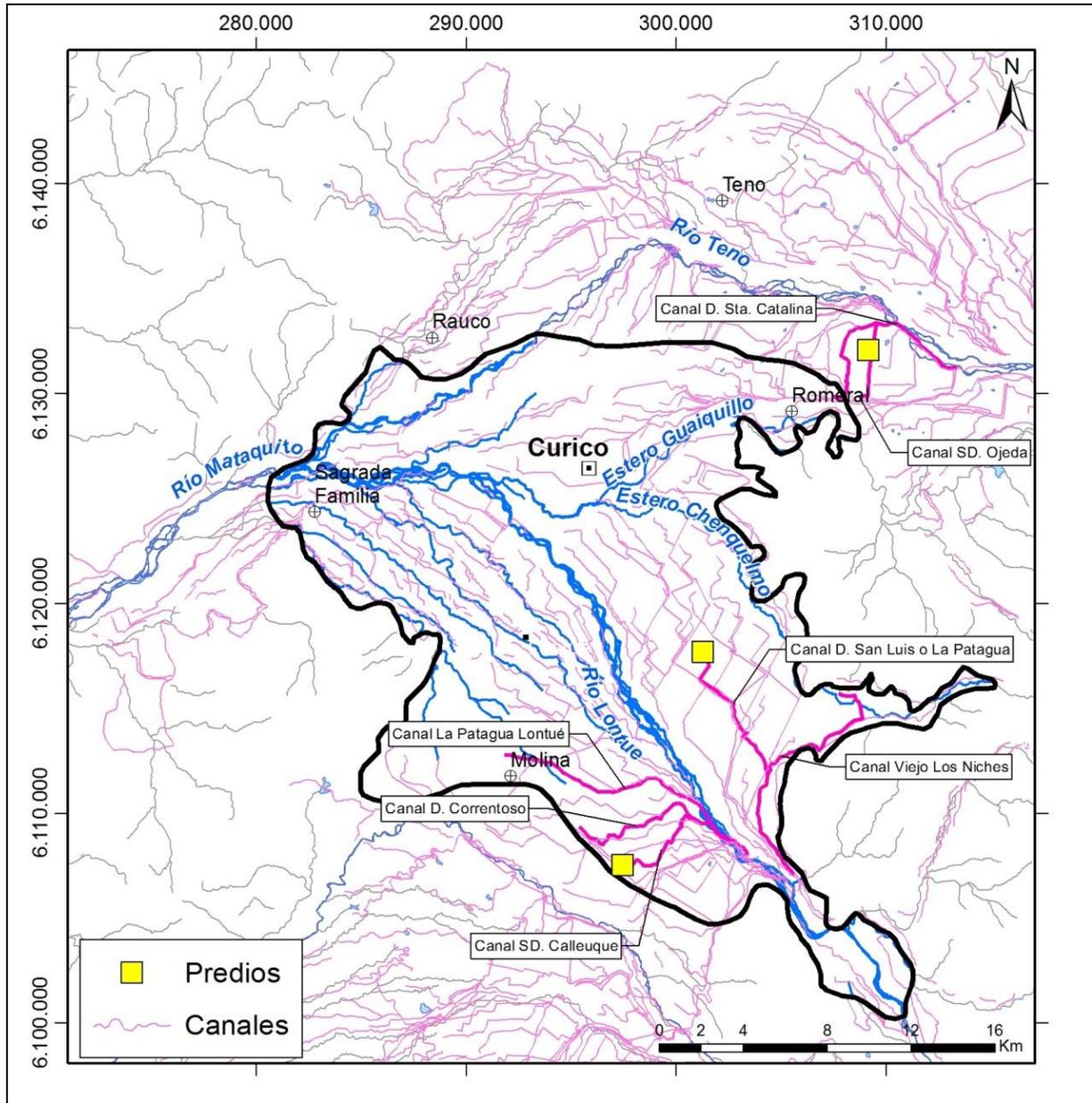
La fuente hidrológica de los canales de la zona de estudio es el río Lontué, cuyo diagrama unifilar se muestra en la Figura 3-25 y en la Figura 3-26 los canales que llegan a cada predio preseleccionado (ver detalle de metodología de preselección en las secciones 3.5 y 4 del presente documento).

Figura 3-25: Diagrama unifilar río Lontué parte 1



Fuente: www.riolontue.cl

Figura 3-26: Canales y ubicación predios preseleccionados



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de frecuencia existe disponibilidad en cada uno de los predios para los meses de invierno que es la época en que el agua no es utilizada para riego. La disponibilidad estará limitada por los derechos de los regantes donde se realice el PPRAA y la capacidad del canal que conduce el agua hacia ese predio.

3.4 METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL

Para el desarrollo de un proyecto de recarga artificial de acuíferos es necesario evaluar una serie de variables hidrogeológicas que determinen la capacidad de recarga de un sector o región. Para el caso puntual del presente proyecto, en que se desarrolló un piloto de recarga artificial, se deben considerar adicionalmente algunas variables de carácter local y específico del o los sitios a desarrollar estos proyectos pilotos. Estas variables locales son requerimientos prácticos como por ejemplo la disponibilidad de los dueños de los predios donde se ubica el sitio, la existencia de derechos de agua y disponibilidad de cederlos, entre otros. Para ello se ha generado una metodología dividida en dos fases que permite en su primera fase calificar de manera espacial la aptitud de una determinada zona o región para realizar un proyecto de recarga artificial considerando las variables hidrogeológicas. Una vez efectuada esta primera fase, se podrán elegir sitios con las mejores calificaciones de aptitud dentro del área estudiada, los cuales a su vez serán evaluados en la segunda fase considerando las variables locales antes mencionadas. Al desarrollar ambas fases se obtiene un sólo sitio que cumple los requerimientos hidrogeológicos y prácticos constituyendo el lugar óptimo de desarrollar un proyecto piloto de recarga artificial. A continuación se explicarán en detalle las dos fases de la metodología.

3.4.1 Fase I

La metodología desarrollada se basa en una ponderación simple de variables consideradas relevantes a la hora de evaluar la aptitud de una zona para la recarga artificial de acuíferos. Estas variables pueden ser incorporadas a un formato GIS en las que se puede evaluar espacialmente esta aptitud para la infiltración. Las variables a considerar son 3, las cuales son explicadas a continuación:

- i) Conductividad Hidráulica Horizontal (V_1): esta variable se refiere a la capacidad del acuífero en la zona estudiada para transportar agua. Una conductividad hidráulica muy baja impedirá el correcto llenado del acuífero y retrasará la disponibilidad del agua infiltrada. Por otra parte, una conductividad muy alta acelerará el transporte del agua infiltrada y podría no estar disponible al momento de requerirse y perderse aflorando en cursos de agua superficiales o simplemente escapando del lugar donde se requiere realizar su extracción. Los valores considerados y los rangos correspondientes a cada uno de los valores se presentan en la Tabla 3-24.
- ii) Cercanía y conexión a una fuente o sumidero de agua (V_2): los cursos de agua superficiales constituyen fuentes o sumideros de agua en el lugar donde se encuentran. En particular, si existe una directa conexión con el acuífero (no existe zona no saturada entre el nivel freático y el cuerpo de agua superficial) el realizar una recarga superficial muy cercana al curso superficial inducirá a un aumento en la recarga del acuífero hacia el cuerpo de agua (pérdida del agua infiltrada) o en su defecto una disminución de la infiltración del cuerpo superficial hacia el acuífero. Ambas situaciones disminuyen la eficiencia de la infiltración realizada. Los valores

considerados y los rangos correspondientes a cada uno de los valores se presentan en la Tabla 3-24.

La variable V_2 se utiliza sólo cuando la profundidad de la napa es menor a 10 m o bien cuando existen antecedentes demostrables de la conexión hidrogeológica entre el cuerpo de agua superficial en evaluación y el acuífero a recargar. En caso contrario, esta variable tendrá el valor máximo.

- iii) Profundidad del nivel freático (V_3): esta variable indicará la capacidad del acuífero en la zona a evaluar. Es importante realizar la evaluación de esta variable para el periodo del año en que se considera realizar recarga.

Para cada una de estas variables se ha establecido una escala de valores para cuantificar la aptitud que ella impone sobre la aptitud completa del lugar evaluado. De este modo un valor de 1 indica que la variable dificulta fuertemente el desarrollo de un proyecto de recarga artificial, mientras que un valor de 5 favorece fuertemente el desarrollo de un proyecto de recarga artificial. En la Tabla 3-24 se describe en detalle el significado de la valoración de cada variable.

Tabla 3-24: Casos en que las variables V_1 a V_3 toman sus respectivos valores

Valor	Variable		
	V_1	V_2	V_3
1	$K_H \leq 0.1 \text{ m/d}$ ó $K_H \geq 1000 \text{ m/d}$	$\text{Dist}_f \leq 100 \text{ m}$	$\text{Prof} \leq 5 \text{ m}$
2	$0,1 \text{ m/d} < K_H \leq 1 \text{ m/d}$ ó $1000 \text{ m/d} > K_H \geq 500 \text{ m/d}$	$100 \text{ m} < \text{Dist}_f \leq 500 \text{ m}$	$5 \text{ m} < \text{Prof} \leq 10 \text{ m}$
3	$1 \text{ m/d} < K_H \leq 5 \text{ m/d}$ ó $500 \text{ m/d} > K_H \geq 200 \text{ m/d}$	$500 \text{ m} < \text{Dist}_f \leq 1 \text{ km}$	$10 \text{ m} < \text{Prof} \leq 25 \text{ m}$
4	$5 \text{ m/d} < K_H \leq 50 \text{ m/d}$ ó $200 \text{ m/d} > K_H \geq 100 \text{ m/d}$	$1 \text{ km} < \text{Dist}_f \leq 10 \text{ km}$	$25 \text{ m} < \text{Prof} \leq 50 \text{ m}$
5	$50 \text{ m/d} < K_H \leq 100 \text{ m/d}$	$10 \text{ km} < \text{Dist}_f$	$50 \text{ m} < \text{Prof}$

Fuente: Elaboración propia

El valor de aptitud general de una zona de estudio se calcula como un promedio de todas las variables ya que se consideran todas con la misma importancia. De acuerdo a lo anterior, se puede considerar la siguiente fórmula:

$$V_A = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 V_i$$

Donde V_A es el valor de la aptitud de la zona estudiada, que va de un valor de 1 para la menos apta hasta 5 para la que tiene mayor aptitud.

3.4.2 Fase II

Una vez realizada la primera fase se debe proceder a la búsqueda de sitios dentro de las áreas de mayor aptitud para proceder a su evaluación en base a las variables locales. Las variables locales son de tipo binario (Positivo o Negativo) y son las siguientes:

- i) Cercanía a la fuente de agua para realizar la recarga. Se considerará con valor positivo cuando la fuente se encuentre a una distancia menor a 100 m.
- ii) Disponibilidad de terreno para realizar el proyecto de recarga artificial.
- iii) Disponibilidad de derechos sobre la fuente para realizar las pruebas.
- iv) Calidad de agua competente para realizar la recarga artificial. Se debe entender que esta experiencia piloto es de corto plazo y se infiltrarán caudales reducidos, por lo anterior se analizará esta variable de manera referencial. Sólo se considerará en la decisión cuando exista clara evidencia de posible afectación por descargas al canal de fuente de contaminantes. En este caso, se adoptará un valor positivo cuando el agua del canal sea de igual o mejor calidad que las aguas subterráneas del sector en los parámetros seleccionados en la Tabla 2 DS N.46 (Límites Máximos Permitidos para Descargar Residuos Líquidos en Condiciones de Vulnerabilidad Baja) o sea menor a todos los parámetros de dicha tabla.
- v) Lejanía a fuentes de contaminación de aguas subterráneas como por ejemplo tranques de relaves o rellenos sanitarios. Se adoptará un valor positivo cuando la fuente se encuentre a más de 3 Km de distancia al lugar de donde se realizará el proyecto de recarga.

Para que un sitio pueda ser considerado para realizar el proyecto de recarga artificial deberá presentar un resultado positivo en la totalidad de las variables consideradas. En caso de que presente un valor negativo en los puntos i), iv) ó v), se considerará caso a caso la factibilidad de los sitios.

Esta metodología será sujeta a un análisis de sensibilidad para los ponderadores de cada variable.

3.5 EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO

La aplicación de la metodología evaluó en primer lugar la Fase I, para obtener los valores de aptitud dentro del área estudiada según las variables hidrogeológicas. En base a lo anterior se eligieron 3 sitios potenciales para desarrollar el proyecto piloto de recarga artificial. Posterior a esto se realiza la evaluación de los sitios en base a la Fase II de la metodología.

3.5.1 Fase I

La aplicación de la metodología descrita en la sección anterior se presenta en forma parcial para cada una de las 3 variables consideradas en la Fase I. Posteriormente, se presenta el resultado global de la evaluación que entrega el valor de aptitud que muestra el territorio para un proyecto de recarga artificial.

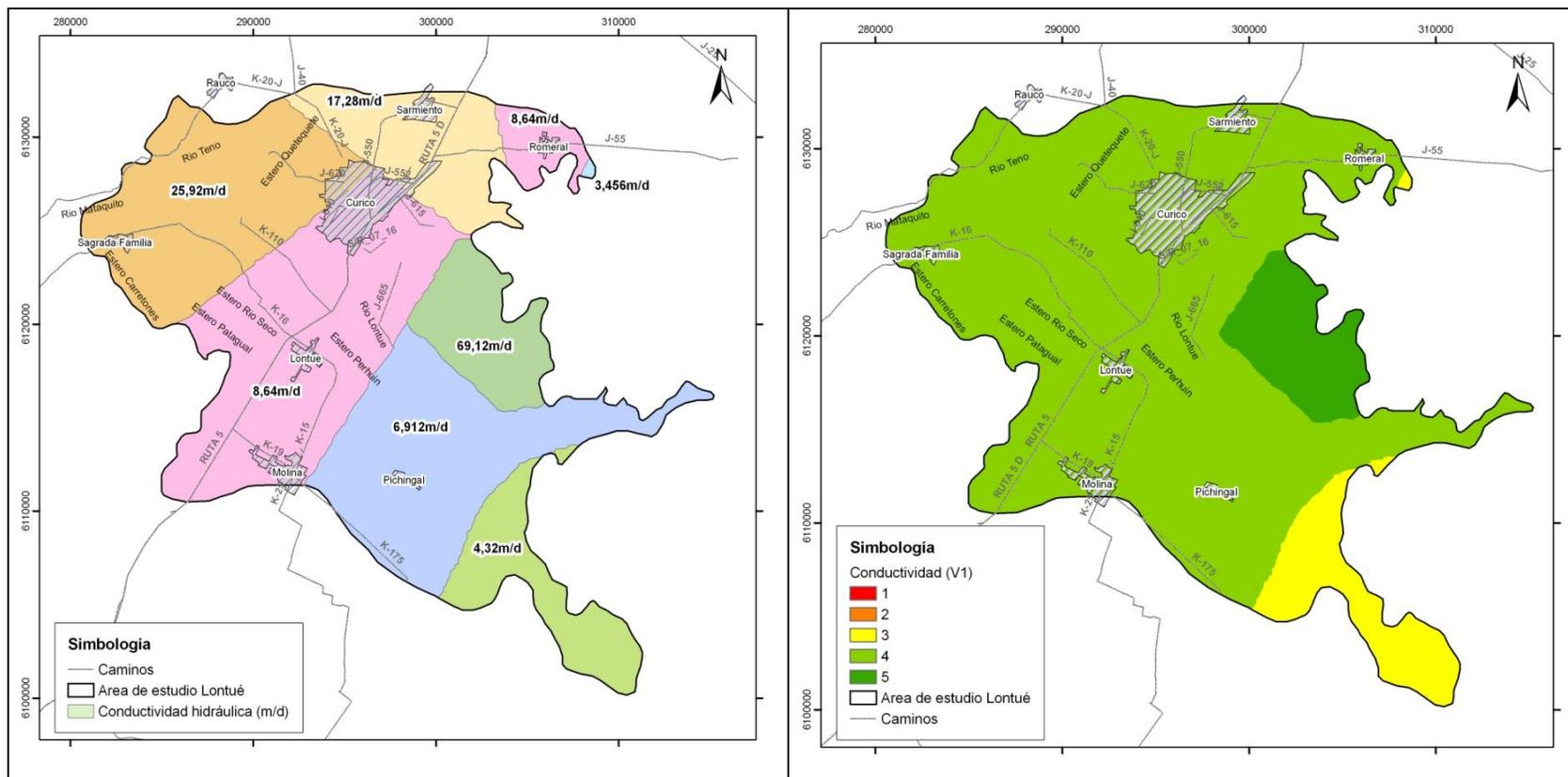
Para construir las distintas capas de información o variables consideradas principalmente se utilizó la información obtenida de la fase de recopilación de antecedentes. La información fue incorporada a un Sistema de Información Geográfico (SIG), en plataforma ArcGIS™, para su procesamiento, análisis y evaluación, determinando el valor de aptitud del territorio analizado.

3.5.1.1 Variable 1: Conductividad hidráulica

Para la determinación de la conductividad hidráulica del área de estudio, se ha empleado la información bibliográfica recopilada correspondiente al estudio Aquaterra, 2012 que entrega una categorización en 7 zonas con permeabilidades que van desde los 3,45 m/d, en una pequeña zona del límite este del área de estudio, a 69,12 m/d para zona ubicada al sureste de Curicó (Figura 3-27 izquierda).

La aplicación de la metodología para esta variable según los rangos de la Tabla 3-24 entrega una clasificación del territorio de estudio en tres categorías como se muestra en la Figura 3-27 derecha. Un valor de 3 para el límite sur, un valor de 4 en la mayor parte del área de estudio y un valor 5 para el sector que presenta la conductividad más elevada. De acuerdo a este resultado, se observa que las características conductivas del territorio favorecen un proyecto de recarga en gran parte del área de estudio y mayormente en la zona que presenta el valor 5.

Figura 3-27: Variable 1 Conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

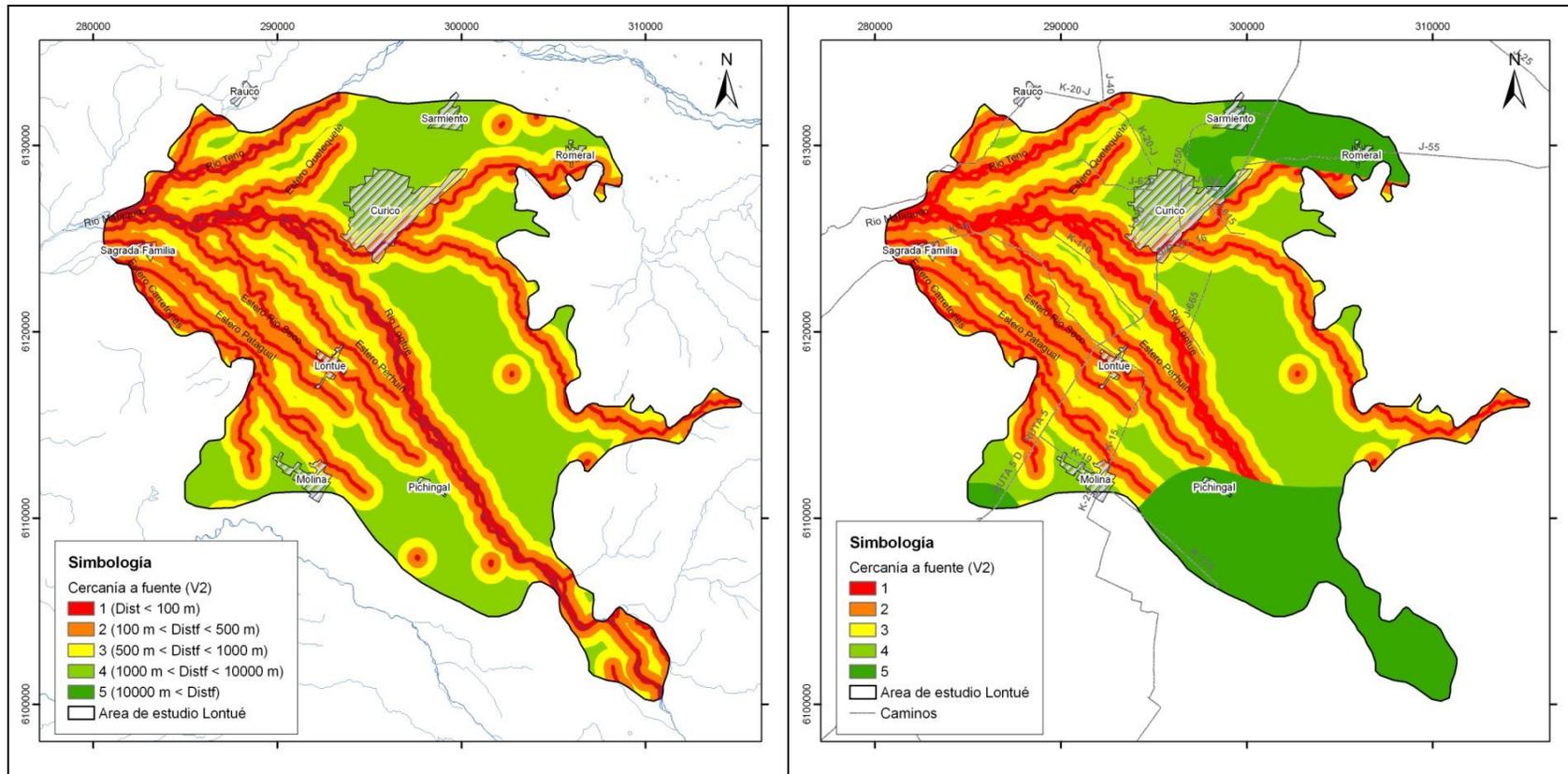
3.5.1.2 Variable 2: Cercanía y conexión a fuente de agua

Para la determinación de esta variable se utilizó la distancia lineal de cada celda de 20x20 metros, dentro del área de estudio, a la fuente de agua superficial más cercana. Para este análisis se utilizó la red de drenaje correspondiente a ríos, esteros y quebradas, además de la red de cuerpos de aguas que presenta los lagos, embalses y lagunas.

La aplicación de la metodología para esta variable según los rangos de la Tabla 3-24, entrega una clasificación del territorio en 4 de las 5 categorías definidas (Figura 3-28 izquierda), desde un valor 1 para aquellas zonas más cercanas (≤ 100 m) a los cauces o cuerpos de agua, hasta un valor 4 para aquel sector del terreno más alejado (entre 1 y 10 km). Sin embargo, como se menciona en la descripción de la metodología, esta variable se analiza sólo cuando la profundidad de la napa es menor a 10 metros, indicando que en caso contrario, esta variable toma valor 5, favoreciendo al proyecto de recarga, lo que se justifica por el aislamiento de la fuente subterránea del recurso superficial.

En la zona de estudio, principalmente en dos sectores se cumple esta condición (ver sección 3.5.1.3), al sur de Pichingal y al nororiente de Curicó, entre las localidades de Sarmiento y Romeral y, por lo tanto, la variable toma un valor 5 como se aprecia en la Figura 3-28 derecha. De acuerdo a este resultado, se observa que las características hídricas del territorio benefician mayormente el proyecto de recarga en los dos sectores mencionados.

Figura 3-28: Variable 2 Cercanía y conexión a fuente de agua



Fuente: Elaboración propia

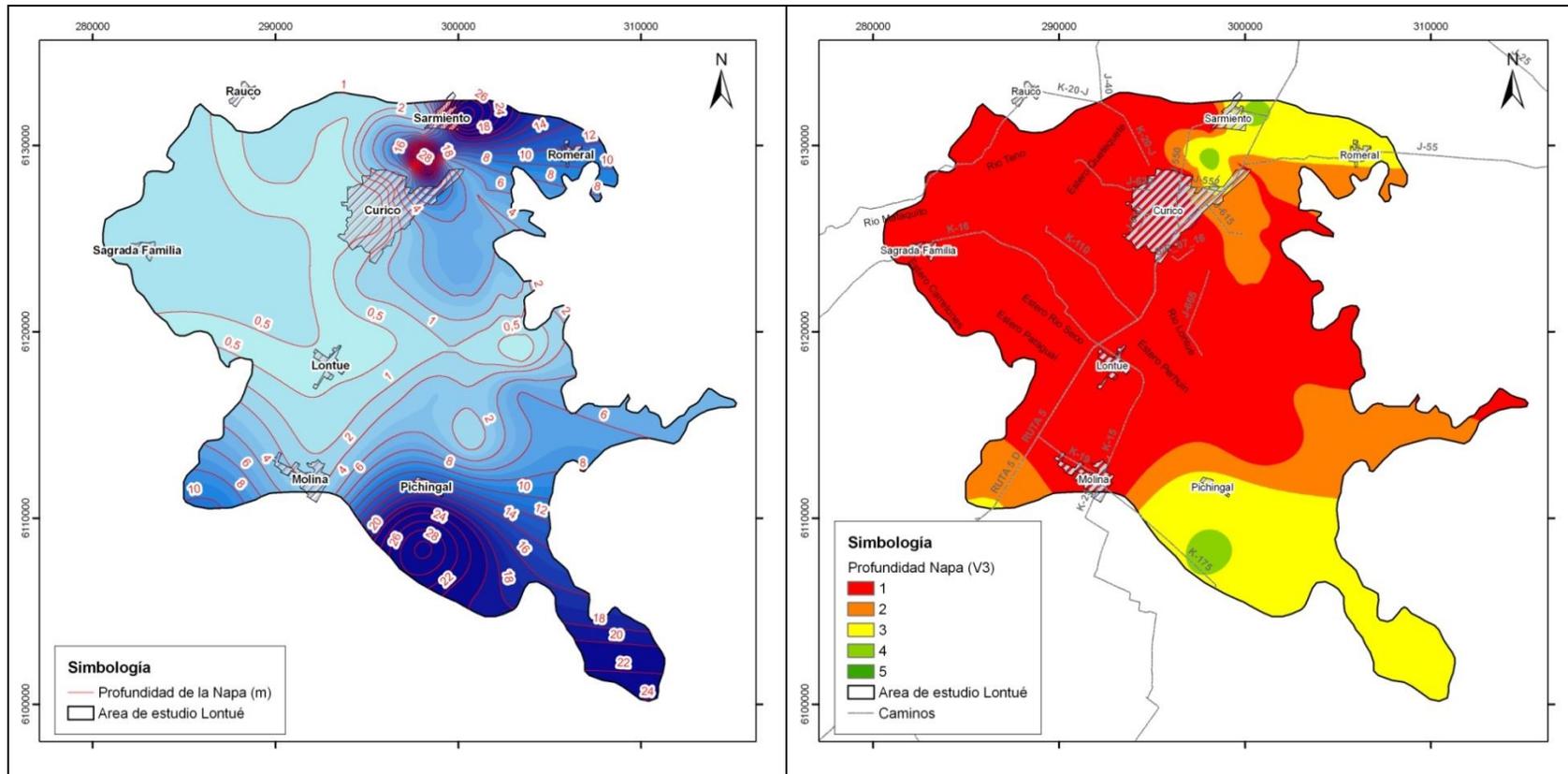
3.5.1.3 Variable 3: Profundidad de la napa

Esta variable fue obtenida de información de profundidad del nivel estático de diversos pozos ubicados en el área de estudio, cuya información fue levantada en la recopilación de antecedentes (Ver capítulo 3) y con la cual se construyó la piezometría de la zona, presentada en la sección 3.2.4.2. De esta forma, se genera un plano de curvas isofreáticas como se muestra en la Figura 3-29 izquierda.

Con la aplicación de la metodología para esta variable se generó una superficie con sectores o zonas comprendidas en un mismo rango de profundidad. De acuerdo a los datos, se estratificó en cinco tramos la profundidad del nivel estático como se indica en la Tabla 3-24.

La Figura 3-29 derecha, presenta el resultado anterior, indicando que en la mayor parte del área de estudio un proyecto de recarga se ve obstaculizado debido a que la napa se encuentra relativamente somera a la superficie, y por lo tanto, se podría generar un trasvase de este al flujo superficial. Sin embargo, se presentan dos sectores donde un proyecto de recarga al acuífero se hace más favorable, siendo estos, al sur de Pichingal y al noreste de Curicó, cuyas profundidades oscilan entre 10 y 28 metros aproximadamente.

Figura 3-29: Variable 3 Profundidad del nivel freático



Fuente: Elaboración propia

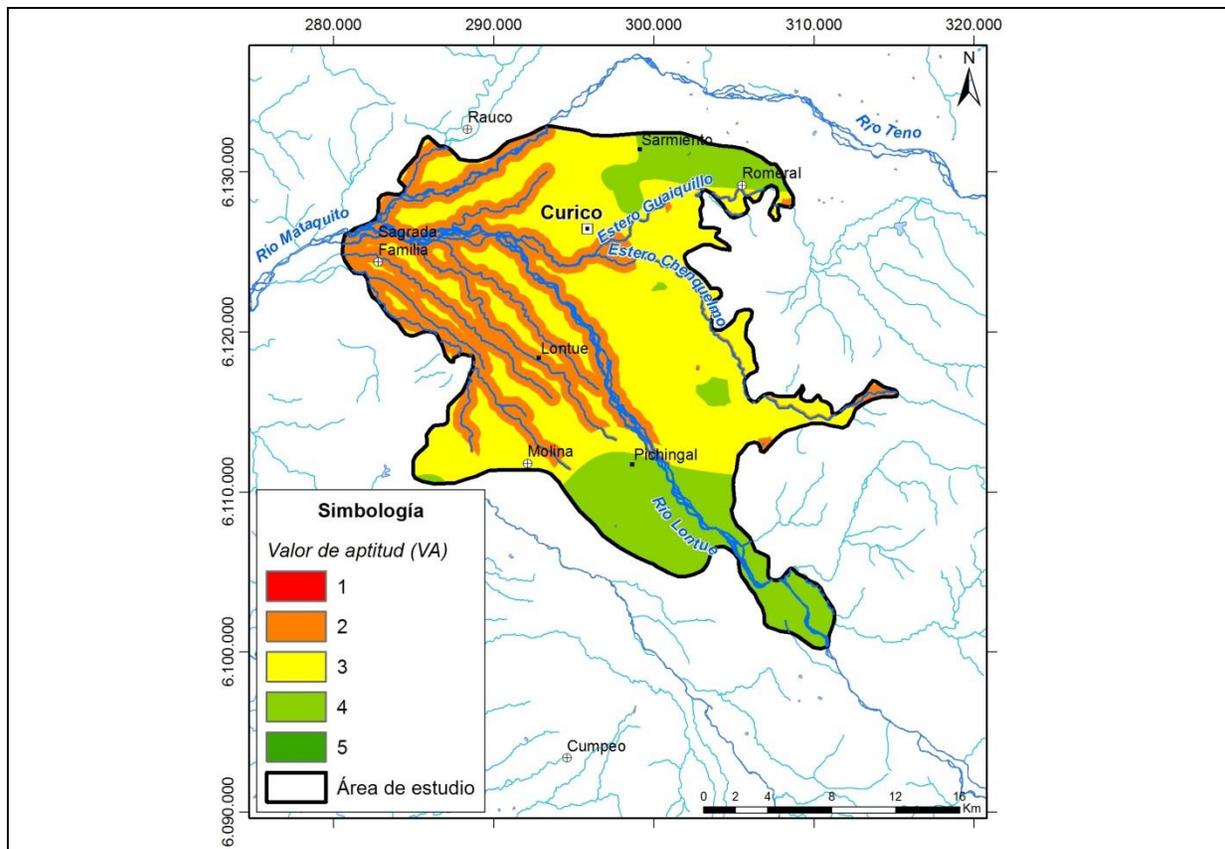
3.5.1.4 Resultado

El valor de aptitud general de la zona de estudio, calculado como el promedio de las 4 variables anteriores, se presenta en la Figura 3-30. En forma general el resultado de la aplicación metodológica para evaluar la aptitud del territorio clasifica el territorio en 5 categorías, siendo estas:

- Valor “1”: Territorio con muy baja aptitud para un proyecto de recarga artificial
- Valor “2”: Territorio con baja aptitud para un proyecto de recarga artificial
- Valor “3”: Territorio con una aptitud media para un proyecto de recarga artificial
- Valor “4”: Territorio con una alta aptitud para un proyecto de recarga artificial
- Valor “5”: Territorio con una muy alta aptitud para un proyecto de recarga artificial

Específicamente, para el área de estudio, el resultado presenta tres categorías: 2, 3 y 4, indicando una baja, media y alta aptitud del territorio respectivamente. En consecuencia la zona más idónea para un proyecto piloto de recarga artificial corresponde a aquella que presenta una alta aptitud (valor 4) y que recae en el sector desde Pichingal hacia el sur y en el sector ubicado al nororiente de Curicó, entre las localidades de Sarmiento y Romeral.

Figura 3-30: Valor de aptitud del territorio (VA), en la cuenca de Lontué



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.5 Análisis de sensibilidad de los parámetros de Fase I de la Metodología en el área

La metodología consideró un promedio de los tres parámetros considerados, en que la suma ponderada le da igual ponderación a los valores de cada una de las variables. Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la variación que se produce al modificar los factores de ponderación de la variable referente a la cercanía de los cursos de agua superficial. Esta variable se considera de una relevancia menor con respecto a las otras dos debido a que no impide evaluar las capacidades puntuales del lugar donde se realizar el piloto de recarga artificial. Sin perjuicio de lo anterior, será una variable de consideración al momento realizar una búsqueda de sitios para realizar una recarga artificial a nivel industrial.

Se realizaron dos casos en que se modifican los valores de ponderación de las variables. La variación de las ponderaciones se presenta en la Tabla 3-25

Tabla 3-25: Variación de ponderación de Variables Fase I

Variable	Caso Base	Simulación 1	Simulación 2
V ₁ : Conductividad Hidráulica	33%	40%	45%
V ₂ : Cercanía Curso Superficial	33%	20%	10%
V ₃ : Profundidad Napa	33%	40%	45%

Fuente: Elaboración propia.

El caso base y los resultados de las dos simulaciones se presentan en la Figura 3-31, Figura 3-32 y Figura 3-33 respectivamente. En ellas se aprecia que los valores de variación de la simulación difieren en unos pocos sectores con el caso base, pero no entre ellos. Las áreas con variaciones más importantes se observan en el sector de Romeral y entre Curicó y Pichingal. En el sector de Romeral se aprecia un aumento en 1 punto en la aptitud, pasando de aptitud alta en el caso base a aptitud muy alta al variar la ponderación. Por otra parte, en la zona entre Curicó y Pichingal, se observa que al cambiar la ponderación del caso base, aparecen sectores pequeños y discontinuos (manchas) donde cambia la aptitud de media a alta (Figura 3-31, Figura 3-32 y Figura 3-33).

Por lo tanto, para la cuenca estudiada la variación de los factores de ponderación para las variables de la Fase I no afectaría mayormente en la elección de los sitios más aptos dentro de la cuenca. Sólo el valor absoluto disminuye al considerar un ponderaciones distintas al 33% en cada variable.

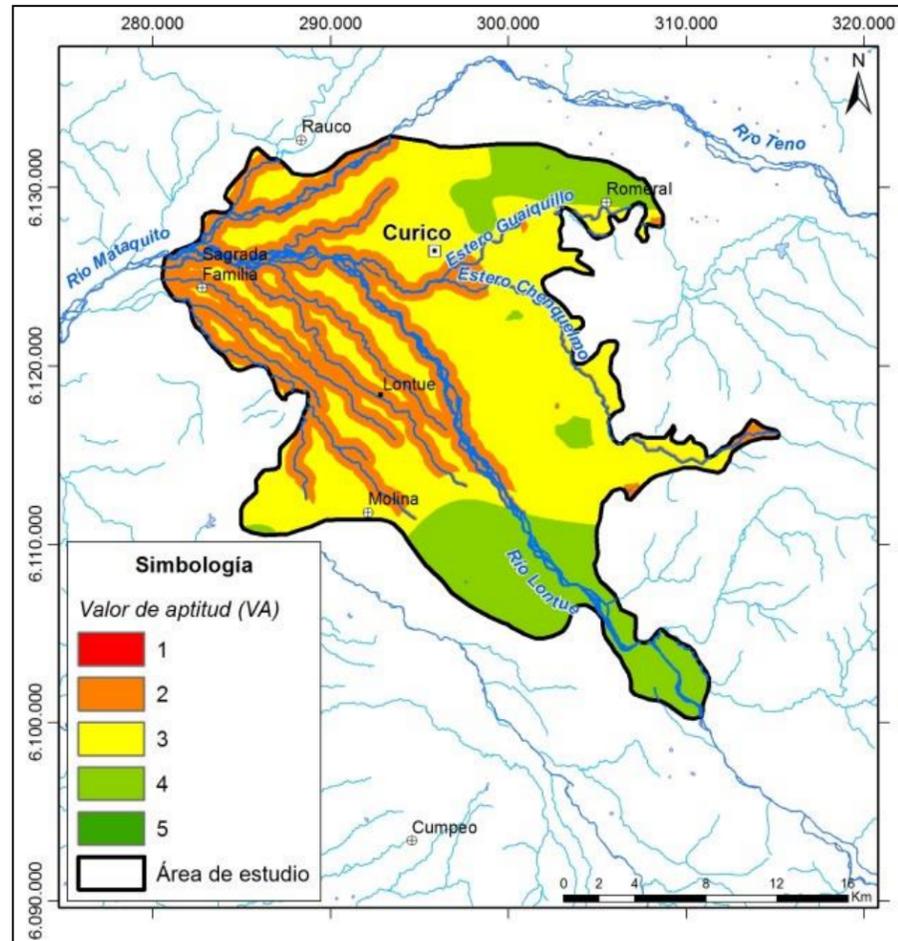


Figura 3-31: Resultados Fase I: Caso Base

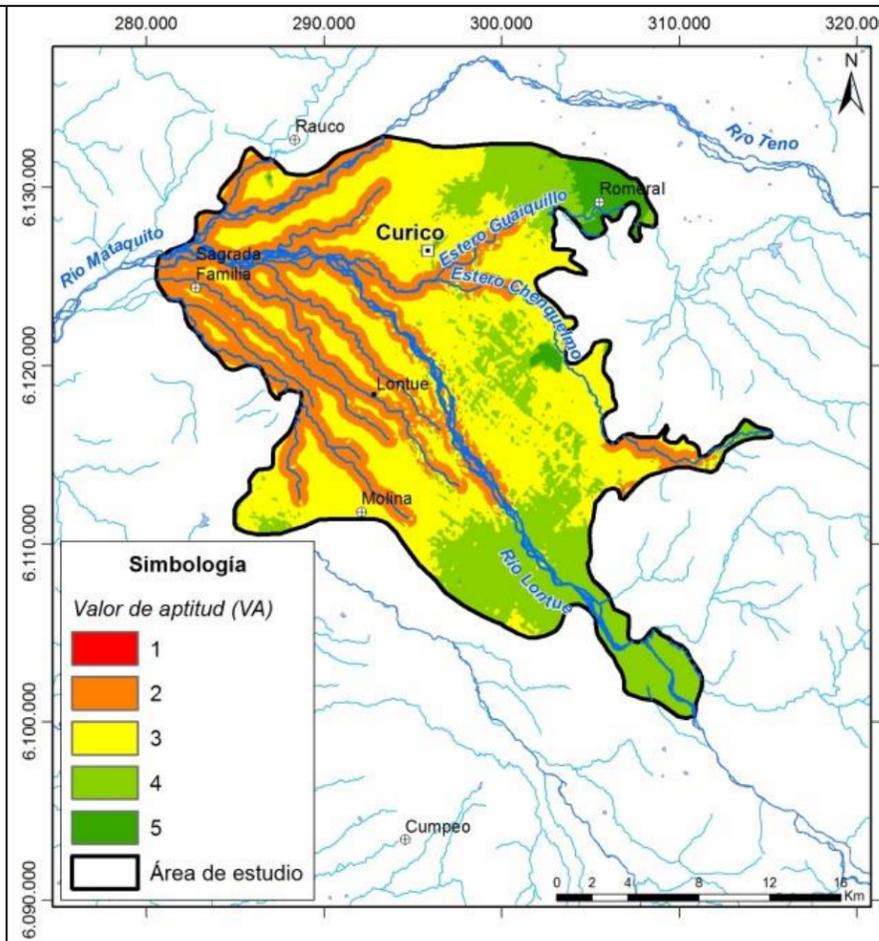


Figura 3-32: Resultados Fase I: Simulación 1

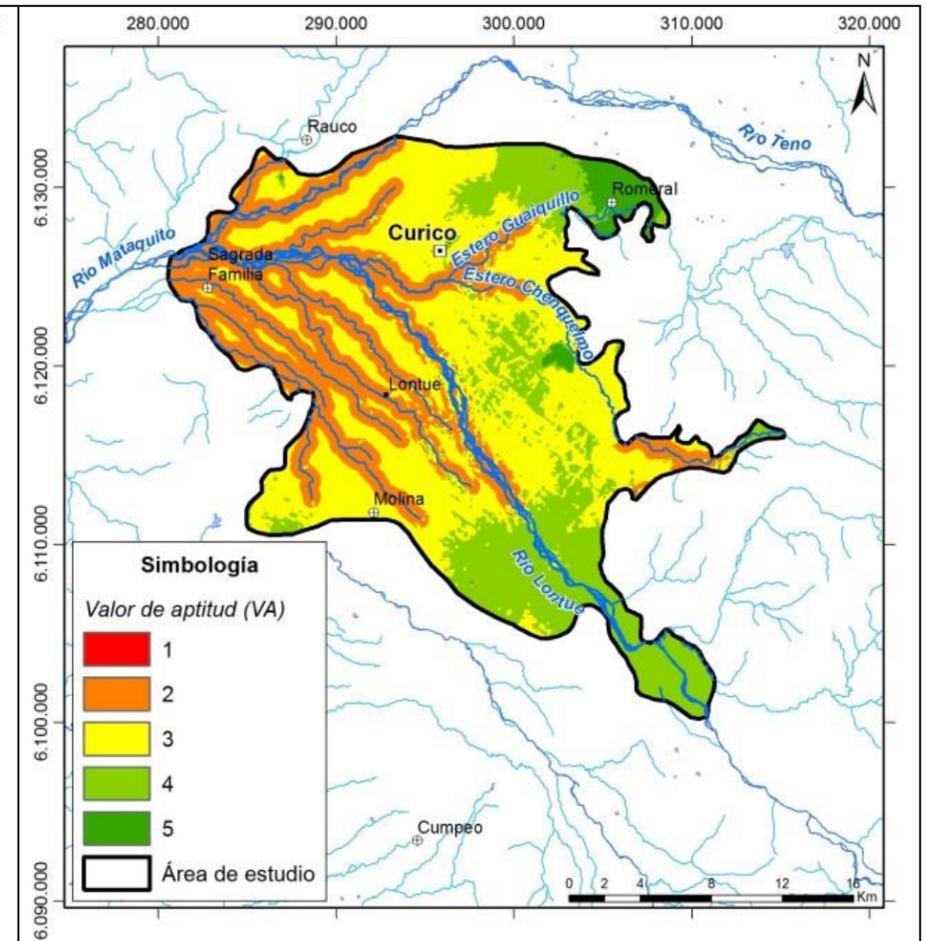


Figura 3-33: Resultados Fase I: Simulación 2

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Propuesta de lugares potenciales para un PPRAA

3.5.2.1 Búsqueda de sitios: Visitas a terreno

Con el objetivo de identificar posibles sitios para realizar el PPRAA, se realizaron campañas de terreno dentro de la cuenca, específicamente en los sectores que poseen una mayor aptitud para hacer este tipo de proyectos.

En este contexto, se hizo un trabajo de búsqueda de predios basándose en los resultados obtenidos de la metodología Fase I, contactos de la CNR y campañas de terreno *in situ* realizadas por profesionales de GeoHidrología.

En cada sitio se identificó si el dueño del predio estaba interesado en el proyecto y por lo tanto estaba dispuesto a facilitar un espacio dentro de su predio. Además si contaba con derechos de agua superficial, y su disposición a cederlos durante el periodo de duración del piloto.

Como resultado de las visitas se encontraron 3 predios donde se estudió la factibilidad de realizar el PPRAA. La Tabla 3-26 presenta el sector y dueño de cada predio preseleccionado. El detalle de las gestiones realizadas en cada uno de los sitios visitados, la disposición de los dueños del predio y derechos de agua, y las características del lugar son presentadas en el Anexo D.

Tabla 3-26. Sector y dueño de potenciales sitios de recarga

Sector	Sitio (dueño)
Romeral	Escuela Agrícola-
Los Niches	Alejandro Arena
Pichingal	Fernando Baile

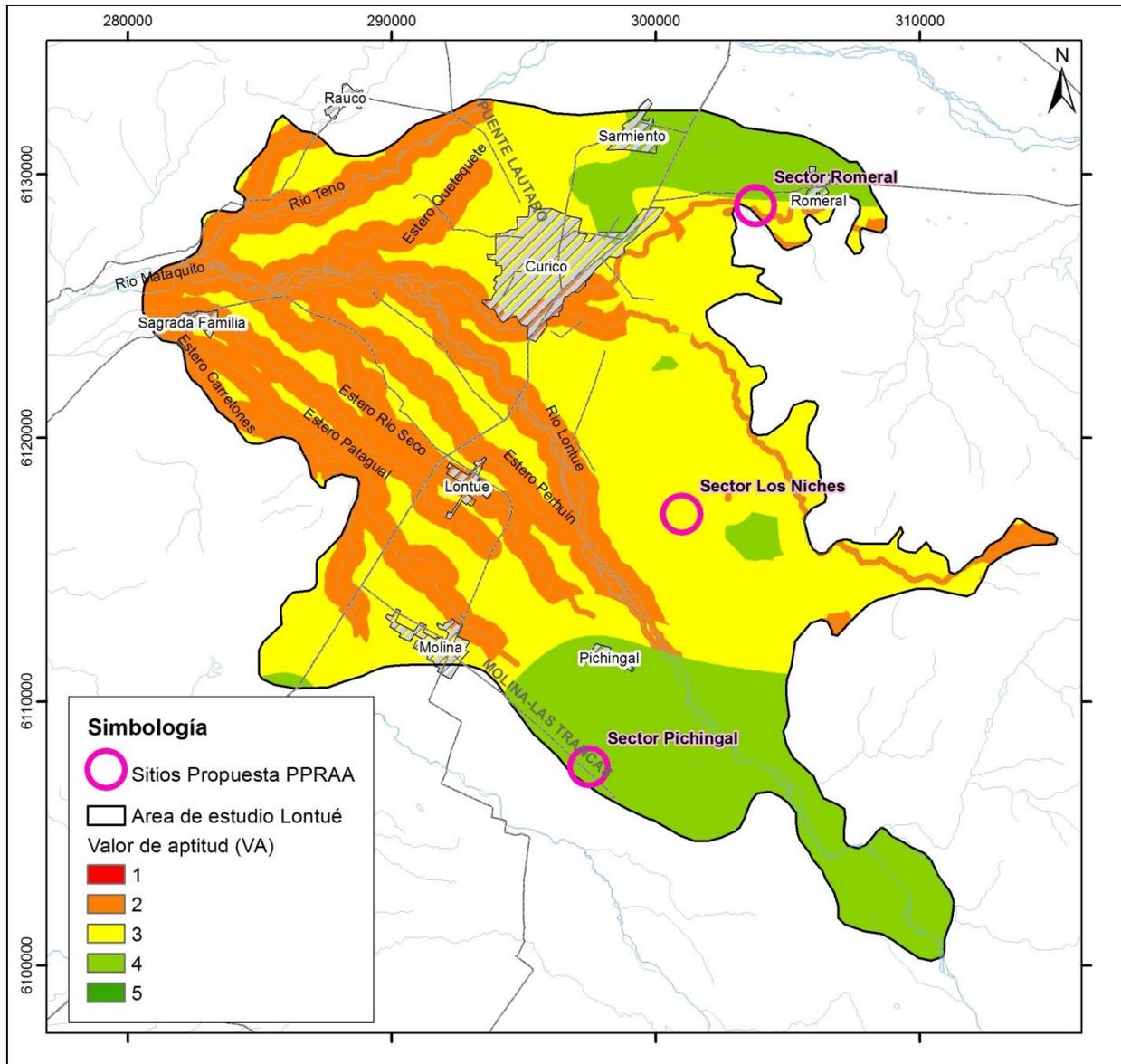
Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.2 Búsqueda de sitios: Resultados Revisión antecedentes

La Figura 3-34 presenta los tres sitios potenciales propuestos para realizar un proyecto piloto de recarga artificial al acuífero de Lontué. La propuesta se basó en el resultado de la evaluación metodológica y en visitas de reconocimiento a terreno.

En la zona de estudio se identificaron 3 sectores potenciales. Estas son de norte a sur: 1) sector Romeral, 2) sector Los Niches y 3) sector Pichingal (Figura 3-34).

Figura 3-34: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA en la cuenca de Lontué



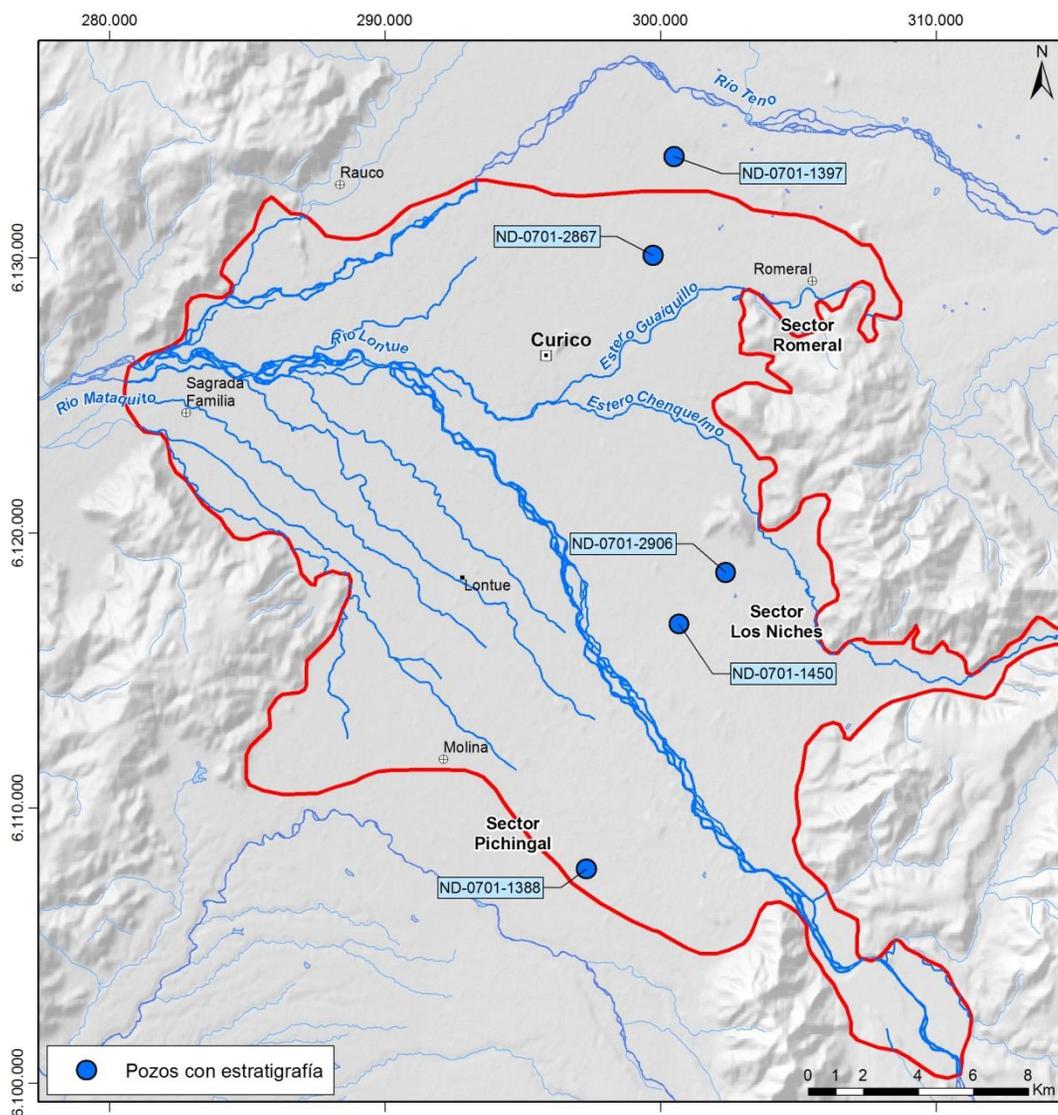
Fuente: Elaboración propia

3.5.2.2.1 Estratigrafía de pozos para las zonas propuestas

El análisis de esta información tuvo como propósito entender la estratigrafía local de cada una de las áreas propuestas, específicamente sobre el nivel estático en la zona, con el fin de evaluar la tecnología de infiltración a ocupar en el proyecto.

Con la información estratigráfica proveniente de los expedientes de pozos DGA se confeccionaron 5 columnas estratigráficas, 2 cercanas al sector de Romeral (norte) (Figura 3-35, Figura 3-36 y Figura 3-37), 2 en el sector de Los Niches (centro) (Figura 3-35, Figura 3-38 y Figura 3-39) y 1 en el sector de Pichingal (sur) (Figura 3-35 y Figura 3-40).

Figura 3-35: Ubicación de Pozos con Estratigrafía



Fuente: Elaboración propia

El nivel estático incluido en las columnas de pozos de la DGA corresponde al resultado de la interpolación realizada en el proceso de generación de las curvas piezométricas para el nivel promedio del segundo semestre del año 2001.

A continuación se describe la estratigrafía de cada sector.

Sector Romeral

La estratigrafía de los pozos ND-0701-1397 y ND-0701-2867, aproximadamente 5 km al oeste del sector de Romeral, muestra que los primeros 50 m desde la superficie están dominados por la presencia de material tamaño grava, sin matriz (Figura 3-36). Hacia el sector del pozo ND-0701-2867, las gravas se vuelven gravas areno-arcillosas (2-14 m de profundidad).

Aproximadamente 5 km al noroeste del sector Romeral, el pozo ND-0701-1397 muestra un espesor de relleno sobre la napa de 21 m (Figura 3-36). Este relleno consiste en ripio grueso intercalado con 3 m de ripio fino a los 9 m de profundidad.

Aproximadamente 4 km al oeste del sector Romeral, el pozo ND-0701-2867 muestra un espesor de relleno sobre la napa de 16 m. Este relleno consiste en 2 m superficiales de tierra vegetal infrayacida por 12 m de gravas areno-arcillosas. Bajo este nivel se distinguen 2 m de gravas arenosas sobre el nivel estático.

Sector Los Niches

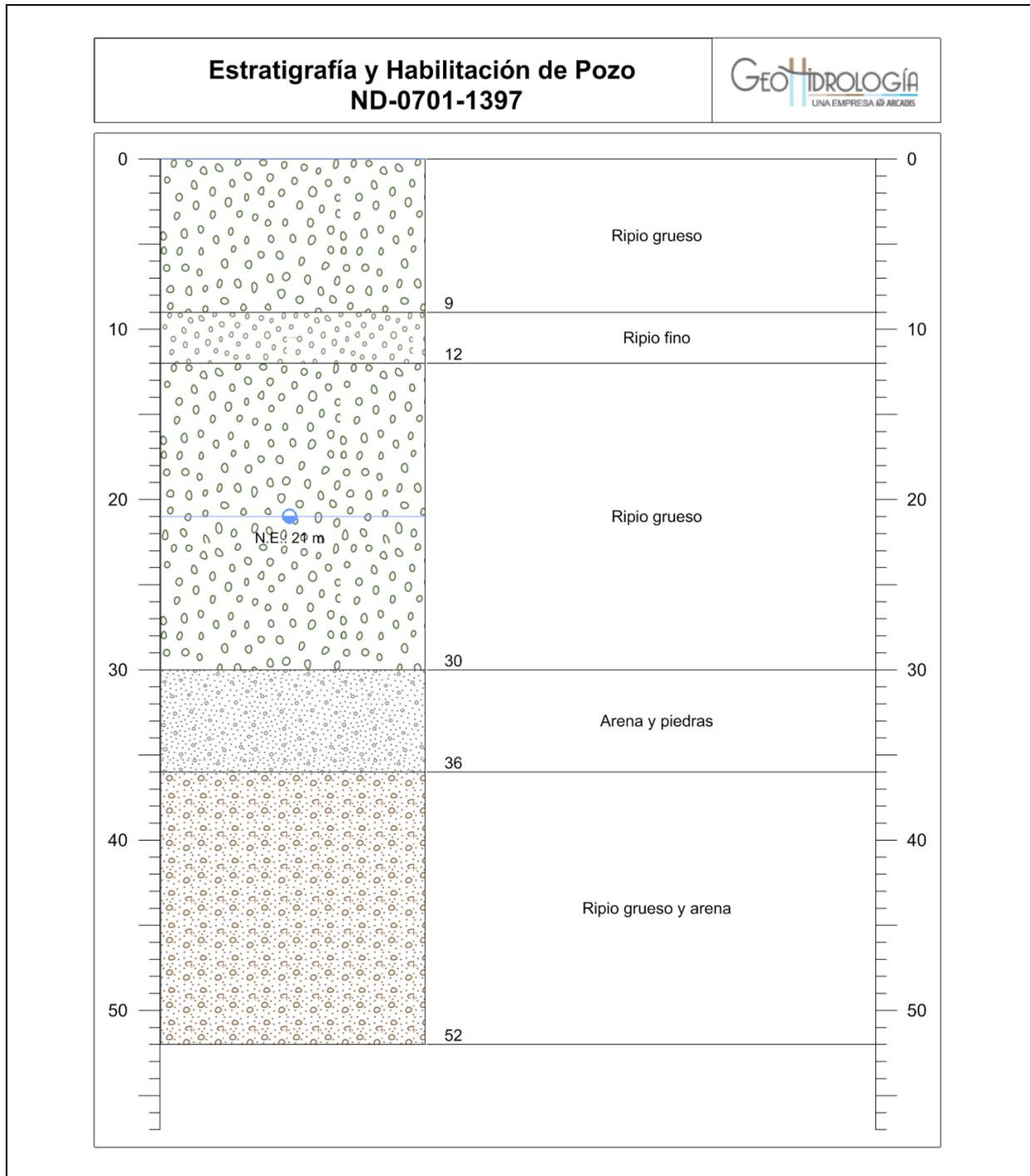
A menos de 2 km al noreste del sector de Los Niches el pozo ND-0701-2906 muestra un espesor de relleno sobre la napa de 2 m (Figura 3-38). Este relleno consiste en 0,5 m superficial de tierra vegetal infrayacida por 1,5 m de grava arcillosa.

En el sector Los Niches, el pozo ND-0701-1450 muestra un espesor de relleno sobre la napa de 4 m (Figura 3-39). Este relleno consiste en 0,4 m superficial de tierra vegetal infrayacida por 5 m de arcilla con clastos mayores. Bajo esto, en contacto con el nivel estático se observa 3,5 m de arena y ripio.

Sector Pichingal

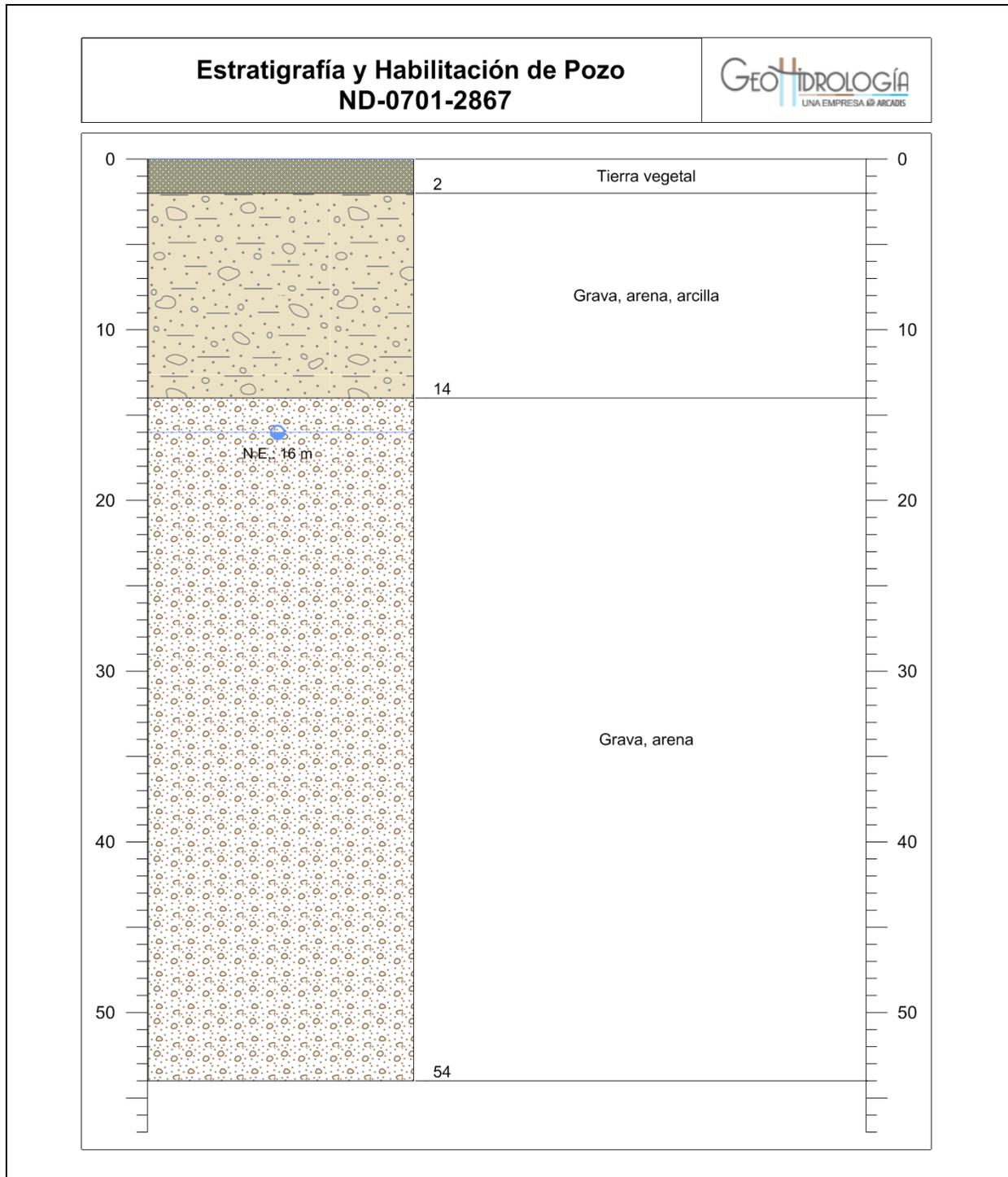
En el sector de Pichingal, el pozo ND-0701-1388 muestra un espesor de relleno sobre la napa de 27 m (Figura 3-40). Este relleno consiste principalmente en gravas intercaladas con arenas gruesas gravosas. Destaca la ausencia de contenido de arcilla.

Figura 3-36: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1397, zona Romeral



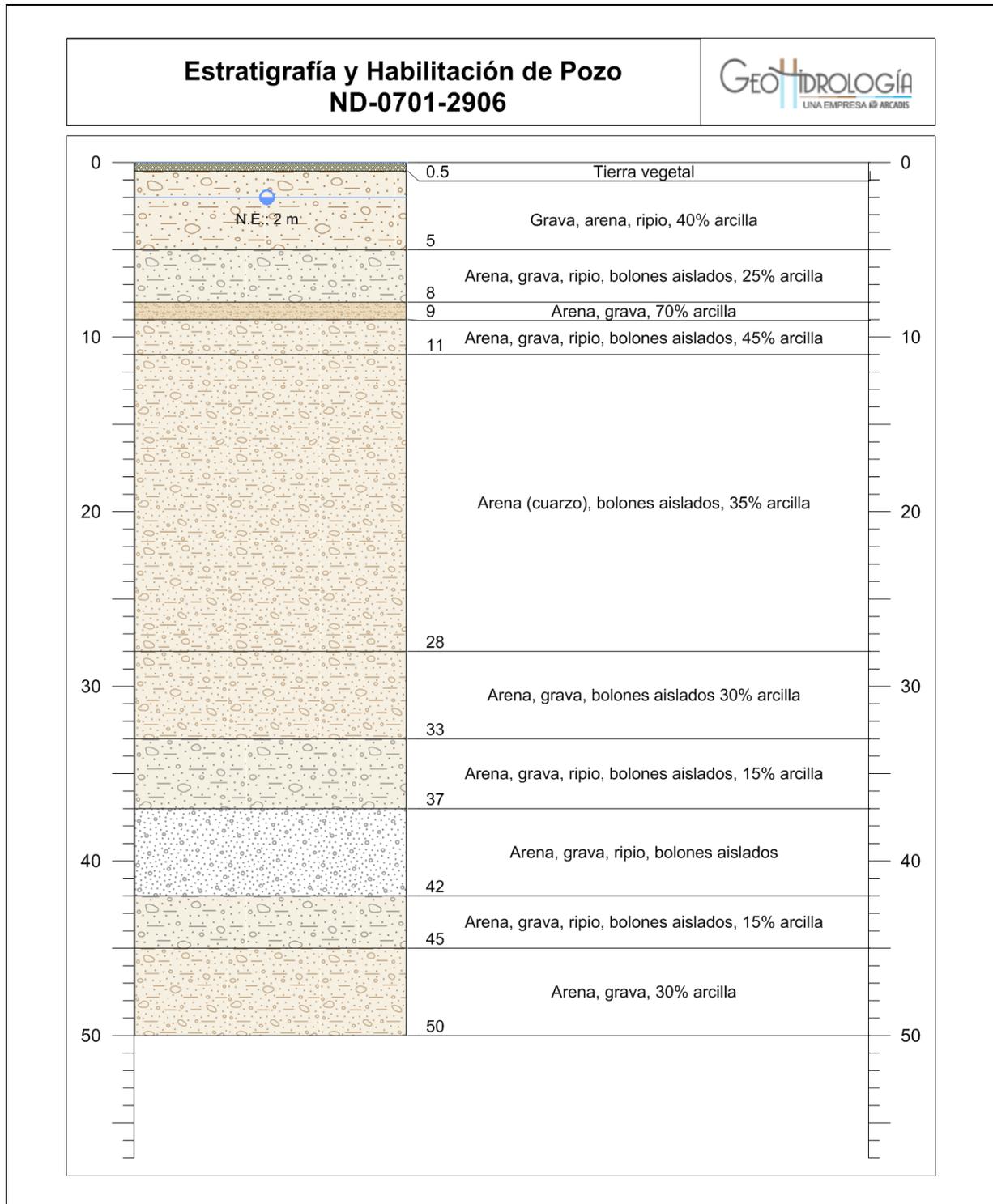
Fuente: Elaboración propia a partir de información del expediente del pozo

Figura 3-37: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-2867, zona Romeral



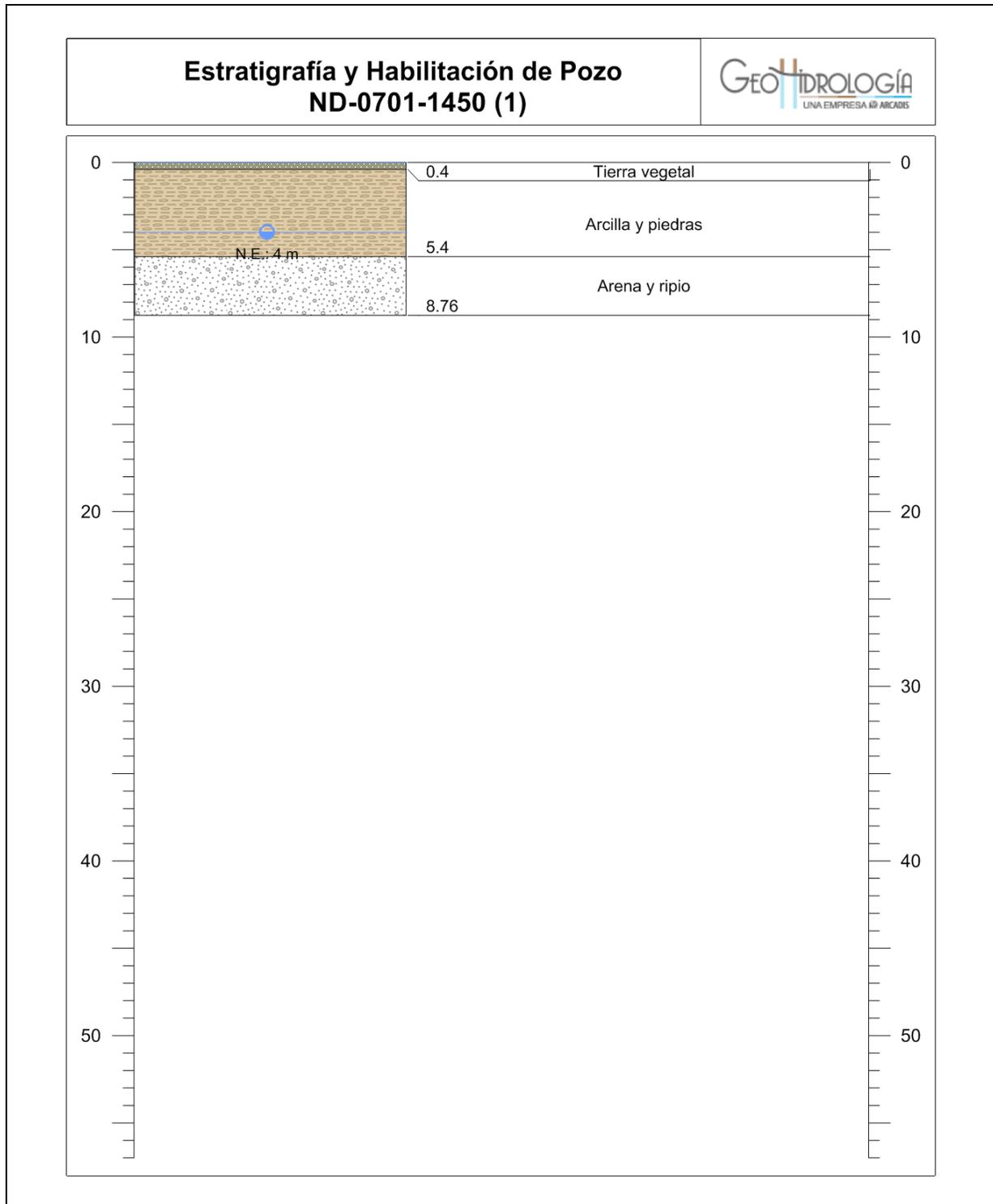
Fuente: Elaboración propia a partir de información del expediente del pozo

Figura 3-38: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-2906, zona Los Niches



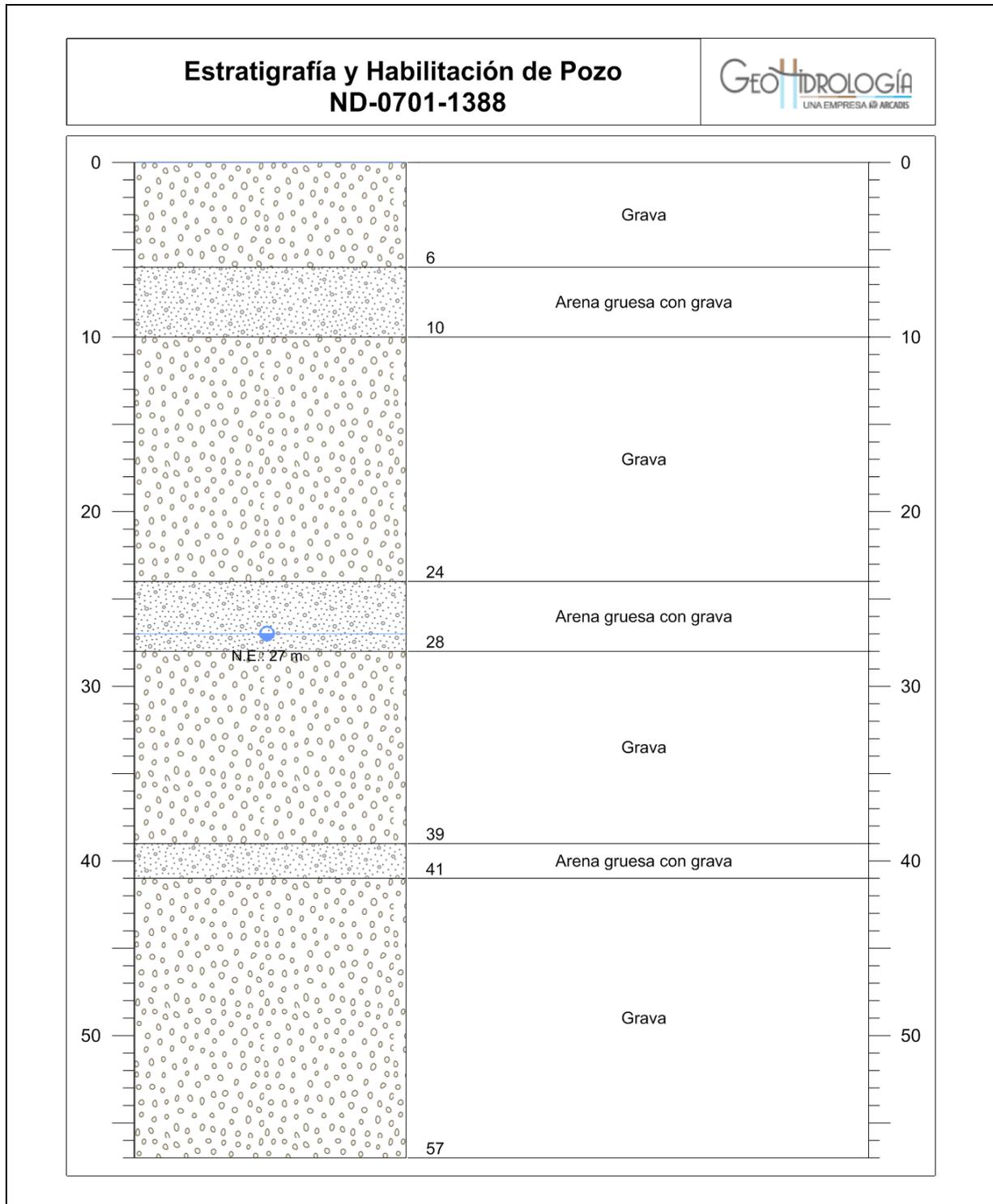
Fuente: Elaboración propia a partir de información del expediente del pozo

Figura 3-39. Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1450(1), zona Los Niches



Fuente: Elaboración propia a partir de información del expediente del pozo

Figura 3-40: Estratigrafía y habilitación del pozo ND-0701-1388, zona Pichingal



3.5.3 Fase II

Los zonas elegidas fueron visitadas y se encontraron 3 sitios para el área de estudio, una por cada zona propuesta. Estos fueron evaluados de acuerdo a la metodología descrita en la sección anterior para la Fase II y a la información recopilada en terreno. A continuación se presenta un cuadro resumen con las características principales de los sitios en la Tabla 3-27 y su respectiva evaluación en la Tabla 3-28.

Tabla 3-27: Características principales de los sitios con miras la evaluación de la Fase II

Sitio (dueño)	Sector	Distancia curso de agua (m)	Disponibilidad		Distancia fuente de contaminación (km)
			Terreno	Derechos	
Escuela Agrícola-	Romeral	<100	Si	Si	15
Alejandro Arena	Los Niches	<100	Si	Si	24
Fernando Baile	Pichingal	<100	Si	Si	36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-28: Evaluación de los sitios (Fase II)

Sitio (dueño)	Nombre predio	Evaluación				Resultado
		Cercanía a fuente de agua	Disponibilidad		Lejanía a fuente de contaminación	
			Terreno	Derechos		
Escuela Agrícola-	Romeral	1	1	1	1	Apto
Alejandro Arena	Los Niches	1	1	1	1	Apto
Fernando Baile	Pichingal	1	1	1	1	Apto

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la metodología presentada se considera los 3 sitios como apropiados para hacer proyecto piloto de recarga artificial.

4 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO

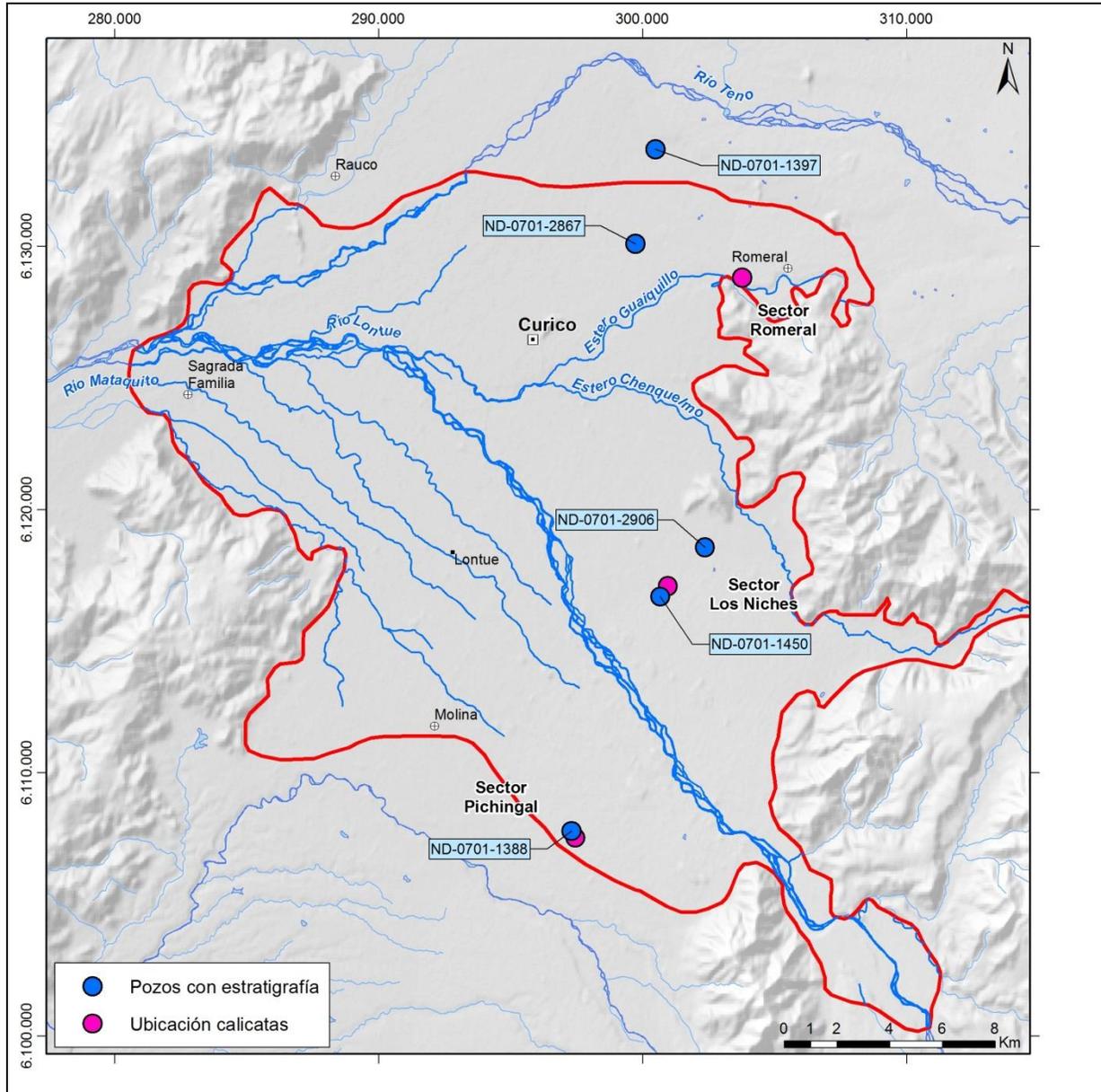
4.1 TRABAJOS EN TERRENO

Entre los días 27 de marzo y 02 de abril, se realizaron trabajos en terreno en el área de estudio. Estos correspondieron a la excavación de calicatas (Figura 4-1) y la realización de ensayos de infiltración en cada uno de los sitios pre-seleccionados. Estos trabajos tienen como objetivo caracterizar litológicamente y estimar la capacidad de infiltración de cada sitio pre-seleccionado.

Extraordinariamente, en la cuenca de Lontué se midieron niveles de pozos en los sectores visitados (Figura 4-2).

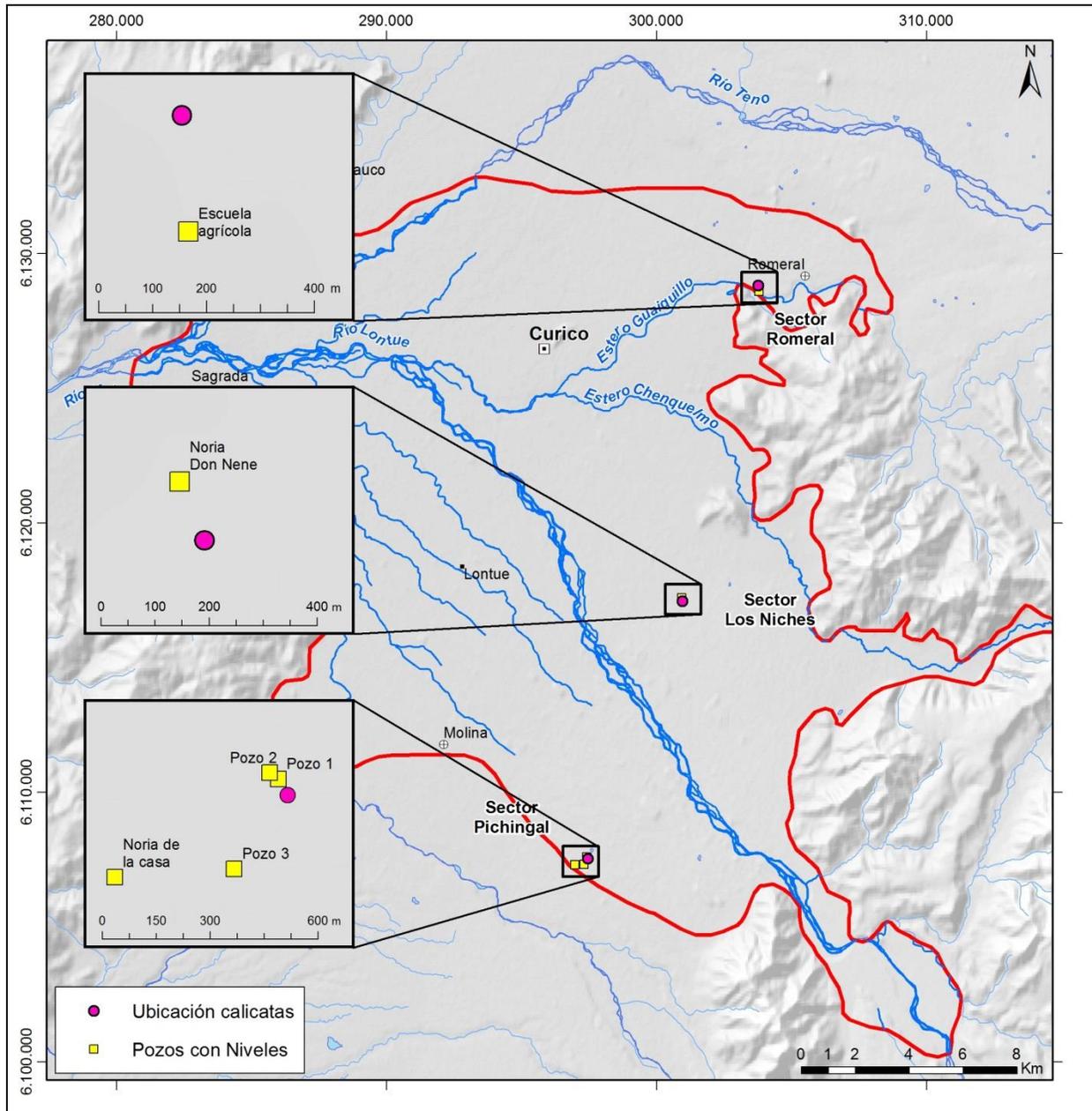
A continuación se presenta la metodología utilizada para la caracterización litológica y pruebas de infiltración, seguido de los resultados obtenidos.

Figura 4-1. Ubicación de calicatas y pozos con estratigrafía en alrededores, en los sectores pre seleccionados del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-2: Ubicación de pozos con niveles estáticos medidos durante trabajos de terreno, en el sector de las calicatas



Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Metodología

La excavación de calicatas incluyó 2 calicatas por sitio, la primera a una profundidad aproximada de 2 m y la segunda a una profundidad menor que 2 m, definida por el geólogo después de la inspección de la primera calicata. La primera calicata tuvo como objetivo

evaluar la aptitud del material del subsuelo que fue infiltrado, en primera instancia mediante la descripción geológica y luego mediante la prueba de infiltración en el fondo de la calicata. Por otra parte, la segunda calicata tuvo como fin preparar el terreno para una medición de infiltración en un estrato identificado durante la inspección de la primera calicata, cuya permeabilidad relativa estimada fue distinta a la del material presente en el fondo de la primera calicata.

La descripción de los taludes fue realizada por un geólogo de GeoH, quien hizo la caracterización mediante estimación visual, a ojo desnudo y con lupa de mano. Los parámetros descritos son: tamaño de grano, con estimación porcentual de los distintos tamaños (ripió, gravas, arena, limo y arcillas), grado de redondeamiento, esfericidad, composición de granos, cantidad de materia orgánica, compactación y cementación.

Esta caracterización fue complementada con información de otros pozos perforados en el entorno del área de estudio, con el fin de ampliar el entendimiento de cada sitio.

Posteriormente, se efectuaron ensayos de infiltración a nivel de superficie y en el fondo de cada calicata excavada, cuyo objetivo fue obtener la conductividad saturada (K_s) del suelo en 3 profundidades distintas.

El tipo de prueba seleccionado para este proyecto es la “Prueba de doble anillo a carga constante” (Figura 4-3). De acuerdo a literatura especializada (Luna, Sánchez y Muñoz, 2005) la conductividad saturada K_s para esta prueba se relaciona con la conductividad hidráulica saturada de campo K_{fs} , mediante la siguiente fórmula: $K_{fs}=0,5K_s$.

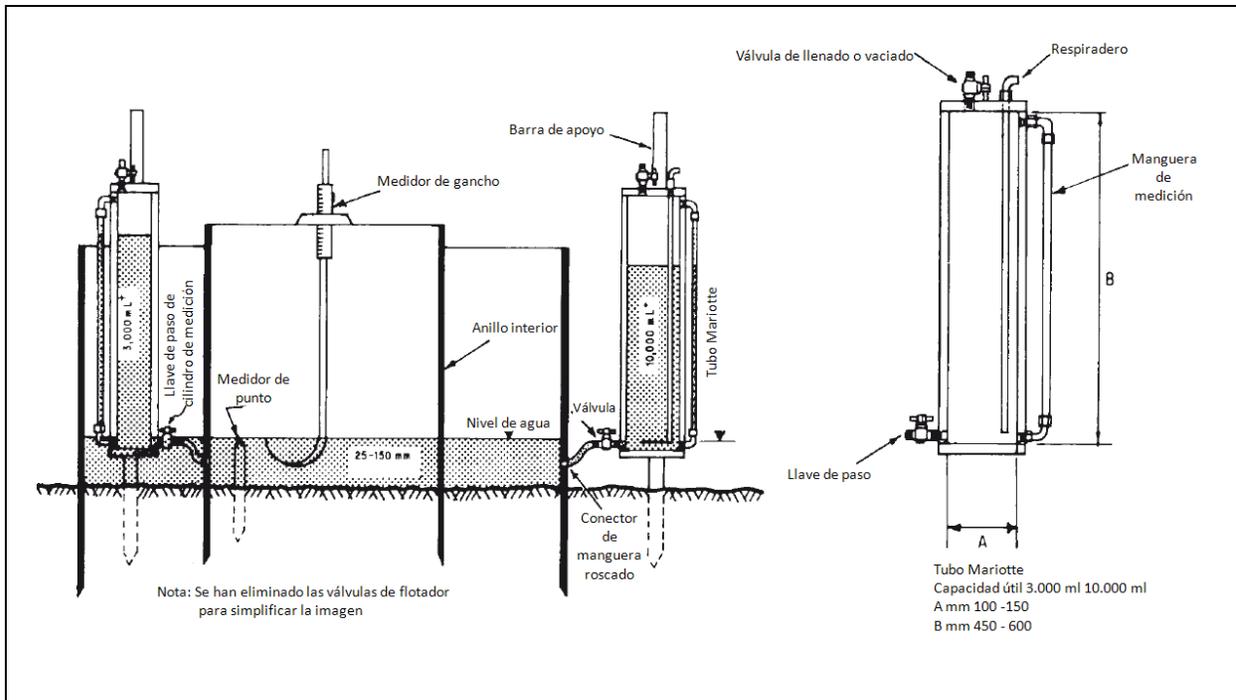
El método consiste en enterrar dos anillos, uno dentro del otro de manera concéntrica llenándolos parcialmente con agua y manteniendo el nivel constante. Para conservar este nivel constante dentro de los anillos, se utilizaron tubos de Mariotté, los que se conectaron a los cilindros tal como se observa en la Figura 4-4. La tasa de descenso medida en el tubo de Mariotte es corregida según el área del anillo interior y el volumen infiltrado, obteniendo así la conductividad hidráulica de campo. De esta manera la conductividad saturada de campo se calcula mediante la siguiente fórmula

$$K_{fs} = f \cdot \frac{dh}{dt}$$

Donde f es el factor que corresponde a la razón entre el área del anillo interior y el área efectiva del tubo de Mariotté, y $\frac{dh}{dt}$ es la tasa de descenso en el tiempo dentro del mismo tubo.

Notar que este valor es variable espacialmente para un mismo tipo de suelo a distancias cortas, por lo que para la generación de modelos espaciales una sola medida no es representativa de la conductividad en un área, aun siendo pequeña y supuestamente homogénea.

Figura 4-3. Esquema de referencia prueba de infiltración del doble anillo a carga cte.



Fuente: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field using double-ring infiltrometer, ASTM International.

Figura 4-4: Instalación prueba de infiltración en terreno



Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Resultados trabajos en terreno

En primer lugar se muestran los niveles del acuífero medidos durante los trabajos de terreno. En segundo lugar se realizó la descripción e interpretación de las calicatas y pruebas de infiltración, agrupada por sectores.

En cada sitio pre seleccionado se efectuaron medidas de nivel de pozo, en las cercanías de las calicatas a excavar durante el mes de abril de 2014 (Tabla 4-1). Las mediciones indican que actualmente el nivel estático en los sectores de interés se encuentra entre los 2,6 y 4,9 m de profundidad, con un promedio de 4,1 m.

Estos resultados pueden ser comparados con los valores de nivel estático catastrados por Aquaterra, durante agosto-septiembre 2012 (Figura 4-5). La Tabla 4-2 muestra los valores de nivel estático seleccionados en los alrededores de los pozos medidos por GeoH en cada sector. Esta tabla indica que el nivel estático para los mismas zonas en que se efectuaron las mediciones más recientes, varía entre 36 y 48,3 m (Figura 4-5), con un promedio de 40,5 m.

El promedio de niveles de los sectores de interés para el período invierno-primavera 2012, que asciende a 40,5 m, es 10 veces mayor que el promedio de niveles medidos durante otoño 2014 (Figura 4-5), correspondiente a 4,1 m. Esto podría indicar que el acuífero de la zona de estudio presenta una variación estacional de niveles estáticos. Los niveles someros medidos durante la época de otoño podrían ser explicados por una infiltración de aguas desde superficie, provenientes del abundante riego de la temporada verano. Esta conclusión es concordante con lo indicado por el Sr Fernando Baile, quien dijo que en el pozo de su predio, en el sector de Pichingal, existía una variación estacional de niveles estáticos, registrándose niveles someros (3 m) durante verano y niveles más profundos durante invierno, secando las norias del sector.

Tabla 4-1. Niveles estáticos abril 2014, medidos durante los trabajos de terreno

Pozo	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Datum	Sector	Fecha medición	Stick up (m)	Profundidad desde superficie (m)
Pozo 1	6.107.581	297.434	WGS84	Pichingal	01/03/13	0,38	4,9
Pozo 2	6.107.598	297.410	WGS84	Pichingal	01/03/13	0,31	4,5
Pozo 3	6.107.331	297.311	WGS84	Pichingal	01/03/13	0,75	4,4
Noria casa	6.107.308	296.979	WGS84	Pichingal	01/03/13	0,76	3,7
Noria Don Nene	6.117.211	300.927	WGS84	Los Niches	01/03/13	0	2,6
Escuela agrícola	6.128.592	303.785	WGS84	El Romeral	01/03/13	0,19	4,5

Tabla 4-2. Niveles estáticos agosto-septiembre 2012, correspondiente a pozos ubicados en las cercanías de los pozos medidos en abril 2014, para efectos de comparación

Pozo	Nombre predio	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Datum	Sector	Fecha medición	Profundidad desde superficie (m)
24	Las Acacias	6.108.076	297.440	WGS84	Pichingal	agosto-sept 2012	40
188	El desafío	6.107.995	298.283	WGS84	Pichingal	agosto-sept 2012	38
191	Agrícola el renacimiento	6.116.736	300.407	WGS84	Los Niches	agosto-sept 2012	40
44	Hijuela B, Chacra Santa Julia	6.129.517	305.489	WGS84	El Romeral	agosto-sept 2012	36
78	Parcela 32 los Cristales	6.127.593	301.436	WGS84	El Romeral	agosto-sept 2012	48,3

Fuente: Aquaterra, 2012

4.1.2.1.1 Romeral

En el sector de Romeral, específicamente en la escuela agrícola, se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 2,0 m de profundidad y calicata 2 de 0,8 m de profundidad (Figura 4-6 A, B y C).

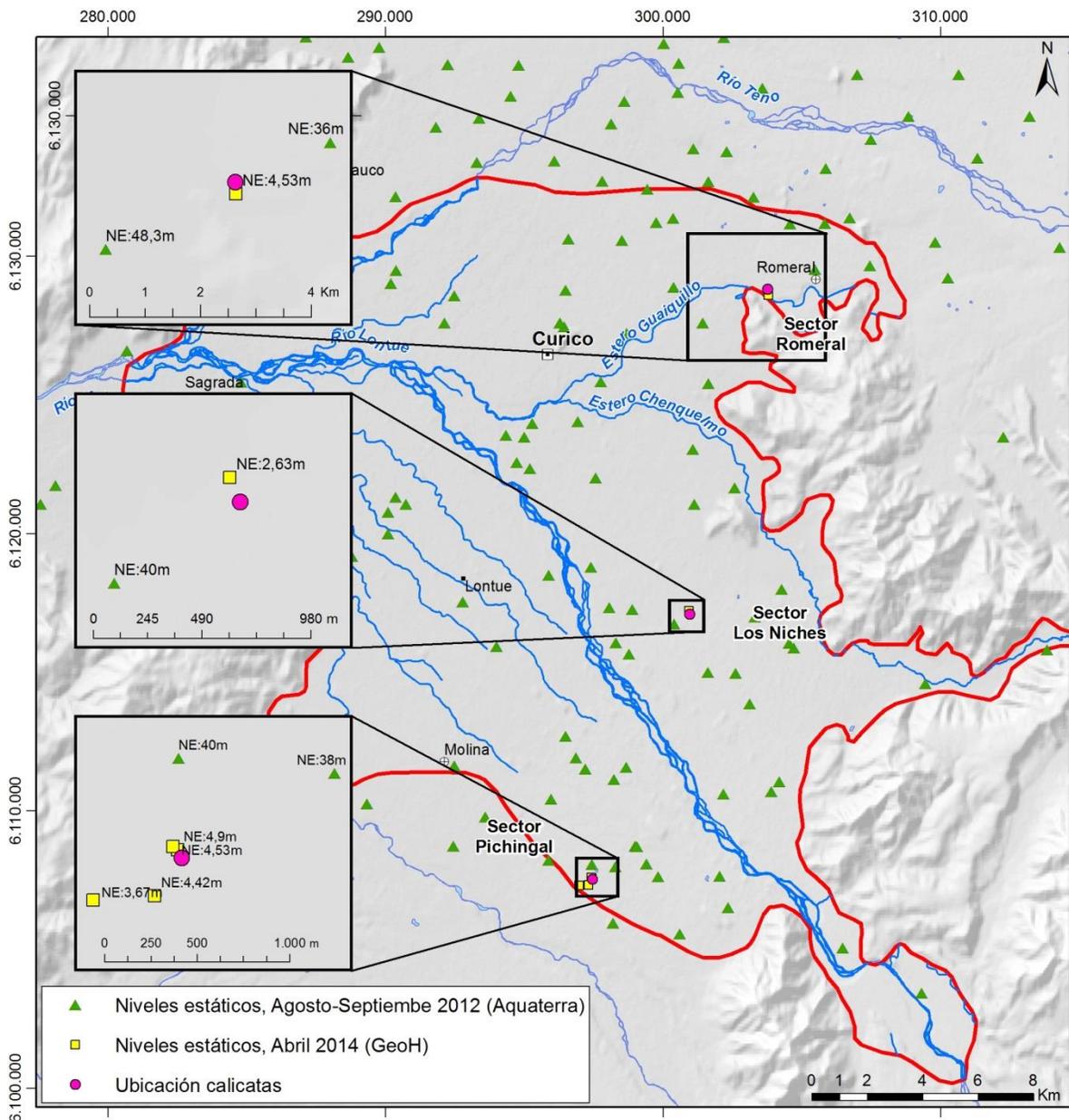
La primera calicata tuvo una profundidad de 2 m y se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 303.773 y N: 6.128.808 (Figura 4-1), mientras que la calicata 2 se ubicó 8 m al suroeste de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Figura 3-36) (Figura 4-1 y Figura 4-7): (1) 0,75 m de grava arenosa - arcillosa con bolones con presencia de arcillas, (2) 0,75 m de grava arcillosa con bolones y con una matriz compuestas por arcilla plástica y limo y (3) 0,5 m s de suelo vegetal compuesto de arcilla café con materia orgánica y limo.

La calicata 2 presenta las mismas características encontradas en la de mayor profundidad (Tabla 4-3).

Posteriormente se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-6 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-4. Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo E.

Figura 4-5. Niveles estáticos para agosto-septiembre 2012 (Aquaterra, 2012). Los cuadros con detalle de cada zona muestran la comparación de niveles 2012 con los niveles medidos en abril del 2014



Fuente: Elaboración propia, preparado con datos de Aquaterra, 2012 y datos propios.

Tabla 4-3: Resultados de la descripción de calicatas en Romeral

Calicata 1 (0-2,0 m)		Calicata 2 (0-80 cm)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,5	Suelo Vegetal: Arcilla café con materia orgánica y limo (~20%) el 15 % corresponde a clastos tamaño grava (hasta 15 cm)	0 a 0,5	Suelo Vegetal: Arcilla café con materia orgánica y limo (~20%) el 15 % corresponde a clastos tamaño grava (hasta 15 cm)
0,5 a 1,25	Grava arcillosa con bolones: Clastos redondeados de hasta 50 cm que representan ~ 75% de la secuencia. La matriz está compuesta principalmente por arcilla plástica y limo , poca arena (20 %)	0,5 a 0,8	Grava arcillosa con bolones: Clastos redondeados de hasta 50 cm que representan ~ 75% de la secuencia. La matriz está compuesta principalmente por arcilla plástica y limo , poca arena (20 %)
1,25 a 2,0	Grava areno-arcillosa con bolones: Secuencia similar a la anterior pero con un aumento de arena en la matriz (50% de matriz) y presencia de arcillas negras		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-4: Resultados del ensayo de permeabilidad en Romeral

	A nivel del suelo	Profundidad 0,8 m (Calicata 0-0,8 m)	Profundidad 2 m (Calicata 0-2 m)
Tasa de infiltración (K_s) (m/d)	0,48	1,5	2,5

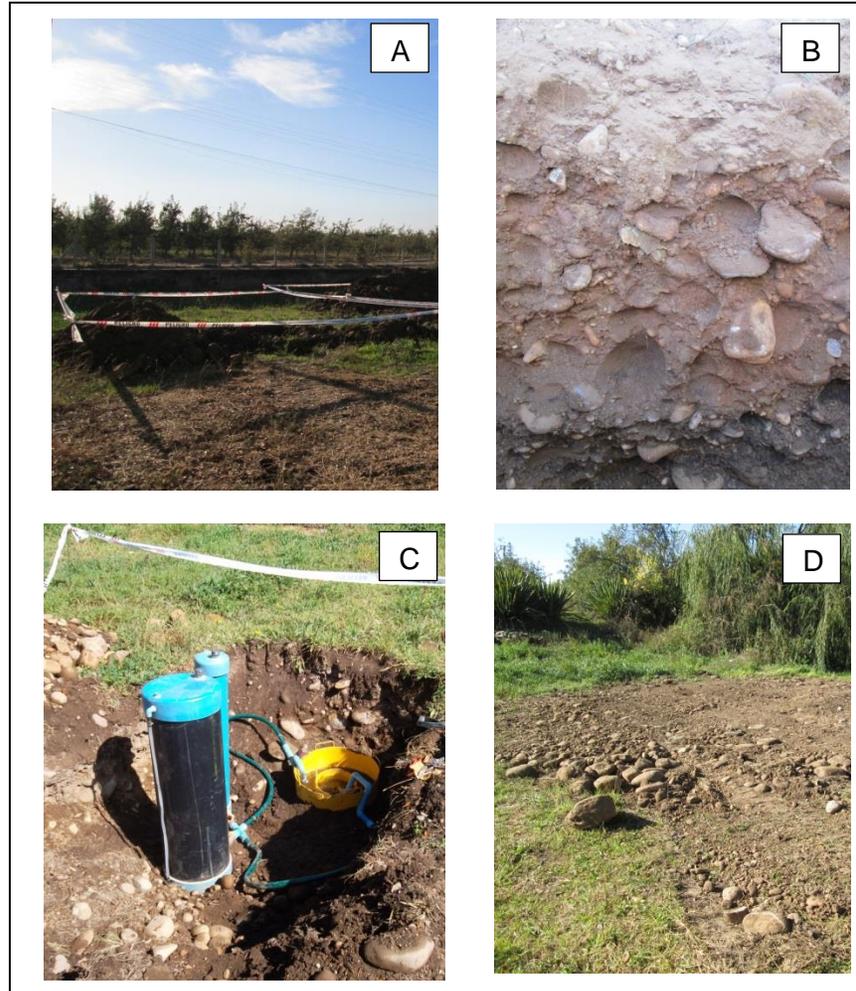
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en Romeral indican una permeabilidad baja para nivel de superficie y media para profundidades de 0,8 m (1,5 m/d) y 2,0 m (2,5 m/d). Es decir, la tasa de infiltración mejora hacia niveles más profundos.

Esto indica que el suelo vegetal tiene una baja capacidad de infiltración, principalmente debido a que está compuesto por arcillas y limos. Por otra parte, los otros estratos medidos tienen una capacidad media de infiltración ya que están compuestos por grava y arena, con finos subordinados.

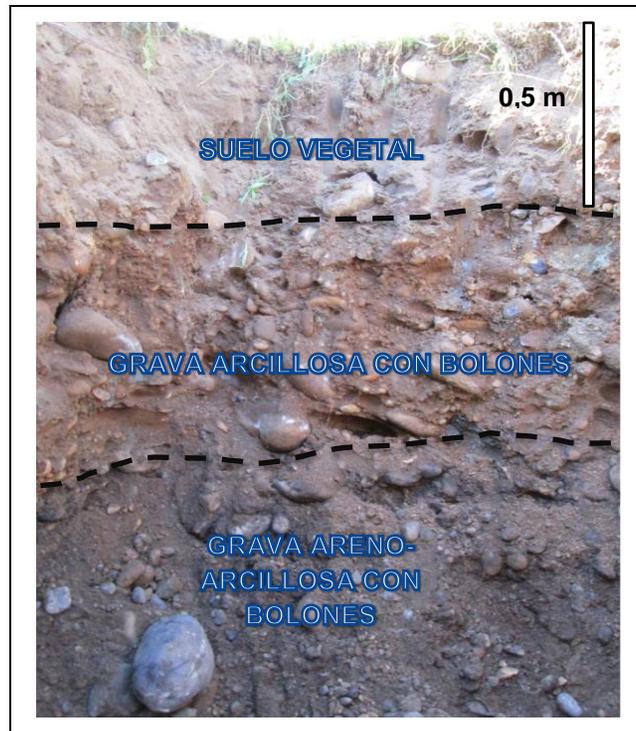
Posterior al ensayo de permeabilidad, se procedió a cerrar las calicatas. Su correcto cierre fue verificado por personal de GeoH el día 10 de abril de 2013 (Figura 4-6 D).

Figura 4-6: Trabajos en terreno- Romeral



Nota: A. Marca de zona a excavar.
B. Calicata 1 Profundidad de 2 m.
C. Prueba de infiltración en calicata 2, 0,8 m de profundidad.
D. Cierre de calicatas.
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-7. Calicata 1, sector Romeral con estratigrafía descrita



Fuente: Elaboración propia

La estratigrafía del pozo ND0701-2867 (capítulo 3.5.2.2.1), ubicado 4 km al oeste de las calicatas (Figura 4-1), muestra un espesor de relleno sobre la napa de 16 m. Este relleno consiste en 2 m superficiales de tierra vegetal infrayacida por 12 m de gravas areno-arcillosas. Bajo este nivel se distinguen 2 m de gravas arenosas sobre el nivel estático.

La información anterior indicaría que el relleno de grava, arena, arcilla y bolones descrito en las calicatas podría llegar hasta una profundidad de 14 m (2 m sobre el nivel estático). Bajo este nivel se encontrarían 2 m de gravas arenosas no saturadas, con propiedades hidrogeológicas supuestamente mejores que el nivel excavado.

4.1.2.1.2 Los Niches

En el Sector Los Niches, específicamente en el predio del Sr. Arena, se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 2 m de profundidad y calicata 2 de 0,8 m de profundidad (Figura 4-8 A, B y C).

La calicata 1 se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 300.976 y N: 6.117.102 (Figura 4-1 y Figura 4-9), mientras que la calicata 2 se ubicó 2 m al oeste de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Tabla 4-5): (1) 90 cm de grava arenosa con bolones con matriz de arena media con escasa arcilla, (2) 65 cm de grava areno-arcillosa con matriz arena gruesa y poca arcilla y (3) 45 cm de suelo vegetal compuesto principalmente por arcilla café con materia orgánica.

La calicata 2 presenta las mismas características encontradas en la de mayor profundidad (Tabla 4-5).

Tabla 4-5: Resultados de la descripción de calicatas en Los Niches

Calicata 1 (0-2 m)		Calicata 2 (0-80 cm)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,45	Suelo vegetal: Arcilla café con presencia de materia vegetal, ~10% de limo, ~ 40 % corresponde a clastos mayores redondeados de hasta 10 cm.	0 a 0,45	Suelo vegetal: Arcilla café con presencia de materia vegetal, ~10% de limo, ~ 40 % corresponde a clastos mayores redondeados de hasta 10 cm.
0,45 a 1,1	Grava areno-arcillosa: 75% Clastos de hasta 10 cm, matriz de arena gruesa angulosa y algo de arcilla (~5%). Se observan pequeños lentes de arena de 10 cm de espesor intercalados en la secuencia.	0,45 a 0,8	Grava areno-arcillosa: 75% Clastos de hasta 10 cm, matriz de arena gruesa angulosa y algo de arcilla (~5%). Se observan pequeños lentes de arena de 10 cm de espesor intercalados en la secuencia.
1,1 a 2,0	Grava arenosa con bolones: Clastos mayores de hasta 30 cm, redondeados , representa el ~80 % de la secuencia. Matriz de arena media angulosa con escasa arcilla.		

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-8 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-6. Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo E.

Tabla 4-6: Resultados del ensayo de permeabilidad en Los Niches

	A nivel del suelo	Profundidad 0,8 m (Calicata 0-0,8 m)	Profundidad 2 m (Calicata 0-2 m)
Tasa de infiltración (K_s) (m/d)	0,58	1,72	2,46

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en Los Niches indicaron una permeabilidad baja para nivel de superficie y media para profundidades de 0,8 m (1,72 m/d) y 2,0 m (2,46 m/d). Es decir, la tasa de infiltración mejoró hacia niveles más profundos.

Esto indica que el suelo vegetal tiene una baja capacidad de infiltración, principalmente debido a que está compuesto principalmente por arcillas. Por otra parte, los otros estratos medidos tienen una capacidad media de infiltración ya que están compuestos por grava y arena, con finos subordinados.

Posterior al ensayo de permeabilidad, se procedió a cerrar las calicatas. Su correcto cierre fue verificado por personal de GeoH el día 10 de abril de 2013 (Figura 4-6 D).

Figura 4-8: Trabajos en terreno- Los Niches



Nota: A. Calicata 1.

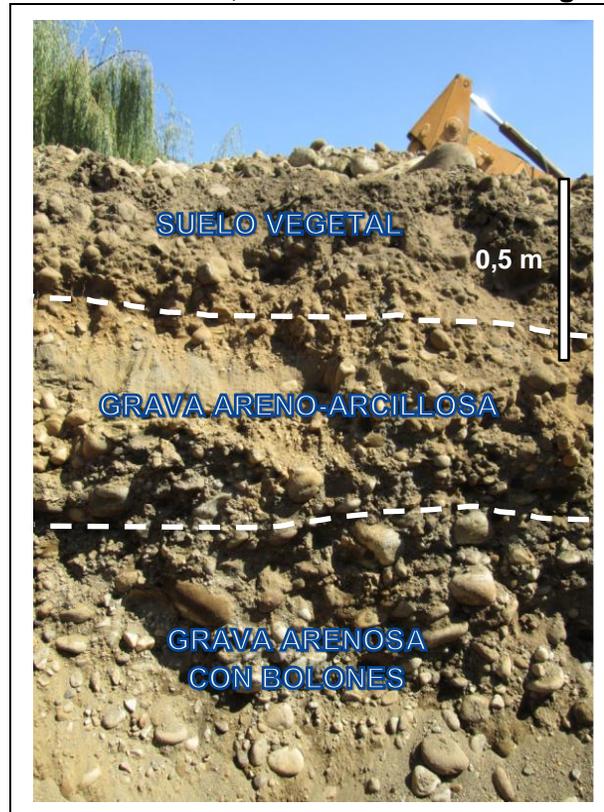
B. Calicata 1.

C. Prueba de infiltración en calicata 2, 0,8 m de profundidad.

D. Cierre de calicatas.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-9. Calicata 1, Los Niches con estratigrafía descrita



Fuente: Elaboración propia

La estratigrafía del pozo ND0701-1450(1) (capítulo 3.5.2.2.1), ubicado a 500 m al suroeste de las calicatas (Figura 4-1), muestra un espesor de relleno sobre la napa de 4 m (Figura 3-39). Este relleno no saturado está compuesto por una capa superficial de 40 cm de tierra vegetal, infrayacida por 5 m de arcillas con clastos mayores. Bajo este nivel se observa 3,5 m de arena y ripio que corresponderían al acuífero.

La información anterior indicaría que los niveles de grava arenosa y grava arcillosa, de permeabilidad media, descritos en la calicata, podrían volverse más arcillosos, empeorando su permeabilidad en profundidad, hasta alcanzar los 6 m (aproximadamente). Bajo este nivel de malas propiedades hidrogeológicas se encontraría el acuífero.

4.1.2.1.3 Pichingal

En el sector Pichingal perteneciente a Agrícola Pirineos, se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 2 m de profundidad y calicata 2 de 0,9 m de profundidad (Figura 4-10 A, B y C).

La calicata 1 se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 297.459 y N: 6.107.536 (Figura 4-1, Figura 4-11), mientras que la calicata 2 se ubicó 10 m al noroeste de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Tabla 4-7): (1) 70 cm de grava arenosa con una matriz de arena gruesa y arcilla en menor proporción, (2) 1 m de grava areno arcillosa con una matriz arena arcillosa y (3) 20 cm de suelo vegetal compuesto por arcilla limosa y material orgánico.

La calicata 2 presenta las mismas características encontradas en la de mayor profundidad (Tabla 4-7).

Tabla 4-7: Resultados de la descripción de calicatas en sector Pichingal

Calicata 1 (0-2 m)		Calicata 2 (0-90 cm)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,2	Suelo vegetal: Arcilla limosa (10% limo) y material orgánico, 50% de clastos de hasta 10 cm.	0 a 0,2	Suelo vegetal: Arcilla limosa (10% limo) y material orgánico, 50% de clastos de hasta 10 cm.
0,2 a 1,2	Grava areno-arcillosa con bolones: Grava y bolones redondeados con un 15-20% de matriz compuesta por arena arcillosa (20 % de la matriz) la arena es gruesa y angulosa.	0,2 a 0,9	Grava areno-arcillosa con bolones: Grava y bolones redondeados con un 15-20% de matriz compuesta por arena arcillosa (20 % de la matriz) la arena es gruesa y angulosa.
1,2 a 2,0	Grava arenosa: No hay presencia de bolones. La matriz es de arena gruesa con un menor porcentaje de arcilla que la secuencia superior.		

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente ,se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-10 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-8 Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo E.

Tabla 4-8: Resultados del ensayo de permeabilidad en Pichingal

	A nivel del suelo	Profundidad 0,9 m (Calicata 0-0,9 m)	Profundidad 2 m (Calicata 0-2 m)
Tasa de infiltración (K _s) (m/d)	1,34	6,53	3,29

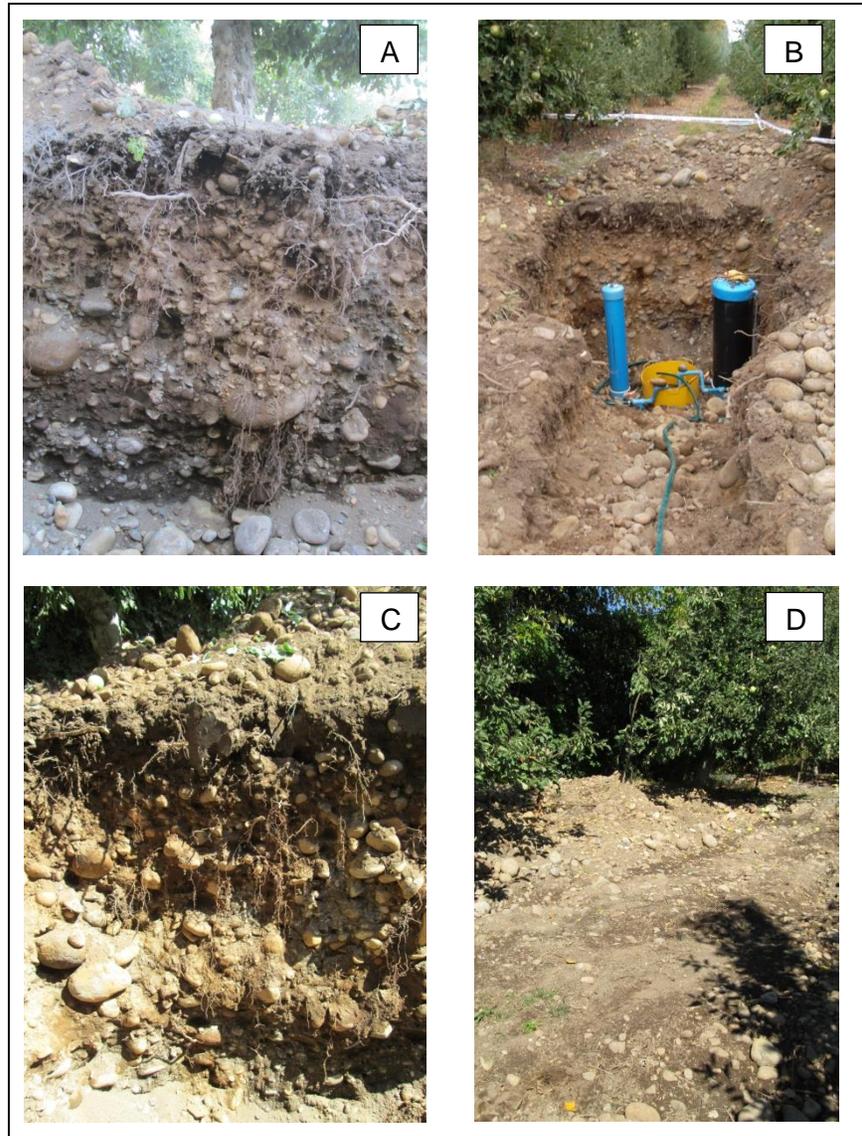
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en Pichingal indica una permeabilidad media para los estratos encontrados, con un valor máximo de 6,53 m/d a una profundidad de 1 m . La permeabilidad de 1,34 m/d del suelo se condice con una arcilla con importante contenido de gravas (50%). Por otra parte, los valores de 6,53 m/d y 3,29 m/d encontrados a

0,9 m y 2 m están relacionados con la naturaleza del relleno, compuesto principalmente por gravas con arcilla subordinada.

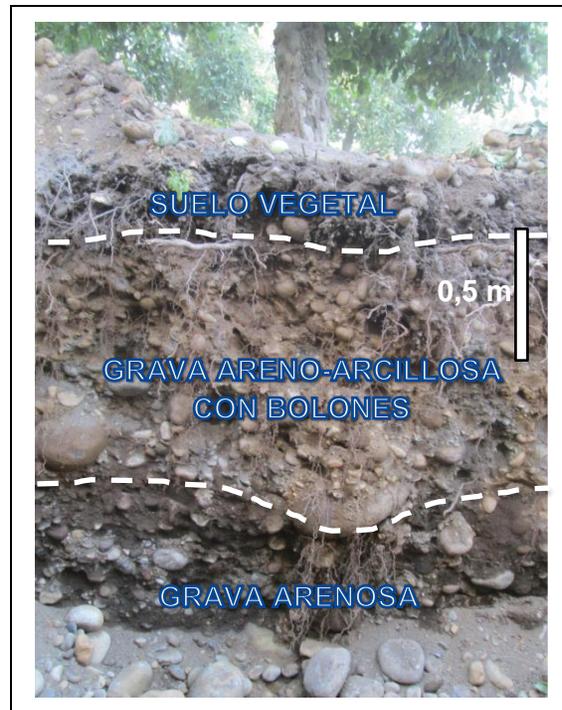
Posterior al ensayo de permeabilidad, se procedió a cerrar las calicatas. Su correcto cierre fue verificado por personal de GeoH el día 10 de abril de 2013 (Figura 4-6 D).

Figura 4-10: Trabajos en terreno- Pichingal



Nota: A. Excavación de calicata 1.
B. Prueba de infiltración en calicata 1.
C. Excavación de calicata 1.
D. Cierre de calicatas.
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-11. Calicata 1, Pichingal con estratigrafía descrita



Fuente: Elaboración propia

La estratigrafía del pozo ND-0701-1388 (capítulo 3.5.2.2.1), ubicado en el mismo sector de las calicatas (Figura 4-1), muestra un relleno de al menos 57 m compuesto por gravas intercaladas con arenas gruesas gravosas. Destaca la ausencia de contenido de arcilla. (Figura 3-40). En este sector, la interpolación realizada en el proceso de generación de las curvas piezométricas para el nivel promedio del segundo semestre del año 2001, muestra un nivel estático de 27 m. Sin embargo, el análisis realizado en la sección 3.2.4.2, indica estacionalidad en los niveles estáticos de la zona de estudio, registrándose una variación de 1 orden de magnitud entre los niveles estáticos estivales e invernales.

La información anterior indicaría que los estratos encontrados compuestos de grava, arena, arcilla y bolones, que tienen una permeabilidad media de infiltración podrían mejorar sus propiedades en profundidad y extenderse hasta alcanzar la napa en ese sector.

4.1.3 Medición de calidad de aguas

La medición de la calidad de aguas tuvo como objetivo analizar la compatibilidad de la fuente de agua a recargar respecto a las aguas presentes en el acuífero. La calidad de agua fue una variable de validación y no de decisión dentro del proyecto. En este sentido los resultados asociados a la calidad del agua validaron que el agua a infiltrar no afectará negativamente al acuífero.

4.1.3.1 Metodología

Se midieron 2 sets de datos en distintos momentos: set A de comprobación y set B de control. Los parámetros se indican en la Tabla 4-9.

El set A, de comprobación se midió 1 vez, previo a las pruebas de infiltración, con el objetivo de analizar la compatibilidad de la fuente de agua a recargar respecto de las aguas presentes en el acuífero. De este modo, se efectuaron mediciones de calidad tanto en la fuente escogida como en el acuífero. La localización y descripción de estas muestras se detalla en el acápite 4.1.3.2.

La calidad de agua fue una variable de validación y no de decisión dentro del proyecto. En este sentido los resultados asociados a la calidad del agua validaron que el agua a infiltrar no afectará negativamente al acuífero.

Por otra parte, el set B sólo se realizó en el sitio seleccionado y se muestreó múltiples veces, durante el desarrollo de las pruebas de recarga del piloto, en la Etapa 3 del proyecto. El set B midió los parámetros a verificar.

Tabla 4-9: Parámetros mínimos de calidad del agua a medir

Parámetro	Set A (Comprobación)	Set B (Control)
a) Nivel de Oxígeno (mg/L O₂)		
Oxígeno disuelto (OD)	X	X
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	X	X
Demanda química de oxígeno (DQO)	X	X
b) Metales (mg/L)		
Aluminio (Al)	X	
Arsénico (As)	X	
Boro (B)	X	
Cadmio (Cd)	X	
Calcio (Ca)	X	X
Cobalto (Co)	X	
Cobre (Cu)	X	
Cromo (Cr)	X	
Fierro (Fe)	X	
Potasio (K)	X	
Magnesio (Mg)	X	X
Manganeso (Mn)	X	X

Tabla 4-9: Parámetros mínimos de calidad del agua a medir

Parámetro	Set A (Comprobación)	Set B (Control)
Mercurio (Hg)	X	
Molibdeno (Mo)	X	
Sodio (Na)	X	X
Níquel (Ni)	X	
Plata (Ag)	X	
Plomo (Pb)	X	
Zinc (Zn)	X	
c) Eutrofización (mg/L)		
Nitrógeno total	X	X
Fósforo de ortofosfato	X	X
d) Microbiológicos (NMP/100 ml)		
Coliformes fecales	X	X
e) Sustancias disueltas (mg/L)		
Cloruro	X	X
Sulfato	X	X
Bicarbonato	X	X
Nitrato	X	X
pH	X	X
Conductividad eléctrica (C.E.)	X	X
f) Parámetros físicos		
Temperatura del Agua (°C)	X	X
Sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L)	X	X
Sólidos disueltos totales (SDT) (mg/L)	X	X
g) Otros parámetros		
Aceites y grasas (mg/L)	X	X

Fuente: elaboración propia

Dentro de los parámetros que se presentan en la Tabla 4-9, los principales parámetros para propósitos de la recarga artificial del acuífero, que se pueden contrastar referencialmente son: 1) sulfatos y coliformes fecales con la NCh N° 1.333, 2) Nitratos con la NCh N° 409 y 3) DBO₅ y sólidos suspendidos totales con el DS N°90. Estas variables y su implicancia se describen brevemente a continuación.

DBO₅

La sigla DBO₅ corresponde a demanda biológica de oxígeno. La demanda biológica de oxígeno (DBO₅) es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l).

Nitratos

Los nitratos son indicadores de contaminación agrícola de aguas, específicamente de fertilizantes. La contaminación por fertilizantes tiene distintos orígenes, aguas servidas originadas durante la producción de fertilizantes, lixiviación de desechos de fertilizantes producida por aguas de lluvia y uso excesivo e inadecuado de fertilizantes terminados, entre otros.

Sulfatos

Los sulfatos se encuentran de manera natural en numerosos minerales (baritina, yeso, etc.). Además se utilizan en la industria química (fertilizantes, pesticidas, colorantes, etc.), como agentes de sedimentación (sulfato de aluminio) o para controlar las algas (sulfato de cobre) en las redes de agua y, por último, como aditivos en los alimentos.

Los sulfatos suelen ser sales solubles en agua, por lo que se distribuyen ampliamente en la naturaleza y pueden presentarse en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones.

En el área de estudio no existen naturalmente minerales ricos en sulfato. Por lo tanto, este compuesto se utiliza como un parámetro indicador de contaminación de aguas, principalmente de origen en la actividad minera y agrícola.

Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos corresponden a pequeñas partículas sólidas que se mantienen en suspensión en el agua como coloides o debido al movimiento del agua. El valor del parámetro sólidos suspendidos totales se asocia con la efectividad de la recarga, ya que los sólidos en suspensión pueden colmatar los acuíferos en proximidades del punto de recarga.

Coliformes fecales

La denominación genérica coliformes designa a un grupo de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos.

Dentro de este grupo, los coliformes fecales corresponden a aquellos de origen intestinal, presentes en las heces de animales y personas. Los coliformes fecales también se

conocen como coliformes termotolerantes, capaces de fermentar lactosa a 44-45 °C. La mayor especie en el grupo de coliforme fecal es el *Escherichia coli*.

La contaminación por coliformes fecales está relacionada con el vertido de agua de desecho de origen doméstico e industrial a los cuerpos de agua.

Foppen y Schijven (2006) indican que el transporte de *Escherichia coli* en el agua subterránea está determinada por procesos como la adherencia, filtración e inactivación. Dentro de estos 3 procesos, la inactivación está bien estudiada. La inactivación depende de factores como temperatura, efecto de protozoos y antagonistas, entre otros.

El trabajo de recopilación bibliográfica sobre tasas de inactivación de distintos microbios en agua subterránea, efectuado por John y Rose (2005), muestra tasas de inactivación de coliformes a distintas temperaturas (Tabla 4-10). La tasa de inactivación es medida en declinación \log_{10} por día.

Tabla 4-10: Tasas de inactivación para coliformes para distintos rangos de temperatura

Rango de temperatura (°C)	Tasa promedio de inactivación ($\log \text{ día}^{-1}$)
0-10	0,07
15-20	0,4
21-37	0,3

Fuente: John y Rose, 2005

Según se puede observar en la Tabla 4-10, al aumentar la temperatura desde el rango 0-10°C al rango 15-20 °C, la tasa promedio de inactivación de coliformes aumenta en 1 orden de magnitud, es decir, los coliformes se inactivan más rápidamente. Por otra parte al aumentar la temperatura desde el rango 15-20 °C al rango 21-37 °C, la tasa promedio de inactivación se mantiene relativamente constante.

El decaimiento (o muerte) logarítmico de las bacterias es explicada por la Dra. Harriet Burge en la página web de EMLab (<http://www.emlab.com/s/sampling/2011-03-Survival-of-Fecal-Coliforms.html>). Según Burge, suponiendo que tenemos una agua contaminada con 1.000.000 bacterias/100 ml y una tasa de inactivación de 1 $\log/\text{día}$ (a modo de ejemplo), tomaría 1 día para que el número de bacterias bajara a 100.000 bacterias/100 ml. Es decir, en 5 días adicionales el número de bacterias bajaría a 1 bacteria/100 ml.

En el Anexo F del presente documento se adjunta el protocolo de muestreo de aguas de GeoHidrología, que será utilizado en este proyecto. El laboratorio designado para el análisis de las muestras tomadas (seta A) es el Laboratorio de Aguas y Riles de DICTUC.

4.1.3.1.1 Validación de análisis químicos

La validez de la base de datos se determinó en función del error del balance iónico de cada muestra analizada en laboratorio. El balance iónico se realizó para las muestras de agua que presentan análisis de los elementos mayoritarios Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y cuando se presenta analizado, el NO_3^- . De esta forma, se trabajó sólo con las muestras de agua que presentan un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas, esto es, que la suma de mili-equivalentes de aniones sea prácticamente igual a la suma de mili-equivalentes de cationes.

El error del balance iónico se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{error (\%)} = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Para las muestras que presentan valores por debajo del límite de detección de un determinado elemento se consideró como dato la mitad del límite de detección. Por ejemplo, en el caso del cobre, las muestras que presentan concentraciones menores a 0,01 mg/l (valor de uno de los límites de detección para este elemento) se tomó como dato un valor asignado de 0,005 mg/l.

4.1.3.2 Campaña de muestreo

El día 25 de marzo se realizó el muestreo de agua superficial y subterránea en los 3 sitios preseleccionados. La descripción de los puntos muestreados se observa en Figura 4-12. Junto con la toma de muestras se midieron parámetros *in situ*, correspondientes a temperatura (T), pH, conductividad eléctrica (C.E.), sólidos disueltos totales (SDT) y oxígeno disuelto (OD). Estos parámetros se presentan en la Tabla 4-12.

En el sitio del sector Pichingal, perteneciente a Agrícola Pirineos se tomaron dos muestras de agua, una subterránea y una (Figura 4-12 y Figura 4-13). La muestra subterránea corresponde a una noria ubicada en el predio, mientras que la muestra superficial corresponde a una acequia.

En el sitio del Sr Arenas ubicado en Villa Lo Niches se tomaron dos muestras de agua, una subterránea y una superficial (Figura 4-12 y Figura 4-14). La muestra subterránea corresponde a una noria ubicada en el predio, mientras que la muestra superficial corresponde a un canal.

Finalmente, en el sitio en el sector Romeral perteneciente a la Escuela de Agricultura se tomaron dos muestras de agua, una subterránea y una superficial (Figura 4-12 y Figura 4-15). La muestra subterránea corresponde a un pozo ubicado en el predio, mientras que la muestra superficial corresponde a una acequia.

Las muestras fueron entregadas al laboratorio el día 26 de marzo para su análisis. Los resultados se muestran en el capítulo siguiente.

Tabla 4-11: Lugares de muestra de agua

Sector	ID muestreo	Tipo	UTM Norte	UTM Este	Observación
Pichingal	LO-P3	Subterráneo	6.128.607	303.793	Escuela Agrícola, noria queda hacia abajo cerca del río, no hay bomba por lo que la muestra se tomó con el que tenía el pozo
Pichingal	LO-C4	Superficial	6.129.069	305.135	Cerca de la escuela se tomó la muestra del canal que abastece la escuela (Don Daniel)
Villa Los Niches	LO-C3	Superficial	6.117.079	300.996	Canal pequeño que riega el predio y lo rodea
Villa Los Niches	LO-P2	Subterráneo	6.117.228	300.937	Pozo bombeando. Muestra del agua que sale de la bomba
Romeral	LO-P1	Subterráneo	6.107.581	297.478	Desde noria, muestreo tomado desde la manguera de la bomba
Romeral	LO-C2	Superficial	6.107.657	297.337	Canal más grande que abastece predio por desvío del este
Romeral	LO-C1	Superficial	6.107.563	297.470	Acequia pequeña al lado de calicatas

Fuente: Elaboración propia. Datum: WGS 84, Huso: 19S

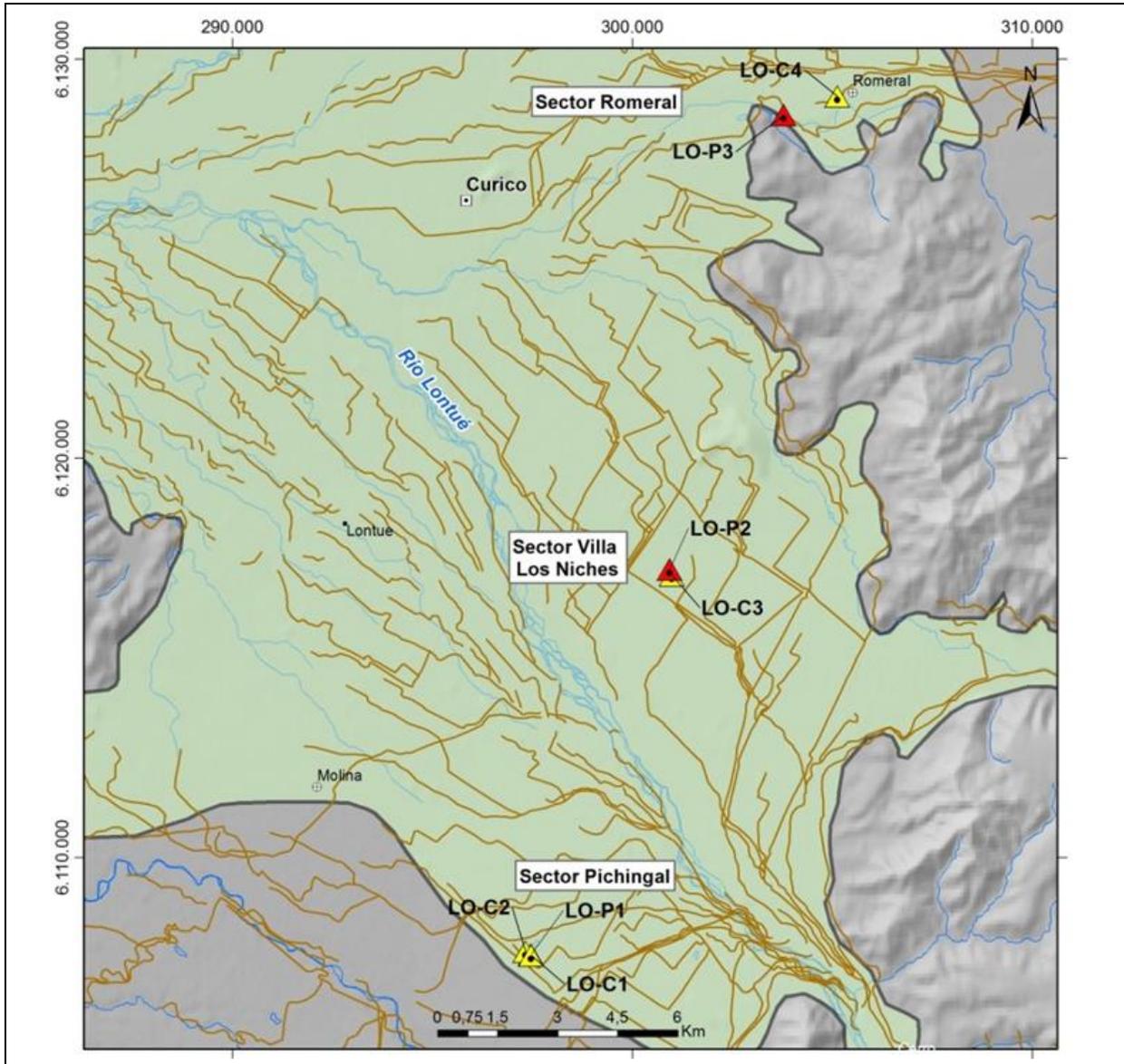
Tabla 4-12: Parámetros *in situ* en los puntos muestreados

ID muestra	LO-P3	LO-C4	LO-C3	LO-P2	LO-P1	LO-C2	LO-C1
Fecha	25-03-14	25-03-14	25-03-14	25-03-14	25-03-14	25-03-14	25-03-14
Hora:	18:30	19:20	17:30	15:10	13:40	14:45	14:20
T°C	19,4	20,54	20,5	22,45	24,05	23,6	24,9
pH	6,52	6,21	6,3	6,23	6,37	6,11	6,16
C.E. (µs/cm)	437	613	36	204	183	236	232
SDT (ppm)	218	307	16	102	82	118	115
OD (ppm)	4,3	3,7	3,91	3,84	4,24	5,4	5,6

Fuente: Elaboración propia

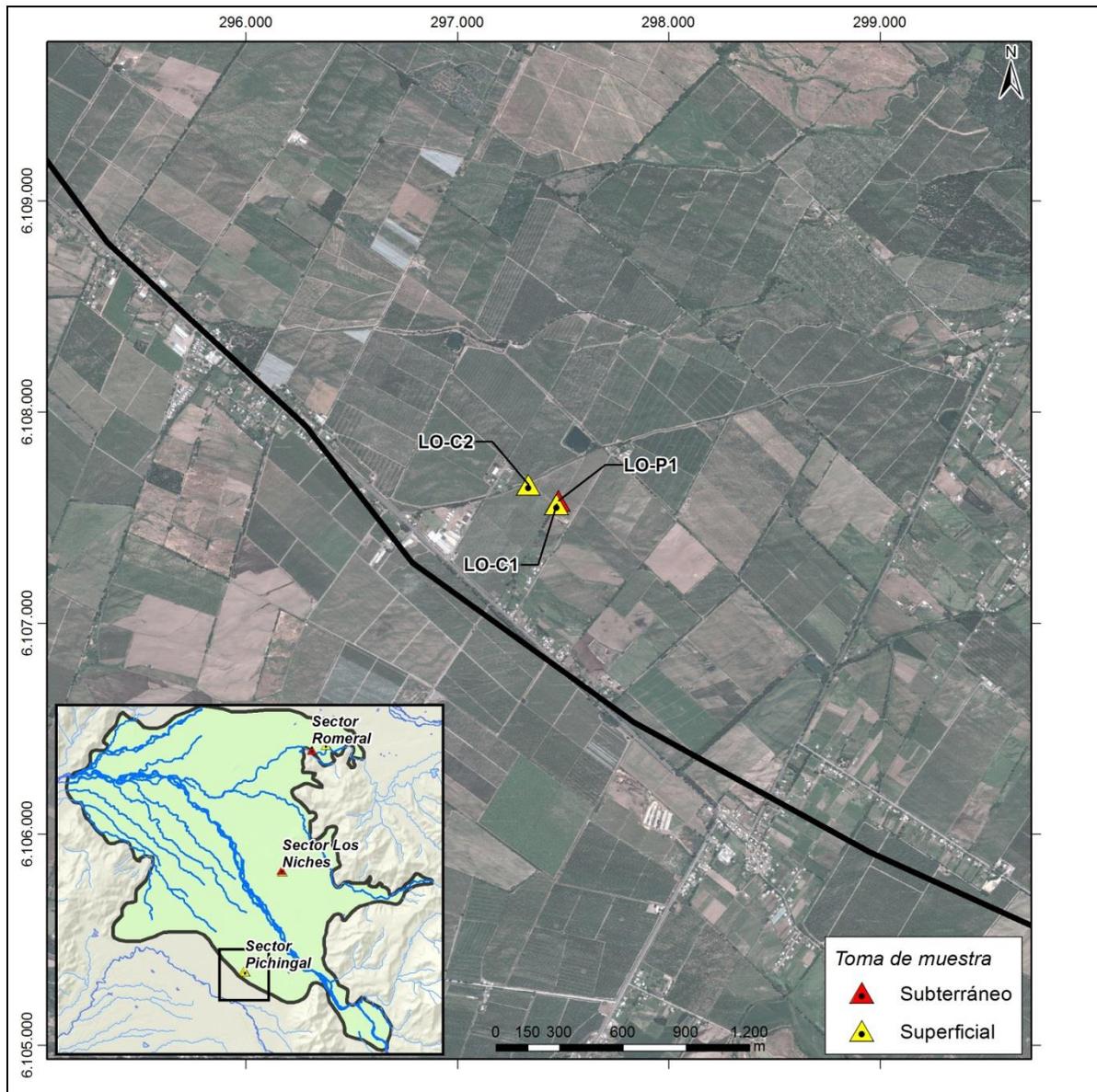
Nota: C.E.: conductividad eléctrica, SDT: sólidos disueltos totales, OD: oxígeno disuelto

Figura 4-12: Ubicación de las muestras de agua



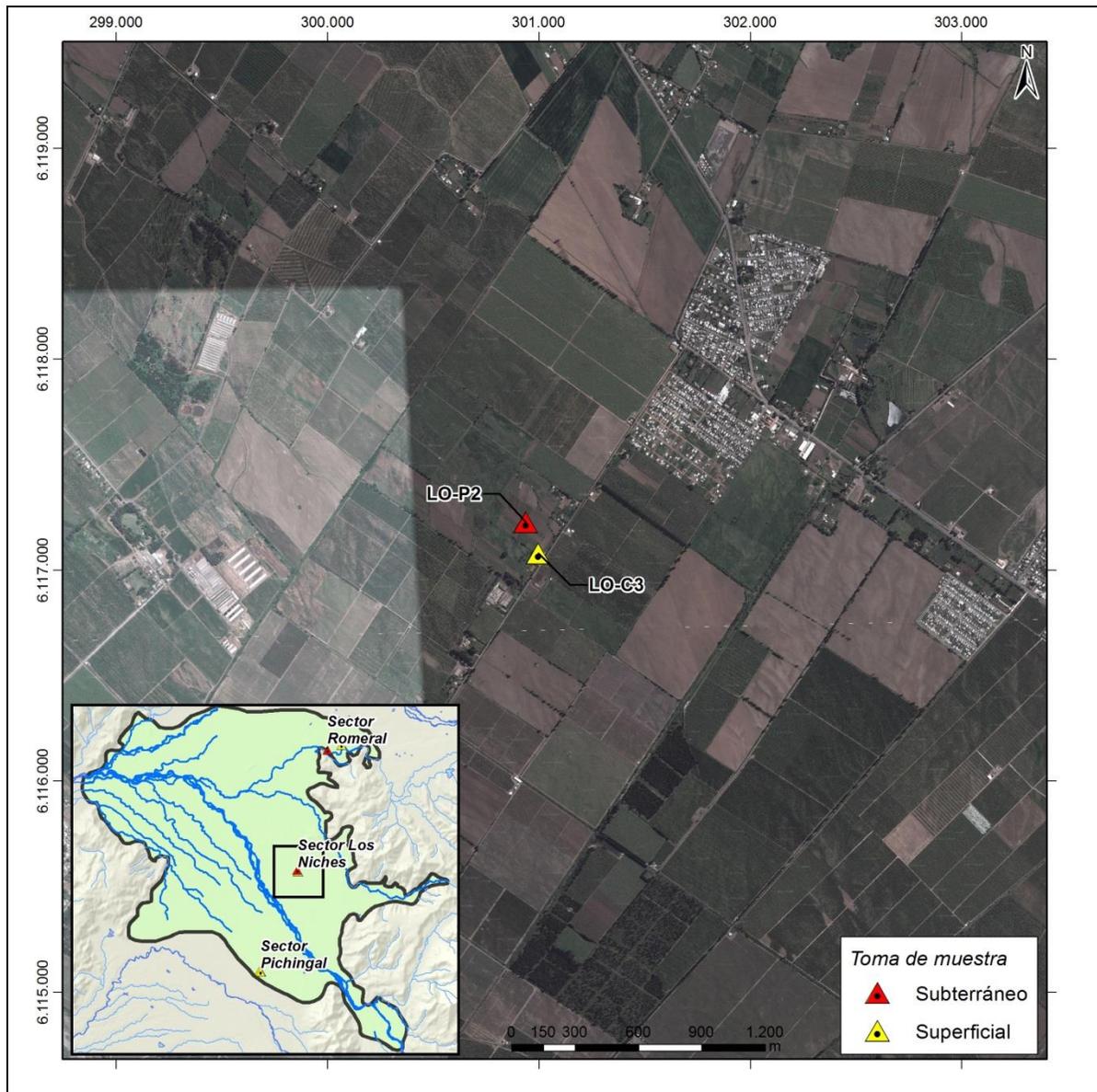
Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA (WGS84 H19S)

Figura 4-13: Ubicación de las muestras Sector Pichingal



Fuente: Elaboración propia a partir de "2014 Google, Image © 2014 Digital Globe, ©2014Cnes/Spot Image".
(WGS84 H19S)

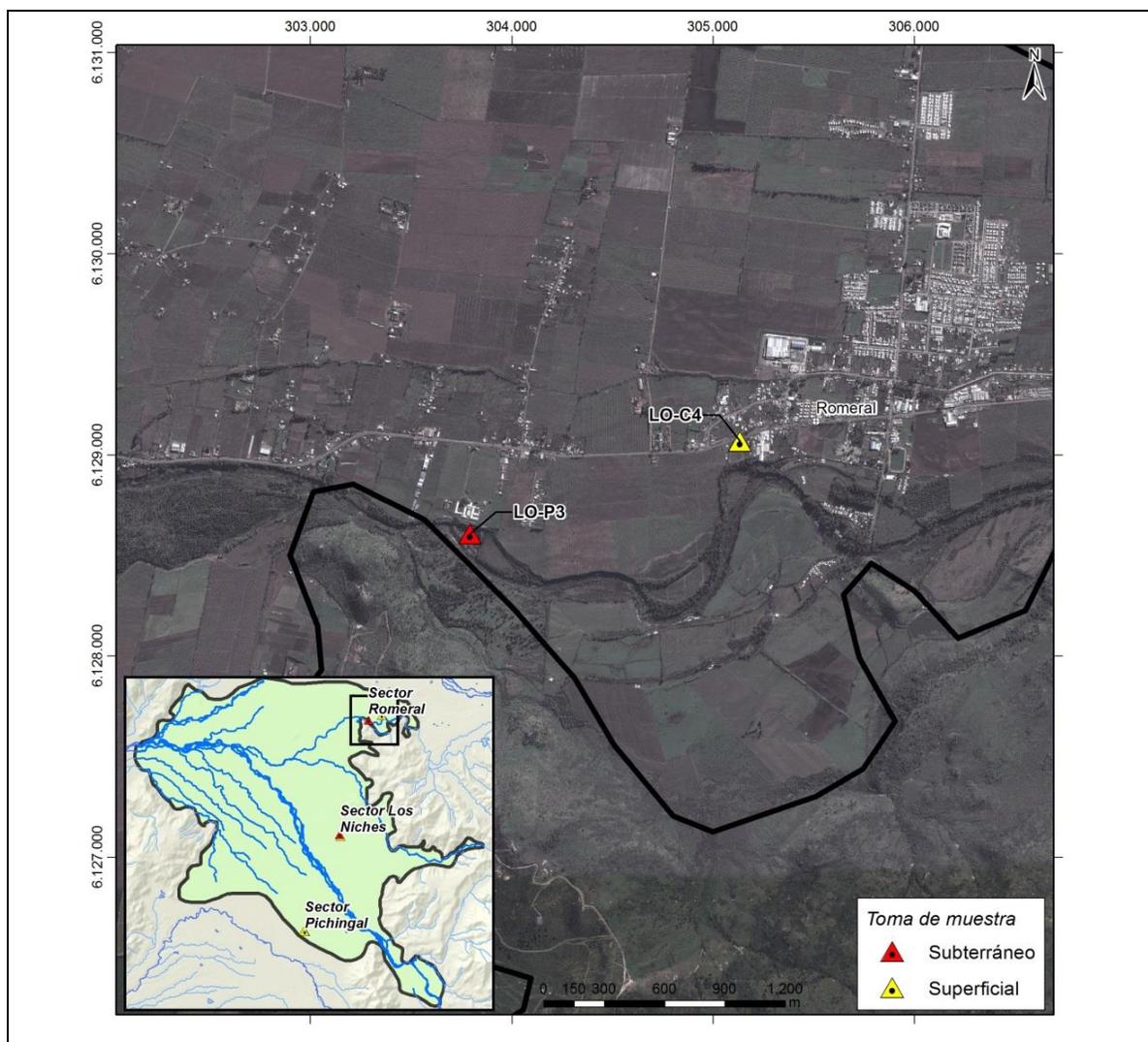
Figura 4-14: Ubicación de las muestras Sector Villa Los Niches



Fuente: Elaboración propia a partir de "2014 Google, Image © 2014 Digital Globe, ©2014Cnes/Spot Image".

(WGS84 H19S)

Figura 4-15: Ubicación de las muestras Sector Romeral



Fuente: Elaboración propia a partir de "2014 Google, Image © 2014 Digital Globe, ©2014Cnes/Spot Image".

(WGS84 H19S)

4.1.3.3 Resultados de análisis de laboratorio

La lista completa de resultados de parámetros analizados por el laboratorio se encuentra en el informe de laboratorio, el que se muestra en el Anexo F1.

Las muestras analizadas en la cuenca de Lontué fueron validadas mediante el balance iónico con error menor o igual al 8%. Este valor corresponde al error aceptable en el balance iónico para conductividad eléctrica en el rango de 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Custodio y Llamas, 1976). Este valor se aplica a las muestras de la zona de interés, ya que la conductividad eléctrica medida *in situ* alcanza valores máximos de 613 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (LO-C4 en Tabla 4-12).

En la cuenca de Lontué se analizaron 7 muestras, 3 en el sector de Romeral, 2 en el sector de Los Niches y 2 en el sector de Pichingal. Del total de 7 muestras, 6 fueron validadas mediante el balance iónico (error menor o igual a 8%). La muestra no validada corresponde a Lo-P2, la cual presenta un error de 10%, valor que es aún razonable, ya que es muy cercano a 8%, por lo que fue incluida en los análisis, ver Anexo F2

A continuación se presentan los resultados más relevantes para propósitos de la recarga artificial de acuífero, agrupados en: 1) elementos mayores y parámetros de calidad y 2) elementos menores.

A modo de referencia, estos valores son comparados con distintas normas chilenas de agua, ya que en nuestro país no existe legislación sobre la calidad de aguas a infiltrar durante la recarga artificial de acuífero. En efecto, la única normativa vigente relacionada con recarga artificial corresponde a la Resolución N°203, con fecha 21 de febrero del 2014, "Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas". Dentro de esta Resolución, el Artículo 49 indica que: "la Dirección General de Aguas aprobará las obras de infiltración cuando el proyecto presentado no provoque la colmatación del acuífero ni la contaminación de las aguas". Si bien esta norma se refiere a contaminación de aguas, no especifica parámetros y límites a cumplir. Por otra parte, en Chile no existe ninguna norma secundaria que regule este tema.

En función de lo anteriormente expuesto, los parámetros agrupados en elementos mayores y parámetros de calidad, se comparan referencialmente con la norma chilena de agua de riego NCh 1333 y el Decreto Supremo (DS) 90/00 en aguas fluviales (Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales). Por otra parte, los elementos menores se comparan referencialmente con el decreto supremo DS46/02 Aguas Subterráneas, Vulnerabilidad Baja. El DS46 establece los límites máximos permitidos para descargar residuos líquidos industriales a aguas subterráneas.

4.1.3.3.1 Elementos mayores y parámetros de calidad

Los resultados obtenidos para el primer grupo, elementos mayores y parámetros de calidad, se observa en la Tabla 4-13. Dentro de este grupo, los valores de nitratos, sulfatos y coliformes fecales pueden ser comparados con la norma de agua para riego NCh 1333, mientras que los índices DBO₅ y sólidos suspendidos totales pueden ser comparados con el Decreto Supremo 90 en aguas fluviales.

La información fue analizada usando gráfico de barras, mostrando el valor de cada variable, para cada muestra de agua superficial y subterránea, para cada uno de los sectores. Para muestras con valores menor o igual que el límite de detección se grafica el valor correspondiente a la mitad del límite de detección. Por otra parte, para el parámetro coliformes fecales, la muestra LO-C4 con valor mayor o igual que 1600 NMP/100ml, se grafica igual a este valor.

La descripción de los resultados se presenta a continuación para cada sector.

Tabla 4-13: Resultados análisis elem. mayores y parámetros calidad. Comparación NCh 1333.

ID Muestra	LO-P1	LO-C1	LO-C2	LO-P2	LO-C3	LO-P3	LO-C4	Límite permitido según Norma	Norma
Sector	Romeral			Los Niches		Pichingal			
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	9,15	<2,0	35	DS 90
Nitratos (mg/L)	3,98	0,69	1,21	12,8	1,85	13,1	<0,50	50	NCh 409
Sulfatos (mg/L)	58,47	53,59	67,22	56,8	91,16	120,6	189,6	250	NCh 1.333
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<10	<10	<10	<10	10	<10	<10	80	DS 90
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	220	900	130	2	1600	80	≥1600	1000	NCh 1.333

Valores en negrita indican aquellos que sobrepasan la norma NCh 1333/DS 90

Fuente: Elaboración propia

Sector Romeral

En el sector de Romeral los valores de DBO₅ para agua superficial y subterránea se observan bajo el mínimo de detección (Figura 4-16). Los valores de DBO₅ no superan los 35 mg O₂/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

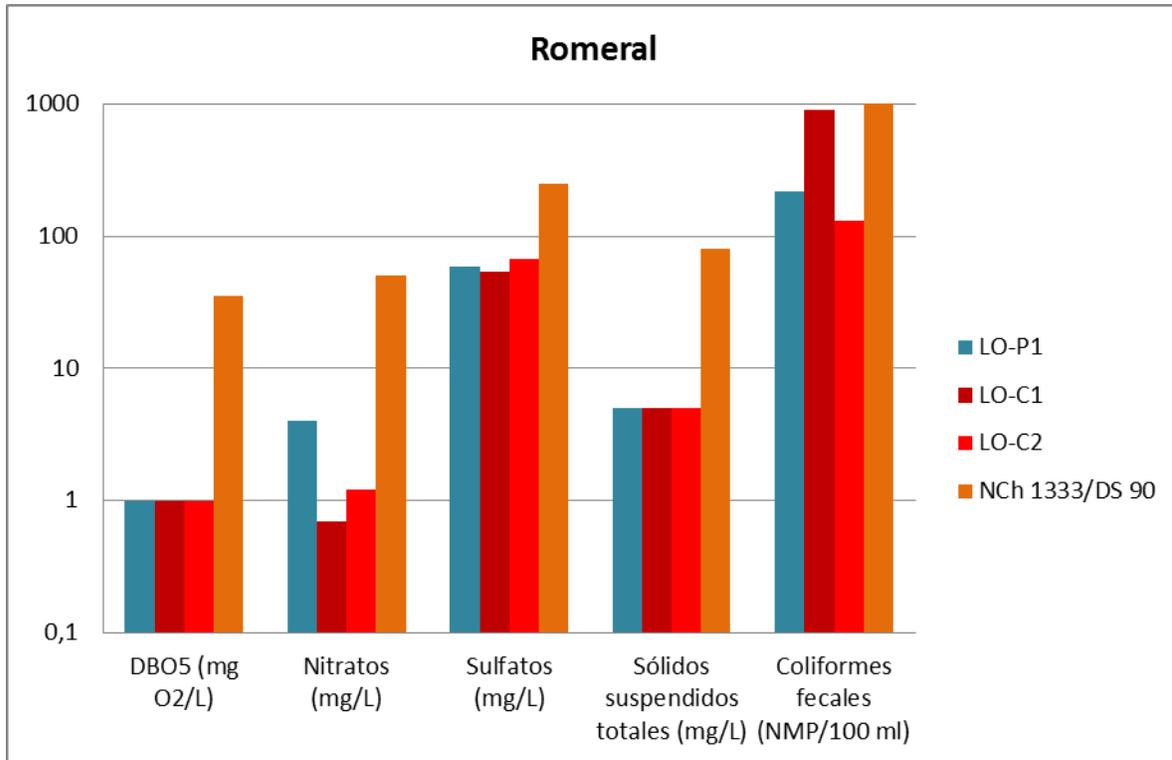
El valor de nitratos de la muestra subterránea se observa un orden de magnitud mayor que las muestras superficiales. Estos valores no superan los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

Los sulfatos medidos en las 3 muestras presentan valores muy similares, los que se encuentran por debajo de los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

Los sólidos suspendidos totales muestran valores muy similares al comparar agua subterránea con agua superficial. Estos valores no superan los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

Por último, los valores de coliformes fecales para las 3 muestras de agua varían dentro del mismo orden de magnitud (Figura 4-16). Estos valores se encuentran bajo el límite permitido en la norma de agua para riego (NCh 1333), que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-13).

Figura 4-16: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Romeral



Fuente: Elaboración propia

Sector Los Niches

En el sector de Los Niches los valores de DBO5 para agua superficial y subterránea se observan idénticos bajo el mínimo de detección (Figura 4-18). Los valores de DBO₅ no superan los 35 mg O₂/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

El nitrato presente en el agua subterránea se observa 1 orden de magnitud mayor que en el agua superficial. Estos valores no superan los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

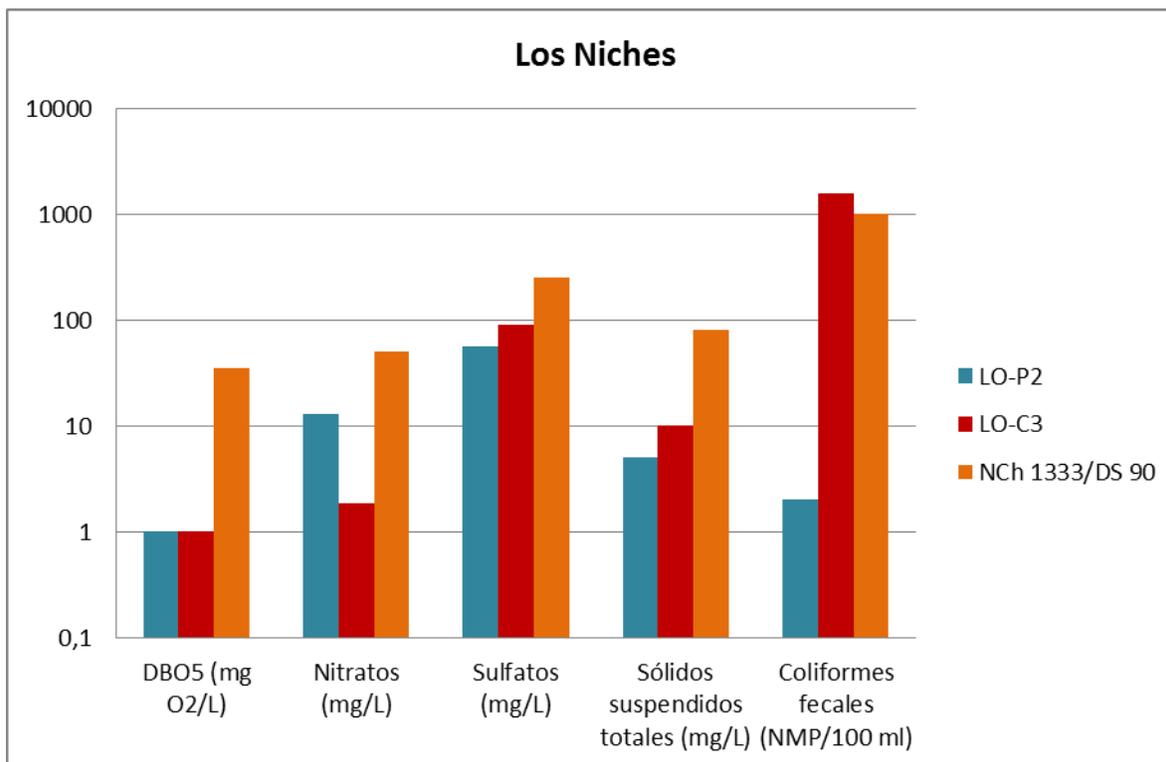
Los sulfatos medidos, las muestras superficial y subterránea presentan valores muy similares. Estos valores se encuentran por debajo de los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

Los sólidos suspendidos totales de ambas muestras presentan valores muy similares. Estos valores no superan los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

Por último, los coliformes fecales en el agua superficial es 3 órdenes de magnitud mayor que en el agua subterránea. El valor de coliformes fecales en la muestra superficial LO-C3 es

1600 NMP/100 ml, superando el límite permitido en la norma de agua para riego (NCh 1333), que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-13).

Figura 4-17: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Los Niches



Fuente: Elaboración propia

Sector Pichingal

En el sector de Pichingal los valores de DBO₅ y DQO en agua subterránea son mayores que en agua superficial (Figura 4-18). Los valores de DBO₅ no superan los 35 mg O₂/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

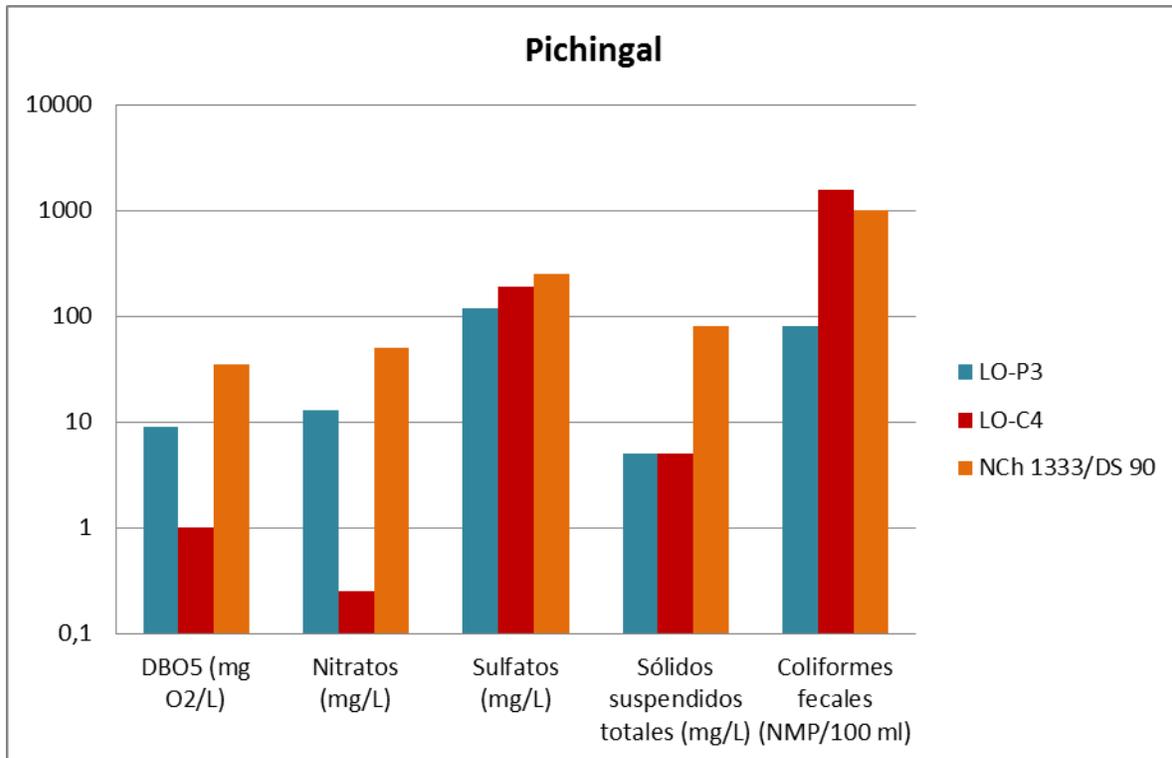
Los nitratos para el agua subterránea se presentan 2 órdenes de magnitud mayor que el agua superficial. Estos valores no superan los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

Los sulfatos presentes en las muestras presentan valores parecidos para ambos tipos de agua. Estos valores se encuentran por debajo de los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-13).

Los sólidos suspendidos de ambas muestras se presentan bajo el límite de detección. Estos valores no superan los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-13).

Por último, los coliformes fecales en el agua superficial es 2 órdenes de magnitud mayor que en el agua subterránea (Figura 4-18). El valor de coliformes fecales en la muestra superficial LO-C4 es ≥ 1600 NMP/100 ml, superando el límite permitido en la norma de agua para riego (NCh 1333), que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-13).

Figura 4-18: Elementos mayores y parámetros de calidad para el sector de Pichingal



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.3.2 Elementos menores

Dentro del segundo grupo, elementos menores, la información fue analizada utilizando tablas con el valor de cada variable en cada punto muestreado y comparando este valor con la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas (D.S. N° 46/02). Según este decreto, ningún elemento menor, para cada una de las muestras analizadas, supera los valores máximos permitidos (Anexo F3).

4.1.3.4 Conclusiones

El resumen del análisis de los parámetros más relevantes para propósitos de la recarga artificial de acuífero para cada sector se muestran en la Tabla 4-14.

Este análisis incluye 2 criterios, siendo éstos: 1) comparación referencial de los valores de parámetros analizados respecto la norma y 2) diferencia entre el valor del parámetro del agua superficial del canal (VC) y el valor del parámetro del agua subterránea muestreado en el pozo (VP). Mientras que el primer criterio tiene como objetivo revisar que el agua que va a ser infiltrada se encuentre referencialmente bajo una norma, el segundo criterio apunta a verificar que el agua que va a ser infiltrada (agua superficial) posea una calidad similar o mejor al agua presente en el acuífero.

El segundo criterio se cumple siempre y cuando la diferencia entre valor del parámetro del canal y el valor del parámetro del pozo sea menor que 1 orden de magnitud (OM). Esto es $VC-VP < 1 OM$, donde VC es el valor del parámetro del agua del canal (agua superficial), VP es el valor del índice del pozo (agua subterránea) y OM corresponde a 1 orden de magnitud.

Tabla 4-14: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial

	Nombre muestra	¿Valores bajo la norma?				¿VC-VP < 1 OM?			
		LO-C1	LO-C2	LO-C3	LO-C4	LO-C1	LO-C2	LO-C3	LO-C4
	Sector	Romeral		Los Niches	Pichingal	Romeral		Los Niches	Pichingal
Elementos mayores y parámetros de calidad	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Nitratos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Sulfatos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	SI	SI	NO	NO	SI	SI	NO	NO
Elementos menores	Elementos menores	SI	SI	SI	SI	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia

Nota: IC: índice canal, IP: índice pozo, OM: orden de magnitud

Según se observa en la Tabla 4-14, que las aguas superficiales más aptas para recarga artificial, en términos de calidad serían los canales en el sector de Romeral, ya que las muestras LO-C1 y LO-C2 cumplen con los 2 criterios evaluados.

Por otra parte las aguas superficiales en los sectores de Los Niches y Pichingal cumplen con todos los parámetros evaluados a excepción de coliformes fecales. Este parámetro en el sector de Los Niches (LO-C3) es de 1600 NMP/100 ml, mientras que en el sector de Pichingal (LO-C4) es ≥ 1600 NMP/100 ml (Tabla 4-13).

Según estudios de transporte y sobrevivencia de coliformes fecales, gran parte de estas bacterias serían inactivadas al entrar en contacto con el acuífero (Foppen y Schijven, 2006; John y Rose, 2005). Según lo explicado el acápite, los coliformes fecales presentan un decaimiento exponencial, dependiente del rango de temperaturas.

Según los datos in situ, la temperatura del agua subterránea en los sectores de Los Niches y Pichingal alcanzaría un promedio de aproximadamente 21°C (Tabla 4-12). Para esta temperatura, el trabajo de John y Rose (2005) indica una tasa promedio de inactivación de 0,3 log/día. Tomando en cuenta esta tasa, una población inicial de 1600 NMP/100 ml en el canal de Los Niches LO-C3) decaería a 802 NMP/100 ml en 1 día y a 2 NMP/100 ml en 10 días (Tabla 4-15). Lo mismo se podría aplicar como referencia para el sector de Pichingal, donde una población inicial ≥ 1600 NMP/100 ml debiera decaer 3 órdenes de magnitud en 10 días.

Tabla 4-15: Cálculo decaimiento coliformes fecales. Sectores Los Niches y Pichingal

No (NMP/100 ml)	Nt (NMP/100 ml)	k (log/día)	t (días)
1600	802	0,3	1
1600	2	0,3	10

Fuente: Elaboración propia

Nota: No: número inicial de coliformes fecales, Nt: número final de coliformes fecales, k: tasa de inactivación, t: tiempo transcurrido

Además de la disminución de coliformes por inactivación, al entrar en contacto con el acuífero, los coliformes podrían ser filtrados al ser infiltrados en el medio no saturado.

En consecuencia, a pesar que las aguas de los sectores Los Niches y Pichingal no presentan las mejores propiedades, también podrían ser infiltradas sin mayor problema.

4.2 SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL

La elección del mejor sitio para realizar la recarga artificial se realizó tomando en cuenta el análisis realizado en el capítulo 3.4 del presente informe, junto con la discusión llevada a cabo con la CNR en las reuniones realizadas los días 24 y 31 de marzo (Minutas reuniones 5 y 6 respectivamente, ver Anexo G). Como resultado se definió que la PPRAA se realizará en el sector llamado Pichingal (propiedad Sr. Fernando Baile)

Adicionalmente se realizó una validación del sitio escogido, basada en la comparación de los resultados del muestreo químico del agua utilizada en las pruebas de infiltración, agua del canal ramal Calleuque y el agua del acuífero. Según indica el análisis de calidad de agua en las muestras de Pichingal, los valores de DBO y DQO de agua superficial menores que los del agua subterránea, junto con valores similares de sólidos suspendidos para ambos tipos de muestra, indica que el agua superficial del sector sería adecuada para la infiltración mediante balsa.

A continuación se presenta un resumen de los criterios utilizados para la definición del sitio desarrollados en el capítulo 3.4 del presente informe, los que se basan en: a) los resultados de la identificación de las zonas para la recarga artificial (fase I y fase II), b) información que se complementa con el análisis de datos registrados durante el trabajo de terreno y c) temas estratégicos.

Según el análisis fase I, la zona de estudio presenta una aptitudes baja, media y alta para la recarga artificial. De acuerdo a esta información, junto con las visitas a terreno, se propuso el sector Callejón Santa María, sector El Retamo y sector Pichingal, los dos primeros de aptitud media y el último de aptitud alta. Por otra parte, el análisis fase II indica que los 3 sectores propuestos son aptos para propósitos del proyecto.

De acuerdo al análisis estratigráfico de pozos en los sectores propuestos, lo que fue verificado por los resultados de trabajos de terreno, en los 2 primeros metros de profundidad, la zona no saturada estaría dominada por un relleno compuesto por gravas, con contenido subordinado de arcillas (Tabla 4-3, Tabla 4-5 y Tabla 4-7), mostrando permeabilidad media (1-7 m/d) en los 2 primeros metros de profundidad. En la zona de Romeral y Los Niches el relleno no saturado en profundidad podría hacerse más arcilloso. Por otra parte y según indica la estratigrafía del pozo ND-0701-1388 (Figura 4-19) ubicado a 620 m al norte del sector del proyecto, dentro del predio escogido (E: 297.500, N: 6.108.160), el relleno no saturado en la zona de Pichingal poseería las mejores características hidrogeológicas, donde se podría realizar recarga mediante balsa.

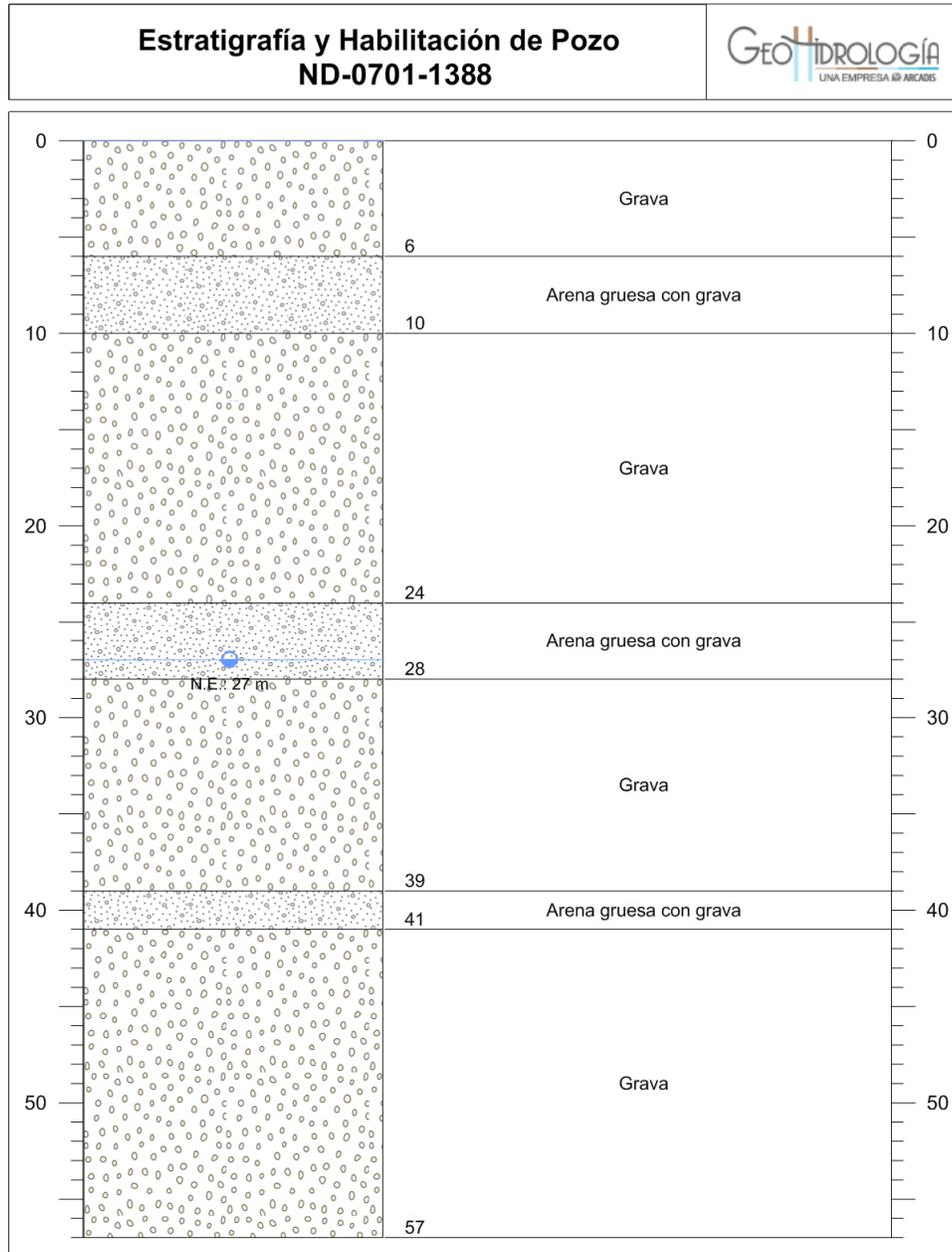
En base a lo anteriormente expuesto y a un análisis estratégico sostenido en conversaciones con la CNR (ver anexo G), se escogió el sector Pichingal. Dado que el dueño de este predio tienen una buena disposición para la construcción de las obras y el sector y predio cuenta con el apoyo de la Junta de Vigilancia del río Lontué.

En la Tabla 4-16 se presenta un resumen de las principales características de los 3 sitios evaluados en la etapa I del proyecto

Tabla 4-16: Resumen y análisis de sitios preseleccionados para el desarrollo del PPRAA

Sitios identificados y contactados	Escuela Agrícola (Romeral)	Alejandro Arena (Los Niches)	Fernando Baile (Pichingal)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Media	Media	Alta
Observaciones	Este sitio encontrado por personal de GeoHidrología en visita a terreno. El dueño presenta buena disposición a ceder terreno y derechos.	Este sitio encontrado por personal de GeoHidrología en visita a terreno. El dueño presenta buena disposición a ceder terreno y derechos.	Este sitio fue sugerido por la junta de Vigilancia del río Lontué de acuerdo a las especificaciones entregadas. Se aprecia una buena disposición por parte del dueño.
A favor	<ul style="list-style-type: none"> - Cuenta con superficie amplia para realizar pruebas en su predio - Posee pequeño embalse que puede ser utilizado como decantadores. 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Sitio cuenta con buenos accesos - Buena calidad del agua en el canal de regadío cercano (Calleuque)
En contra	<ul style="list-style-type: none"> - Pese a la variación estacional la napa está a una profundidad máxima de 20 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Pese a la variación estacional la napa está a una profundidad máxima de 20 m 	<ul style="list-style-type: none"> - Pese a la variación estacional la napa está a una profundidad máxima de 20 m
Visión de largo plazo	El desarrollo de proyectos de recarga artificial a gran escala es limitado en esta zona por lo somero de la napa. La Junta de Vigilancia está interesada en este tipo de iniciativas. Existe potencial para el desarrollo de iniciativas locales y pequeñas en predios particulares donde existan características hidrogeológicas adecuadas, para regularización de pérdidas de agua por infiltración en canales		

Figura 4-19: Estratigrafía del pozo ND-0701-1388, zona Pichingal



Fuente: Elaboración propia a partir de información del expediente del pozo.

Nota: Se debe señalar que la profundidad de la napa fue estimada a partir de una interpolación a escala regional, por lo que debe considerarse sólo como referencial.

5 ANALISIS LEGAL

El análisis legal comprende dos etapas: la primera de ellas fue analizar la legislación vigente, determinar la aplicabilidad de ella y obtener las autorizaciones correspondientes para la implementación del proyecto de recarga. La segunda, fue generar un convenio de colaboración entre CNR y el dueño del predio y de los derechos de agua con las autorizaciones correspondientes para implementar y ejecutar el proyecto por un plazo determinado.

5.1 ANALISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES

En materia de análisis legal y autorizaciones, se revisó la normativa chilena vigente asociada a la ejecución del Proyecto de Recarga Artificial en Lontué. En este contexto, se destaca la Ley N° 19.300 sobre bases generales del medio ambiente, que especifica cuales proyectos deben ingresar al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), el Código de Aguas, que regula los permisos necesarios requeridos por proyectos asociados al recurso hídrico (Permisos Sectoriales) y el DS. 46/2002 Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. La Tabla 5-1 presenta un resumen de los temas analizados y sus resultados para el proyecto.

Tabla 5-1: Legislación vigente analizada para PPRAA

Legislación Analizada	Nombre	Pertinencia
Ley 19.300, DS 40/2012 (Pertinencia del proyecto al SEIA)	EIA: Evaluación de Impacto Ambiental DIA: Declaración de Impacto Ambiental	No aplica
Código de aguas (Permisos sectoriales)	Artículo N° 66 del Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122. de 1981: Obras para la recarga artificial de acuíferos	Aplica
	Artículo N° 151. Construcción, modificación, cambio y unificación de bocatomas.	No aplica
	Artículo N° 171. Modificación de cauce.	No aplica
Decretos Supremos	DS. 46/2002 Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.	No aplica

El detalle de cada una de las leyes, permisos y decretos analizados, se presenta en el Anexo H.

5.1.1 Conclusión y plazos análisis legal

Conforme a lo solicitado, podemos concluir que este proyecto piloto de recarga artificial, requiere sólo el permiso para ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, conforme a lo dispuesto en el establecido en el artículo 66 del Código de Aguas y la Resolución N° 425/2007 de la DGA.

Dado lo anterior, GeoHidrología Consultores se contactó con la Dirección General de Aguas para gestionar la solicitud del permiso y consultar sobre los plazos asociados a la entrega de la memoria técnica, su revisión por parte de la autoridad y el otorgamiento del permiso para infiltrar agua al acuífero. Adicionalmente CNR se comunicó vía interministerialmente para realizar las mismas consultas.

DGA indicó que aún no hay un departamento de la institución que se encuentre a cargo de este tema. Es más, este año DGA licitó el proyecto llamado: “Diagnóstico de metodología para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos” (ID1019-41-LE-41), el cual tuvo el propósito de generar una propuesta de guía metodológica que establezca los contenidos mínimos que debe tener un proyecto de recarga artificial al momento de presentarse. Esta guía debe servir a la comunidad para la presentación de este tipo de proyectos y a la DGA como base para la revisión de los mismos.

Dado que: 1) no existió claridad en el procedimiento para solicitar el permiso correspondiente para infiltrar agua al acuífero, 2) DGA se encontraba trabajando para desarrollar una guía para este tipo de proyectos y 3) no se obtuvo una respuesta clara y certera de los pasos a seguir legalmente según lo dispuesto en el establecido en el artículo 66 del Código de Aguas y la Resolución N° 425/2007 de la DGA, GeoHidrología en conjunto con la CNR no gestionaron el permiso correspondiente.

El permiso del Artículo 171 del Código de Aguas, no resulta aplicable a este proyecto, toda vez que, no se verifican *modificaciones en cauces naturales o artificiales, con motivo de la construcción de obras públicas, urbanizaciones, edificaciones y otras obras en general*. Tampoco resulta aplicable el Artículo 151 del Código de Aguas, puesto que el proyecto no contempla la construcción, modificación, cambio y unificación de bocatomas.

Dado que se trata de un proyecto piloto, cuya finalidad es infiltrar aguas y medir el comportamiento de la napa freática en el sector, y no así la solicitud de nuevos derechos provisionales de aguas, la solicitud de recarga artificial de acuíferos, debe ir acompañada sólo de la respectiva memoria técnica, la que si cumple con los contenidos mínimos del artículo 34 Resolución N° 425/2007 de la DGA, debería corresponder a una autorización que se conceda sin más trámite por el Servicio. En efecto, a pesar que no existe un plazo para estos efectos, salvo lo establecido en la ley 19.880 sobre procedimientos administrativos, lo que procede es que de no existir observaciones sobre errores, omisiones o inexactitudes por parte de la DGA, este Servicio otorgue su permiso, sin mayor dilación.

5.2 CONVENIO DE COLABORACIÓN

El convenio de colaboración es un documento legal que compromete al dueño del predio y al dueño de los derechos de agua a entregar en comodato sus terrenos y derechos, por un periodo de tiempo acotado, para ser utilizado en la construcción, ejecución y operación del proyecto.

En la subcuenca del río Lontué se redactó un convenio, debido a que la dueña del predio donde se construyeron las obras, es la misma dueña de los derechos de agua utilizados para la operación del sistema. En efecto, el convenio fue firmado entre CNR y la señora Ana María Pons.

Es importante mencionar que el documento formal fue editado en base al modelo de convenio entregado por la CNR en los términos de referencia de este proyecto y fue visado por abogados del departamento jurídico de la CNR. En términos generales los convenios indican: 1) los antecedentes de las partes, 2) el objeto del convenio, 3) obligaciones del colaborador, 4) obligaciones de la CNR y 5) vigencia y modificaciones. Los ejemplares originales de los convenios de colaboración, firmados por ambas partes, fueron aprobados según la siguiente Resolución:

1. ORD CNR N° 2912 emitido el 2 de julio de 2014: Convenio que acredita aporte de recursos hídricos para la ejecución del proyecto.

La Resolución aprobatoria y el convenio de colaboración se presentan íntegramente en el Anexo I.

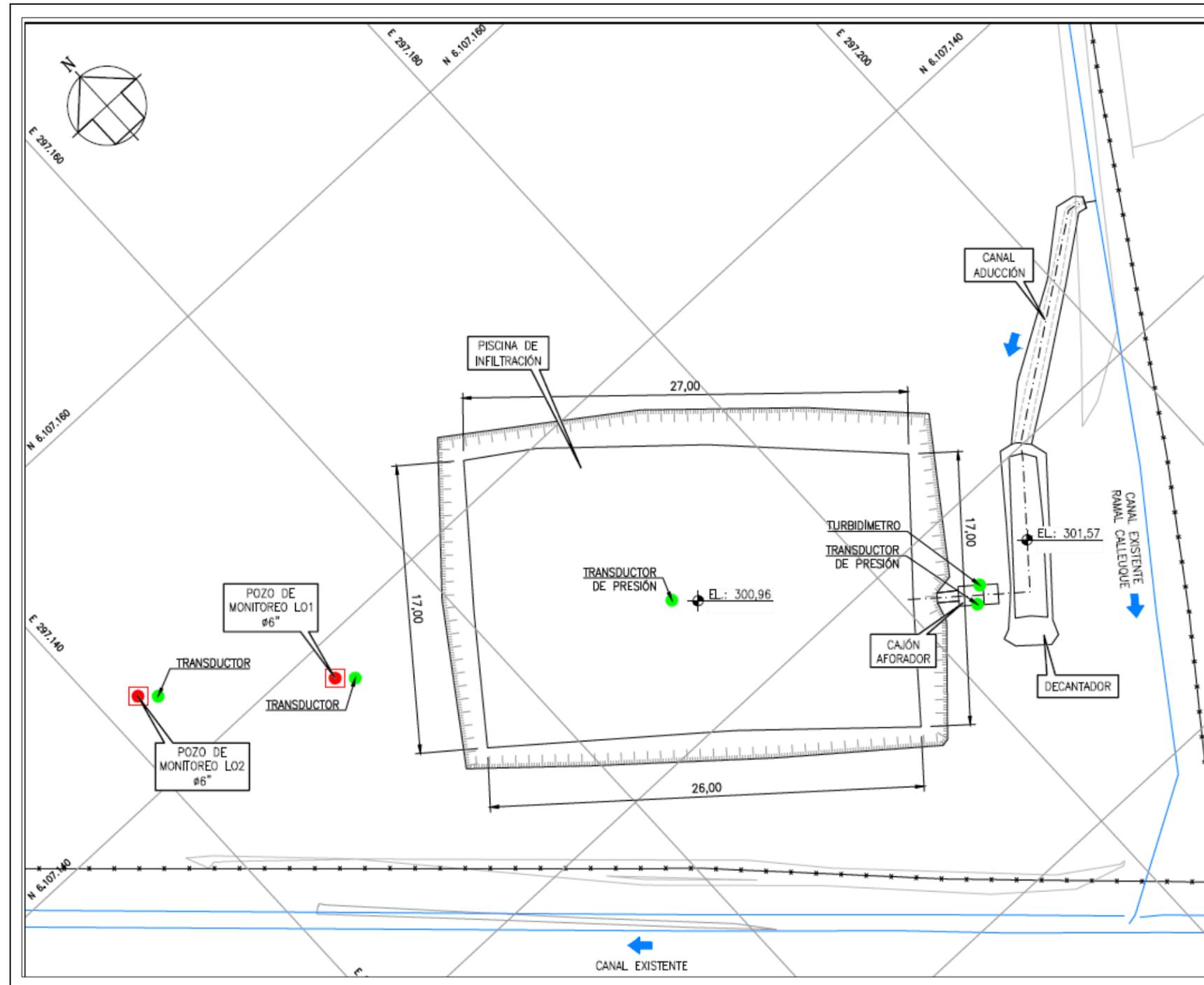
6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL

El diseño de las obras se realizó en dos etapas: a) una primera etapa que se ha denominado pre-diseño del PPRAA, que se desarrolló en función de datos estratigráficos locales obtenidos de la revisión, análisis de antecedentes y de los datos de terreno descritos en el acápite 4.1 (ver Anexo J, con el detalle del pre-diseño del sistema); y b) una etapa 2 llamada diseño final, que fue producto de la información que se fue recopilando en la medida que el proyecto fue avanzando, especialmente la estratigrafía obtenida desde los pozos perforados. A continuación se presenta, en orden cronológico, las actividades, resultados y decisiones que se fueron tomando en la medida que avanzaba el proyecto.

1. Trabajos de terreno. Se construyeron 2 calicatas, se midió la tasa de infiltración en la superficie, a 1 y 2 metros de profundidad. El resultado de estos trabajos mostró que el terreno es apto para la realización de infiltración a través de balsas de infiltración.
2. Pre-diseño 1. El pre-diseño del proyecto, de acuerdo a las bases de licitación, consideró la construcción de una balsa de infiltración y dos pozos de observación cada uno de aproximadamente 25 m de profundidad según los datos estratigráficos obtenidos de la revisión de antecedentes y de los trabajos de terreno. Adicionalmente las obras a construir fueron ubicadas tomando las indicaciones dadas por el dueño del predio, las que estuviesen ubicadas en la zona sur del predio.
3. Perforación de pozo de infiltración. Durante la perforación del pozo de infiltración se fue analizando las muestras estratigráficas por geólogos de GeoH. De acuerdo a las muestras obtenidas y a los niveles que cada uno de los pozos presentó, se perforó LO-01 y LO-02 de 25 y 15 m respectivamente. Ambos pozos cumplen con el criterio de perforación por debajo del nivel piezométrico.
4. Diseño final del sistema. Se realizó una pequeña modificación en el sistema de recarga pre-diseñado, en particular se modificó:
 - o Profundidad de los pozos LO-01 y LO-02 quedo en 25 y 15 metros respectivamente, debido a que se encontró un acuífero colgado durante la perforación del primer pozo. Por ello el segundo fue construido con una menor profundidad con el objetivo de monitorear el acuífero somero.

El esquema conceptual diseñado se presenta en la Figura 6-1, donde se incluye una vista en planta del diseño conceptual del sistema de infiltración elegido. En primer lugar se realizó una toma desde el canal ramal del Calleuque cuya entrada es una compuerta plana que regula el caudal que entra al canal de aducción del sistema y luego es transportado hasta el decantador. El decantador fue revestido con polietileno para evitar filtraciones. Posterior al decantador, se construyó el cajón aforador que mide el caudal a través de un vertedero triangular de 45° que entrega el flujo en la entrada a la piscina de infiltración. Esta piscina tiene 17 m de ancho, 27 m de largo y 1,7 m de profundidad. La obra no contempla una canal de desagüe.

Figura 6-1. Vista en planta del diseño del sistema de infiltración



Fuente: Elaboración propia. (WGS84 H19S)

6.1 DETALLE DE LAS OBRAS

Como se mencionó anteriormente, lo primero que se construyó en el proyecto fueron los pozos de monitoreo, con la finalidad de obtener la estratigrafía local y validar el diseño conceptual y el pre-diseño de detalle de las obras a construir.

El plano as built general de la infraestructura del PPRAA, con el detalle de cada una de las obras, se presenta en el Anexo Q.

6.2 PERFORACIÓN DE POZOS

Como parte del proyecto se construyeron dos pozos de monitoreo LO-01 y LO-02, cuyas características se presentan en la Tabla 6-1. Adicionalmente se presentan las observaciones realizadas durante la filmación del pozo LO-01.

La construcción de las obras fue ejecutada por la empresa Quinta Ingeniería y Construcción entre los días 16 y 17 de Julio de 2014, bajo la supervisión técnica de GeoHidrología Consultores.

Los trabajos de perforación se efectuaron en el mismo predio que la balsa de infiltración. La fecha de construcción de cada pozo y las coordenadas UTM (Datum WGS84 huso 19S) medidas con GPS navegador se indican en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Resumen de información de pozos perforados.

Pozo	Tipo	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)	Fecha construcción	Profundidad (m)	Nivel Estático (m)
LO-01	Observación	297.151	6.107.138	16/07/2014	25	11,45
LO-02	Observación	297.141	6.107.145	17/07/2014	15	5,50

En general, la secuencia estratigráfica encontrada a través de los dos sondajes, corresponde a una secuencia aluvial que presenta intercalaciones de grava arenosa a arena gravosa, sin contenido de arcillas, con buena selección y fragmentos sub-redondeados y sub-esféricos. El tamaño de grano varía desde arena gruesa a grava gruesa.

6.2.1 Pozo de observación LO-01

La perforación se llevó a cabo con la máquina *Prominas* R-1H, mediante sistema de rotoperCUSión con entubación simultánea en 6" de diámetro, llegando hasta los 25 m de profundidad. El pozo fue habilitado con tuberías ciegas y ranuradas en acero al carbono de 6" de diámetro. El detalle de la habilitación se indica en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Resumen de habilitación del pozo LO-01 (Stick Up* = 0,45 m).

Tipo	Desde (m)	Hasta (m)	Diámetro	Long. Tramo (m)	N° Tuberías
Ciego	0	6,4	6"	7	1
Ranurado	6,4	9,4		3	0,5
Ciego	9,4	12,4		3	0,5
Ranurado	12,4	24,4		12	2
Simetrix	24,4	25		0,6	-

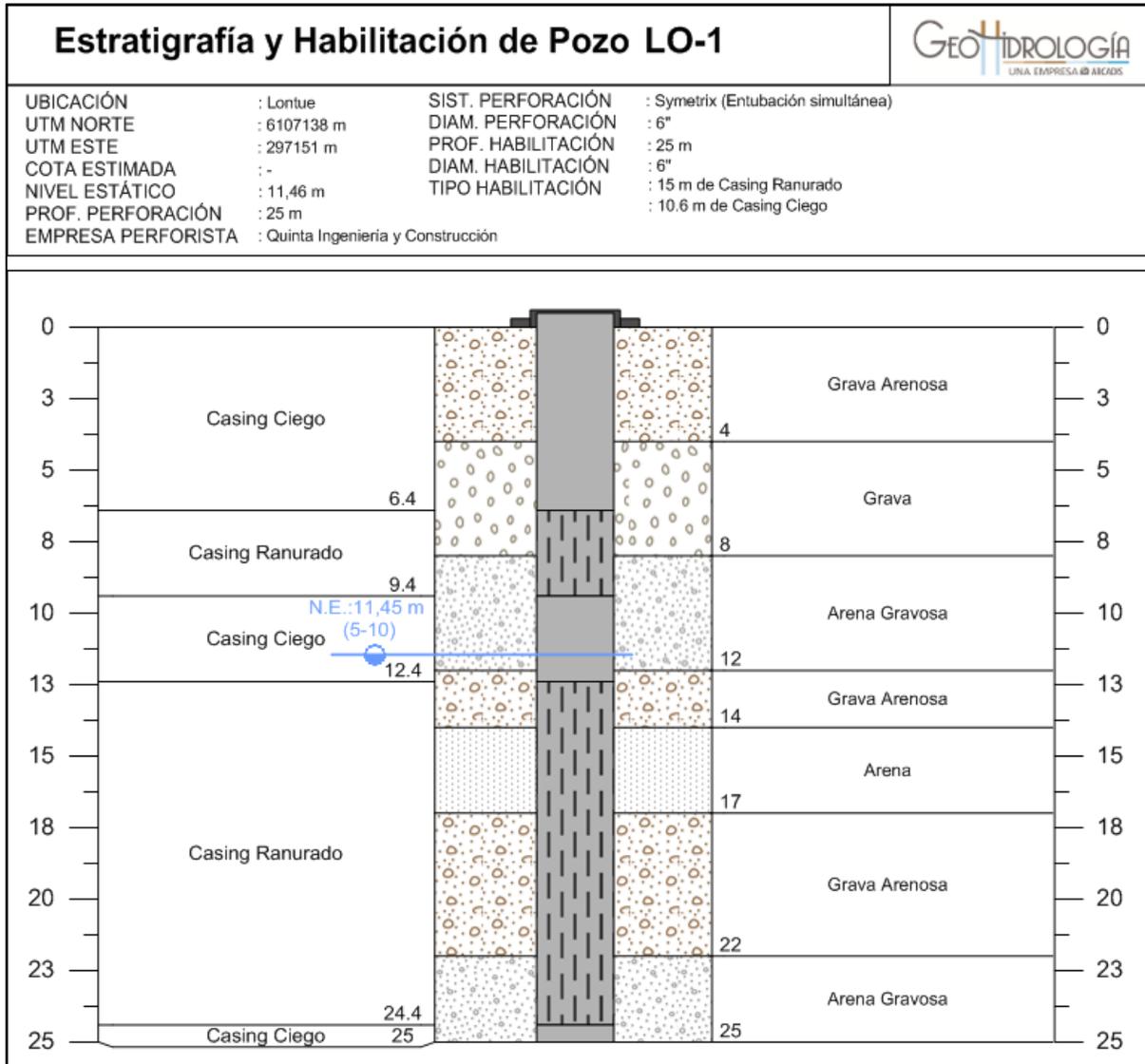
Stick Up= altura de la tubería del pozo que queda por encima de la superficie del terreno.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que en el fondo de pozo quedaron 0,6 m de symetrix ciego, que corresponde a la entubación del martillo de perforación. El día 16 de julio se realizó el desarrollo de pozo mediante *swabbing* e inyección de aire. En la Figura 6-2 se puede observar un esquema de la estratigrafía y habilitación del pozo LO-01.

La estratigrafía del punto perforado corresponde a una secuencia aluvial no consolidada de 25 m de espesor, la cual presenta distintos niveles de acuerdo a su granulometría. La secuencia es uniforme, y presenta intercalaciones de grava arenosa con arena gravosa, con fragmentos sub-angulosos y sub-redondeados de tamaño grava gruesa y arena gruesa. La litología predominante es polimíctica volcánica, con presencia de clastos andesíticos y diorítico. Entre los 4 y 8 m se encuentra una grava que se diferencia del resto de la secuencia por su color gris y presencia de clastos volcánicos con vetillas de clorita. Así también, entre los 14 y 17 m se observa un nivel de arena café oscuro. En general, el depósito presenta buena selección.

Figura 6-2. Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo LO-01.



Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Pozo de observación LO-02

La perforación se llevó a cabo con la máquina *Prominas R-1H*, mediante sistema de rotopercusión con entubación simultánea en 6” de diámetro, llegando hasta los 15 m de profundidad. El pozo fue habilitado con tuberías ciegas y ranuradas en acero al carbono de 6” de diámetro. El detalle de la habilitación se indica en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Resumen de habilitación del pozo LO-02 (Stick Up = 0,42 m).

Tipo	Desde (m)	Hasta (m)	Diámetro	Long. Tramo (m)	N° Tuberías
Ciego	0	2,4	6”	3	0,5
Ranurado	2,4	14,4		12	2
Simetrix	14,4	15		0,6	-

Stick Up= altura de la tubería del pozo que queda por encima de la superficie del terreno.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que en el fondo de pozo quedaron 0,6 m de symetrix ciego, que corresponde a la entubación del martillo de perforación. El día 17 de julio se realizó el desarrollo de pozo mediante *swabbing* e inyección de aire. En la Figura 6-3 se puede observar un esquema de la estratigrafía y habilitación del pozo LO-02.

La estratigrafía del punto perforado corresponde a una secuencia aluvial no consolidada de 15 m de espesor, la cual presenta distintos niveles de acuerdo a su granulometría. El nivel somero, entre 0 y 8 m se compone de dos niveles de grava arenosa de 4 m de espesor cada uno, que se diferencian entre sí por el color. El primer nivel es color café y el segundo color gris, la litología de los fragmentos es polimíctica en ambas capas. Entre los 8 y 11 m se observa una arena gravo-limosa de color café oscuro, el porcentaje de limo es de un 5%. Luego, entre los 11 y 12 m hay un nivel de grava, de fragmentos polimícticos de hasta 6 cm de buena selección, sub-redondeados y esféricos. Finalmente, la base de la secuencia, entre los 12 y 15 m se encuentra una arena gravosa, de fragmentos polimícticos de buena selección, sub-angulosos y sub-esféricos.

Figura 6-3. Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo LO-02.



Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Filmación de pozo LO-01

Con el objetivo de diagnosticar el estado estructural de la habilitación y las condiciones de limpieza de las tuberías y del agua presente en los pozos, el día 24 de julio de 2014 se filmó el pozo de observación LO-01.

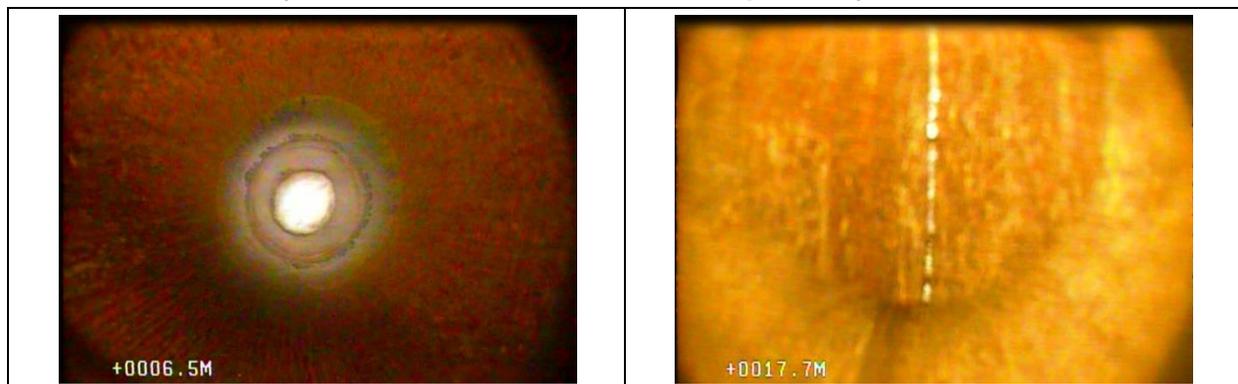
La filmación del pozo se realizó utilizando una cámara dual sumergible (modelo GS-0013), con lente lateral en 360° y lente de fondo. La cámara se introdujo con centralizadores y utilizando un huinche eléctrico con regulador de velocidad y contador de metros. Además se efectuó el monitoreo *in situ*, a medida que descendía la cámara dentro del pozo, utilizando una pantalla LCD de 7". El registro de la filmación se grabó en un DVD, el cual se encuentra en el Anexo K.

Durante la filmación del pozo, fue posible observar el ingreso de un flujo turbulento, a través de las ranuras, a partir de los 7,1 m hasta los 17 m, profundidad donde ocurre un cambio en el régimen y el ingreso de flujo se torna laminar.

La habilitación del pozo presenta buen estado estructural en toda su extensión. Las tuberías ciegas y ranuradas compuestas por *casing* de acero al carbono no presentan daño alguno. Los tramos de tubería sobre el ingreso de agua se observaron totalmente limpios. En cambio, las ranuras bajo los 17 m se encuentran semi-tapada. En conclusión, el pozo se encuentra en excelente estado estructural y en un buen estado de limpieza. Las ranuras permiten el ingreso de agua al interior de la tubería sin problema, y por lo tanto cumple su objetivo de pozo de monitoreo.

La entrada de agua por sobre el nivel estático sugiere la existencia de uno o más acuíferos "colgados" por sobre el nivel estático en que el pozo perforado actúa como un conector entre ellos. Los acuíferos de éstas características se ubican sobre estratos impermeables que no fueron encontrados durante las perforaciones lo que indica que éstos podrían tener una potencia del orden de centímetros.

Figura 6-4. Imagen de filmación. Se observa a la izquierda el ingreso de agua turbulenta y a la derecha una ranura semi-tapada bajo el nivel estático.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-4: Resumen de la filmación del pozo LO-01.
Las profundidades se encuentran sin descontar stick up.

Profundidad (m)	Habilitación	Estado Estructural	Estado Limpieza	Comentarios
3,4	Tubería ciega	Bueno	Limpio	
4,7	Tubería ciega	Bueno	Limpio	
6,3	Tubería ciega	Bueno	Limpio	
7	Unión tubería	Bueno	Limpio	Unión ciego – ranurado
7,1	Ingreso de flujo turbulento			
7,3	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
8,2	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
8,6	Aumento de flujo turbulento			
9,1	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
11,1	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
13,1	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
15,6	Flujo turbulento impide observar mayor detalle			
17	Ingreso de flujo laminar			
17,1	Ranura	Bueno	Semi-tapada	
18,4	Ranura	Bueno	Semi-tapada	
19	Unión tubería	Bueno	Limpia	
19,3	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
20,1	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
20,8	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
21,3	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
23	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
23,6	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
24,3	Ranura	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
25	Unión tubería	Bueno	Semi-tapada	Agua limpia
25,3	Fondo pozo			Rocas y material en fondo.

Fuente: Elaboración propia

6.3 DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS DEL PPRAA

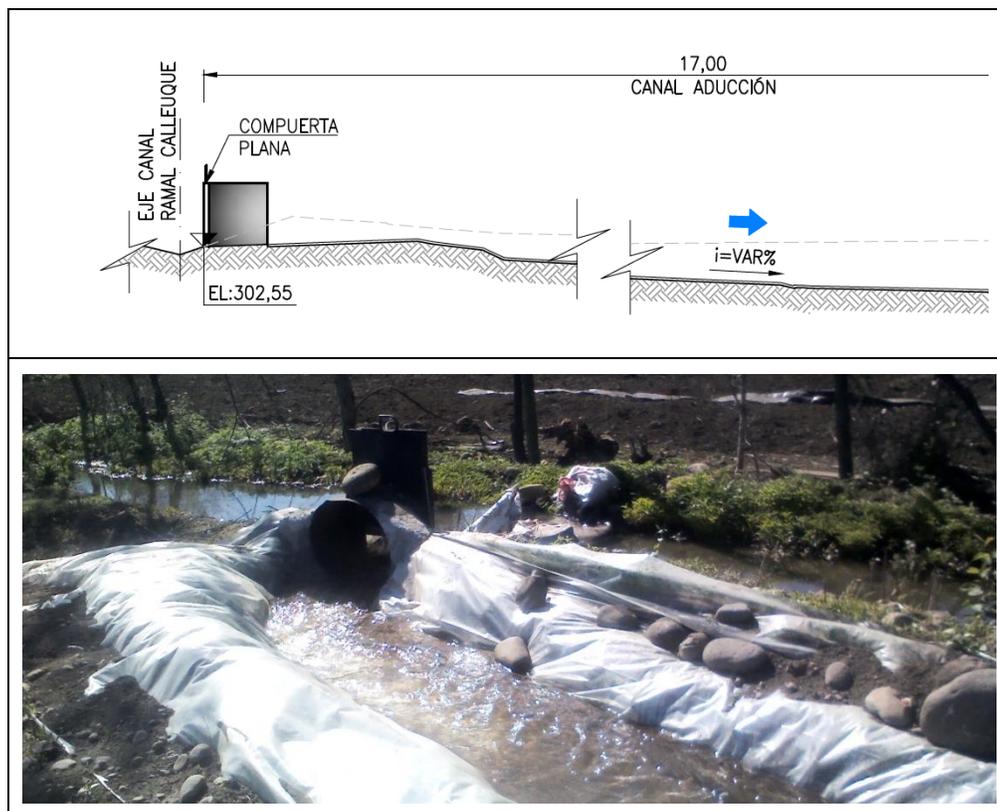
A continuación se detalla cada una de las obras hidráulicas que componen el Proyecto Piloto de Recarga al acuífero de Lontué.

El plano as built general de la infraestructura del PPRAA, con el detalle de cada una de las obras, se presenta en el Anexo Q.

6.3.1 Sistema de captación

Se utilizó para estos efectos, una obra de toma desde el canal ramal Calleuque, mediante una toma lateral con compuerta plana de fondo. La obra fue construida en hormigón armado especialmente para este proyecto. La compuerta transportó el flujo hasta el canal de aducción. El diseño conceptual y de detalle se aprecia en la Figura 6-5. La compuerta permitió tomar el agua del canal y realizar la regulación del caudal, variando la apertura de la compuerta. El sistema puede detener el flujo a través de la toma mediante el cierre de la compuerta. La obra de toma descargó el caudal al canal de aducción recubierto con polietileno.

Figura 6-5. Sistema de captación

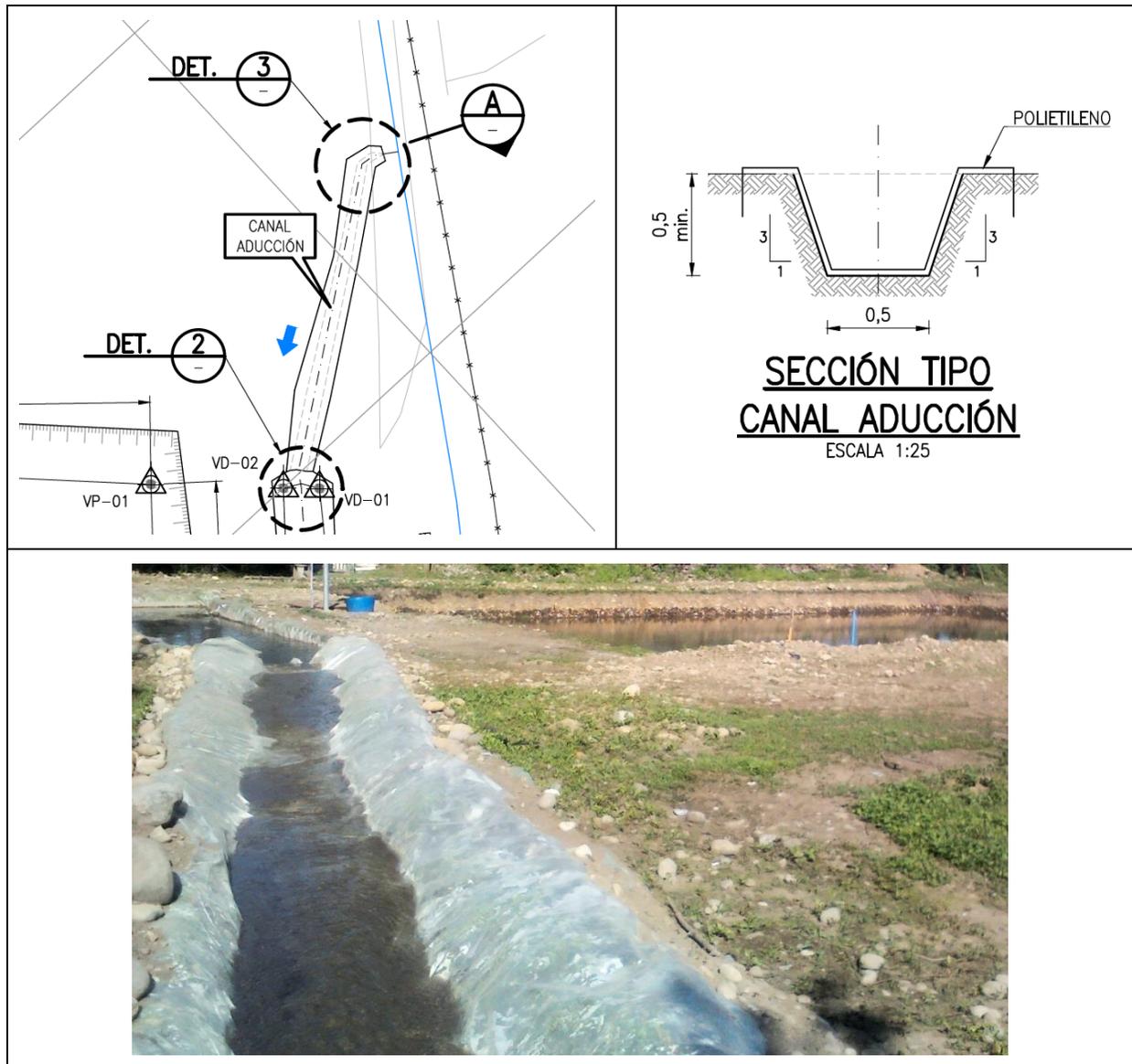


Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Conducción 1: Entre captación y obra de decantación

Luego de la captación, el agua fue llevada mediante canal trapezoidal revestido de polietileno. La longitud del canal de aducción es de aproximadamente 17,0 m de largo.

Tabla 6-5: Canal de aducción

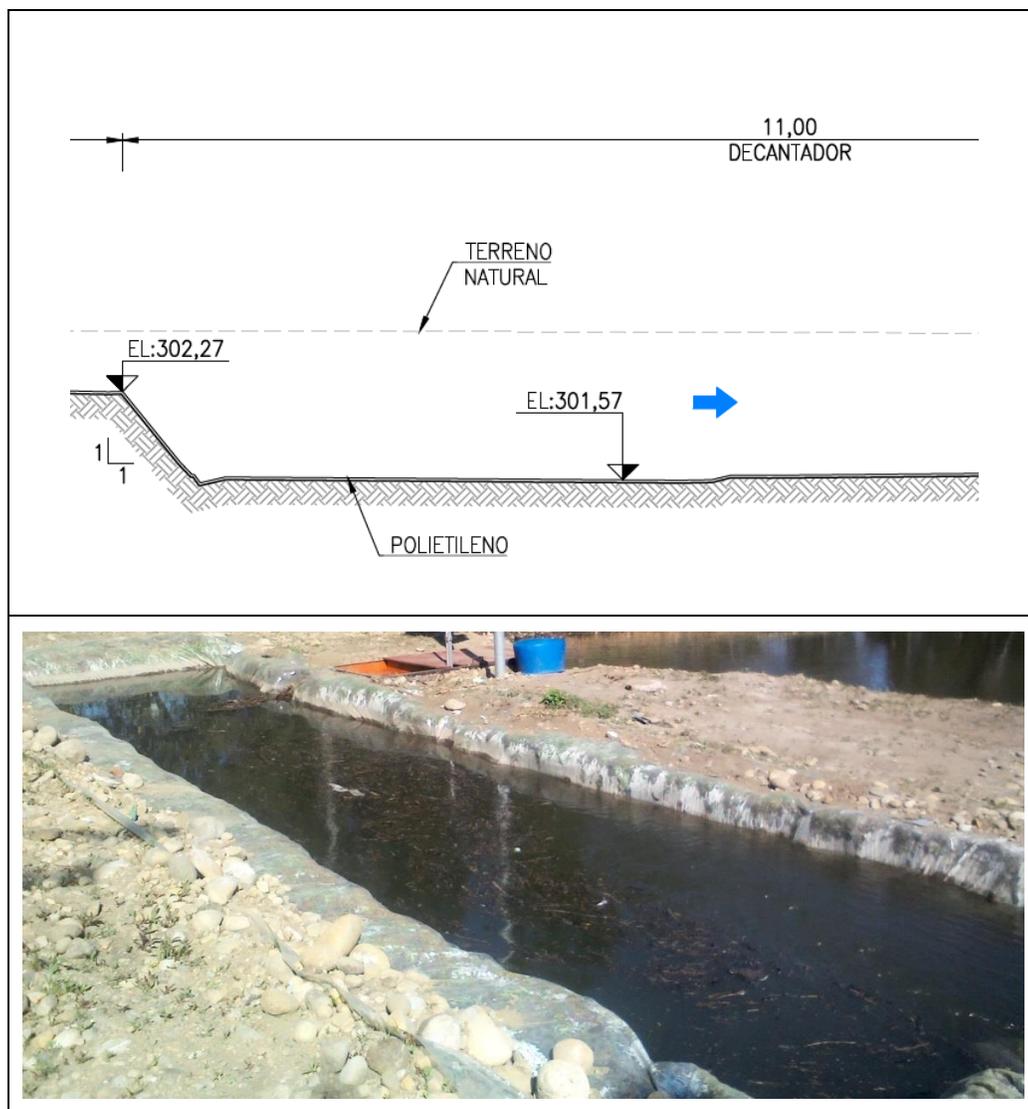


6.3.3 Obra de decantación

La obra de decantación correspondió a una sección trapecial excavada en terreno natural y revestido con polietileno de manera de evitar una infiltración no controlada del flujo.

El decantador tiene una longitud de 11 m, un ancho basal de 2 m, taludes laterales H:V=1:1, sin pendiente y una profundidad efectiva de 1,1 m. Con estas dimensiones se tiene una velocidad de escurrimiento de 0,35 cm/s, velocidad suficiente para decantar dentro de la obra partículas de hasta 0,05 mm. En la Figura 6-6 se puede apreciar esta obra.

Figura 6-6: Esquema decantador

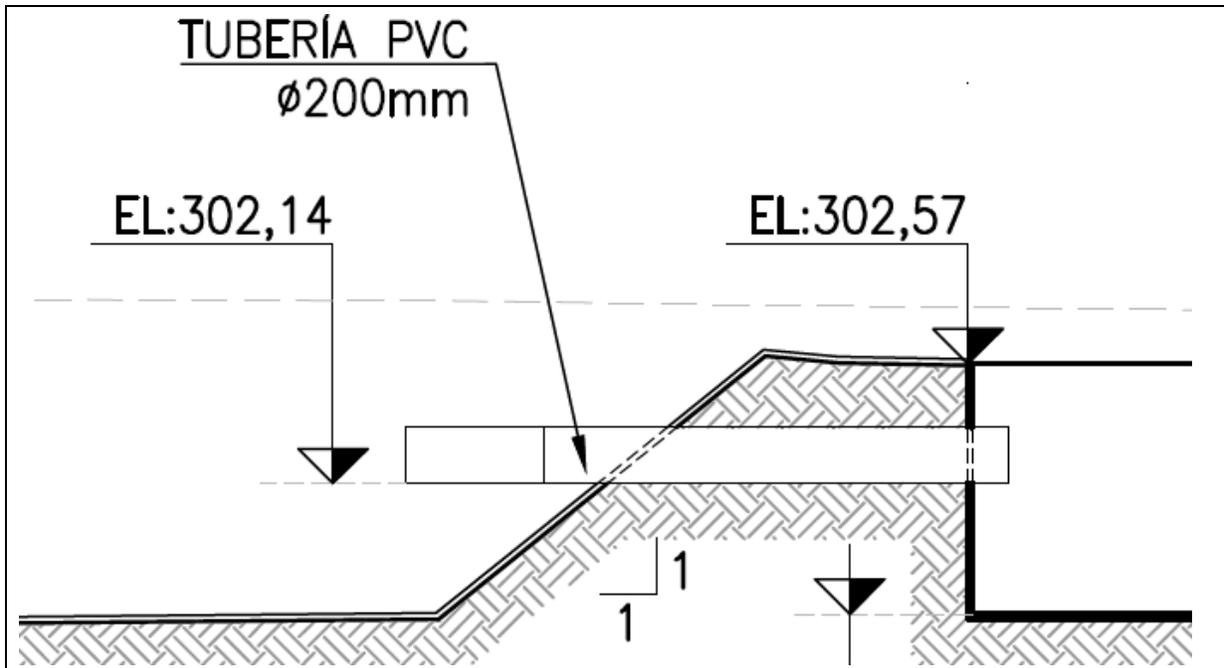


Fuente: Elaboración propia

6.3.4 Conducción 2: Entre decantador y dispositivo de medición

Posterior a la obra de decantación el flujo es conducido mediante una tubería de PVC de 200 mm de diámetro hasta la piscina de infiltración (ver Figura 6-7).

Figura 6-7: Conducción entre decantador y dispositivo de medición



6.3.5 Dispositivos de medición

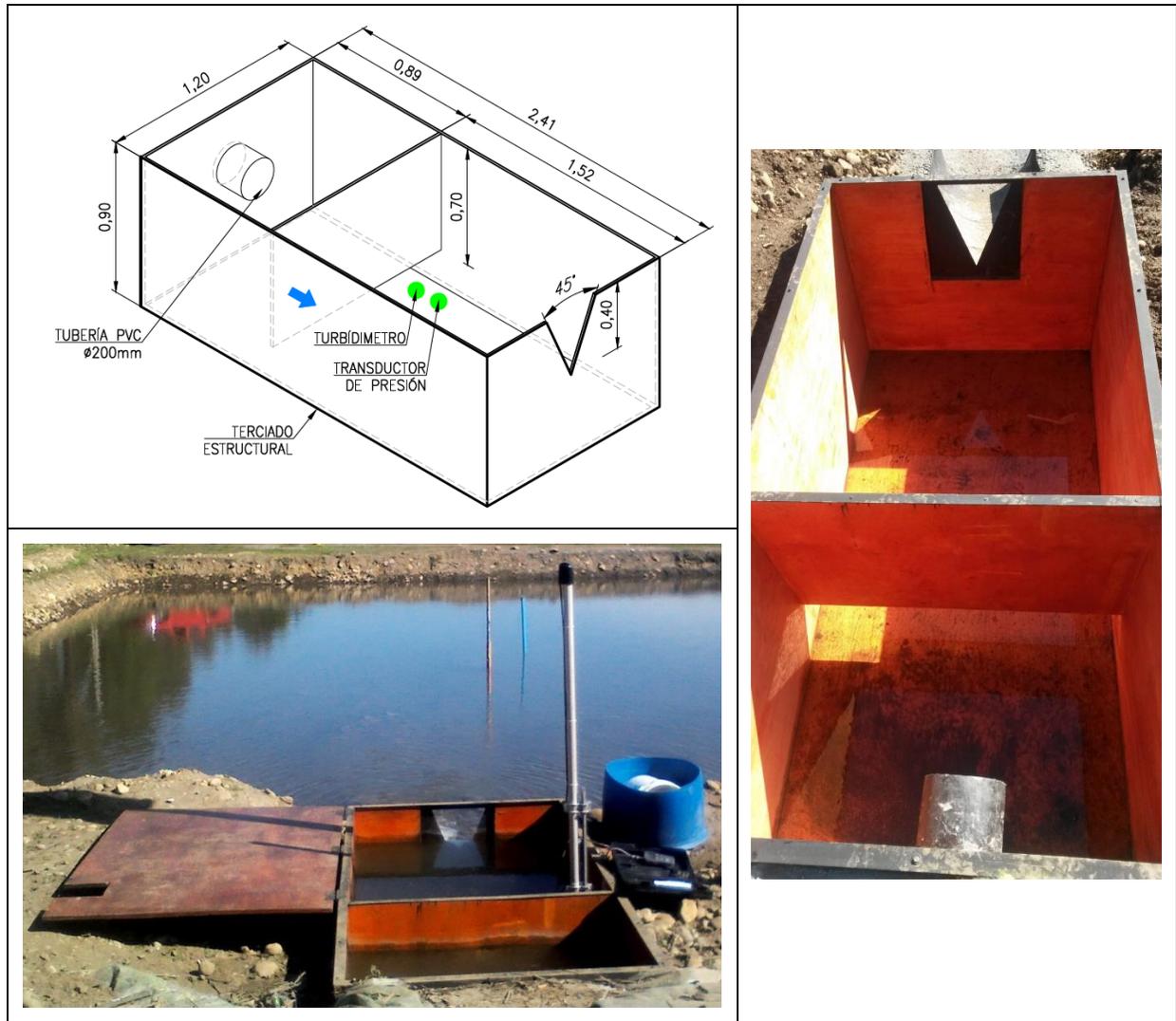
El dispositivo de medición, está compuesto por un cajón aforador, ver Figura 6-8. El cajón aforador posee un vertedero triangular de 45° donde es posible medir el caudal que entra a la piscina de infiltración.

Las dimensiones del dispositivo de medición es de 1,2 m de ancho, 2,4 m de largo y 0,9 m de altura. El vertedero es de 45° y se ubicaran a 0,5 m del fondo. Se espera que el caudal máximo de operación del sistema fuese de 25 L/s lo que implica una altura de escurrimiento de aproximadamente 25 cm sobre los vertederos de este ángulo. El material de los dispositivos de medición es terciado marino de 1,8 cm de espesor con esqueleto de perfiles de acero de 40x40x1,8 mm. En la Figura 6-8 se presenta el esquema de los dispositivos de medición .

6.3.6 Piscina de infiltración

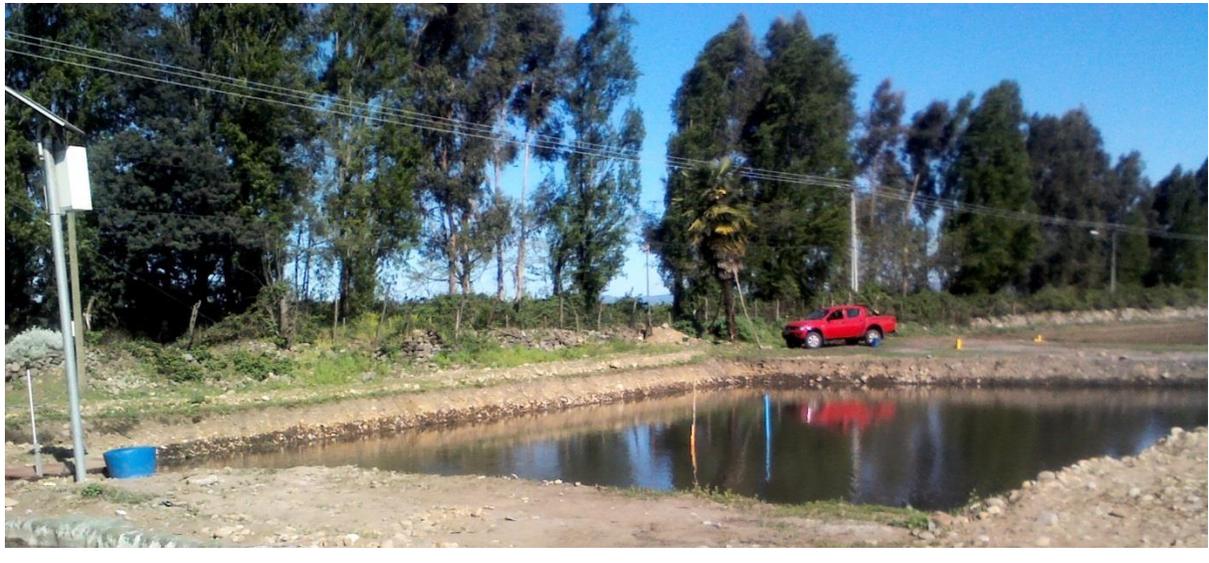
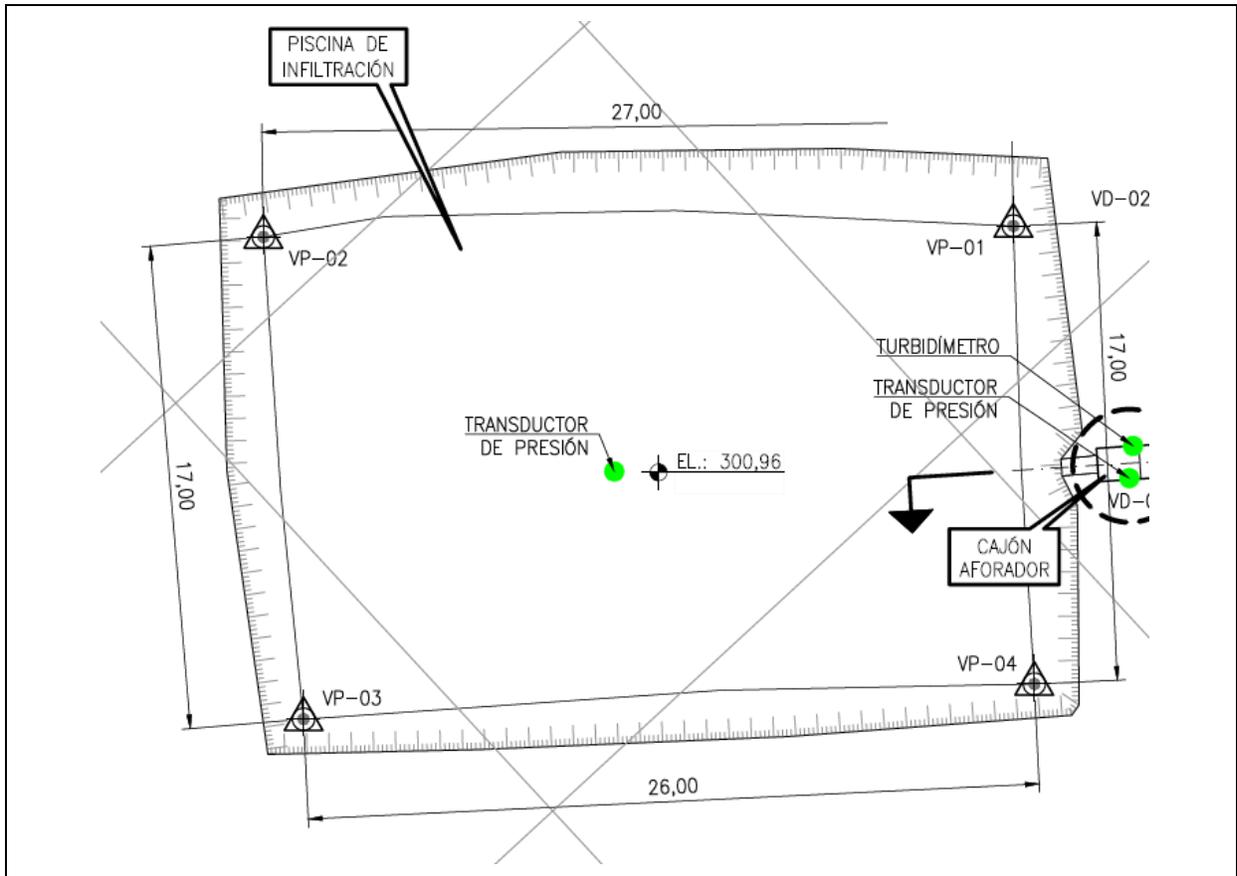
El diseño de la piscina de infiltración se presenta en Figura 6-9. El diseño corresponde a una piscina o balsa de infiltración de 450 m². La construcción de la balsa de infiltración se llevó a cabo en dos etapas los días 18 y 19 de julio en el predio del Sr. Fernando Baile ubicado en Molina. La primera correspondió a la demolición y retiro de escombro de una casa ubicada en el área. Posteriormente, se procedió a realizar la excavación de la balsa con máquina retroexcavadora. Las medidas finales de la balsa son 17,0 m de ancho; 26,5 m de largo y 1,7 m de profundidad.

Figura 6-8: Esquema dispositivo de medición



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-9: Esquema de piscina de infiltración



Fuente: Elaboración propia

6.4 MEDICIÓN DE VARIABLES

El control de variables y parámetros incluye todas las mediciones que se realizan en terreno de manera puntual o continua, los cuales tienen 4 objetivos principales dentro del proyecto piloto de recarga artificial:

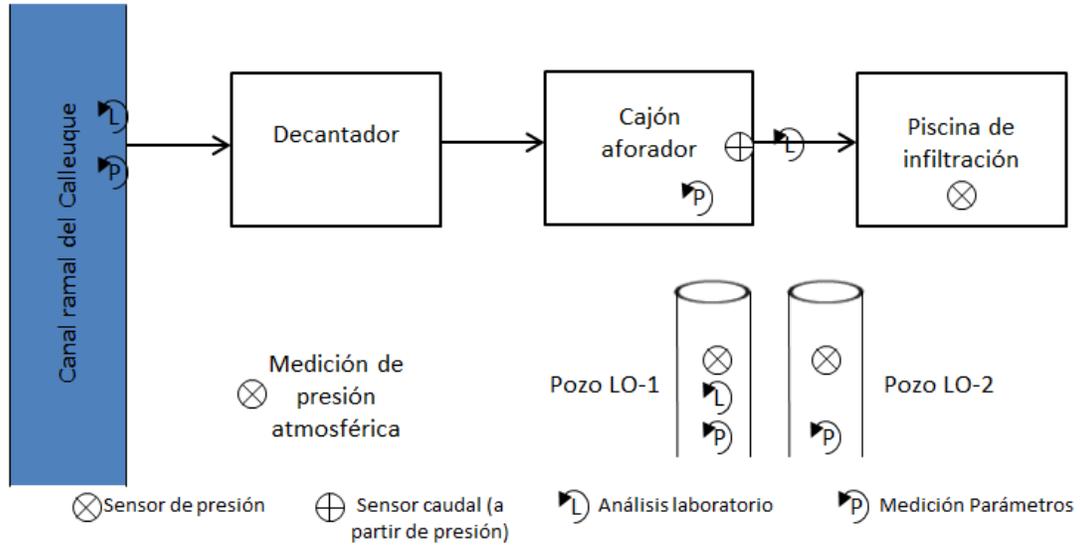
- Desempeño del sistema de infiltración. La variable más importante que interesa controlar es el caudal infiltrado y su evolución en el tiempo,
- Respuesta del acuífero. Para la consecución de este objetivo la variable a controlar es el comportamiento del nivel del acuífero, medido en los pozos de observación, los que permiten determinar el volumen del acuífero ocupado por el agua infiltrada desarrollada y el tiempo de retención del agua infiltrada.
- Control de variables críticas. La variable crítica de mayor relevancia para el correcto funcionamiento del sistema de infiltración son los sólidos suspendidos (partículas de suelo u de otro origen, no disueltas), que puedan estar presente en el agua de alimentación del sistema de infiltración.
- Control de los efectos de la infiltración. Este último se refiere principalmente a las alteraciones en la calidad química del acuífero relacionadas a la infiltración desarrollada.

Dado la descripción anterior, el proyecto de recarga piloto contempló la implementación de una red de monitoreo de la operación del sistema compuesta por medidores de nivel y turbidez, a través de los cuales se puede establecer el caudal de infiltración (medido a la entrada y salida de la balsa de infiltración), la calidad química del agua a infiltrar y en el acuífero.

Para las variables más determinantes de operación se implementó un sistema de telemetría, el cual permite que la medición *in situ* sea enviada por comunicación inalámbrica hacia un sitio web desde donde se puede acceder a la información histórica y en línea, facilitando el monitoreo instantáneo y envío de alertas vía mensaje de texto y mail. Adicionalmente es monitoreada la precipitación en el área, a través de las estaciones pertenecientes a la red de la Dirección General de Aguas.

El detalle de las variables monitoreadas se presenta en la Tabla 6-6 considerando lugar de medición, equipo a utilizar, frecuencia estimada de medición y si se contempla telemetría o no. La Figura 6-10 presenta un diagrama esquemático de su ubicación.

Figura 6-10: Diagrama de ubicación equipos de medición.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-6: Cuadro resumen de medición de variables.

Objetivo asociado	Parámetro	Lugar de medición	Equipo	Marca/ modelo	Frecuencia	Telemetría
Estimación de Balance Hídrico	Caudal	Vertedero triangular al ingreso de la balsa de infiltración	Transductor de presión	Leeg. Sensor de niveles hidroestático capacitivo 0-5m	Continuo	Si
Respuesta del acuífero	Niveles	Pozos de observación 1 y 2	Transductor de presión	HOBO. U20L water level logger	Continuo	No
		Presión atmosférica (Ambiental)				
Control de variables críticas	Turbidez	Cajón aforador	Turbidímetro	SOLITAX scSS Wiper with sc200 Controller	Continuo	Si
Control de los efectos de la infiltración	Parámetros químicos (Set B)	Pozos de observación 1 (LO-01)	Análisis de laboratorio	Set B de laboratorio ALS	Mensual	No
		Agua a infiltrar (antes de entrar a piscina de infiltración)				
	Parámetros físico- químicos (pH, T°, DO, Cond. Eléc.)	Canal alimentador antes de la toma	Medidor multiparámetros portátil	Hanna instrument HI9829	Semanal	No
Pozos de observación 1 y 2						
Balsa de infiltración						

Fuente: Elaboración propia

6.4.1 Medición de caudal

El sistema contempla la medición del caudal que ingresa a la cámara de infiltración y el caudal de rebose, es decir, el caudal de agua que no fue posible de infiltrar. Se utilizaron vertederos triangulares idénticos con un ángulo de 45°, cuya curva de descarga está dada por la siguiente expresión:

$$Q=571,4 * H^{2,5}$$

Donde,

Q: Caudal pasante (L/s).

H: Altura de agua sobre el vertedero (m).

La medición del nivel se realizó por medio de un sensor de nivel hidrostático capacitivo (transductor de presión), con un rango de medición de 0 a 5 mca (metros columna de agua), marca LEEG con una precisión de 0,25% del rango máximo de medición. Las características del equipo se presentan en el catálogo adjunto en el Anexo L. El transductor de presión estuvo conectado al sistema de telemetría.

Como resultado se cuenta con información continua de nivel de agua en la entrada y salida de la cámara de infiltración. El equipo se ubicó dentro de la cámara a una distancia de 3 a 4 veces la altura de flujo máximo a aforar. Una fotografía del equipo se presenta en la Figura 6-11.

Figura 6-11: Equipo usado para la medición de caudales.



Fuente: Catálogo del producto

6.4.2 Medición de nivel del acuífero

Para la medición del nivel de la napa se utilizaron transductores de presión. Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, uno de los más comunes es el transductor extensométrico. La conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al transductor de presión produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación produce un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión. Este cambio en la resistencia es transformado a unidades de presión de manera interna y registrado en la memoria interna o transmitido a otro dispositivo.

Junto con la medición de los niveles del acuífero, se utilizaron transductores para medir las alturas desarrolladas en los vertederos triangulares de manera de registrar la medición de flujo en línea. Por lo tanto, se instalaron 5 transductores de presión en el sistema de infiltración, ver Figura 6-10. El resumen de su ubicación es el siguiente:

- 1 por cada pozos de observación (son dos pozos en total), instalado a 30 cm del fondo del pozo.
- 1 en la piscina de infiltración, instalado a 30 cm del fondo de la perforación.
- 1 en el vertedero triangular instalado en el cajón aforador, instalado a 30 cm aguas arriba de la placa vertedero en el fondo de esta.
- 1 Transductor para medir la presión ambiental y así conocer la presión absoluta.

La precisión de este tipo de dispositivo depende de la presión máxima que son capaces de medir y se encuentra en torno al 0,1% de este valor. Por esta razón es que los transductores de los vertederos tienen una presión máxima de medición de 1 mca, en tanto que los ubicados en los pozos poseen una presión máxima de 30 mca.

Se utilizaron transductores de presión marca HOBO modelo U20L Water Level Logger (Figura 6-12) para medir la profundidad de la napa. La medición se realizó de manera continua durante toda la duración de las pruebas. Adicionalmente, durante las pruebas se midieron con pozómetros el nivel de la napa para validar la información continua registrada por el transductor. En el Anexo L se encuentra el catálogo del producto. Adicionalmente se utilizaron transductores de presión marca Leeg para medir la altura de agua sobre el vertedero del cajón aforador, este tipo de transductor se encontraba conectado a telemetría.

Figura 6-12: Equipo usado para la medición de niveles



Nota: Imagen a la izquierda foto del producto e imagen a la derecha instalación en el pozo PO-1
Fuente: catálogo del equipo y elaboración propia

Adicionalmente se realizó medición de la profundidad del agua subterránea de manera manual a través de un pozómetro. Información que fue utilizada para validar los datos obtenidos con los transductores de presión, ver Figura 6-13

Figura 6-13: Pozómetro para medir profundidad del agua subterránea en pozos



Fuente: www.solinst.com

6.4.3 Medición de turbiedad

Este control se refiere a la medición oportuna de parámetros que interfieran con el correcto funcionamiento de las pruebas de infiltración. Se estima que la variable de mayor importancia es el contenido de sólidos suspendidos en el agua de alimentación. No existen mediciones en línea para este parámetro, sin embargo el parámetro turbidez también puede ser usado como indicador de acuerdo a ASCE (2001). Para este parámetro se utilizan métodos ópticos de sencilla manipulación y son instalados en terreno para su medición continua.

La unidad de medida de la turbidez es NTU que se refieren a Unidades Nefelométricas de turbidez. Se recomienda que el agua para los sistemas de infiltración presente un valor menor a 5-10 NTU (ASCE, 2001). Por lo tanto se utilizó el criterio de corte de 10 NTU para la suspensión de las pruebas de infiltración. Si la medición de turbiedad supera los 10 NTU, el operador debe cerrar la compuerta de entrada al sistema, para impedir la entrada de agua turbia a la piscina de infiltración. Con respecto al agua que quedará como remanente en el sistema de infiltración, ésta será extraída con una bomba superficial y descartada en un lugar del predio que no afecte el sector.

Se instaló un turbidímetro en el cajón aforador de manera de controlar el parámetro turbidez de manera continua. Este parámetro es leído en el visor del instrumento. En conjunto con la inspección visual permiten al operador suspender la prueba de infiltración en el caso de que el agua a infiltrar se encuentre con un grado de turbidez que ponga en riesgo la capacidad infiltrante de la piscina por colmatación.

El equipo de medición utilizado es el modelo SOLITAX sc SS Wiperwith sc200 Controller de marca HACH. Los registros fueron continuos y estuvieron disponibles en tiempo real con el equipo conectado a telemetría. La medición de la turbidez se realizó en la cajón aforador. El equipo se presenta en la Figura 6-14 y en el Anexo L se incluye su catálogo.

Figura 6-14: Equipo usado para la medición niveles (Izq) y turbidez (Der).



Fuente: catálogo del producto y elaboración propia

6.4.4 Control de efectos de la infiltración a través de la calidad química

Uno de los objetivos de las pruebas de infiltración y del plan de monitoreo es controlar los efectos físico-químicos en el acuífero, durante el desarrollo de las pruebas de infiltración. El buen funcionamiento del sistema de infiltración debe considerar no contaminar el acuífero, es decir, que si se produce una alteración de la calidad química del acuífero, ésta no perjudique el uso normal de las aguas. De manera general, posibles alteraciones se pueden producir por aguas con características químicas muy distintas al agua del acuífero o por reacciones ocasionadas por el contacto con los minerales presentes en la matriz sólida del acuífero. En el caso particular del sector de Lontué, las aguas utilizadas para infiltrar provienen del canal que se utiliza para regar el mismo predio donde se realizará la experiencia. El análisis químico demostró que la calidad de ambas aguas (fuente y agua subterránea) son similares, por lo que no se esperan alteraciones producidas por la infiltración.

Para cumplir con los objetivos antes señalados se realizarán dos tipos de mediciones de calidad físico-química en el acuífero: a) toma de muestra para análisis de parámetros químicos, definidos en el set B según los términos de referencia y b) medición de parámetros físico-químicos. Los muestreos serán realizados en de acuerdo al procedimiento de muestreo incluidos en el Anexo F.

6.4.4.1 Parámetros químicos (set B)

La medición de los parámetros químicos, tuvo como objetivo el control de los efectos de la infiltración, sobre la calidad química del agua subterránea.

Para ello, en la sección 4.1.3 del presente informe se definió un Set A de 35 parámetros a controlar para establecer la línea base de calidad incluyendo nivel de oxígeno, metales, eutrofización, microbiología, sustancias disueltas, parámetros físicos, aceites y grasas. Posteriormente se definió un set B que incluye un subconjunto de 20 parámetros del Set A, y que fue utilizado para monitorear la calidad del agua a infiltrar y del acuífero.

Los puntos de muestreo para los parámetros químicos (set B) fueron los siguientes:

- En el pozos de observación LO-01
- Salida de cajón aforador: agua a infiltrar (LO-i)

El muestreo lo realizó personal de GeoHidrología mensualmente y las muestras fueron enviadas antes de 24 horas al laboratorio para la realización de sus análisis. En la Figura 6-15 se presenta el equipo (cooler y frascos) utilizado en terreno.

Figura 6-15: Equipo para muestreo hidroquímico.



Fuente: Elaboración propia

6.4.4.2 Parámetros Físicoquímicos

La medición de los parámetros físico-químicos, tuvo como objetivo el control de los efectos de la infiltración. Se utilizó un multiparámetro HI-9829 marca Hanna Instruments, propiedad de GeoH. Los puntos de muestreo para los parámetros físico-químicos fueron los siguientes:

- Canal alimentador antes de toma (LO-CA)
- Dos Pozos de observación (LO-01 y LO-02)
- Salida de cajón aforador: agua a infiltrar (LO-i)

Los parámetros físico-químicos medidos fueron pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos.

La Figura 6-16 presenta una fotografía del equipo y el catálogo se incluye en el Anexo L.

Figura 6-16: Equipo de medición multiparámetros



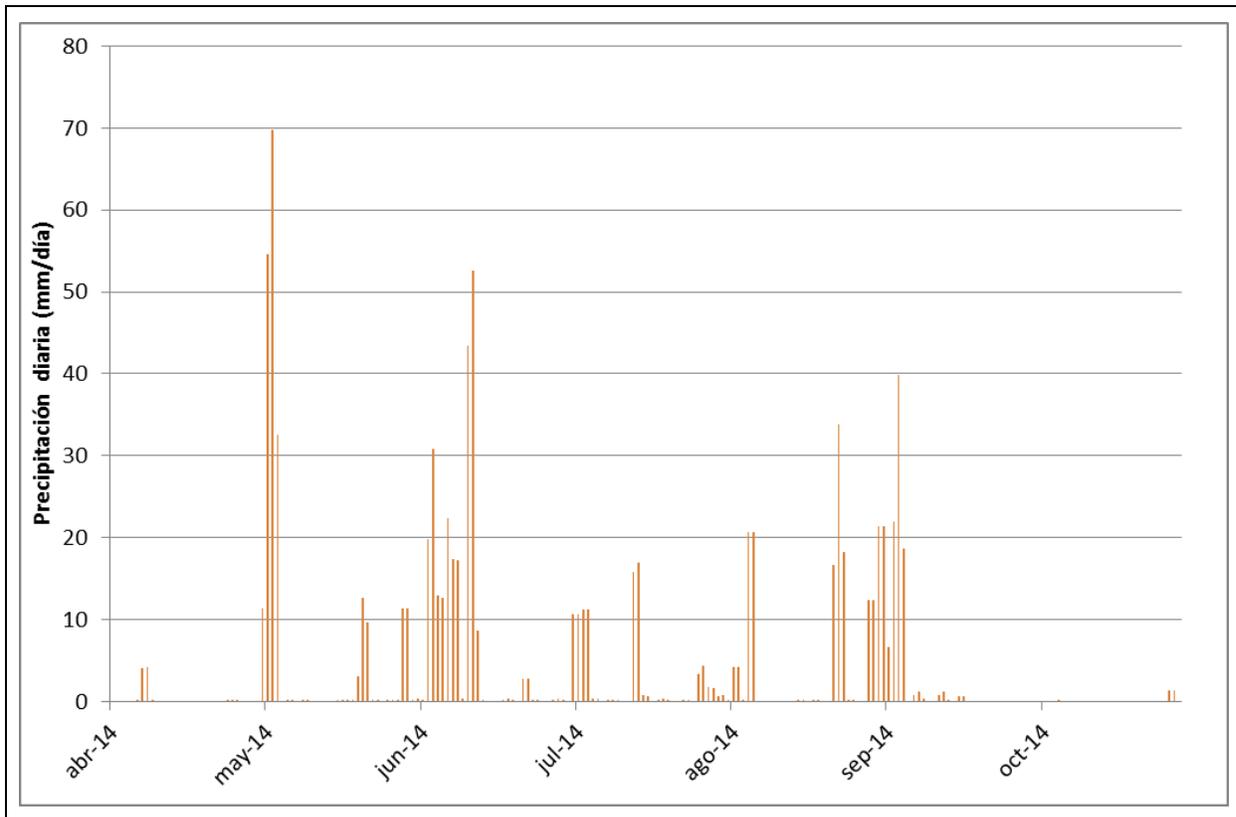
Fuente: www.hannachile.com

6.4.5 Registros de precipitación

Se estima que la única variable meteorológica que deberá controlarse es la precipitación. El monitoreo de las precipitaciones se realizó indirectamente utilizando la estación de monitoreo perteneciente a Dirección Meteorológica de Chile “General Freire, Curicó Ad.” (Código nacional 340031), la que tiene información en tiempo real e histórica. Las precipitación acumulada cada 24 horas son mostradas en la Figura 6-17. En la Figura 6-18 se presenta la ubicación de la estación con respecto al proyecto, la estación se encuentra a menos de 22 Km del lugar de las pruebas.

El registro de precipitaciones muestra un evento intenso pero breve a comienzos de mayo. Por otro lado, ocurrieron precipitaciones importantes durante la primera mitad de junio. Finalmente se aprecia un evento de precipitaciones de menor intensidad que el anterior hacia finales de agosto y comienzos de septiembre.

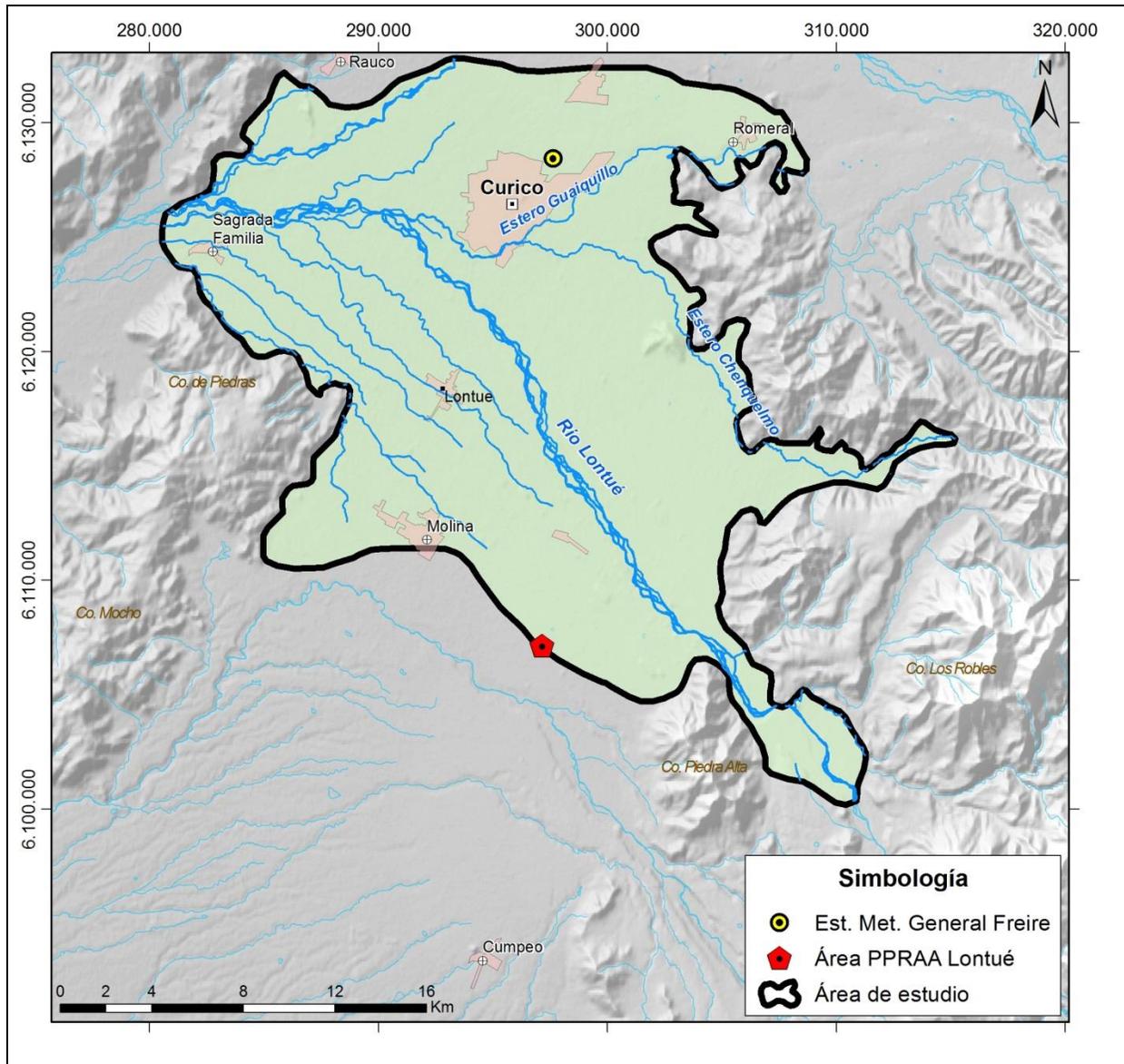
Figura 6-17: Pp. acumulada cada 24 horas en estación General Freire, Curicó Ad.



Fuente: Elaboración propia

Se estimó que la evaporación no influirá en el desarrollo de las pruebas debido a que su magnitud dentro del sistema de infiltración será reducida. El decantador y la piscina de infiltración son las superficies susceptibles a evaporar, sin embargo la suma de sus áreas (453 m²) no es suficiente para generar un flujo considerable de evaporación. Se estima que la evaporación será menor a 0,01 L/s considerando una tasa promedio de 1,8 mm/d.

Figura 6-18: Estación de la DMC usada para el monitoreo de la precipitación



Fuente: Elaboración propia
Coordenadas UTM (Datum WGS84 H19S) de PPRAA Lontué E: 297.151 y N: 6.107.138

6.4.6 Sistema de medición por telemetría

El sistema de telemetría utilizado fue un kit marca Wisebox compuesto por los elementos indicados en la Tabla 6-7 y servicio de plataforma ofrecido por WiseAcces.

Tabla 6-7: Elementos que componen el Kit Wisebox

Producto	Descripción	Part Number	Udds.
Wisebox	WiseBox TC1 con antena interna, sin DB9.	WBTC1	1
Cable	Cable de power 100 cm rojo-negro punta estañada.	ACPWR-C100	1
Módulo	Convertor RS485-RS232	ACADP-485	1
Gabinete	Gabinete plástico PRG352/1. Riel din, prensaestopas, bornes 14.	ACGAB-352	1
Resistencia	R 250 ohm	ACVAR-R250	2

Fuente: Cotización de Wise access

Las características del servicio de Wise Access fueron:

- Presentación de datos en tiempo real y datos históricos,
- Dashboard con gráficos, tablas, diagramas, cartas Gantt, relojes, fotografías, documentos, mapas, etc.,
- Interfaz Google Maps,
- No requiere software especial instalado en el PC del usuario,
- Almacenamiento de datos históricos de por vida,
- Número ilimitado y múltiples perfiles de usuario (consulta, operador, etc.),
- Número ilimitado de accesos y reportes.

El producto se presenta en la Figura 6-19 y en el catálogo se incluye en el Anexo L.

Figura 6-19: Sistema de telemetría



Fuente: <http://espana.wiseaccess.la/documentos.html>

6.5 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS

El presente acápite presenta los costos asociados a la construcción y de equipos de monitoreo del proyecto piloto de recarga artificial y el valor unitario de agua a infiltrar (\$/L de agua infiltrada).

Se debe considerar que los valores presentados corresponden a un proyecto de investigación y por lo tanto no son representativos en el caso que se implemente un proyecto de recarga artificial propiamente tal. Lo anterior se debe a que los costos asociados a un proyecto de infiltración, ya sea a nivel predial o industrial, debiesen ser menores, principalmente en lo relativo al monitoreo (perforación de pozos y equipos de medición).

Para el presente proyecto, los costos se dividen en: 1) costos de inversión y 2) costos de instrumentación. El primero de ellos considera la perforación de pozos y la construcción de obras civiles. La Tabla 6-8 presenta su detalle.

Tabla 6-8: Costos de inversión PPRAA Lontué

Tipo de obra	Metros perforados	Costo total (\$)
Limpieza sector de emplazamiento de obras	-	1.071.000
P. Observación 1 (LO-01)	25	6.742.838
P. Observación 2 (LO-02)	15	6.742.838
Pruebas de bombeo	-	3.852.030
Obras Hidráulicas	-	8.460.244
Total (IVA Incluido)		26.868.949

Respecto a las obras civiles, éstas consideran la construcción de: bocatoma, canal de aducción, decantador, revestimiento de canal y decantador, cajón aforador y piscina de infiltración (ver detalle en sección 6.3). Según lo mostrado en la tabla precedente, el ítem perforación de pozos más el desarrollo de las pruebas de bombeo, corresponde al 65% del total de los costos de inversión del proyecto. A su vez las obras hidráulica involucran el 31% de los costos de inversión.

Los costos de instrumentación del proyecto piloto corresponden a los equipos utilizados para medir las variables relevantes de monitorear para el correcto funcionamiento de un proyecto de investigación. Además considera la telemetría contratada para monitorear en línea variables críticas de operación y su instalación (ver sección 6.4.6). La Tabla 6-9, presenta su detalle. Se debe mencionar que el turbidímetro es el equipo más caro, debido a que fue necesario utilizar un modelo que permitiera medir en línea y que fuera compatible con los equipos de telemetría. En el mercado existen equipos de mucho menor costo, que realizan mediciones puntuales.

Tabla 6-9: Costos de instrumentación PPRAA Lontué

Equipo	Variable monitoreada	PU (\$)	Cantidad	Costo total (\$)
Sensor de niveles hidroestático marca LEEG	Altura en vertedero	410.550	2	821.100
Turbidímetro Solitax Marca Hach	turbiedad	4.782.971	1	4.782.971
Transductor de presión marca HOBO	Nivel en pozos	294.224	4	1.176.896
Cable de comunicación	Traspaso de datos de nivel	125.592	1	125.592
Telemetría: Sistema Wise Access	Telemetría	2.149.075	1	2.149.075
Telemetría: Tarjeta de datos	Telemetría	128.000	1	128.000
Telemetría: B&V electricidad (Instalación)	Telemetría	309.400	1	309.400
Total (IVA Incluido)				9.493.034

El costo total asociado a la construcción del proyecto, considerando inversión y equipos de medición es de \$37.432.983, de los cuales el 25% corresponde a costos de instrumentación y un 72% a inversión.

Para obtener un valor referencial del valor del litro de agua a infiltrar, se puede calcular utilizando el caudal máximo sostenible infiltrado durante la operación del proyecto, siendo éste 26,5 L/s (ver sección 7.2). Ver detalle en Tabla 6-10:

Tabla 6-10: Valor referencial de agua infiltrada

Total (IVA Incluido) (\$)	37.432.983
Q máximo infiltrado (L/seg)	26,50
Costo \$(/L/seg infiltrado)	1.412.565

7 REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO

Posterior a la construcción de los pozos de infiltración y monitoreo, se procedió a realizar una prueba de bombeo de gasto variable y otra de gasto constante en el pozo LO-01, con la finalidad de determinar las características hidráulicas del acuífero (Permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S)) y la capacidad que tiene el pozo de extraer agua del acuífero.

Durante los días 29 y 31 de julio se realizó la prueba de gasto variable con 3 etapas (8, 12 y 16,5 L/s) y la prueba de gasto constante (16 L/s).

El bombeo se efectuó con una bomba sumergible marca Tecson dispuesta a 20 m de profundidad. El nivel estático antes de iniciar las pruebas se encontraba a 9,15 m de profundidad.

Durante las pruebas se registraron las variaciones de niveles en el mismo pozo de bombeo (LO-01) y en el otro pozo de observación (LO-02). Adicionalmente, se ha realizado un seguimiento al nivel del acuífero en el sector, con mediciones semanales a partir del 11 de abril de 2014, es decir, con una antelación aproximada de 3 meses y medio previo a la prueba (ver sección 7.2.3). El rango de las mediciones de profundidad del nivel de la napa se encuentra para las norias N1, N2, N3 y N4 entre 4,15 y 7,53 m. Las norias N1, N2, N3 y N4 se ubican a una distancia de 250, 262, 531 y 525 m del pozo de bombeo LO-01.

Cabe señalar que en el pozo LO-01 se da una situación particular, en la que se aprecia que cae constantemente un flujo de agua desde un nivel superior al nivel donde se encontró el acuífero (9,22 m medido el 30 julio). Lo anterior, se puede interpretar como la existencia de un acuífero colgado, que producto de la construcción del pozo (ranurado en ambos acuíferos) y por la diferencia de carga hidráulica, sus aguas fluyen desde el acuífero superior al inferior. Para mayor detalle ver el acápite 6.2.3 correspondiente a la filmación del pozo. Esta caída de agua que se establece en el pozo, produce una zona de turbulenta dentro de él, por lo que las mediciones de niveles medidas manualmente con el pozómetro difieren de las mediciones realizadas con el transductor, siendo éste último el más confiable en este caso y el que se utilizó para los análisis de las pruebas.

7.1.1 Análisis de la prueba de bombeo

7.1.1.1 Prueba de gasto variable

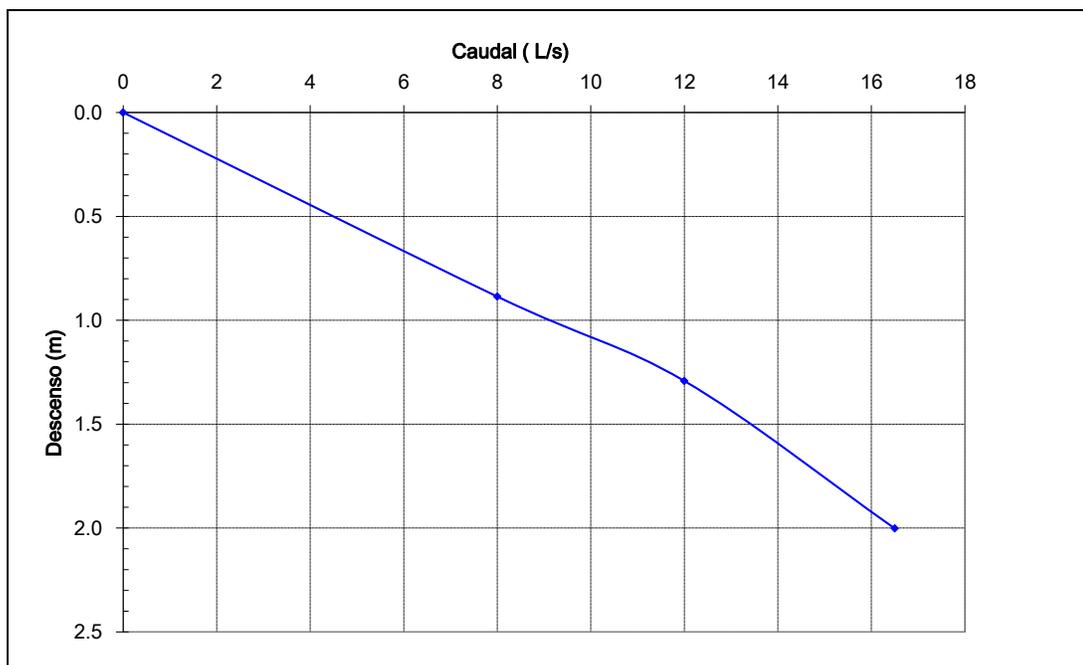
La prueba de gasto variable (PGV) consistió en bombear el pozo LO-01 en tres etapas consecutivas, con un caudal determinado en cada una de éstas. Los caudales extraídos en la prueba fueron 8, 12 y 16,5 L/s. El ensayo de recuperación se efectuó consecutivamente al último caudal y consistió en medir la recuperación de niveles una vez que se detuvo el bombeo.

Los niveles registrados a lo largo de la PGV se presenta en la Figura 7-2. Los datos se presentan en el Anexo M. A partir de los últimos niveles registrados se esbozó la curva de agotamiento del pozo (ver Figura 7-1). La estratigrafía del pozo sugiere que corresponde a un acuífero libre, sin embargo el resultado de la curva de agotamiento no permite afirmar esta aseveración, ya que el aumento en la tasa de descenso a medida que aumenta el caudal de bombeo es de magnitud menor y por lo tanto su resultado es incierto.

El nivel estático registrado previo al inicio de la PGV fue de 10,46 m. Para los caudales de 8, 12, y 16,5 L/s se registró un descenso máximo con respecto al nivel inicial de 0,89, 1,29 y 2,0, respectivamente. Posterior a la etapa del caudal de 16,5 L/s se realizó la prueba de recuperación, donde se recuperó en un 88% en aproximadamente 180 min.

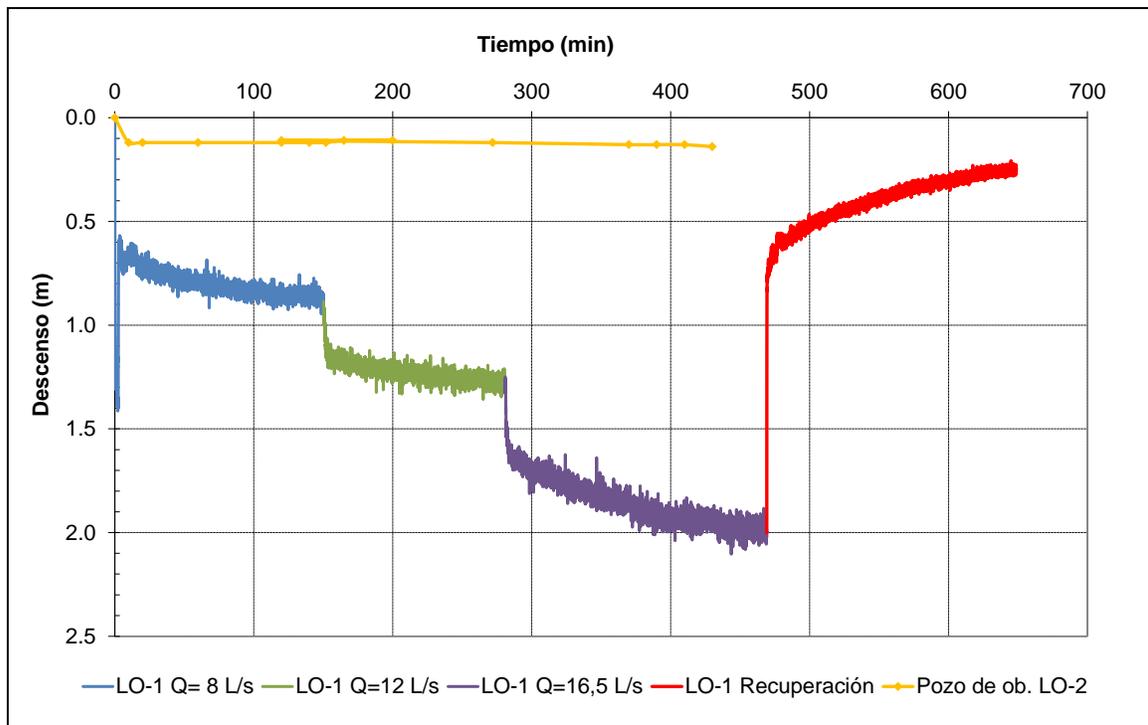
El pozo de observación LO-02, ubicado a 12 metros del pozo LO-01, no presenta variaciones que puedan ser atribuidas a la prueba de gasto variable (Figura 7-2).

Figura 7-1: Curva de Agotamiento PGV pozo LO-01



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-2: Prueba de caudal variable – Pozo PO-1



Fuente: Elaboración propia

7.1.1.2 Prueba de gasto constante

La prueba de gasto constante (PGC) consistió en bombear el pozo con un caudal único y registrar la evolución temporal de los descensos piezométricos en el pozo de bombeo. El ensayo de recuperación se efectuó a continuación de la PGC y consistió en medir la recuperación de niveles una vez que se ha detenido el bombeo. A partir de la PGC se obtienen los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero. La transmisividad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable (Custodio, 1983), o también como la inversa de la resistividad del terreno al paso de agua por el espesor saturado del acuífero, sus unidades son de longitud al cuadrado dividido por el tiempo. A mayor valor de Transmisividad mayor es la capacidad del acuífero de transmitir agua. La permeabilidad se obtuvo a partir del valor de transmisividad y del espesor saturado de agua $H_p = 14,4$ m). El coeficiente de almacenamiento se define como la altura de lámina de agua que se obtiene al deprimir el nivel piezométrico una unidad, siendo el valor de la porosidad eficaz en acuíferos libres y el valor de compresibilidad del terreno sumado al del agua en acuíferos confinados, el coeficiente de almacenamiento no tiene unidades.

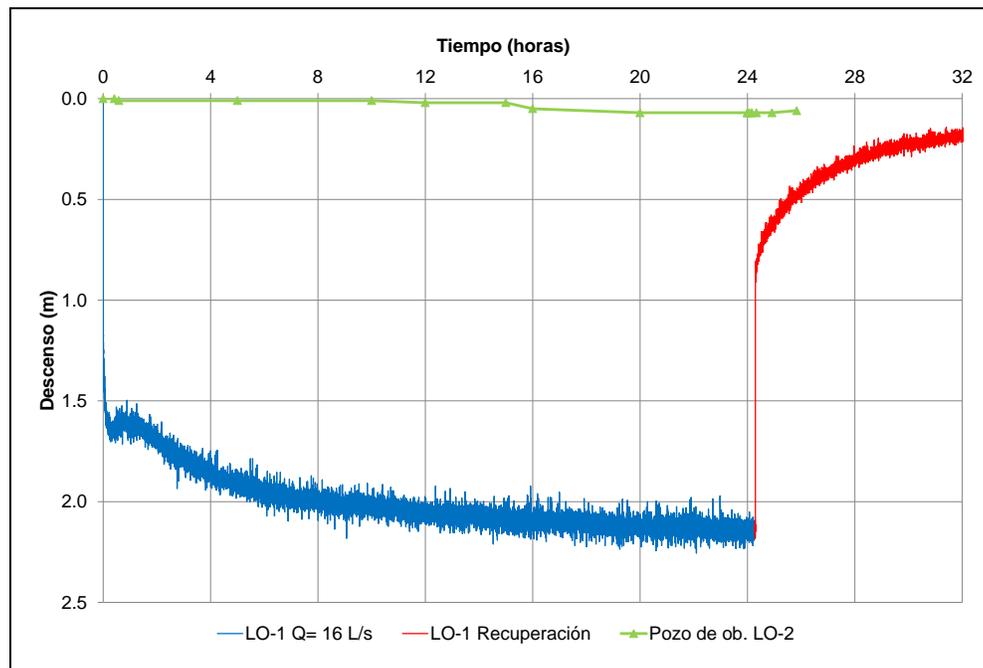
La PGC en el pozo PO-1 se realizó con un caudal de 16 L/s con una duración de 24 horas, mientras que el tiempo de registro de recuperación tuvo una extensión de 8 horas aproximadamente. La prueba se inició con el nivel estático a una profundidad de 10,59 m, nivel que luego de 24 horas alcanzó una profundidad de 12,77 m. En este nivel dinámico, se

alcanzó una depresión total de 2,18 m. Los niveles se muestran de manera gráfica en la Figura 7-3 y los datos de la prueba se presentan en el Anexo M.

La prueba de recuperación se realizó consecutivamente a la PGC y el nivel inicial se recuperó en un 91% después de 8 horas aproximadamente(nivel dinámico 10,78 m).

El pozo de observación LO-02 no alcanza a sentir los efecto de la prueba de gasto constante ni tampoco su recuperación posterior a la detención del bombeo (Figura 7-3).

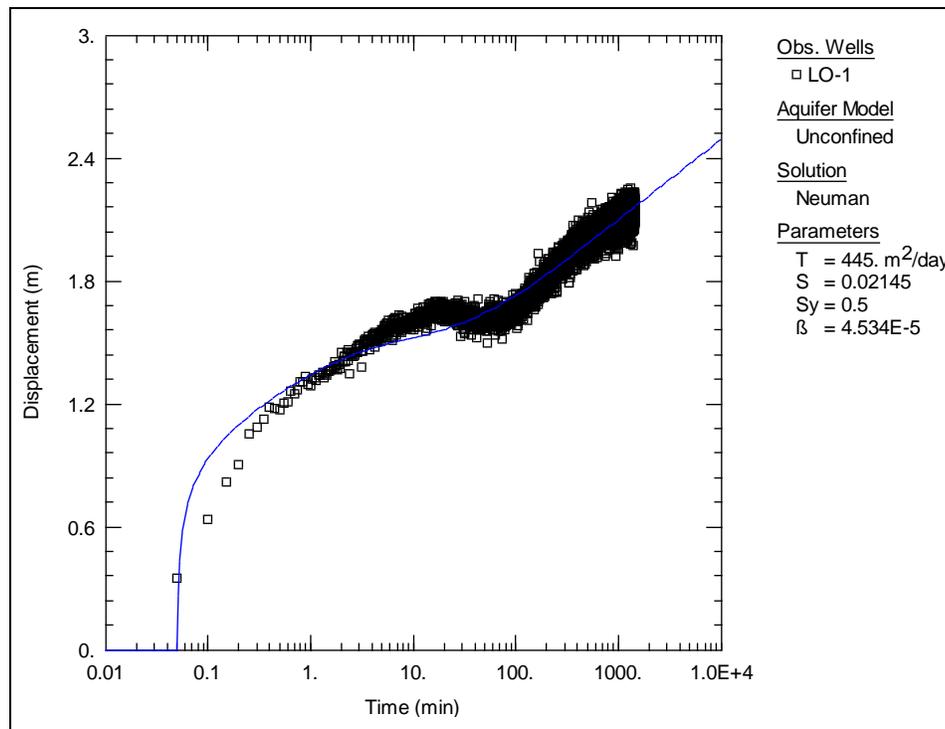
Figura 7-3: Prueba de gasto constante en pozo LO-01



Nota. Elaboración propia

Dado que el pozo LO-01 presenta un ingreso de un caudal importante e indeterminado de agua desde un estrato superior (detectado claramente en la filmación), el análisis de esta prueba de bombeo por los métodos tradicionales resulta poco confiable, ya que no se cumple las hipótesis fundamental que establece que el agua extraída del acuífero proviene exclusivamente del almacenamiento. Sin embargo, y a modo de aproximación se considera que el comportamiento de esta prueba se puede asimilar al comportamiento utilizado por Neuman para pozos en acuíferos libres con drenaje diferido. Entonces, a partir de los datos registrados en la PGC se procedió a estimar los parámetros elásticos del acuífero (Transmisividad T y Almacenamiento S) con el software AQT SOLV versión 4.5 (desarrollado por Glenn M. Duffield, Hydrosolve), a través del método de Neuman para acuíferos libres con respuesta retardada al bombeo. Se obtuvo una permeabilidad de 30,8 m/d, un $T = 445 \text{ m}^2/\text{d}$ y un $S = 2,15 \cdot 10^{-2}$, cuyo ajuste realizado se presenta en la Figura 7-4. Se debe señalar que estos valores son solo referenciales y podrían estar sobreestimados debido al ingreso de un caudal externo e indeterminado.

Figura 7-4: Ajuste de parámetros con los resultados de la prueba de gasto constante



Nota. AQT SOLV versión 4.5

7.1.1.3 Discusión de resultados

Se realizó una prueba de gasto variable el día 29 de julio, midiéndose la recuperación una vez finalizada la prueba. Posteriormente se realizó una prueba de gasto constante con su recuperación, entre los días 30 y 31 de julio de 2014.

La prueba de gasto variable se realizó en 3 etapas, con caudales entre 8 y 16,5 L/s, los que alcanzaron depresiones entre 0,89 y 2,0 m, respectivamente.

La prueba de bombeo de gasto constante se realizó para un caudal de 16 L/s con una duración de 24 horas, estabilizando sus niveles con una depresión de 2,18 m. A partir de los registros de esta prueba, por medio del método de Neuman se obtuvo un $T = 445 \text{ m}^2/\text{d}$ y un $S = 2,15 \cdot 10^{-2}$.

El valor de permeabilidad obtenido se sitúa dentro del rango 1-500 m/d categorizado por Custodio (1983) como valor permeable, acuífero de regular a bueno y granulometrías en materiales sedimentarios de arena limpia y/o gravas con arena.

El valor de coeficiente de almacenamiento obtenido se aproxima a los valores correspondientes a acuífero libre, de 0,05 a 0,3 según Custodio (1983), por lo que se podría corresponder el valor de la porosidad eficaz con el coeficiente de almacenamiento obtenido.

Aplicando el valor de permeabilidad obtenido en el área de la balsa de recarga se obtenían un valor teórico de infiltración de 200 L/s. Este supuesto representaría sobreestimar la permeabilidad ya que en el pozo de bombeo hay la entrada de un caudal exterior que reduce el caudal efectivo de bombeo, además se está aplicando la permeabilidad estimada en el material del tramo de rejilla del pozo al suelo que se sitúa a 1 metro de profundidad desde la superficie. Por este motivo el caudal de operación de la balsa se obtiene de la “Marcha Blanca” (operación del proyecto a modo de tanteo antes del funcionamiento normal) que se detalla en el siguiente capítulo.

7.2 OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA

7.2.1 Procedimiento de pruebas de infiltración

El objetivo principal de la realización de las pruebas de infiltración es evaluar el desempeño de la infraestructura de infiltración y la respuesta del acuífero producto de la realización de dichas pruebas. Para cumplir con el objetivo se diseñó un completo plan de monitoreo descrito en detalle en la sección 6.4.

Desde el punto de vista de la evaluación de la infraestructura, el principal resultado buscado es el caudal máximo de infiltración, mientras que desde el punto de vista del acuífero es el aumento de los niveles y el tiempo de duración del ascenso. Las pruebas consideran la variación de algunos parámetros de operación dentro de los cuales destacan: caudal de infiltración, tiempo de infiltración y variaciones en las condiciones del entorno (canales cercanos, bombes, etc.). En el caso de que existan factores externos que no puedan ser regulados y con potencial afectación de parámetros, se intentará realizar las pruebas cuando estos factores permanezcan constantes.

Como primera actividad se considera la puesta en marcha del sistema de infiltración, junto con los equipos de medición y de telemetría. Para lo cual se realizarán una serie de pruebas de corta duración y de caudales pequeños. Las pruebas de infiltración se realizarán mediante un pozo de inyección y serán operadas por personal de GeoHidrología.

Cabe señalar, que la duración de las pruebas se definió de acuerdo a los resultados obtenidos en terreno, se debe recordar que son pruebas piloto y por tanto se desconocen los parámetros de operación antes de comenzar a operar el sistema. Cada prueba de infiltración tendrá criterios de detención de la prueba, los cuales se describen a continuación:

- Criterios de detención (basta que se dé uno de ellos)
 - Afloramiento en el pozo de inyección,
 - Afloramientos en los sectores aledaños,
 - Turbidez mayor a 10 NTU, medido justo antes del ingreso del agua al pozo de infiltración;

Aunque durante la operación del proyecto no hubo episodios de contaminación al acuífero GeoH contaba con el siguiente control de contingencias:

1. Cierre de toma y paralización de la prueba mientras dura el control de la contingencia.
2. Toma de muestra de agua desde los pozos de observación para análisis de contaminantes específicos. Se considera aumentar el monitoreo de mensual a semanal, hasta que dure la contingencia.
3. Basados en los análisis químicos evaluar la necesidad de realizar medida de contingencia. Decisión se tomará en conjunto con la CNR,
4. Aplicación de medida de contingencia si el análisis anterior lo indica. Se considera dos medidas de contingencia que pueden ser aplicadas de manera excluyente.
 - a. Bombeo de agua contaminada desde el acuífero. Desde pozos de observación. Se bombeará un volumen tal que permita disminuir la concentración del contaminante a niveles aceptables. Los valores objetivos serán definidos en conjunto con la CNR.
 - b. Inyección de agua limpia hacia el acuífero. Se inyectará agua limpia a través de los pozos de observación, dado que la respuesta del acuífero será más rápida que infiltrar a través de la balsa. El objetivo de la inyección es generar la dilución del contaminante, la inyección se realizará hasta que permita disminuir la concentración del contaminante a niveles aceptables. Los valores objetivos de la mitigación serán definidos en conjunto con la CNR.
 - c. Se debe señalar que la elección de la medida de contingencia y su diseño definitivo será realizado en función de los antecedentes que serán recabados durante la construcción de las obras (pruebas de bombeo) y del funcionamiento mismo de la prueba de infiltración, por lo que no es posible realizar el diseño en esta etapa del proyecto.
5. Reanudación de las pruebas de infiltración.

7.2.2 Descripción de las pruebas

En este apartado se realiza una descripción y análisis de la operación del PPRAA en Lontué entre el 5 y el 14 de noviembre de 2014. La operación consiste en el monitoreo del caudal de entrada al sistema en conjunto con el registro de la altura de agua en la balsa de infiltración y del nivel freático en los pozos de observación. A partir de estos datos se compara el caudal de entrada con la variación de volumen en la balsa de infiltración y con los niveles de agua de los pozos de observación. De esta forma se estima el volumen de agua ingresada en el acuífero y el impacto de ésta en los niveles del mismo.

La operación del proyecto empezó el 1 de octubre y se realizaron dos pruebas de operación para determinar los rangos de funcionamiento del sistema. El resumen de las pruebas se puede observar en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Resumen de pruebas realizadas previas a la operación

Nº	Caudal Entrada piscina infiltración*	Fecha Inicio	Duración (días)	Observación
1	0	01-10	4	Prueba realizada con el objetivo de determinar la influencia de la infiltración del agua pasante del canal en el sistema construido.
2	Variable (Mínimo: 5 L/s; máximo: 26,5 L/s)	05-10	10	Marcha Blanca: Funcionamiento general del sistema de infiltración de acuerdo a lo diseñado. Esta prueba permitió determinar los rangos de operación del sistema.

* Caudal medido en vertedero del cajón aforador, el que se encuentra conectado mediante telemetría

Fuente: elaboración propia.

A partir de la “Marcha Blanca” se decidió realizar la operación con un caudal variable comprendido entre los 10 L/s y los 25 L/s. Esto es debido a que las labores de riego en el predio no permitieron asegurar un caudal continuo en el canal como para imponer caudales permanentes de infiltración por un periodo mayor a 24 horas.

El funcionamiento del proyecto se paralizó entre el 17 y el 24 del mismo mes por disponibilidad hídrica por la demanda de agua de regadío. Esta detención en el agua de entrada separó la actividad entre el rango de fechas analizado en dos etapas distintas, la primera entre el 5 y el 17 de octubre, y la segunda entre el 24 y el 30 de octubre.

7.2.3 Caudal de infiltración y análisis de niveles

Para calcular el caudal de infiltración se realiza un balance en el que se monitorea el caudal de entrada en el vertedero y la tasa de variación del volumen de agua de la balsa de infiltración, calculada a partir de la variación de altura de agua en la balsa de infiltración. La tasa de infiltración en la balsa, Q_{inf} en L/s, se calcula como:

$$Q_{inf} = -\frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{ev}$$

dónde:

ΔV = incremento de volumen en la balsa de recarga (L).

Δt = incremento de tiempo (s).

Q_{ev} = caudal de entrada en el vertedero (L/s).

En la Figura 7-5 se muestra la evolución de los caudales de infiltración y entrada en el vertedero además del nivel en la balsa de infiltración. Como se puede observar la diferencia

entre los valores de Q_{inf} y Q_{ev} controlan la altura del nivel en la balsa, cuando la infiltración es menor a la entrada de agua se produce un aumento en el nivel de agua y viceversa.

Otro aspecto relevante de la Figura 7-5 es que la diferencia de caudal entre la entrada desde el vertedero y el caudal de infiltración es mayor es la comparación de la altura del nivel de agua en la balsa con la tasa de infiltración. En la Figura 7-5 se marcan los momentos en que el nivel de agua tiene poca variación con círculos numerados. En el círculo N°1 corresponde a una tasa de infiltración de 20 L/s con un nivel de 30 cm, en el círculo N°2 la infiltración es de 12 L/s para 10 cm de nivel de agua y en el N°3 se observa una infiltración de 17 L/s con una altura del nivel de agua de 33 cm. Comparando la infiltración en el círculo N°1 con el círculo N°3 se observa como la infiltración con respecto al nivel de agua en la balsa ha disminuido levemente. A pesar de ser valores cercanos y de los posibles errores debidos a la precisión de los equipos esto sería un comportamiento esperable debido a la colmatación del fondo de la balsa con finos aportados por el agua del canal.

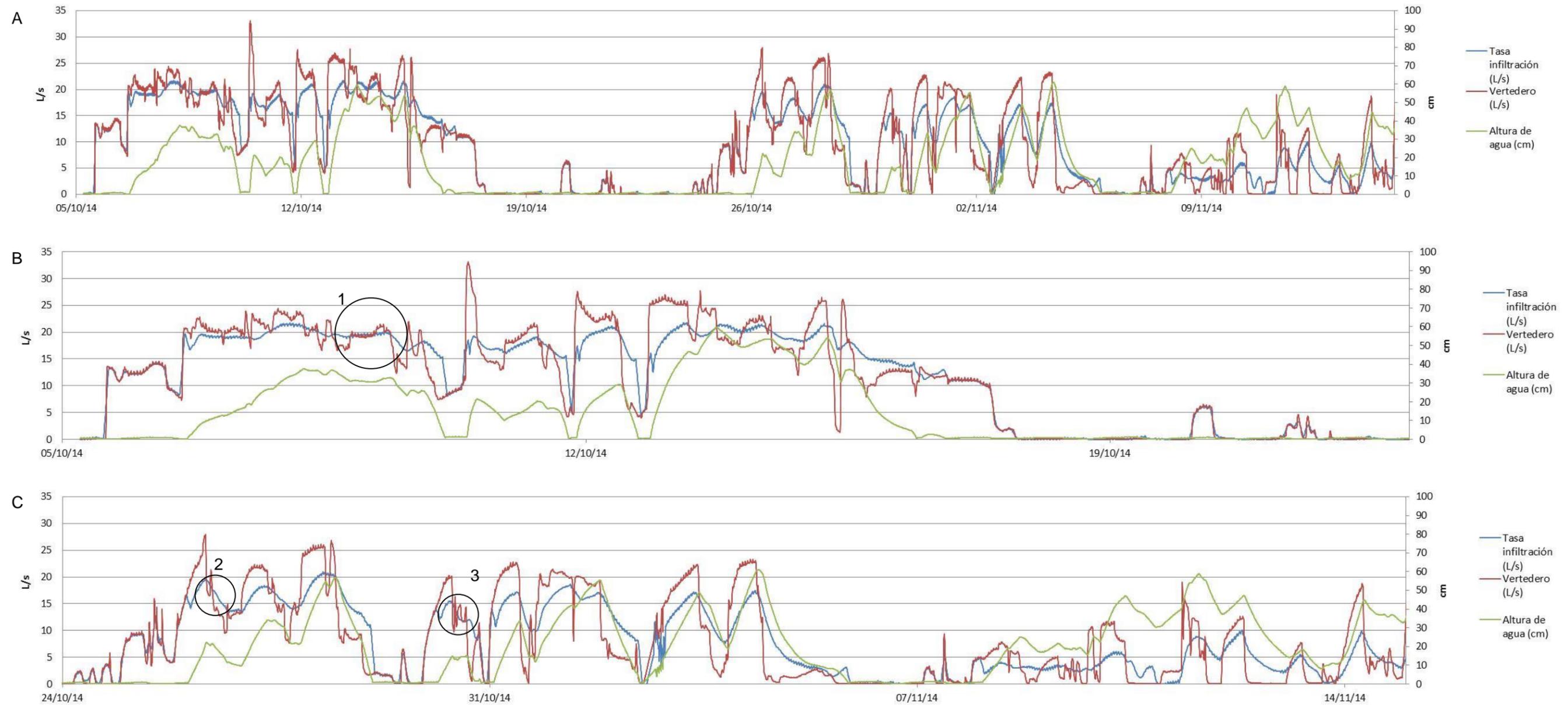
En la Tabla 7-2 se presenta el promedio de los caudales de entrada a la balsa e infiltración en cada uno de los periodos y los volúmenes correspondientes a la integración de los caudales. En los dos periodos se infiltraron del orden de 23.000 m³.

Tabla 7-2: Resumen de los caudales y volúmenes de entrada e infiltración.

Duración	Q vertedero prom. (L/s)	Q infiltrado prom. (L/s)	V vertedero total (m ³)	V infiltrado total (m ³)
12 días etapa 1	16,0	16,0	17.625,0	17.626,0
21 días etapa 2	8,0	7,8	18.541,0	18.704,0

Los datos de operación obtenidos se presentan en el Anexo Q.

Figura 7-5: Evolución del caudal de entrada en balsa de recarga, tasa infiltración y nivel de agua en balsa infiltración. A - Periodo completo de operación, B - Etapa 1 y C – Etapa 2.



Para caracterizar la variación natural del nivel freático se monitorearon las norias existentes en el predio desde abril de 2014. En la Figura 7-6 se presenta la evolución de los niveles en las norias y en la Figura 7-7 la ubicación respecto a los pozos de observación LO-01 y LO-02. Los niveles de las cuatro norias varían de forma prácticamente paralela, en el inicio del monitoreo el nivel se encuentra entre los 4 y 5 m de profundidad y al final de monitoreo el nivel aumentó hasta los 1 y 2 metros de profundidad. Como se puede observar los niveles presentan dos aumentos considerables: el primero de ellos registrado a contar del 12 de junio y el segundo en la primera quincena de octubre. El primer aumento de nivel corresponde a un evento de lluvia registrado el 11 de junio en la estación pluviométrica “El Guindo” de la DGA en el que precipitaron 69 mm en un día, el segundo aumento de nivel corresponde al inicio del regadío en los cultivos extensivos de la zona y en el predio donde se encuentran las norias. Para poder determinar el efecto real de la infiltración en la balsa se corrigió el nivel de los pozos de observación LO-01 y LO-02 con la variación observada en las norias en el mismo periodo de tiempo. La corrección se realiza restando al registro de los pozos de infiltración las variaciones de un pozo guía, supuestamente no influenciado por las infiltraciones, a contar de la fecha de inicio de los registros de los pozos de observación.

Figura 7-6: Evolución de niveles en los pozos de observación y en las norias del predio.

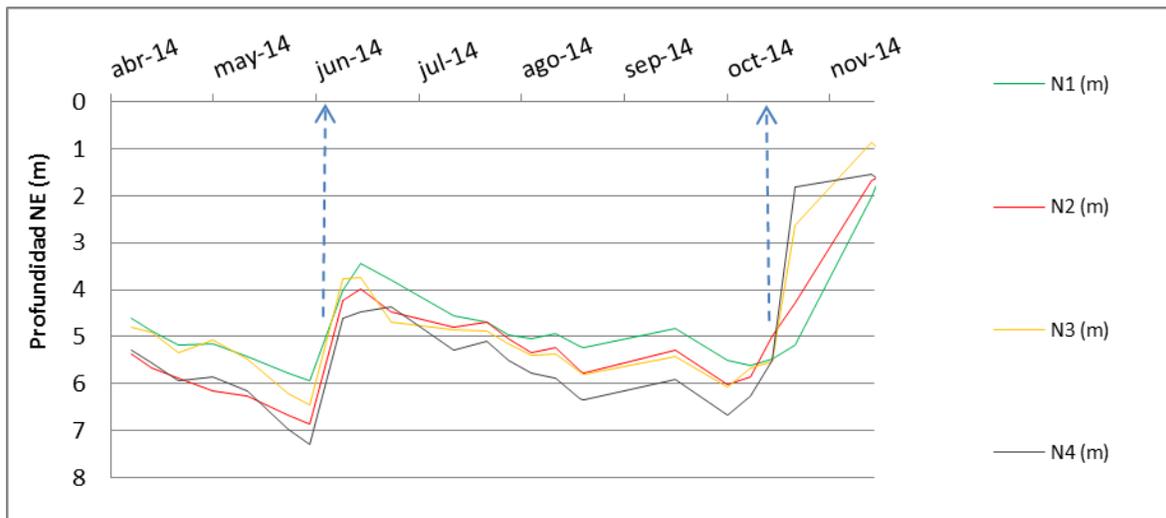
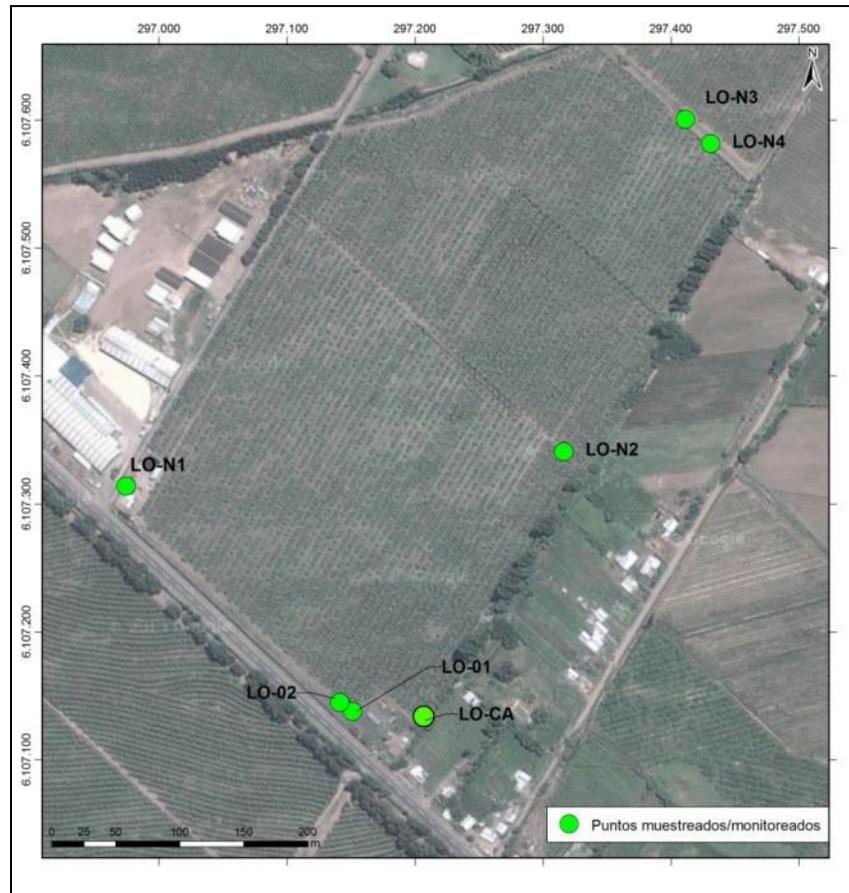


Figura 7-7: Ubicación de Puntos Muestreados



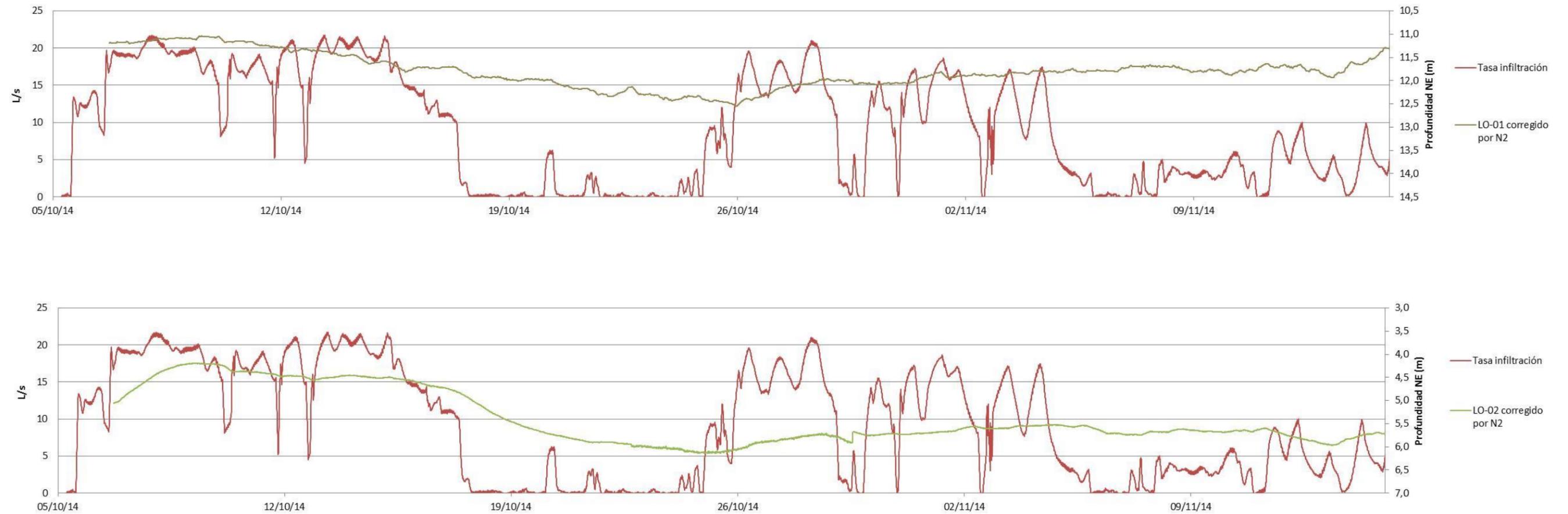
Nota. Elaboración propia

Para poder determinar el efecto de la operación de infiltración de la balsa en los pozos LO-01 y LO-02 se compara la variación de los niveles corregidos de estos con el caudal de infiltración de la balsa (Figura 7-8).

La diferencia de las profundidades de los niveles entre los pozos LO-01 y LO-02 es de alrededor de 6 m aún y estar a menos de 20 m de distancia. Esto puede ser explicado por la existencia de acuíferos “colgados” en niveles superiores que en conjunto con la alta conductividad hidráulica generan flujos dentro de los mismos pozos. Lo anterior podría generar niveles ligeramente distintos a los del acuífero circundante.

En la comparación entre los caudales infiltrados y los niveles desarrollados en los pozos (Figura 7-8) se aprecia que el pozo LO-02 responde a las infiltraciones desarrolladas en las dos etapas de recarga teniendo una variación máxima de nivel de 2,0 m. Para el caso del pozo LO-01 la respuesta muestra una variación de niveles alrededor de 1,50 m.

Figura 7-8: Evolución del nivel estático de los pozos de observación LO-01 y LO-02 corregidos a partir de la noria N2, y caudal de infiltración de la balsa.



7.2.4 Calidad química

El presente capítulo presenta un análisis temporal de la evolución de la calidad química de las aguas subterráneas y de las aguas a infiltrar, con el propósito de evaluar los eventuales cambios en la calidad fisicoquímica del acuífero producto de las pruebas de infiltración realizadas durante la operación del proyecto.

El análisis se realiza según 3 criterios: 1) parámetros físico-químicos, 2) algunos parámetros más relevantes y su comparación con la NCh 1333 y 3) composición química de las aguas.

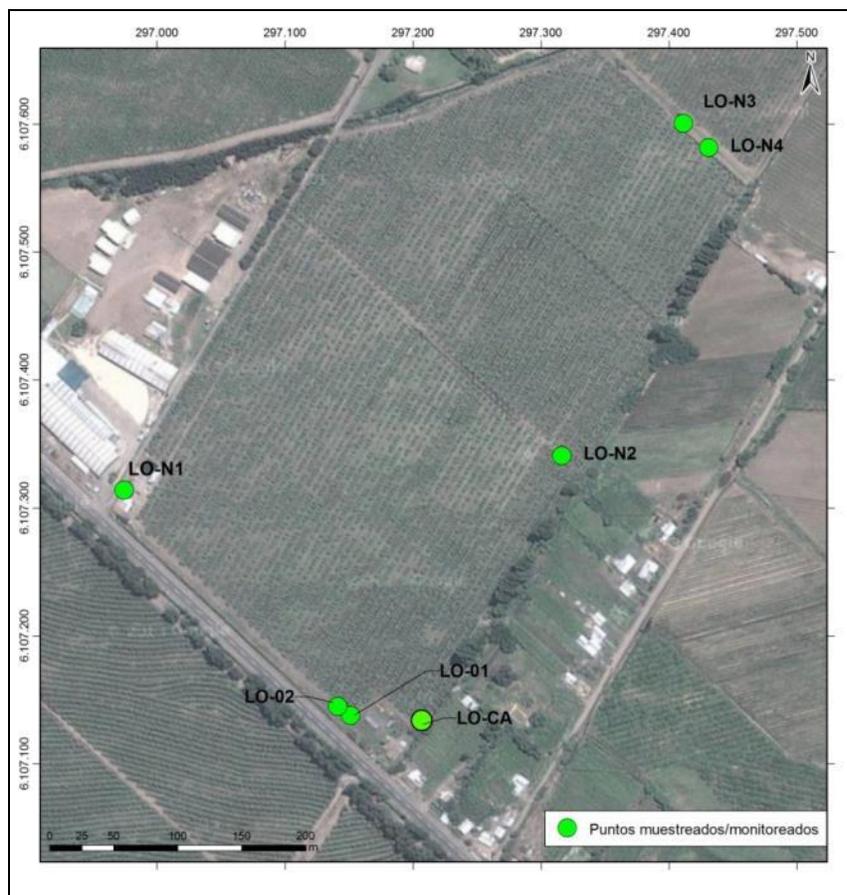
Se monitorearon a lo largo del tiempo distintos puntos de muestreo, realizando diferentes análisis de parámetros en cada uno de ellos, siendo éstos los que se presentan en la Tabla 7-3. Su ubicación geográfica se presenta en la Figura 7-9.

Tabla 7-3: Puntos de muestreo Lontué

Punto de muestreo		ID	Tipo de muestra	Tipo de muestreo
Pozo de observación 1	LO-01	LO-01	Agua subterránea	Set B PFQ
Pozo de observación 2	LO-02	LO-02	Agua subterránea	PFQ
Canal alimentador	Canal interno predio	LO-CA	Agua superficial	PFQ
Agua a infiltrar	ubicada en el cajón aforador, justo antes de entrar a la piscina de infiltración, en figura se superpone a LO-CA	LO-i	Agua superficial	Set B PFQ
Noria 1	Norias ubicadas dentro de predio	LO-N1	Agua superficial	PFQ
Noria 2		LO-N2	Agua superficial	PFQ
Noria 3		LO-N3	Agua superficial	PFQ
Noria 4		LO-N4	Agua superficial	PFQ

Fuente: Elaboración propia, Nota: Todas las muestras fueron tomadas con bailer

Figura 7-9: Ubicación de Puntos Muestreados



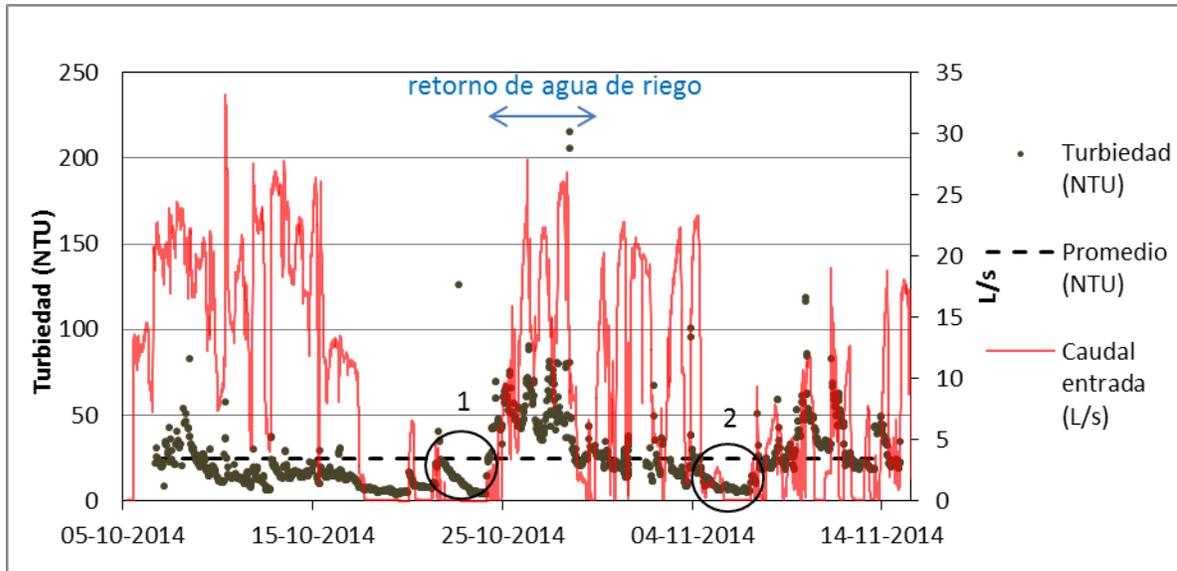
Nota. Elaboración propia

7.2.4.1 Parámetros físico-químicos

En la Figura 7-10 se presentan los valores de turbiedad y caudal del agua en el vertedero en el periodo de operación de la balsa. El valor promedio de la turbiedad es del orden de 25 NTU. Como se aprecia los valores de turbiedad son mayores en el inicio de los periodos de entrada de caudal por el arrastre del material particulado sedimentado en periodos de no entrada de agua. En la evolución de la turbiedad se observa un periodo con valores más elevados que el promedio a finales del mes de octubre, esto es debido a que el agua de entrada en la balsa provenía del retorno del riego de los predios ubicados al este del proyecto.

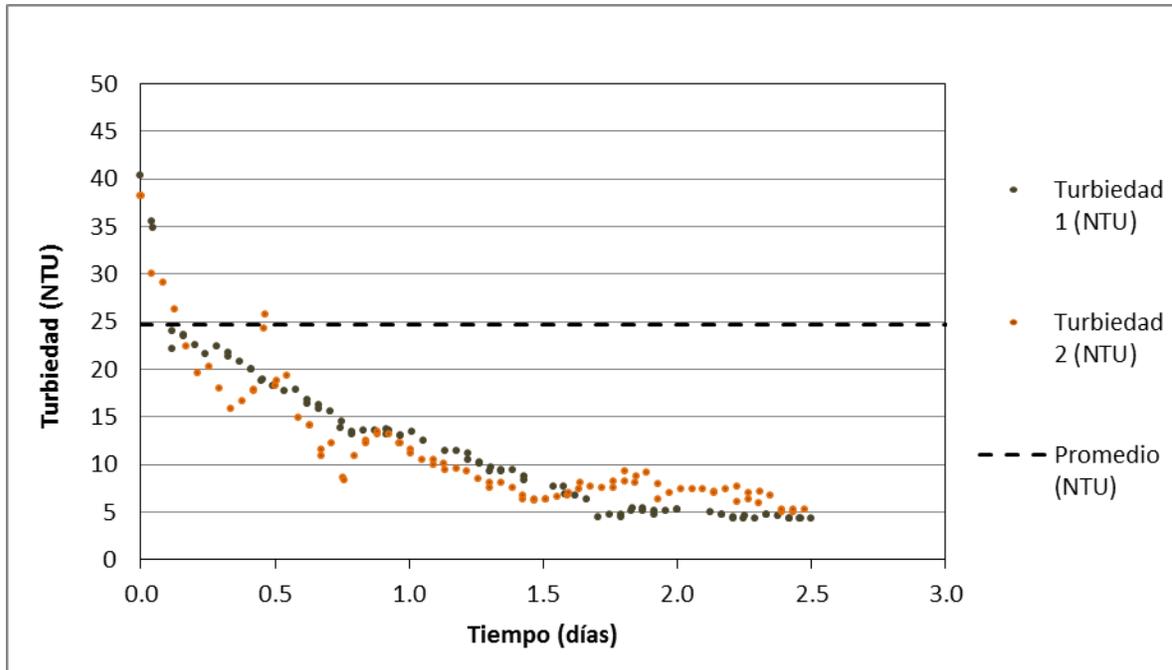
Los valores de turbiedad en general estuvieron por sobre lo recomendado (10 NTU) la mayor parte del tiempo. Sin embargo, no se realizaron cortes de operación debido a lo acotado del tiempo para realizar las pruebas.

Figura 7-10: Valores de Turbiedad y caudal de entrada en el vertedero.



En la Figura 7-12 se analizan dos eventos de decaimiento de la turbiedad cuando no entra caudal en el vertedero, estos dos eventos están señalizados en la Figura 7-10 con dos círculos numerados. Durante estos periodos se aprovechó de realizar un análisis sobre ellos acerca de los tiempos necesarios para disminuir turbiedad. Esta disminución se produce por decantación en el dispositivo de aforo en el que se acumulan aproximadamente 1,2 m³ de agua y durante estos episodios no presentaron flujo. Como se observa, son necesarios entre 1 y 1,5 días para disminuir la turbiedad a 10 NTU, y entre 2 y 2,5 días para llegar a los 5 NTU. Lo anterior sugiere que, debido a la gran variación de los tamaños de partícula y a su comportamiento con respecto a la decantación, se debiesen realizar pruebas de laboratorio con las mismas aguas del canal para el dimensionamiento de las obras.

Figura 7-11: Decaimiento de la Turbiedad en agua estancada en el vertedero.



El caudal de infiltración en la balsa está relacionado con la altura de la columna de agua de la balsa, para ver esta relación se calculó la razón “caudal de infiltración/altura” con unidades de $L/s \cdot cm$, esta razón se grafica en la Figura 7-12 juntamente con la altura de agua en la balsa. Se observa como el valor de la razón disminuye con el tiempo, y en particular se observa como la capacidad de infiltración es significativamente menor en el final de la operación (mes de noviembre), esto se refleja por la mayor separación entre los valores la razón con los valores de altura de agua en la balsa. Esta menor tasa de infiltración puede relacionarse a la colmatación del fondo de la balsa por la acumulación del material en suspensión del agua de infiltración. En la Figura 7-13 se presenta una prueba de esto en que se tomaron fotografías el día 13 de noviembre con la balsa de infiltración casi vacía. En las fotografías se puede apreciar un sedimento en el fondo que particularmente se aprecia sobre las piedras secas que presentan un recubrimiento de un material fino.

Otro aspecto relevante es que los mayores valores de infiltración no están asociados a valores de columna de agua mayores, como se podría pensar. Esto podría ser debido a que una mayor columna de agua podría provocar una mayor compactación del suelo y por consiguiente una menor permeabilidad.

Figura 7-12: Evolución del ratio caudal de infiltración por altura de agua y valores de altura de agua en la balsa de infiltración.

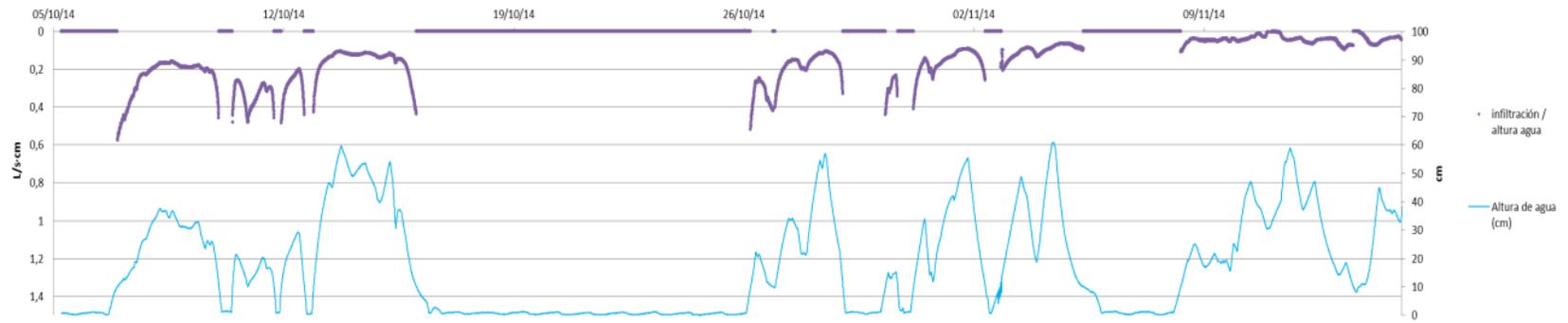


Figura 7-13: Acumulación de Sedimentos en balsa



Los parámetros físico-químicos fueron medidos in situ, periódicamente mediante multiparámetro (ver capítulo 4.5). Los parámetros medidos son pH, conductividad eléctrica (C.E.) y temperatura. Junto con ello se midió de manera continua la turbidez de las aguas, ya que constituye una variable crítica para la operación del sistema. La evolución en el tiempo de estos parámetros, contrastando el período antes, durante y después de efectuar las pruebas de infiltración, se muestra a continuación. En la Tabla 7-4 se resumen los parámetros muestreados, sus resultados y las fechas de la medición.

Tabla 7-4: Resumen de medición de parámetros

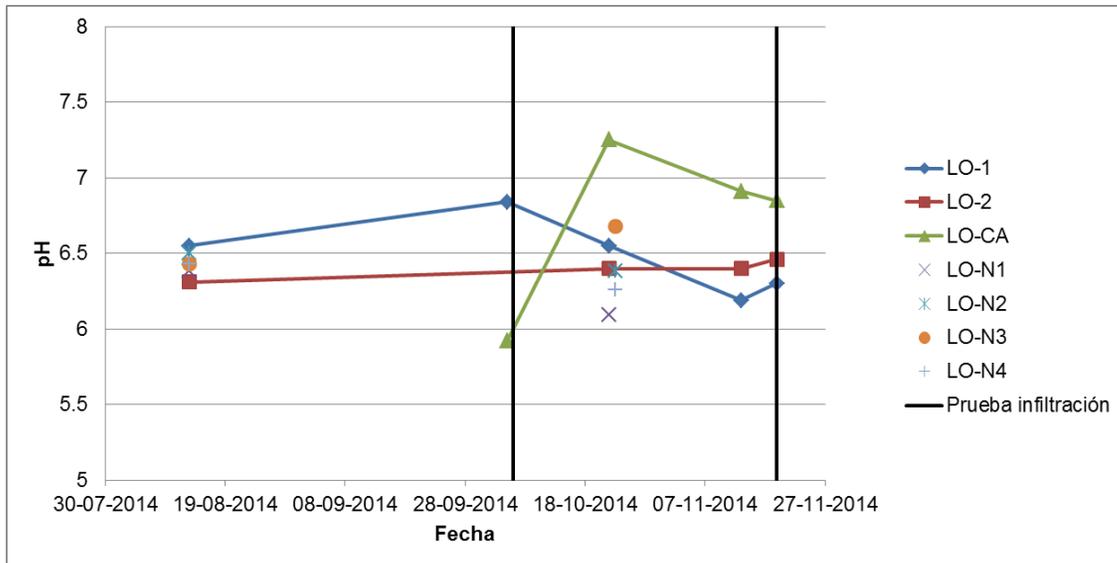
Punto muestreo	Fecha	T (°C)	pH	C.E. (mS)
LO-01	13-08-2014	15,7	6,55	0,40
	05-10-2014	21,6	6,84	0,13
	22-10-2014	18,1	6,55	0,52
	13-11-2014	18,5	6,19	0,36
	19-11-2014	17,2	6,30	0,22
LO-02	05-10-2014	15,2	6,31	1,48
	22-10-2014	17,2	6,40	0,45
	13-11-2014	20,8	6,40	0,45
	19-11-2014	21,6	6,46	0,13
LO-CA	05-10-2014	20,5	5,92	0,34
	22-10-2014	18,5	7,25	0,28
	13-11-2014	29,3	6,91	0,15
	19-11-2014	27,5	6,85	0,11
LO-N1	13-08-2014	17,0	6,38	0,48
	22-10-2014	18,8	6,09	0,55
LO-N2	13-08-2014	15,4	6,50	0,45
	23-10-2014	17,7	6,38	0,77
LO-N3	13-08-2014	15,6	6,43	0,42
	23-10-2014	22,5	6,68	0,38
LO-N4	13-08-2014	15,7	6,43	0,43
	23-10-2014	17,2	6,26	0,65

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el pH del canal alimentador (LO-CA) aumenta en el tiempo, con valores entre 5,9 y 7,2 (Figura 7-14). Por otra parte, el pozo de observación 1 (LO-01) muestra un leve descenso en el pH, al ser comparado antes de la infiltración y 16 días después de comenzado la operación del sistema, sus valores van desde 6,8 hasta 6,6. Las norias 1, 2 3 y 4 (LO-N1 a LO-N4) muestran valores de pH entre 6 y 6,7.

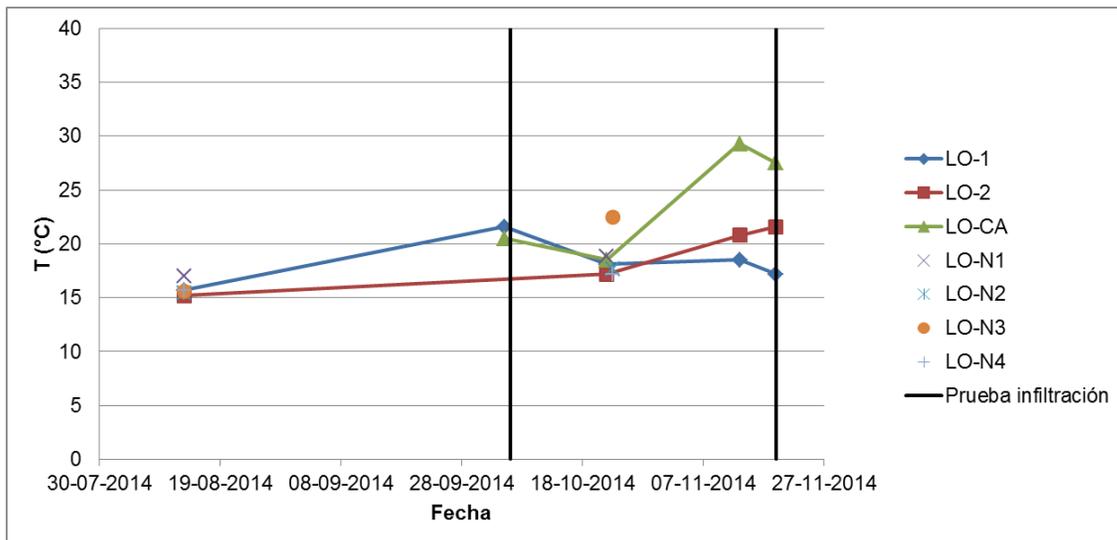
Con respecto a la temperatura, el canal LO-CA presenta valores variables entre 19°C y 29°C (Figura 7-15), mientras que los pozos de observación muestran temperaturas entre 15° y 22° (LO-1 y LO-2), muy parecidas a la temperatura en las norias 1, 2, 3 y 4 (LO-N1, LO-N2, LO-N3 y LO-N3). Las diferencias observadas entre la temperatura de las aguas subterráneas y las aguas superficiales son en general comunes, ya que las aguas superficiales se ven influenciadas por la temperatura ambiental, mientras que las aguas en los pozos y norias presentan menor influencia externa lo que genera una menor variabilidad en la temperatura.

Figura 7-14: Parámetros físico-químicos: pH



Fuente: Elaboración propia.

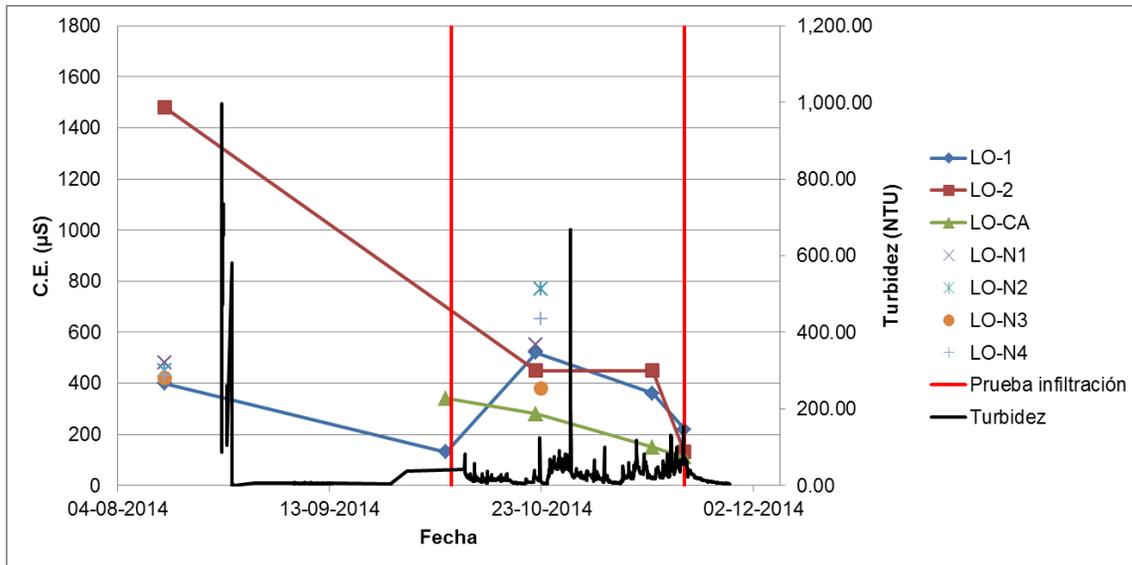
Figura 7-15: Parámetros físico-químicos: Temperatura



Fuente: Elaboración propia.

La conductividad eléctrica del canal (LO-CA) muestra valores variables entre 100 y 340 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Figura 7-16). Por otra parte, el pozo de observación 1 (LO-01) muestra un ascenso en conductividad desde 130 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (antes de las pruebas de infiltración) a 550 (16 días después de comenzadas las pruebas de infiltración). Las norias (LO-N1 a LO-N4) muestran conductividad variable entre 380 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y 770 $\mu\text{s}/\text{cm}$. No se observa una relación entre ambos parámetros y de ellos no se puede asegurar una afectación producto de la recarga artificial.

Figura 7-16: Parámetros físico-químicos: conductividad eléctrica - turbidez



Fuente: Elaboración propia.

7.2.4.2 Parámetros relevantes y normados

La información proveniente de las muestras tomadas antes de comenzar, durante y al finalizar las pruebas de infiltración se presentan en la Tabla 7-5 y Tabla 7-6. La totalidad de parámetros analizados, junto a sus resultados se pueden encontrar en el Anexo N, el cual presenta los informes entregados por el laboratorio ALS. Todos los parámetros considerados relevantes tienen concentraciones menores a los indicado en la norma chilena de riego NCh 1333/DS 90.

Los parámetros analizados considerados como de primer orden o relevantes corresponden a: DQO, nitratos, sulfatos, sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales.. En la Tabla 7-5 se resumen las fechas de muestreo, los códigos de las muestras entregadas por el laboratorio (ALS) y las fechas de recepción y entrega de resultados por parte de éste.

Tabla 7-5: Resumen muestreo set B

Fecha muestreo	Fecha recepción ALS	Fecha entrega resultados	Código ALS
30-09-2014	01-10-2014	24-10-2014	SE1401385
28-10-2014	28-10-2014	20-11-2014	SE1401522
17-11-2014	18-11-2014	02-10-2014	SE1401616

Fuente: Elaboración propia.

La DQO de las aguas subterráneas y las aguas del canal presentan un contenido bajo el límite de detección para este parámetro (<10 mg/L). Esto último, sugiere que las aguas presentan un bajo contenido de materia orgánica (Figura 7-17).

Los contenidos de nitrato dan cuenta de cierta influencia agrícola en las aguas subterráneas ya que se encuentran valores mayores a 10 mg/L. Sin embargo, estos valores no se encuentran reflejados en las muestras tomadas en el canal de alimentación LO-CA, ya que presenta valores menores a 3.

Los valores de sulfatos se encuentran bajo la norma (Figura 7-17). En el tiempo, se puede observar un aumento de los sulfatos en las muestras del pozo de observación y una disminución en el canal alimentador.

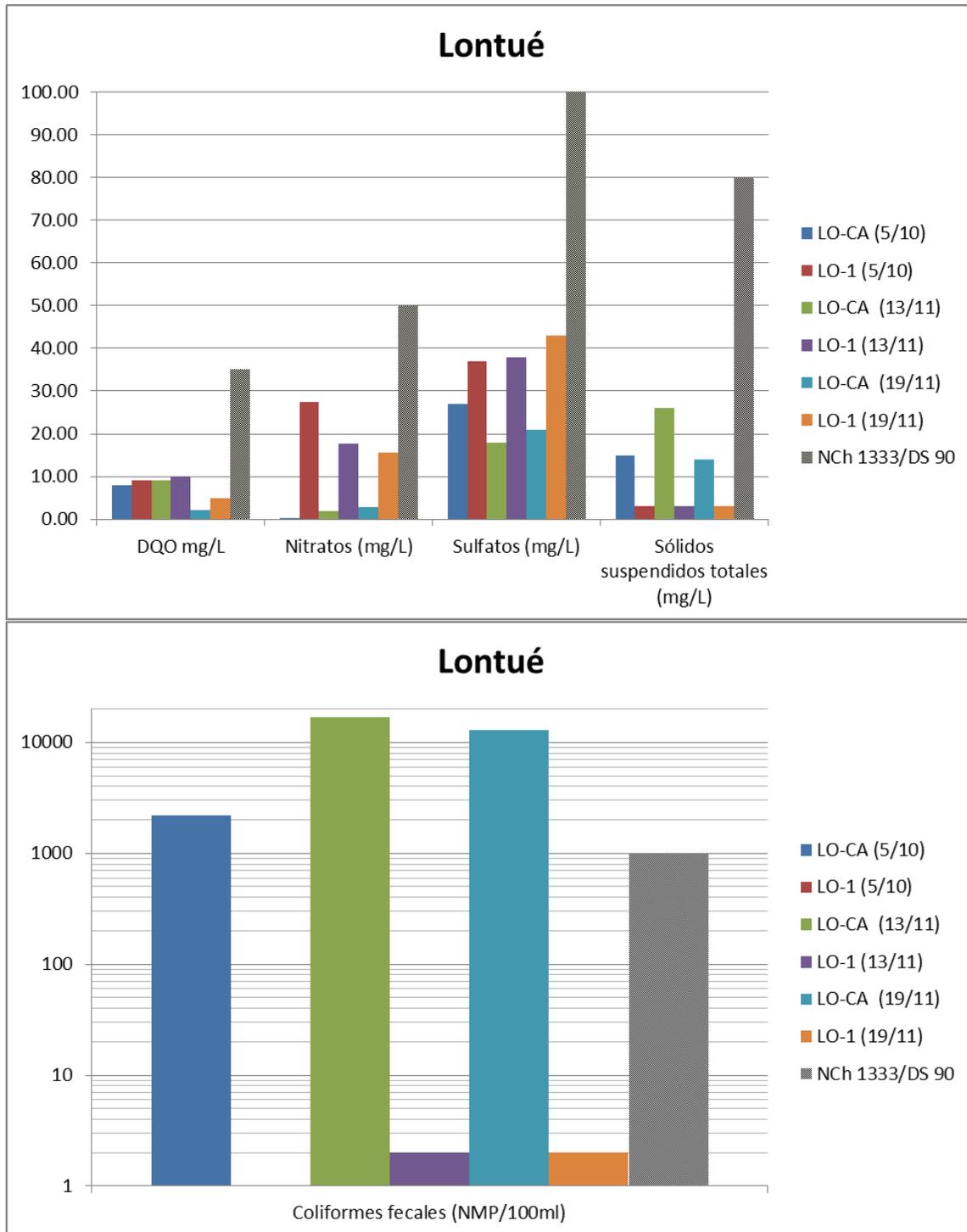
Los sólidos suspendidos totales en el canal alimentador LO-CA es un orden de magnitud mayor que en el pozo de observación LO-01 (Figura 7-17). Los coliformes fecales en el pozo presentan valores menores a 3 (bajo el límite de detección). En el canal alimentador, los coliformes fecales presentan un valor hasta 15 veces sobre la norma, esto se podría deber al aporte de agua a través de pequeños canales desde predios aledaños (Figura 7-17).

Tabla 7-6: Analitos de interés, pruebas de infiltración.

ID muestra	Antes de Pruebas de Infiltración		Después de Pruebas de Infiltración				NCh 1333/ DS 90
	LO-CA (5/10)	LO-01 (5/10)	LO-CA (13/11)	LO-01 (13/11)	LO-CA (19/11)	LO-01 (19/11)	
Fecha de muestreo	05-10-2014	05-10-2014	13-11-2014	13-11-2014	19-11-2014	19-11-2014	
DQO mg/L	<10	<10	<10	<10	<10	<10	35
Nitratos (mg/L)	0,31	27,36	1,86	17,64	2,87	15,60	50
Sulfatos (mg/L)	27	37	18	38	21	43	250
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	15	<3	26	3	14	<3	80
Coliformes fecales (NMP/100ml)	2200	<2	17000	2	13000	2	1000

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-17: Parámetros relevantes y normados (NCh 1333), pruebas de infiltración.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El dato de coliformes fecales para LO-01 (5/10) no se aprecia en el gráfico ya que es menor que 1.

7.2.4.3 Composición química

Para representar la composición química de las muestras se utilizó diagrama de Piper. Con el diagrama de Piper se obtiene una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización. Permite representar un número ilimitado de muestras en un mismo gráfico lo que, a nivel regional, proporciona una visión global de las distintas composiciones de agua existentes. Las proporciones relativas de cationes y aniones son representadas en dos diagramas triangulares, y proyectadas en un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los aniones y cationes en conjunto (Figura 7-18). Cada muestra está representada con un mismo símbolo en cada uno de los diagramas.

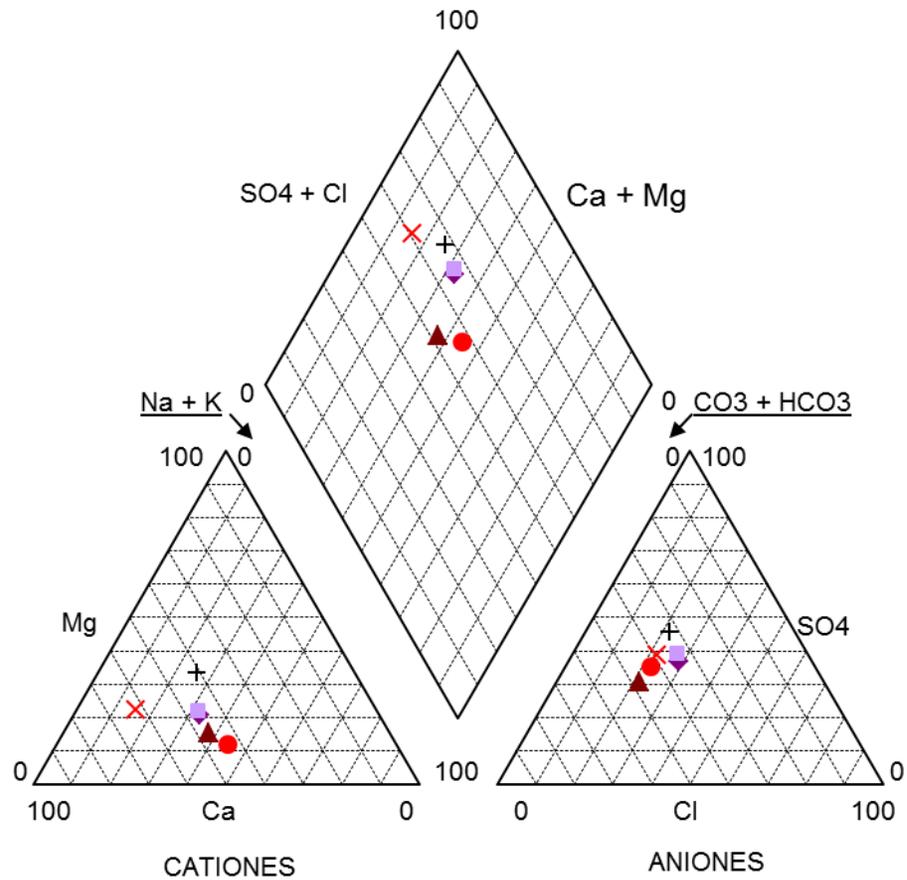
El diagrama de Piper indica que las aguas en general presentan una composición intermedia sulfatada-cálcica. Se puede observar también que cada par de muestras tomado en la misma fecha presenta composiciones similares lo que se condice que tanto el agua de los pozos de observación como el agua de infiltración pertenecían a la misma fuente.

Las muestras tomadas al final de las pruebas de infiltración se presentan levemente más sulfatadas y cálcicas que las muestras de fechas anteriores. Esto puede deberse a aportes de agua desde predios aledaños.

Figura 7-18: Diagrama Piper

DIAGRAMA DE PIPER

Lontué



× LO-CA (19/11)	+ LO-1 (19/11)	● LO-CA (5/10)
◆ LO-1 (5/10)	▲ LO-CA (13/11)	■ LO-1 (13/11)

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al análisis de los parámetros fisicoquímicos, muestras de analitos relevantes y el diagrama de piper se puede concluir que:

- Los contenidos de nitrato dan cuenta de cierta influencia agrícola en las aguas subterráneas ya que se encuentran valores mayores a 10 mg/L. Sin embargo, estos valores no se encuentran reflejados en las muestras tomadas en el canal de alimentación LO-CA, ya que presenta valores menores a 3. Las muestras tomadas durante y al final de las pruebas de infiltración, presentan valores más bajos de nitratos para las aguas subterráneas que antes de la operación del sistema, lo que puede indicar mezcla con aguas desde la balsa de infiltración.
- En el tiempo, se puede observar un aumento de los sulfatos en las muestras del pozo de observación y una disminución en el canal alimentador. Esto es concordante con la observación anterior, e indicaría una eventual mezcla de agua desde la balsa de infiltración (mayor contenido de sulfatos) con el acuífero, reflejado en los pozos de observación.
- En resumen, los resultados químicos y fisicoquímicos sugieren que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos en los pozos de observación cercanos a la balsa de infiltración son producto de las pruebas de infiltración desarrolladas.
- Los sólidos suspendidos totales en el canal alimentador LO-CA son un orden de magnitud mayor que los registrados en el pozo de observación LO-01, en ambos casos el registro se encuentra bajo la norma. En ocasiones se superó el umbral de 10 NTU establecido para detener la operación, sin embargo las pruebas no fueron detenidas. Esta decisión fue tomada ya que se contó con pocos días para realizar las pruebas, debido a diversos inconvenientes que afectaron el desarrollo del proyecto. Por otro lado, se consideró que una piscina de infiltración pueden ser sometida a mantenimientos a bajo costo (a diferencia de un pozo de infiltración), por lo que de ocurrir una colmatación esta puede ser corregida. Pese a lo anterior, si se desea operar el sistema por plazos más extensos, se debe respetar el umbral propuesto.
- En el canal alimentador, los coliformes fecales presentan un valor hasta 15 veces sobre la norma, esto se podría deber al aporte de agua a través de pequeños canales provenientes de predios aledaños que interceptan al canal situado dentro del predio en estudio. Sin embargo, en etapas anteriores se concluyó que para la concentración existente, gran parte de estas bacterias serían inactivadas al entrar en contacto con el acuífero, debido al decaimiento exponencial que sufre la población inicial de esta bacteria. Así, no se producirían cambios en la concentración de este analito en el acuífero.

7.2.5 Análisis de la operación del sistema

De acuerdo al desempeño del sistema implementado se observó que el diseño fue el apropiado considerando los objetivos, plazos de ejecución y presupuesto. A continuación se enumeran las ventajas y desventajas detectadas durante la operación del sistema de recarga artificial.

Ventajas:

- Facilidad de la operación: el sistema puede ser operado por una sola persona que debe ir periódicamente sólo a regular los caudales de infiltración. Los parámetros a medir como niveles, caudal y turbidez, fueron medidos con dataloggers y telemetría lo que permite un control continuo y un registro de los datos durante toda la operación.
- Rapidez de la construcción: dado el corto periodo de operación, el diseño consideró obras livianas que se pudieron construir en el plazo de 1 mes.

Desventajas:

- Regulación del Caudal: este aspecto se consideró dentro de los aspectos críticos debido a la dificultad de regular los caudales y mantenerlos en el tiempo. Esto se debe principalmente a la variabilidad del caudal del canal del que se alimenta el sistema de infiltración.
- Registro de datos de niveles: el registro de niveles se realizó mediante transductores de presión con dataloggers los cuales eran descargados periódicamente al visitar las instalaciones. Pese a que el registro cumple con lo necesario para el análisis de las pruebas desarrolladas, hubiese resultado más práctico controlar éstas variables con telemetría al igual que los caudales y la turbidez. Esto hubiese permitido tomar decisiones con mayor agilidad y dan cuenta en tiempo real de los resultados que se van obteniendo.

7.2.5.1 Modelo conceptual local

A continuación se explica el modelo conceptual del funcionamiento del sistema de infiltración implementado y su relación con el acuífero en el área de estudio. Se debe tener en cuenta que los modelos conceptuales se van perfeccionando a medida que se cuenta con mayor información. El modelo que acá se presenta incluye toda la información recopilada durante la ejecución del proyecto.

La descripción estratigráfica de las muestras obtenidas en las perforaciones, sugieren la existencia de una única unidad hidrogeológica predominante, ya que todos los estratos identificados corresponden a clastos gruesos desde arenas a gravas. Sin embargo, el comportamiento del nivel observado en los dos pozos perforados (LO-01 y LO-02) indican la existencia de un estrato de menor permeabilidad que dividiría horizontalmente la unidad descrita anteriormente. Esta unidad divisoria no fue detectada durante las perforaciones por lo que se espera que sea muy delgada y se ubicaría en algún lugar bajo el fondo del pozo LO-02 (prof 15 m) y por sobre el fondo del pozo LO-01 (prof 25 m). En resumen, se plantea la existencia de 3 unidades hidrogeológicas, superior (UH-1) e inferior (UH-3) con conductividades medias a altas separadas por un estrato impermeable delgado (UH-2).

Al describir los niveles, en primer lugar se debe observar el comportamiento estacional del agua subterránea en el área de estudio. Para ello se analizó la Figura 7-6 donde se presenta la evolución registrada en norias cercanas al emplazamiento de las obras de infiltración (menor que 525 m), durante el transcurso del presente estudio. El rango de oscilación de las norias, entre los niveles mínimos y máximos es de 4 m. Se aprecian además dos periodos con ascensos de consideración. El primero de ellos ocurrió en invierno, claramente relacionado con eventos de precipitación importantes ocurridos en el mes de junio (ver sección 4.6). El segundo de ellos, de mayor magnitud, ocurrió a contar de fines de septiembre y comienzo de octubre, esto coincide con el inicio del periodo de riego en la zona. Se generó un ascenso de aproximadamente 4 m, que ubicó el nivel freático a aproximadamente 2 metros de profundidad.

El comportamiento de los niveles sin recarga artificial da cuenta de la existencia de 2 acuíferos, los cuales presentan distintos niveles piezométricos. El acuífero superior presentó una carga mayor que el acuífero inferior, por lo que se plantea que el acuífero superficial estaría "colgado" o que el inferior presenta un grado de confinamiento con cargas menores que el acuífero superior. En cualquiera de los casos existe una diferencia en la cota piezométrica de al menos 6 metros entre ambos acuíferos.

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico, este fue separado entre el periodo previo a realizar las PPRAA y durante las pruebas PPRAA. El comportamiento regional del sector sin infiltración posee un gradiente en el sentido noreste. Particularmente, en el sistema piscinas-pozos de infiltración se presenta naturalmente el mismo sentido. Estas direcciones de flujo en el tiempo se conservan durante todo el pese a la importante oscilación que presentan.

En el comportamiento de los flujos antes de realizar las pruebas también se debe considerar que el pozo LO-01, conectó 2 acuíferos con distintas alturas piezométricas, generando un flujo vertical descendente que de acuerdo a las filmaciones realizadas en el pozo podrían ser de consideración ($>$ a 5 L/s). En particular, en la filmación descrita se pueden observar chorros que surgen desde el acuífero superior y se incorporan al acuífero inferior que presenta un nivel más bajo. En este sentido, el nivel que presenta el pozo LO-01 no es el del acuífero inferior sino una combinación de ambos y se encuentra muy influenciado por el flujo a través del mismo pozo. Por su parte, el pozo LO-02 presentaría los niveles correspondientes sólo al acuífero superior. Considerando lo anterior, no hay certeza sobre la ubicación del nivel piezométrico en el acuífero inferior. Este acuífero podría estar confinado (AC2 N°1 en Figura 7-19 y Figura 7-20) por la delgada capa impermeable que cuelga al acuífero superior o bien podría ubicarse bajo este estrato, correspondiendo de esta forma a un acuífero libre con una profundidad de al menos 15 m (AC2 N°2 en Figura 7-19 y Figura 7-20).

La infiltración se realizó superficialmente a través de la balsa y representa un flujo entrante hacia el acuífero superior, levantando los niveles en forma de domo. Durante las pruebas de infiltración el sentido regional del flujo varía levemente, ya que se crea una divisoria de aguas local bajo la piscina de infiltración. Esto es debido a que se invierte el sentido del flujo producto del domo generado en el área. Este domo se produce únicamente en el acuífero superior y genera alteraciones en los niveles de los pozos de observación. Como es de esperarse, el efecto se apreció de mejor manera en el pozo LO-02, pese a encontrarse más alejado de la piscina de infiltración, debido a que se encuentra íntegramente en el acuífero superior. El pozo LO-01, por su parte, presenta un efecto menor ya que es suavizado por la conexión que este pozo presenta con el acuífero inferior.

Las aguas en el sistema presentan una composición natural del tipo sulfatadas cálcicas y con conductividades eléctricas entre 0,1 y 1,5 mS/cm. Los análisis químicos realizados en distintas etapas del proyecto sugieren que tanto las aguas a infiltrar como las aguas subterráneas provienen de una misma fuente. Junto con lo anterior se observa que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos en los pozos de observación cercanos a la balsa de infiltración probablemente son producto de las pruebas de infiltración desarrolladas. Se debe notar que el transporte a través del acuífero disminuye la concentración de algunos analitos, debido a los procesos que se producen durante este transporte, además de la dilución. Se destaca la disminución de coliformes fecales en que las aguas de alimentación contienen por sobre los 10000 NMP/100 ml y las aguas subterráneas se registraron valores alrededor del límite de detección ($<$ 2 NM/100 ml).

Las Figura 7-19 y Figura 7-20 resumen de forma gráfica el funcionamiento conceptual del sistema antes y durante la PPRAA. En ellas se muestra las unidades hidrogeológicas, los pozos con las cotas representativas, las variaciones en los niveles de las napas y los flujos de aguas subterráneas.

Figura 7-19: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA

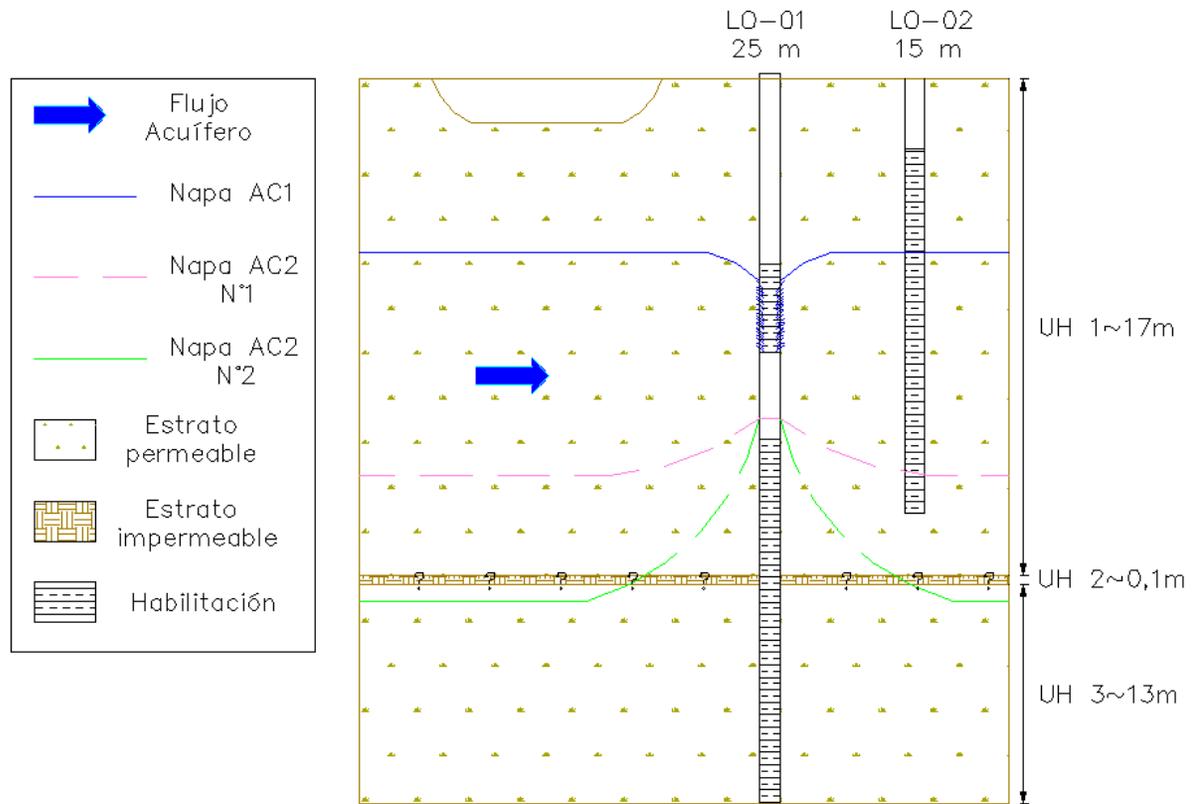
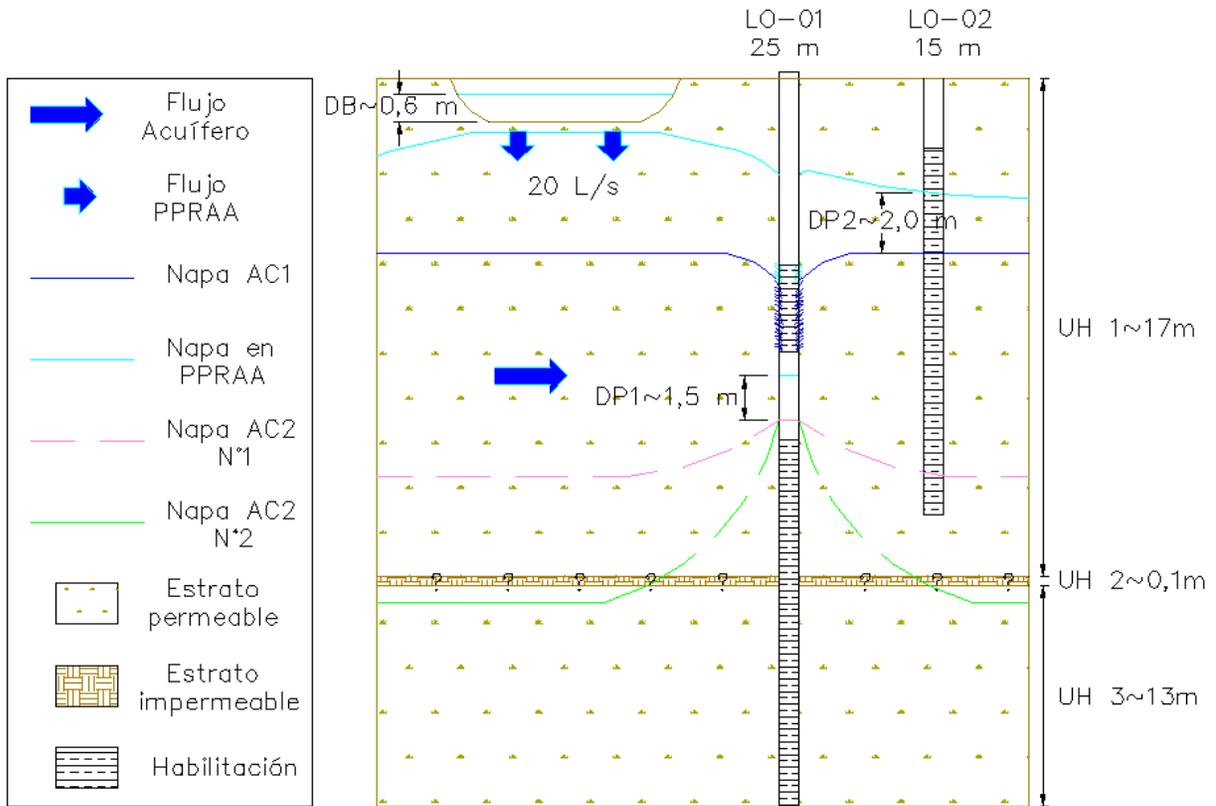


Figura 7-20: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA



7.2.6 Análisis de resultados PPRAA

Los resultados de las PPRAA se analizarán en términos del impacto sobre los niveles estáticos a nivel local y regional, incluyendo la velocidad de la onda de recarga y su relación con el tiempo de residencia del agua infiltrada en el acuífero. Todo lo anterior será estimado a través de un modelo numérico simplificado del acuífero.

7.3 ANÁLISIS DEL EFECTO PROYECTADO EN NIVELES DEL ACUÍFERO

Para analizar los resultados de las PPRAA se realizó un ejercicio de modelación que permite observar el efecto en los niveles del acuífero y en la red de drenaje para determinadas condiciones, para lo cual se desarrolló un modelo numérico simplificado. El modelo presentado no fue calibrado y sólo se verificó que el gradiente y balances obtenidos estuviesen dentro de lo esperado con la información disponible. Debido a lo anterior, este modelo puede ser utilizado sólo de manera referencial y no constituye una herramienta de predicción para estimación de recursos, como tampoco fenómenos de transporte. Sin embargo, para efectos del estudio el realizar un modelo numérico representa un ejercicio que permite un mayor entendimiento de los fenómenos involucrados que un cálculo analítico.

7.3.1 Construcción del modelo

Para el desarrollo de la modelación numérica se ha seleccionado MODFLOW-USG (Panday et al 2013) debido a la flexibilidad en el diseño de la grilla del modelo. MODFLOW-USG (de *UnStructured Grids*) implementa la técnica matemática de volúmenes finitos, lo que le permite flexibilizar el tipo de grilla del modelo, liberando las restricciones asociadas a las grillas clásicas de diferencias finitas donde cualquier refinamiento dentro del modelo necesariamente implicaba refinar zonas exteriores donde esto no era requerido. Esto permite generar modelos con un menor número celdas, pero manteniendo un buen nivel de detalle en las zonas de interés. Con lo que además se reducen los tiempos de simulación del modelo. Como procesador gráfico para MODFLOW-USG se ha empleado Groundwater Vistas 6.

7.3.1.1 Discretización espacial y temporal

El dominio de modelación considera una superficie total de 840 Km², el cual fue definido considerando el área de estudio presentada en la Figura 1-1. Para efectos de la modelación no se considera la totalidad de la cuenca aportante al área de estudio, ya que se han realizado las simplificaciones necesarias para desarrollar un modelo que cumpla los objetivos de este ejercicio, con esto se excluyen las cabeceras de los principales drenajes de la zona de estudio (río Lontué y estero Chenquélmo) y el sector aguas arriba de la juntas de los esteros Guaiquillo y Chenquélmo (ver Figura 3-4).

La discretización espacial en vertical considera una capa, cuyo espesor mínimo es de 125 m en la salida de la cuenca, donde la cota de fondo se mantiene en 0 m.s.n.m. Esta cota de fondo se definió considerando los perfiles hidrogeológicos presentados en la Figura 3-3. Con esto se tiene una geometría simplificada del acuífero.

Respecto de la discretización espacial en planta, el dominio fue inicialmente subdividido con celdas cuadradas de 400 x 400 m, lo que resultó en un total de 75 filas y 70 columnas, es decir, 5.250 celdas. Posteriormente el modelo fue refinado localmente en torno al río Lontué y a la zona donde se aplica la recarga artificial, con celdas cuadradas de 50 x 50 m. Para esto se empleó una grilla del tipo *Quadtree suavizado*, técnica que subdivide la celda en 4, procurando que cada celda esté en contacto con máximo 2 celdas adyacentes. De esta forma el número total de celdas aumentó a 21.183, de las cuales 18.372 están activas, lo que constituye un 87% de las celdas. En la Figura 7-21 se presenta la grilla utilizada para discretizar horizontalmente el modelo, con un detalle de la zona se aplica la recarga artificial.

La discretización temporal adoptada en el modelo fue mensual y se considera un periodo de simulación de 50 años. Con esto, el modelo presenta un total de 601 períodos de stress, de los cuales el primero es operado en régimen permanente, de modo de obtener una condición inicial para el modelo en régimen transiente y así evitar inestabilidades numéricas. Mientras, el modelo transiente consta de los 600 períodos restantes (meses comprendidos en 50 años).

7.3.1.2 Propiedades hidráulicas

Las zonas de conductividad hidráulica consideradas en el modelo provienen de las permeabilidades consideradas en evaluación de la metodología para identificar las posibles zonas de recarga artificial (acápite 3.5.1.1), según esto el área de estudio considera 7 zonas de permeabilidad, como se observa en la Figura 3-27. Como el modelo no considera el área de estudio en su totalidad, sólo incluye 5 zonas de permeabilidad, las que se detallan en la Tabla 3-18. Cabe mencionar que se consideró isotropía horizontal ($K_x=K_y$) y anisotropía vertical ($K_z=K_x/10$).

Tabla 7-7: Conductividad hidráulica

Zona Modelo	Kx (m/d)	Ky (m/d)	Kz (m/d)
Zona 1	4,32	4,32	0,432
Zona 2	6,912	6,912	0,6912
Zona 3	69,12	69,12	6,912
Zona 4	8,64	8,64	0,864
Zona 5	25,92	25,92	2,592

Respecto de los parámetros de almacenamiento y porosidad no se tiene información, por lo que, de acuerdo a la experiencia del consultor, se consideraron valores iniciales para describir el almacenamiento y posteriormente se analiza el efecto en los resultados de este parámetro mediante un análisis de sensibilidad. Se impuso un coeficiente de

almacenamiento (S_s) de 0,001; un almacenamiento específico (S_y) de 0,08 y una porosidad de 0,1.

7.3.1.3 Condiciones de borde

En términos generales, el modelo considera el uso de tres tipos de condiciones de borde (ver Figura 7-21):

1. De carga hidráulica conocida: aplicada en los límites del modelo para incluir la recarga y descarga subterránea, lo que permite representar el gradiente hidráulico. Para definir la condición de borde de carga hidráulica se consideró información de observación de profundidades de la napa en la cabecera y salida del área de estudio, donde en la cabecera se tiene una profundidad de 20 m y en la salida de 0,5 m.
2. De flujo especificado: para las zonas donde no ingresa flujo al modelo (celdas inactivas y el fondo de la mono-capa) y para la zona de recarga artificial. Para la zona de recarga artificial se define un área de 200 x 200 m donde se infiltra un total de 1000 L/s durante 6 meses consecutivos al año. La zona de recarga se ubicó dentro del sector con mayor valor de aptitud definido en la metodología (ver Figura 3-30), a más de 2 Km de distancia del río Lontué.
3. Mixta: para los flujos que son dependientes del nivel de la napa se incluye una condición de borde tipo río. En este ejercicio de modelación sólo se considera el río Lontué como drenaje superficial de la cuenca.

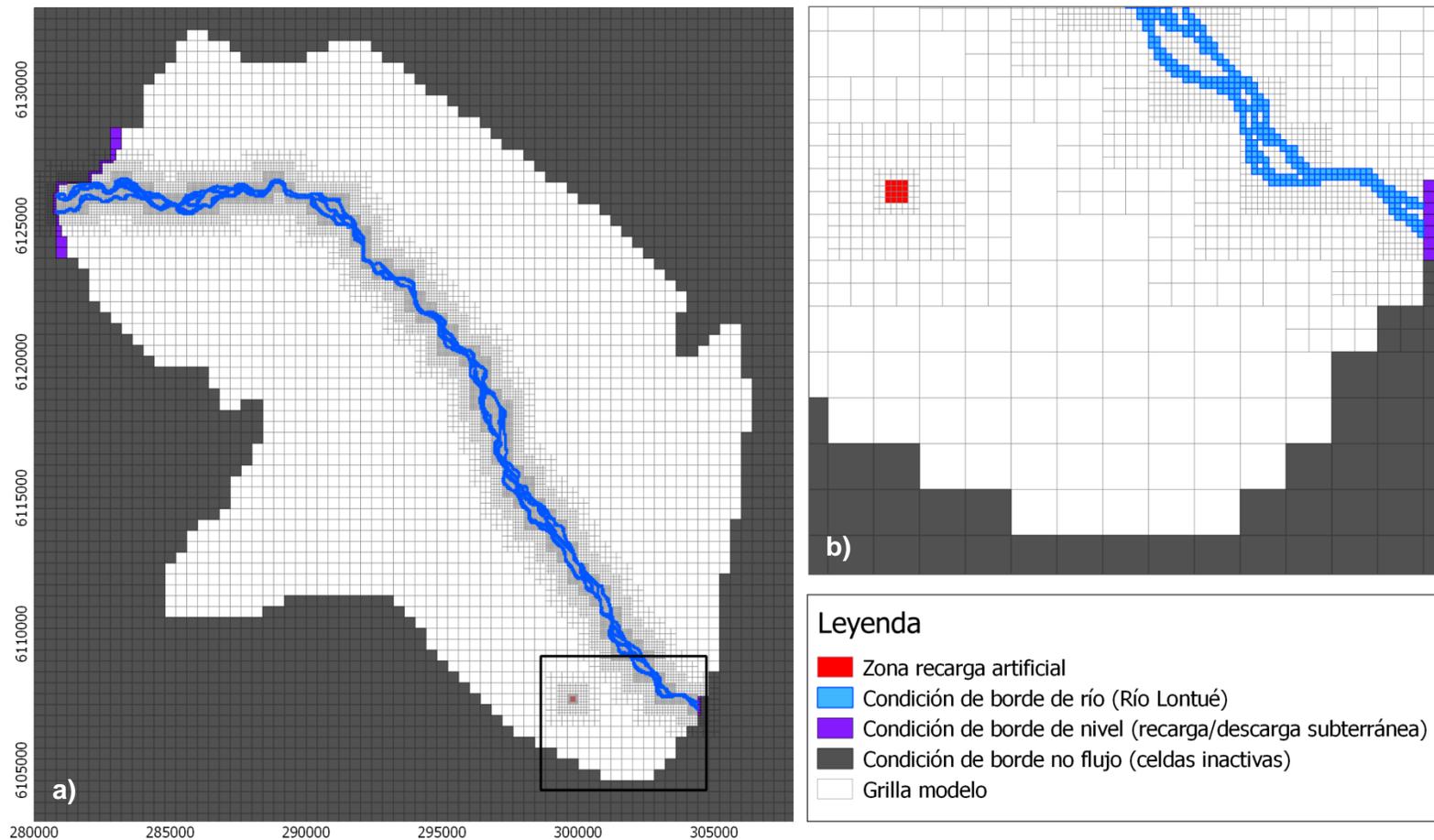
Debido a que este modelo constituye un ejercicio simplificado, no se considera la recarga superficial por precipitaciones, la recarga superficial por riego, la evaporación, la presencia de pozos de extracción, tampoco otros cursos superficiales adicionales al río Lontué ni la red de canales de riego existente.

Se debe notar que las recargas por riego y precipitaciones producen una importante variación estacional de los niveles freáticos, la cual fue observada en el transcurso del estudio. La mayor variación es el ascenso que se produce durante los meses de riego que no fue considerada en el modelo.

7.3.1.4 Condición inicial

Para el modelo en régimen permanente se impuso como condición inicial el nivel del techo de la mono-capa. Por su parte, la condición inicial adoptada en el modelo transiente se obtiene del resultado del modelo en régimen permanente, que en este caso corresponde al primer periodo de estrés del modelo.

Figura 7-21: a) Discretización espacial y condiciones de borde modelo numérico. b) Detalle zona de recarga artificial



7.3.2 Resultados

A partir los resultados de la modelación numérica es posible observar la variación del nivel del acuífero y de los flujos a través de las condiciones de borde por efecto de la aplicación de una recarga artificial estacional (de 6 meses al año) de 1000 L/s en un área de infiltración de 200 x 200 m. Del análisis de los flujos a través de las condiciones de borde se observa que parte de caudal de recarga artificial se pierde al ser captado por el río. El tiempo para el cual el río capta el 10% de la recarga, es decir 100 L/s, es de 26 años.

En la Figura 7-22 se presentan los ascensos de nivel respecto de la condición inicial sin recarga artificial para el año 1, año 26 y año 50, para el sexto mes con recarga artificial que corresponde al momento del año con mayor ascenso de niveles. En esta figura se observa la evolución temporal del ascenso de niveles. En la Figura 7-23 se presentan los resultados para el nivel del acuífero en el sexto mes de recarga artificial de los años 1, 26 y 50, en comparación con la topografía, en un perfil transversal que pasa por la zona de recarga artificial y cruza el río Lontué. Se observa el domo generado en los niveles en torno a la zona de recarga artificial y su evolución en el tiempo. Se deben notar los cambios en la curvatura en las equipotenciales transversales al río las que indican un cambio de régimen con respecto a este. Este cambio de régimen significa un aumento en el flujo del río hacia el acuífero o una disminución del flujo desde el río al acuífero, dependiendo del nivel del acuífero con respecto al nivel del río.

Se realizó un análisis de sensibilidad observando la variación del tiempo en que los flujos desde o hacia el río varían en 100 L/s (10% de la recarga impuesta). La sensibilidad se realizó variando el nivel del río, la conductividad hidráulica del relleno, el almacenamiento y la conductancia del río.. En la Tabla 7-8 se presenta un resumen de resultados para todos los casos simulados, donde se observa que la variable más sensible es la conductancia del río.

Tabla 7-8: Tiempo para que el 10% de la recarga sea captada por el río

Simulación	Tiempo (días)	Tiempo (años)
Caso base	9642	26
Nivel río _{caso base} -1 m	9611	26
$K_{\text{caso base}} \times 0,5$	10737	29
$K_{\text{caso base}} \times 2$	9095	25
$S_y = 3\%$	8304	23
$S_y = 15\%$	11559	32
Conductancia río _{caso base} x 10	N.A.	N.A. (*)
Conductancia río _{caso base} x 0,2	486	1

(*) En este caso durante el periodo de simulación el río no alcanza a captar el 10% del caudal de recarga artificial. A los 50 años el río capta cerca de 20 L/s.

La modelación numérica realizada permite analizar a grandes rasgos el efecto de la aplicación de una recarga artificial estacional para las condiciones consideradas en este ejercicio, donde se realiza una serie de simplificaciones que permiten una evaluación numérica rápida. En ningún caso el modelo realizado corresponde a un modelo calibrado del acuífero de Lontué.

Figura 7-22: Ascenso nivel acuífero luego de 6 meses de recarga artificial para el año 1, año 26 y año 50

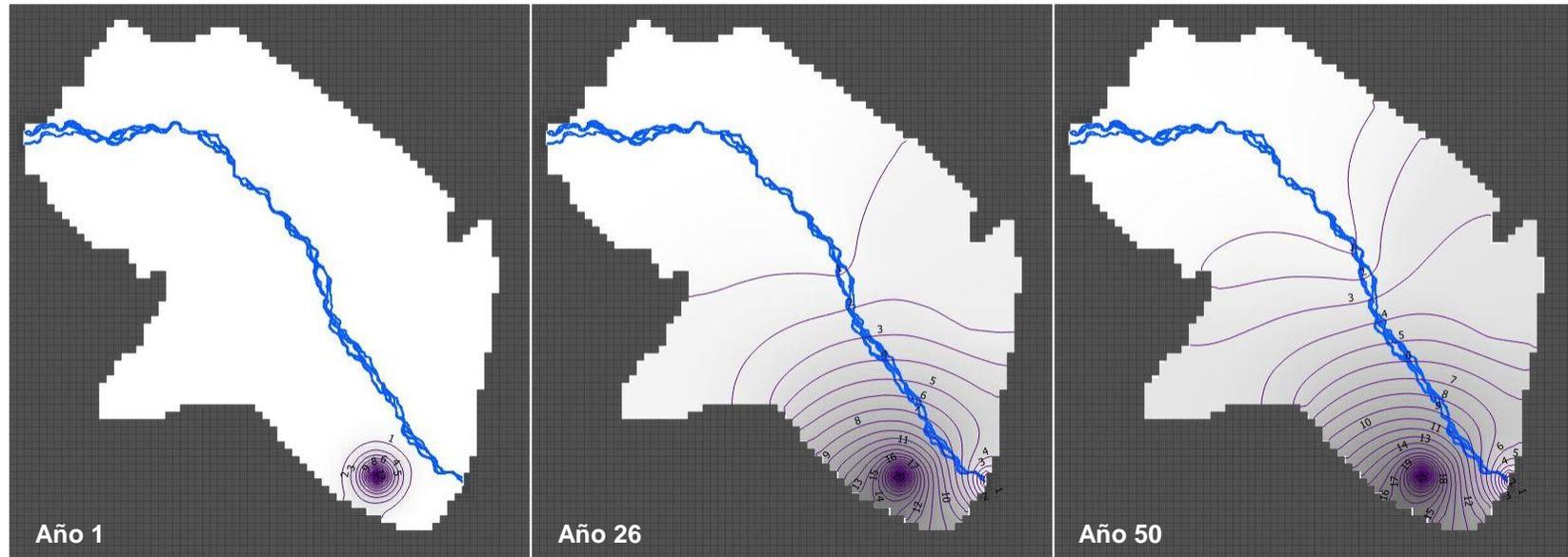
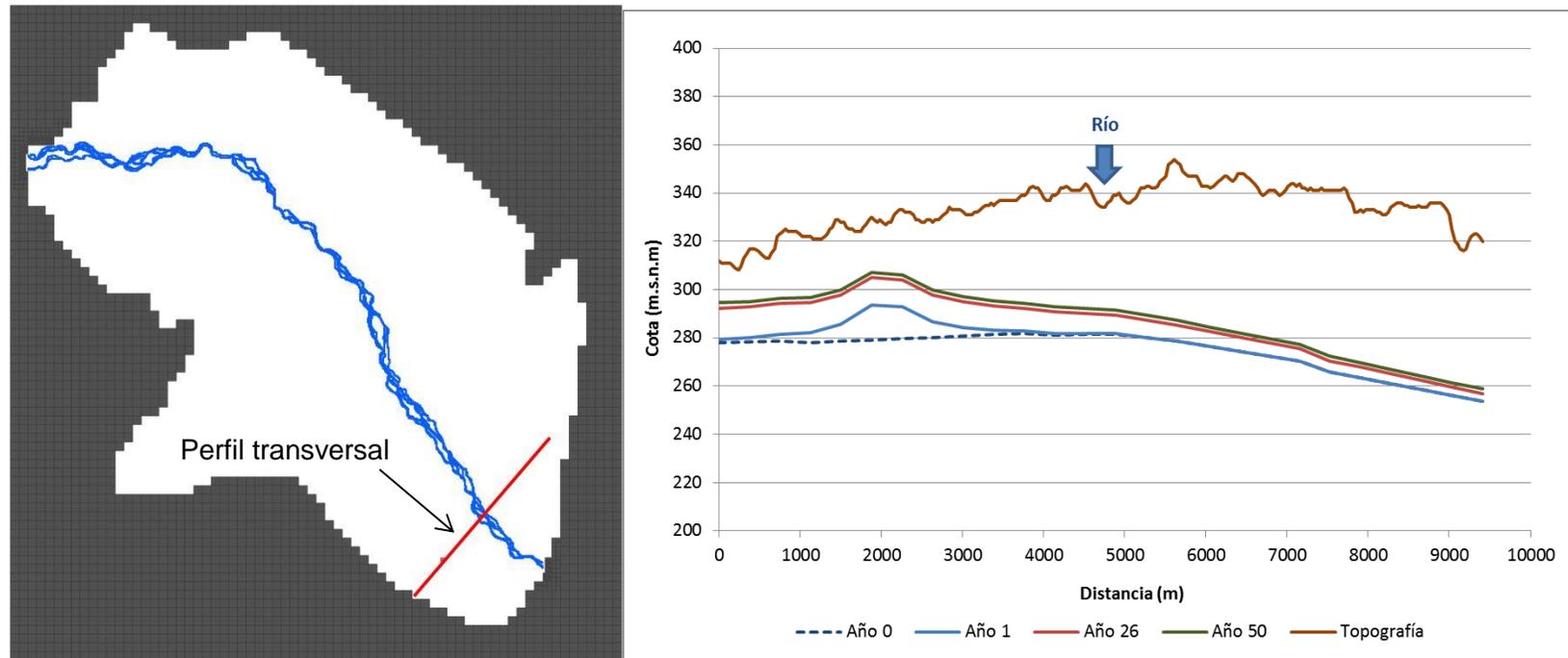


Figura 7-23: Perfil de niveles acuífero luego de 6 meses de recarga artificial, para el año 1, año 26 y año 50



8 DISCUSIÓN

La finalización del proyecto a través de este informe final ha requerido la ejecución de una cantidad importante de actividades, las que se han desarrollado de manera concatenada o paralelo dependiendo de las necesidades. Como una forma de ordenar la discusión se ha dividido de acuerdo a las actividades principales, a saber: a) Hidrogeología regional, b) disponibilidad de agua, c) Metodología de identificación de sitios, d) análisis legal, e) diseño y construcción de las obras, f) monitoreo, g) pruebas hidráulicas y h) operación del PPRAA.

8.1 HIDROGEOLOGÍA REGIONAL

Se realizó una descripción hidrogeológica a nivel regional con el objetivo de describir el funcionamiento del acuífero al nivel de cuenca y de este modo ayudar a definir una metodología que permitiera identificar zonas que tuvieran características apropiadas para la recarga artificial.

La información más relevante desde el punto de vista de un proyecto de recarga artificial corresponde a: a) la morfología y geología superficial, que permite identificar los límites del acuífero en el caso que correspondan a acuíferos compuesto de rellenos sedimentarios; b) la hidrogeología, especialmente la información de la profundidad del acuífero, que permite identificar la potencialidad de almacenamiento del acuífero, la piezometría que permite describir escurrimiento del agua subterránea en términos de su sentido y magnitud, los parámetros hidráulicos del acuífero, que permiten determinar el tiempo de residencia del agua infiltrada en el acuífero y también la capacidad de almacenamiento; y c) la calidad del agua, ya que permite estimar el potencial impacto de la calidad del agua sobre el acuífero y establecer una línea base de para evaluar los efectos. Menos relevante resulta la información hidrológica, siendo la información de la ubicación y características de los cauces superficiales y su relación con el acuífero lo que más importancia tiene. La información edafológica no tiene relevancia práctica respecto de este tipo de proyectos.

Respecto de la información relevante se debe indicar que en términos generales la información disponible es insuficiente para realizar una buena caracterización hidrogeológica, especialmente en términos de la geología subsuperficial, profundidad del acuífero y propiedades hidráulicas. Respecto de la geología subsuperficial, prácticamente no existe información a excepción de lo contenido en la carta hidrogeológica de Chile, que trabaja a una escala demasiado grande (1:1.000.000). Respecto de información de profundidad y nivel de la napa, existe poca representatividad espacial, ya que la DGA sólo cuenta con 10 pozos en todo el acuífero, dejando amplias e importantes zonas sin información. Más aun cuando se requiere trabajar a una escala menor, como por ejemplo para diseñar sistemas de infiltración prácticamente no existe información y se debe recurrir a información de pozos locales, que en general no cuentan con información estratigráfica ni de construcción del pozo y además depende de la buena voluntad de los dueños y administradores de predios para facilitar acceso para toma de datos.

Respecto de la información de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico), sólo existe información de la conductividad hidráulica de la que se tienen definidas zonas homogéneas, sin embargo, la escala de trabajo presenta una escala poco apropiada para el desarrollo de pruebas piloto, no existe información del coeficiente de rendimiento específico.

La comparación de los niveles estáticos de la napa de agosto-septiembre 2012 con los medidos en abril del 2014 muestran diferencias de nivel de 1 orden de magnitud. Esto es, un promedio de 40 m para los niveles de invierno-primavera 2012 y de 4 para los niveles de otoño 2014. Esto confirmó la estacionalidad en los niveles estáticos de la zona de estudio, indicada por el dueño del predio de Pichingal.

8.2 DISPONIBILIDAD DE AGUA

El mayor valor de este análisis se da cuando se requiere estimar el potencial de infiltración a nivel regional, ya que, para el caso de este proyecto los caudales son en general pequeños, no excediendo los 25 l/s.

Adicionalmente se debe mencionar que en general es muy difícil estimar los recursos realmente disponibles a nivel predial, ya que en general la asociación de canalistas no cuentan con información de aforos a través del tiempo en los canales matrices y menos aún en un canal que es un ramal de un canal más importante.

Para el éxito de pruebas piloto resulta fundamental estar coordinados con la asociación de canalistas, más que con la junta de vigilancia del río, ya que si se puede tener la disposición de la junta de vigilancia de prestar agua, son las asociaciones de canalistas son las que finalmente conducen el agua hasta donde se requiere. Lo anterior, es de vital importancia especialmente durante los meses de invierno cuando muchos de los canales se encuentran cerrados.

En este sentido y desde el punto de vista de los particulares que quisieran realizar recarga artificial durante los meses de invierno, éstos requerirían coordinarse con las asociaciones de canalistas correspondientes de modo de tener acceso al agua en este periodo.

8.3 METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE SITIOS

Como parte del proyecto se desarrolló una metodología para la identificación de sitios con potencial para desarrollar proyectos de recarga artificial. La metodología se desarrolló en dos fases, la primera corresponde a un análisis regional y la segunda se aplica a nivel local. La metodología regional se basa en 3 parámetros: la conductividad hidráulica, la cercanía y conexión con una fuente o sumidero de agua, y la profundidad del nivel freático. La metodología local se basa en la siguiente información: a) cercanía a la fuente de agua, b) disponibilidad de terreno, c) disponibilidad de derechos de agua, d) calidad química del agua de recarga, e) ubicación respecto de una fuente potencial de contaminación.

Es importante señalar, que la metodología regional permite identificar zonas potenciales de recarga artificial, y por tanto, sirve como un primer filtro sobre el cual se debe necesariamente, recabar más información para determinar si los sectores seleccionados efectivamente presentan buenas características para la aplicación de este tipo de tecnología. En efecto, se podría decir que el principal uso de esta metodología es para descartar sectores y de este modo ayudar en la búsqueda de sectores con buenas características.

Sin perjuicio de lo anterior y en términos generales la metodología regional desarrollada funcionó bien pudiendo identificar zonas donde existen mejores características para la recarga artificial, que se condicen con los trabajos de terreno desarrollados de manera posterior. Adicionalmente ha sido probada en más de una cuenca (Lontué, Aconcagua, Chacabuco-Polpaico, Popeta y Puangue).

El principal problema de la metodología es la calidad de la información hidrogeológica disponible, siendo este caso especialmente sensible la información de profundidad de la napa y de la conductividad hidráulica. Tal como se mencionó en la sección 8.1 del presente informe, existe baja representatividad espacial de la información de la profundidad y cota del agua subterránea, así como registros cortos para evaluar el comportamiento temporal del acuífero. Por ejemplo en el caso del sector donde se desarrolló el proyecto existen variaciones relevantes de la profundidad de la napa entre una estación del año y otra, con variaciones de 10 m aproximadamente. Este tipo de información no está contenida en las bases de datos de la DGA, ni en los catastro revisados. Una variación de esa magnitud puede cambiar la evaluación de un sitio de medianamente aptos a no aptos.

Respecto de la calidad de la información de conductividad hidráulica la evaluación es similar, siendo escasa o bien existe a una escala no adecuada para este tipo de proyectos.

La metodología en si misma tiene la virtud que es fácil de implementar teniendo un sistema de información geográfica simple. Una mejora a evaluar sería incorporar información de la geología superficial, lo que permitiría identificar aquellos sectores que son aptos para recargar a través de balsas o a través de pozos.

Se definieron tres sectores específicos para realizar la PPRAA de los cuales se eligió el predio ubicado en el sector llamado Pichingal. La elección se realizó considerando que presenta una alta aptitud para la realización de un proyecto de recarga artificial, y que desde

el punto estratégico el dueño del predio posee una buena disposición para la construcción de las obras y posee el apoyo de la Junta de Vigilancia del río Lontué.

8.4 ANÁLISIS LEGAL

Desde el punto de vista legal lo que aplica a proyectos de recarga artificial, son el artículo N° 66 del código de aguas y lo indicado en la resolución N° 425, respecto de la información que se debe entregar a la DGA para solicitar autorización para este tipo de proyectos. Respecto a este artículo se debe indicar que al momento de comenzar el proyecto en la DGA no existía claridad del mecanismo mediante el cual se deben presentar los proyectos de recarga artificial, aun cuando en la resolución N°425 se indica el tipo de información que se debe entregar. Sin embargo, no existe claridad respecto de la profundidad de la información que se debe entregar, los formatos y si toda la información requerida es aplicable en cualquier tipo de proyecto de recarga artificial. Tampoco se tiene claridad de cuáles serán los criterios mediante los cuales la DGA realizará el otorgamiento o no del permiso para realizar un proyecto de recarga artificial.

Para pruebas piloto de la envergadura de las construidas como parte de este proyecto, no aplica la Ley Base del medio ambiente 19.300, sin embargo, se debe evaluar en obras que sean de mayor tamaño y/o cuando se trasvasen aguas desde otra cuenca.

Otro tema que debe ser revisado es el permiso sectorial (artículo 171, código de aguas) correspondiente a modificación de cauce, que debe ser presentado y autorizado por la DGA. Este es relevante cuando se realizan modificaciones de cauce como por ejemplo la construcción de una bocatoma para acceder al agua de infiltración

Respecto del proyecto en particular no fue necesario solicitar permisos, por cuanto, no aplica como proyecto de recarga artificial como tal ya que no se solicitarán derechos sobre los volúmenes infiltrados, por lo que el proyecto puede definirse como una prueba de infiltración. Tampoco aplica la modificación de cauce, ya que, el canal que fue intervenido corresponde a un canal privado, ubicado al interior del predio.

8.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS

El diseño es la parte más importante en proyectos de recarga artificial, ya que el éxito de la recarga dependerá del tipo de obra a utilizar y de las variables de control diseñadas. Es por este motivo que en proyectos de recarga artificial se realizan una serie de trabajos de campo previos al diseño definitivo de las obras, como la construcción de calicatas, medición de las tasas de infiltración superficial y sobre todo la perforación de sondajes exploratorios tendientes a caracterizar la zona no saturada del suelo y para caracterizar el acuífero en términos estratigráficos y de propiedades hidráulicas, así como la caracterización de la calidad de agua que será infiltrada y la del acuífero receptor. Comúnmente también se utilizan métodos geofísicos para caracterizar una zona más amplia a un costo menor que con una serie de sondajes.

Los trabajos de terreno anteriormente descritos permiten generar un modelo de funcionamiento hidrogeológico conceptual que permite, primero determinar si un proyecto de recarga artificial será o no exitoso y definir variables relevantes de diseño, como el tipo de tecnología de infiltración a utilizar, junto con el dimensionamiento de las obras de acuerdo a las tasas de infiltración esperadas.

El sistema PPRAA se compone de las siguientes obras: un canal de aducción, un estanque decantador, un canal aforador, una piscina de infiltración y dos pozos de observación. El método seleccionado para la prueba es de balsa de infiltración. Lo anterior fue determinado en función de la información hidrogeológica, junto con las pruebas de terreno realizadas en calicatas. Ambos antecedentes demostraron que existe en superficie y subsuperficie material grueso homogéneamente dispuesto hasta alcanzar el acuífero, que hacen propicio la infiltración a través de balsas, esto fue corroborado una vez que se construyeron los pozos de observación.

Si bien es cierto gran parte de los trabajos de terreno antes señalados están considerados en los términos de referencia y fueron ejecutados como parte del proyecto, el orden de las actividades no permiten realizar un diseño adecuado del PPRAA. En efecto, en la etapa 2 del proyecto se solicita entregar el diseño del PPRAA, antes de contar con información estratigráfica de los pozos.

En el caso de Lontue la situación no es crítica dada las buenas propiedades hidráulicas del acuífero. Sin embargo, el monitoreo del nivel del agua subterránea permitió determinar que existen al menos dos acuíferos, uno superficial al parecer colgado y uno profundo. Si bien no existen suficientes antecedentes, la información recopilada sugiere que el acuífero propiamente tal es el profundo, el que estaría desconectado del acuífero superior a través de una capa de poco espesor, ya que no fue identificada durante la perforación del pozo de observación más profundo. Esta información plantea la incertidumbre si efectivamente la utilización de balsas de infiltración es realmente la forma más apropiada de realizar recarga artificial en este sector, ya que quizás resultaría más efectivo la utilización de pozos que recarguen directamente el acuífero inferior, siempre y cuando este corresponda al acuífero regional.

La información previa es tan relevante, especialmente la obtenida desde la perforación del pozo, que en esta etapa se puede decidir si continuar o no con un proyecto de recarga artificial. En resumen es relevante realizar todos los trabajos de terreno, incluyendo la perforación de pozos exploratorios, ojalá utilizando diamantina que permite obtener muestras inalteradas del subsuelo, de manera previa al diseño del PPRAA, lo que asegura que el diseño y posterior operación sean exitosos. También se recomienda considerar para futuros proyectos que uno de los pozos exploratorios presente una profundidad mayor, ya que, se requiere conocer con mayor detalle que es lo que pasa en profundidad lo que permite entre otras cosas la mejor toma de decisiones respecto del diseño y tipo de sistema de infiltración a utilizar. En función del resultado de este pozo exploratorio se puede determinar la profundidad de los pozos de observación, que por ejemplo en el caso de Lontue hubiera permitido definir la habilitación de un pozo en el acuífero superior y otro en el acuífero inferior.

Respecto de la construcción de las obras y el funcionamiento de cada una de las partes del PPRAA diseñadas se debe indicar que en términos generales éstas funcionaron bien, permitiendo realizar las pruebas de infiltración y monitorear de manera adecuada cada una de las variables relevantes. Sin embargo, de manera particular se pueden identificar aquellas partes del PPRAA que pueden ser mejor diseñadas para futuras pruebas. Uno de los principales problemas en la operación fue la regulación del caudal de entrada al PPRAA, ya que, existió una gran variabilidad en el canal fuente, lo que produjo que en la práctica fuera casi imposible contar con un caudal constante durante un cierto periodo de tiempo. Esto implica que para futuras pruebas se requiere diseñar algún tipo de cámara de carga que permita regular el caudal de manera independiente de las variaciones propias de canal fuente.

Cabe señalar que la regulación del caudal es importante en pruebas piloto, donde se quiere determinar los caudales máximos de infiltración en régimen permanente, así como su variación en el tiempo producto de la operación del sistema. Cuando el objetivo es sólo infiltrar agua, lo relevante es contar con un buen sistema de medición que permita determinar el volumen de agua infiltrado con la precisión adecuada.

Respecto de la perforación si se hubiese tenido información precisa de la estratigrafía se hubiera preferido habilitar un pozo en el acuífero superior y otro en el inferior, de manera de evaluar mejor las propiedades de los acuíferos y del efecto de la recarga en ambos acuíferos. El pozo LO-01 conecta ambos acuíferos, incluso generando un flujo descendente de agua a través del mismo pozo de observación, que dificulta el análisis de la información hidrogeológica y la evaluación de los efectos de la prueba de infiltración.

Una parte relevante dependiendo de la calidad de agua a infiltrar corresponde al decantador o sistema de tratamiento primario, utilizado para disminuir la cantidad de sólidos suspendidos, que pueden disminuir la capacidad de infiltración del PPRAA en el tiempo. El decantador fue diseñado para el tamaño máximo de partículas esperadas en el agua de riego, sin embargo, se observó que el agua arrastró partículas más finas que las esperadas, que requiere un mayor tiempo de residencia en el decantador. En efecto, a través del monitoreo continuo de la turbiedad medida en el cajón aforador, se determinó que el tiempo de decantación para este tamaño de partícula es aproximadamente de un día y medio. Lo anterior lleva a recomendar para futuros proyectos a monitorear por un tiempo la calidad del agua en términos de calidad físico-química que llegará al PPRAA. En este punto se debe destacar que las muestras deben ser obtenidas justo en el punto donde se espera tomar el agua, ya que, el flujo se carga de sedimentos a medida que corre a través del canal de tierra en este caso. También se debe considerar que generalmente el peor momento es cuando recién llega el agua después de un periodo si riego o durante las épocas de deshielo.

Una vez tomadas las muestras se sugiere realizar pruebas de decantación tipo batch, que permiten obtener de manera empírica el tiempo de decantación de las partículas más pequeñas.

Dentro de los diseños destacados se puede mencionar el cajón aforador y la cámara de infiltración que por un costo muy razonable permitieron medir el caudal que ingresa a la

balsa con la precisión adecuada y adicionalmente esta información se mantuvo en línea, ya que se conectó al sistema telemétrico.

8.6 MONITOREO

Las variables monitoreadas fueron: a) caudal de ingreso (a través de medición del nivel), b) altura de agua en balsa de infiltración, c) turbiedad, d) nivel del acuífero, y e) la calidad química del agua de infiltración y del acuífero. Las tres primeras fueron medidas de manera continua y transmitidas a través de telemetría a un servidor que permitió ver su comportamiento en línea. El nivel del acuífero fue también medido de manera continua pero sin transmisión telemétrica, mientras que la calidad química fue medida de manera puntual a través de la medición de parámetros físico-químicos y toma de muestra para análisis de laboratorio.

Se debe indicar que se corroboró que este conjunto de parámetros es suficiente para el control y posterior análisis de la información de funcionamiento del sistema. Una mejora para futuros proyectos sería la inclusión en la telemetría, de al menos un pozo de observación. Esto permitiría adicionalmente controlar de mejor manera el funcionamiento del sistema y evaluar en línea el efecto de la inyección de agua sobre el acuífero.

De las variables medidas en la pruebas, la más importante resulta ser la altura de agua en el vertedero de entrada a la piscina de infiltración. Esta presentó una variabilidad importante debido a que el canal que entregaba el agua al sistema tenía diversos usos y proveniencias, por lo que se producían variaciones diarias importantes en el flujo del mismo canal. Estas variaciones se tradujeron en cambios en la alimentación del sistema de infiltración. Debido a lo anterior, resultó difícil fijar caudales permanentes en las pruebas.

8.7 PRUEBAS HIDRÁULICAS

Parte importante de la caracterización del acuífero se realizó a través de una prueba de bombeo de gasto variable (PGV) y de una prueba de gasto constante (PGC), ambas realizadas en el pozo LO-01, que correspondió al más profundo. La existencia de dos acuíferos que fueron conectados a través del pozo de observación LO-01 dificultó el análisis de la prueba de bombeo, ya que éstas asumen que el agua proviene del almacenamiento del acuífero y no desde una recarga.

Sin perjuicio de lo anterior, la información obtenida es concordante con los resultados obtenidos posteriormente en las pruebas de infiltración. La conductividad hidráulica obtenida (30,8 m/d) es aproximadamente 4 veces mayor a la recopilada para el sector en el análisis de antecedentes disponibles (6,9 m/d). Claramente el caudal máximo obtenido en la PGV es menor al potencial, sin embargo éste está limitado por el diámetro del pozo, que no permite utilizar bombas de mayor capacidad. Sin embargo, las pruebas de bombeo demostraron que este es un acuífero de gran potencia, pudiéndose extraer importantes cantidades de agua con pozos poco profundos. No se pudo corroborar que el acuífero sea libre, ya que el resultado de la curva de agotamiento no permite afirmar esta aseveración, surgida en base a la estratigrafía encontrada en los pozos de observación.

La utilidad principal de las pruebas de bombeo en el caso de la utilización de una balsa de infiltración es para determinar posteriormente el tiempo de residencia del agua en el acuífero. En este caso este objetivo se cumple de manera parcial, al tener una prueba que conecta dos acuíferos con energía distinta. Idealmente se deberían haber habilitado dos pozos, uno en el acuífero superior y otro en el acuífero inferior y realizar dos pruebas de bombeo, una en cada acuífero. Esta configuración permitiría caracterizar desde el punto de vista de las propiedades hidráulicas ambos acuíferos y estimar además su conexión y de este modo, mejorar las estimaciones del efecto de un proyecto de recarga artificial a escala regional y a largo plazo.

8.8 OPERACIÓN DEL PPRAA

Las variables de control definidas (caudal, turbiedad, nivel balsa) para operar el PPRAA fueron las correctas permitiendo controlar el sistema de acuerdo a lo requerido.

Lamentablemente por la gran variación del caudal del canal fuente fue muy difícil mantener un caudal constante como se había planificado. Lo anterior, tenía como objetivo determinar las tasas de infiltración para distintas alturas de agua y de este modo determinar variables de operación. Adicionalmente producto del funcionamiento propio del campo y de lluvias ocurridas durante las pruebas, hubo varios días en los que no se contó con agua para realizar recarga.

Independiente de lo anteriormente expuesto, los resultados obtenidos en estas pruebas se pueden catalogar como promisorias, por cuanto la capacidad de infiltración del sistema fue alta.

Es importante mencionar que si bien los resultados obtenidos son buenos, el tiempo de las pruebas fue corto como para tener una evaluación más certera de los resultados. Uno de los temas que no pudo ser evaluado, es el efecto sobre el nivel del acuífero en periodo de riego, cuando la napa aumenta de nivel varios metros. Muy posiblemente durante este periodo se podrían haber producido afloramientos de agua debido al aumento estacional y regional del nivel del acuífero, esto sumado al hecho de que la recarga se produciría en un acuífero colgado. Otro aspecto no evaluado producto del poco tiempo de las pruebas es el efecto de la calidad físico-química sobre la capacidad de infiltración de la balsa. Parte del efecto se pudo ver hacia el final de la prueba cuando la tasa de infiltración disminuyó, producto de la infiltración de agua con una turbiedad sobre lo recomendado. Sin embargo, no se alcanzó a probar técnicas de limpieza de las balsas, lo que habría permitido contar con mayor información para futuras pruebas o proyectos de recarga artificial.

Respecto del efecto del agua infiltrada en los niveles del acuífero se puede indicar que dada la variación estacional de los niveles y de la existencia de dos acuíferos en profundidad, el efecto es difícil de dimensionar aun cuando existe una clara relación entre tasa de infiltración en la balsa y los niveles en el acuífero. La información parece mostrar que el efecto es mayor en el pozo LO-02, situación que es esperable por cuanto es el acuífero en el cual se está realizando la infiltración.

Respecto de la calidad química en general se observa que la turbiedad es el parámetro que generalmente se encuentra sobre lo recomendado, especialmente al inicio de la operación del sistema, ya que el agua cuando comienza a escurrir levanta una cantidad significativa de sedimentos desde el fondo del canal, que son arrastrados hasta el ingreso del PPRAA. Sin embargo, esta cantidad de sólidos suspendidos no generó un efecto significativo en el sistema de infiltración, observándose solo los últimos 3 días un efecto sobre la tasa de infiltración. Se estima que en este sector en particular el efecto de la turbiedad es menos relevante dada la gran capacidad de infiltración que presenta el terreno. Sería interesante realizar pruebas tendientes a determinar de manera sitio específica un rango de funcionamiento de estos sistemas.

El efecto de la turbiedad se observa al analizar el comportamiento de la razón cauda/atura de la balsa que muestra que esta relación disminuye en el tiempo, indicando que para infiltrar un mismo caudal se requiere una mayor carga hidráulica a medida que el tiempo transcurre. Como se indicó anteriormente, no existió el tiempo suficiente para poder definir criterios de cuando limpiar la balsa en función de su eficiencia.

Otro aspecto relevante es que los mayores valores de infiltración no están asociados a valores de columna de agua mayores, como se podría pensar. Esto podría ser debido a que una mayor columna de agua podría provocar una mayor compactación del suelo y por consiguiente una menor permeabilidad.

Los resultados de los parámetros analizados dan cuenta de una mezcla de aguas entre las aguas superficiales infiltradas y las aguas subterráneas. Lo anterior es esperable en este sistema por cuanto las tasas de infiltración son altas y el acuífero superior se encuentra muy somero. En este sentido el parámetro más preocupantes corresponde al de coliformes fecales, que en el agua del canal fuente presenta valores altos, sin embargo, como fue argumentado anteriormente, esta situación no es riesgosa por cuanto la vida media de los coliformes fecales en el acuíferos es de unos pocos días. Lo anterior se refleja en los resultados de los análisis biológicos, siendo su concentración en la muestra obtenida 1 semana después de terminada la pruebas 2 número más probable (NMP), cuando la concentración en el canal fuente fue de 17.0000 NPM. Este resultado es esperable ya que el agua infiltrada es la misma que se utiliza para regar de manera habitual en el sector.

8.9 ANÁLISIS DEL EFECTO PROYECTADO EN NIVELES DEL ACUÍFERO

Para analizar los resultados de las PPRAA a nivel regional se realizó un ejercicio de modelación que permite observar el efecto en los niveles del acuífero y en la red de drenaje para determinadas condiciones, para lo cual se desarrolló un modelo numérico simplificado. El modelo presentado no fue calibrado y sólo se verificó que el gradiente y balances obtenidos estuviesen dentro de lo esperado con la información disponible. Debido a lo anterior, este modelo puede ser utilizado sólo de manera referencial y no constituye una herramienta de predicción para estimación de recursos, como tampoco fenómenos de transporte. Sin embargo, para efectos del estudio, el realizar un modelo numérico representa un ejercicio que permite un mayor entendimiento de los fenómenos involucrados que un cálculo analítico.

El modelo fue operado para evaluar una recarga de 1000 L/s de manera estacional, es decir, se recarga durante 6 meses al año, por un periodo de 50 años. La evaluación de los resultados se realizó a través de la determinación del tiempo en el cual el agua infiltrada se pierde o escurre hacia cuerpos de agua superficial (río Lontué) desde donde finalmente se pierde por escurrimiento. El criterio definido fue el 10% de la infiltración es decir 100 L/s.

El análisis arroja que bajo las condiciones impuestas, la pérdida de agua mayor o igual al 10% ocurre a partir del año 26, es decir, se puede recargar de manera artificial en la zona de estudio un caudal de 1000 L/s, durante 26 años, antes de tener una pérdida significativa de agua. Lo anterior, sin considerar que esta agua puede ser también bombeada durante periodos de sequía.

Los resultados de la simulación, aunque simplificados, son promisorios, por cuanto indican que se puede realizar recarga artificial de acuíferos a una escala de tiempo interanual. Es decir, se puede realizar recarga del acuífero por varios años antes de bombearse. Se debe tener en cuenta que el acuífero estudiado presenta una variación estacional importante provocada por las lluvias y principalmente por el riego, en donde el nivel freático sube hasta casi la superficie. Esta característica no fue incorporada al modelo y se deberá evaluar al momento de realizar un diseño de recarga artificial para esta zona en particular

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

- En general se aprecia que el estudio cumple con los objetivos planteados en cuanto a la caracterización del acuífero estudiado, identificación de zonas de recarga, la realización de un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuíferos (PPRAA), la realización de pruebas de infiltración y el análisis de sus resultados. En efecto, se cumplieron los objetivos específicos dado los siguientes términos:
 - Fue posible caracterizar la cuenca a través de información topográfica, geomorfológica, edafológica, geológica, hidrológica e hidrogeológica y a partir de ella generar una metodología que permitió identificar zonas potenciales para la realización del PPRAA.
 - En cada uno de las zonas, fue posible determinar la compatibilidad de la calidad del agua superficial a recargar con la del acuífero receptor, y así disminuir el potencial riesgo de afectar el acuífero. Lo anterior en todos los parámetros estudiados.
 - Fue posible complementar los resultados de la aplicación de la metodología de identificación de zonas de recarga con los trabajos de terreno *in situ* para seleccionar el sitio para el del PPRAA.
 - Fue posible diseñar el sistema de recarga artificial, lo que incluyó el diseño y construcción de las obras y el buen funcionamiento de la operación del sistema. El diseño contemplo obas de toma, conducción, decantación e infiltración que permitieron desarrollar el proyecto.
 - Se determinaron las constantes elásticas del acuífero a través de la realización de dos pruebas de bombeo, una de gasto variable y otra de gasto constante. Los parámetros obtenidos fueron, conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico.
 - Se midió y registraron las fluctuaciones del nivel estático (N.E.) del acuífero en forma continua en cuatro existentes del predio previo al inicio de las experiencias de recarga artificial.
 - Fue posible operar el sistema durante 2 meses aprox. y registrar datos para el análisis del comportamiento del acuífero. A partir de lo cual se estimaron las tasas de infiltración del sector.
 - Se analizó la información en términos locales y se proyectó su resultado a nivel regional a través de una modelación numérica simplificada.
- La información existente es insuficiente para desarrollar una correcta caracterización hidrogeológica de la cuenca a la escala requerida. Un ejemplo de esto es el bajo número de pozos de monitoreo de la DGA que se encuentran habilitados (sólo 10) en el área de estudio. Se requiere de mayor detalle (registro continuo de niveles por al menos 5 años, estratigrafía y mayor número de pozos a nivel regional, entre otros) para realizar tanto un proyecto piloto de recarga artificial, como un proyecto de recarga a nivel industrial.

- La elaboración de la metodología de identificación de sitios constituye una primera aproximación para la elección de lugares para realizar proyectos de recarga artificial. De acuerdo al estudio realizado, la metodología es adecuada para descartar áreas que no presentan condiciones apropiadas para desarrollar este tipo de proyectos. Se debe tener en cuenta que las variables con los rangos elegidos y su ponderación en el cálculo del valor de aptitud se obtienen de los antecedentes recopilados con ocasión de este estudio y debiesen ser revisados aplicándolos en una mayor cantidad de cuencas
- Al evaluar la metodología en la cuenca del área de estudio se obtiene que 32 % del área utilizable (relleno) presenta una aptitud baja (concentrándose en la parte baja de la cuenca), un 47 % presenta una aptitud media y un 21 % con una aptitud alta. Así, se estima que la cuenca es apropiada para proyectos de recarga artificial. En particular, la aptitud del sector donde se realizó el piloto (Pichingal) es alta. Los resultados de la prueba de infiltración coinciden con la aptitud calculada.
- Se observa que resulta fundamental realizar este tipo de proyectos trabajando en conjunto con las asociaciones de regantes que son las que administran los recursos. Esto cobra mayor relevancia en los ámbitos de disponibilidad, ya que resulta difícil estimar los recursos efectivamente disponibles a nivel predial, debido a que en general no existe información de aforos a través del tiempo en los canales matrices y menos aún en canales que son ramales de un canal más importante.
- El diseño del piloto de recarga artificial en base a una piscina de infiltración se consideró apropiado para la información con que se contaba al momento de su construcción y a los recursos disponibles. Tras realizar las pruebas se pudo corroborar que el diseño propuesto fue apropiado.
- Resulta fundamental la revisión de estudios hidrogeológicos previos para la realización de los diseños de los sistemas de infiltración. Mediante ellos se podrá establecer rangos de recarga esperados, destino y alternativas de extracción de las aguas infiltradas
- De la operación de las pruebas de infiltración, realizadas en dos etapas, se obtiene que la capacidad de infiltración del acuífero es promisoria, ya que se logró infiltrar un caudal medio de 16 y 8 L/s, utilizando una piscina de infiltración de 450 m². En ambas etapas fue posible infiltrar caudales máximos entorno a los 20 L/s. No se alcanzaron las capacidades máximas de infiltración del sistema debido a que para este caso el caudal de entrada fue limitante. Con mayor disponibilidad de agua se podría obtener un buen aporte de la recarga artificial del acuífero.
- Del modelo numérico desarrollado se obtiene que la infiltración simulada para las condiciones impuestas se conserva en el acuífero por un periodo mayor a 20 años. Esto indica la factibilidad de realizar la extracción de los volúmenes infiltrados de manera interanual. Se debe tomar en cuenta que la simulación realizada constituye sólo un ejercicio y se deberá contar con un modelo que incluya la totalidad de las

condiciones hidrogeológicas para evaluar el tiempo real en que el agua es retenida en el acuífero y la ubicación de las zonas de recarga y extracción. En particular, se infiere que las variaciones estacionales y la mayor cantidad de cursos superficiales existente podrían variar de manera importante los resultados presentados.

9.2 RECOMENDACIONES

La factibilidad de la recarga a escala industrial dependerá en gran medida de localizar sitios con mejores tasas de infiltración, con una profundidad de la napa adecuada y con disponibilidad de recursos superficiales para ello se tiene en cuenta lo siguiente:

- Se espera que a partir de la metodología propuesta para encontrar los sitios más aptos para realizar recarga, se exploren otros sitios que hayan sido catalogados con buena aptitud.
- Mejorar la red de monitoreo de niveles, especialmente en termino de profundidad del acuífero y conductividad hidráulica. Esto permitirá caracterizar la dirección media de los flujos de las aguas subterráneas e investigar la variabilidad de esta dirección, determinándose el destino de los recursos recargados. Por otro lado una mejor red de monitoreo le dará mayor validez a la metodología para seleccionar los sitios donde se realizará la recarga artificial. Finalmente se podrá caracterizar la variabilidad cíclica de la profundidad de la napa. El entendimiento de esta variable es relevante ya que la eficacia de una recarga artificial a gran escala depende de que la napa no sea excesivamente somera.
- Se recomienda realizar un estudio que permita determinar de forma precisa la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales que no se estén aprovechando durante los meses con menor demanda hídrica de los cultivos (típicamente los meses de invierno donde ocurren las mayores precipitaciones). Esto permitirá mejorar la metodología para elegir el sitio, ya que se podrá estimar el volumen total disponible para la recarga artificial.
- Se espera que en el futuro los proyectos de recarga realicen el diseño del sistema de infiltración después de haber realizado todos los trabajos de terreno, incluyendo la perforación de pozos exploratorios que permitan obtener muestras inalteradas de suelo. Esto permitirá corroborar las aptitudes del sitio, preparar un diseño especial o bien buscar otro sitio con mejores cualidades para el proyecto de recarga.
- Se deberá tener especial atención en la evaluación de la continuidad y consistencia de los recursos superficiales disponibles, ya que estos pueden verse afectados por decisiones operativas de los usuarios de los derechos, lo que provoca una alta variabilidad en la entrada del sistema. Por este motivo se recomienda utilizar como obra de toma un codo de PVC de al menos 8", que actúe como sumidero y cuyo objetivo sea mantener una altura de agua constante en la toma del sistema, de modo de que se independice de las fluctuaciones horarias y diarias en los caudales afluentes.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Stick up: Es la altura de la tubería del pozo que queda por encima de la superficie del terreno, este valor es importante ya que esta altura se toma como referencia cuando se mide la profundidad de la napa con un piezómetro. Generalmente mide entre 0,5 y 1m de largo.

Sistema de rotopercusión con entubación simultánea: Sistema de perforación en el cual se va instalando la tubería de habilitación definitiva del pozo a medida que se va perforando. Este método constructivo no considera la utilización de cribas ni engravillado del pozo.

Symetrix: Tubería ciega que sostiene la herramienta de perforación cuando se perfora con sistema de rotopercusión con entubación simultánea y que queda en el fondo del pozo construido una vez que se alcanza la profundidad objetivo y se da por finalizada la perforación del mismo.

Casing: Tubería de acero utilizada para revestir un pozo. Esta tiene múltiples usos durante la construcción de un pozo, las más comunes son instalarla en forma definitiva como parte de la habilitación o provisoriamente durante la perforación para afirmar las paredes del pozo. El casing puede ser ciego o ranurado dependiendo de para que se va a utilizar.

Bailer: Instrumento utilizado para tomar muestras de agua de un pozo, compuesto por un tubo con una bola en su interior, la cual permite el ingreso de agua y posteriormente impide su salida, haciendo posible de esta manera que se pueda extraer la muestra del pozo. Una vez que el muestreador llega al nivel de la capa freática, se levanta la bola del orificio de entrada, dejando entrar el agua en el muestreador. Cuando se retira el muestreador, la presión de la columna de agua desplaza la bola hacia abajo, cerrando la apertura de forma estanca, permitiendo de esta manera sacar la muestra del pozo.

Swabbing: Acción de utilizar un pistón (swab) para desarrollar un pozo.

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Comisión Nacional de Riego: CNR

GeoHidrología Consultores: GeoH

LO-01: Pozo de monitoreo

LO-02: Pozo de monitoreo

mca: metros columna de agua

m: metros

NTU: Unidades Nefelométricas de turbidez (del inglés: Nephelometric Turbidity Unit)

TDS: Sólidos Disueltos Totales (del inglés Total Dissolved Solids)

DQO: Demanda Química de Oxígeno

CE: Conductividad Eléctrica

PGV: Prueba de Gasto Variable

PGC: Prueba de Gasto Constante

ND: Nivel Dinámico

NE: Nivel Estático

PFQ: Parámetro Físico Químicos

Set A y Set B: Conjunto de analitos para ser medidos en el laboratorio. En el presente estudio se han considerado dos conjuntos o set, los cuales presentan distintos análisis (set A y set B). El detalle se presenta dentro del informe.