



**ESTUDIO BÁSICO
“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PILOTO
DE RECARGA ARTIFICIAL CHACABUCO-POLPAICO”**

INFORME FINAL

Santiago, marzo de 2015



ESTUDIO BÁSICO “ANÁLISIS ALTERNATIVAS PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL CHACABUCO-POLPAICO”

INFORME FINAL:

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3	ÁREA DE ESTUDIO.....	16
2	METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO.....	19
3	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y FUENTES DE RECARGA A NIVEL DE CUENCA.....	21
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA CUENCA.....	21
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	24
3.2.1	Unidades morfológicas y geología regional.....	24
3.2.2	Edafología.....	28
3.2.3	Hidrología.....	31
3.2.4	Hidrogeología.....	40
3.2.5	Calidad de aguas superficiales y subterráneas.....	49
3.2.6	Usos/derechos de aprovechamiento de aguas.....	52
3.2.7	Resumen y modelo hidrogeológico conceptual.....	56
3.3	IDENTIFICACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE AGUA.....	59
3.4	METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA ARTIFICIAL.....	63
3.4.1	Fase I.....	63
3.4.2	Fase II.....	64
3.5	EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO.....	65
3.5.1	Fase I.....	65
3.5.2	Propuesta de lugares potenciales para un PPRAA.....	75
3.5.3	Fase II.....	85
4	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO.....	87
4.1	TRABAJOS EN TERRENO.....	87

4.1.1	Metodología.....	88
4.1.2	Resultados trabajos en terreno.....	90
4.1.3	Medición de calidad de aguas.....	97
4.2	SELECCIÓN DEL MEJOR SITIO PARA REALIZAR RECARGA ARTIFICIAL	118
5	ANÁLISIS LEGAL.....	121
5.1	ANÁLISIS LEGAL Y AUTORIZACIONES.....	121
5.1.1	Conclusión y plazos análisis legal	122
5.2	CONVENIO DE COLABORACIÓN	123
6	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL	123
6.1	DETALLE DE LAS OBRAS DISEÑADAS.....	126
6.2	PERFORACIÓN DE POZOS	126
6.2.1	Pozo de infiltración CH-01	126
6.2.2	Pozo de observación CH-02	129
6.2.3	Pozo de observación CH-03.....	131
6.2.4	Filmación de pozo CH-02.....	133
6.3	DISEÑO DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS DEL PPRAA.....	135
6.3.1	Sistema de captación	135
	Conducción 1: Entre captación y obra de decantación	136
6.3.2	Obra de decantación.....	136
6.3.3	Conducción 2: Entre decantador y dispositivo de medición	137
6.3.4	Dispositivos de medición	137
6.3.5	Pozo de Inyección.....	138
6.3.6	Canal de desagüe.....	139
6.4	MEDICIÓN DE VARIABLES	139
6.4.1	Medición de caudal	142
6.4.2	Medición de nivel del acuífero	143
6.4.3	Medición de turbiedad	144
6.4.4	Control de efectos de la infiltración a través de la calidad química.....	146
6.4.5	Registro de Precipitación	150
6.4.6	Sistema de medición por telemetría	152
6.5	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS”COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS	153
7	REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	155
7.1	DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO	155
7.1.1	Pruebas de infiltración para determinación de K	155
7.1.2	Prueba N°1	156
7.1.3	Prueba N°2.....	161

7.1.4	Prueba N°3	162
7.2	OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA	166
7.2.1	Procedimiento de pruebas de infiltración	166
7.2.2	Descripción de las pruebas	167
7.2.3	Caudal de infiltración y análisis de niveles	170
7.2.4	Calidad química	179
7.3	ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA	188
7.3.1	Modelo conceptual local	189
7.4	EFFECTO PROYECTADO EN LOS NIVELES DEL ACUÍFERO.....	192
7.4.1	Construcción del modelo	192
7.4.2	Resultados	196
8	DISCUSIÓN	201
8.1	HIDROGEOLOGÍA REGIONAL	201
8.2	DISPONIBILIDAD DE AGUA	202
8.3	METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE SITIOS.....	202
8.4	ANÁLISIS LEGAL	203
8.5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS	204
8.6	MONITOREO	206
8.7	PRUEBAS HIDRÁULICAS	206
8.8	OPERACIÓN DEL PPRAA.....	207
8.9	ANÁLISIS DEL EFFECTO PROYECTADO EN NIVELES DEL ACUÍFERO ..	207
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	209
9.1	CONCLUSIONES	209
9.2	RECOMENDACIONES	210
10	GLOSARIO DE TÉRMINOS	212

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A	COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS CHACABUCO-POLPAICO
ANEXO B	DATOS DE CAUDAL MEDIO MENSUAL Y PRECIPITACIÓN MENSUAL EN LAS ESTACIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO
ANEXO C	GRÁFICOS DE PROFUNDIDADES DE LA NAPA EN POZOS DE MONITOREO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL SECTOR DE ESTUDIO (DIGITAL)
ANEXO D:	MAPA DEL CANAL DE CHACABUCO POLPAICO
ANEXO E:	BUSQUEDA DE SITIOS POTENCIALES PARA UN PPRAA
ANEXO F:	DATOS REGISTRADOS EN LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN
ANEXO G	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO DE AGUA PARA ANÁLISIS DE LABORATORIO
ANEXO G1	RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO (SET A) (DIGITAL)
ANEXO G2	ANÁLISIS QUÍMICOS ELEMENTOS MENORES Y COMPARACIÓN CON DS46
ANEXO H	MINUTAS REUNIONES CNR-GEOHIDROLOGÍA
ANEXO I	ANÁLISIS LEGAL
ANEXO J	CONVENIO APORTE PROPIEDAD SUPERFICIAL Y DERECHOS DE AGUA (DIGITAL)
ANEXO K	PRE-DISEÑO DE OBRAS INVOLUCRADAS EN EL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL
ANEXO L	FILMACIÓN POZO (DIGITAL)
ANEXO M	CATÁLOGO DE EQUIPOS (DIGITAL)
ANEXO N:	INFORMES DE POZOS P4 Y P5
ANEXO O	DATOS PRUEBA DE OPERACIÓN (DIGITAL)
ANEXO P	RESULTADOS LABORATORIO ALS (SET B) (DIGITAL)
ANEXO Q	PRUEBAS DE INFILTRACIÓN (DIGITAL)
ANEXO R	PLANO PRE-DISEÑO DE OBRAS (DIGITAL)
ANEXO S	PLANO AS BUILT OBRAS (DIGITAL)
ANEXO T	SIG_PPRAA_CNR_CHACABUCO-POLPAICO (DIGITAL)

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1: Antecedentes recopilados para el área de estudio.....	21
Tabla 3-2: Zonas edáficas de Chile.....	29
Tabla 3-3: Estaciones meteorológicas en zona de estudio y alrededores.	33
Tabla 3-4: Estadígrafos principales de series de Pp. anual en zona estudio y alrededores..	33
Tabla 3-5: Caracterización Pp. mensuales en zona estudio y alrededores.	35
Tabla 3-6: Caracterización de Pp. estacional en zona de estudio y sus alrededores.	36
Tabla 3-7: Estaciones meteorológicas con información de temperatura.....	36
Tabla 3-8: Estadígrafos principales de series de temperatura.....	36
Tabla 3-9: Caracterización de temperaturas (°C) a nivel mensual.....	36
Tabla 3-10: Estaciones fluviométricas en los alrededores de la zona de estudio	39
Tabla 3-11: Estadígrafos principales de las series de caudal medio anual en los alrededores de la zona de estudio.....	39
Tabla 3-12: Promedio mensual de caudales en las estaciones seleccionadas (m ³ /s) en los alrededores de la zona de estudio	39
Tabla 3-13: Estaciones de monitoreo en sector de estudio y características principales.....	42
Tabla 3-14: Parámetros a observar en aguas para infiltración y límite recomendado.....	52
Tabla 3-15: Red de canales en el área de estudio	53
Tabla 3-16: Distribución de los derechos de aprovechamiento otorgados según usos en el área de estudio	54
Tabla 3-17: Caudal medio mensual (L/s) para diferentes niveles de probabilidad.....	60
Tabla 3-18: Área aportante a los predios preseleccionados.....	61
Tabla 3-19: Casos en que las variables V_1 a V_3 toman sus respectivos valores.....	64
Tabla 3-20: Variación de ponderación de Variables Fase I	73
Tabla 3-21: Sector y dueño de potenciales sitios de recarga	75
Tabla 3-22: Características principales de los sitios con miras la evaluación de la Fase II ..	85
Tabla 3-23: Evaluación de los sitios (Fase II).....	85

Tabla 3-24: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico.....	86
Tabla 4-1: Resultados descripción de calicatas en el sector de Casas de Chacabuco.....	91
Tabla 4-2: Resultados ensayo de permeabilidad en el sector de Casas de Chacabuco.....	92
Tabla 4-3: Resultados de la descripción de calicatas en el sector de El Colorado	94
Tabla 4-4: Resultados del ensayo de permeabilidad en el sector de El Colorado	94
Tabla 4-5: Resultados de la descripción de calicatas en el sector Huechún	96
Tabla 4-6: Resultados del ensayo de permeabilidad en el sector de Huechún.....	96
Tabla 4-7: Parámetros mínimos de calidad del agua a medir.....	98
Tabla 4-8: Tasas de inactivación para coliformes para distintos rangos de temperatura	101
Tabla 4-9: Ubicación de muestras de agua.....	103
Tabla 4-10: Parámetros <i>in situ</i> en los puntos muestreados.....	103
Tabla 4-11: Resultados análisis elem. mayores y parámetros de calidad y comparación con normas.....	110
Tabla 4-12: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial	117
Tabla 4-13: Cálculo decaimiento de coliformes fecales sector Casas de Chacabuco	118
Tabla 4-14: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico.....	120
Tabla 5-1: Legislación vigente analizada para PPRAA	121
Tabla 6-1: Resumen de información de pozos perforados.	126
Tabla 6-2: Resumen de habilitación del pozo CH-01 (Stick Up = 0,5 m).....	127
Tabla 6-3: Resumen de habilitación del pozo CH-02(Stick Up = 0,5 m).....	129
Tabla 6-4: Resumen de habilitación del pozo CH-03 (Stick Up = 0,5 m).....	131
Tabla 6-5: Resumen de la filmación del pozo CH-02.	134
Tabla 6-6: Canal de aducción	136
Tabla 6-7: Esquema canal de rebose	139
Tabla 6-8: Cuadro resumen de medición de variables.	141
Tabla 6-9: Elementos que componen el Kit Wise box	152
Tabla 6-10: Costos de inversión PPRAA Chacabuco-Polpaico	153

Tabla 6-11: Costos de instrumentación PPRAA Chacabuco-Polpaico	154
Tabla 6-12: Valor referencial de agua infiltrada.....	154
Tabla 7-1: Resumen pruebas infiltración.....	156
Tabla 7-2: Parámetros de la Prueba N°1 de infiltración del pozo CH-01.	159
Tabla 7-3: Parámetros de la prueba de infiltración del pozo CH-01.	162
Tabla 7-4: Parámetros de la prueba de infiltración del pozo CH-01.	164
Tabla 7-5: Resumen Pruebas de Infiltración	168
Tabla 7-6: Razón ascenso caudal.....	178
Tabla 7-7: Puntos de muestreo Chacabuco	179
Tabla 7-8: Resumen de medición de parámetros físico-químicos	181
Tabla 7-9: Analitos de Interés Pruebas de Infiltración	186
Tabla 7-10: Principales Iones Analizados	188
Tabla 7-11: Tiempo para que el 10% de la recarga sea captada por el río	196

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación del área de estudio	17
Figura 1-2: Ubicación proyecto piloto.....	18
Figura 2-1: Metodología general de trabajo	20
Figura 3-1: Geomorfología de la zona de estudio	25
Figura 3-2: Geología del área de estudio	27
Figura 3-3: Drenaje de la zona de estudio	31
Figura 3-4: Estaciones meteorológicas en zona de estudio	32
Figura 3-5: Mapa de isoyetas medias anuales en la cuenca del estero Chacabuco.....	34
Figura 3-6: Promedio Pp. mensual en estaciones ubicadas dentro zona estudio.....	35
Figura 3-7: Temperatura promedio mensual en la estación Huechún Andina	37
Figura 3-8: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio y sus alrededores	38
Figura 3-9: Prom. Q medio mensual en estaciones más representativas para zona estudio	40
Figura 3-10: Estaciones de monitoreo en el sector de estudio	44
Figura 3-11: Profundidad de la Napa pozo “Fundo Los Talaveras”	45
Figura 3-12: Profundidad de la Napa pozo “Asentamiento Chacabuco”	46
Figura 3-13: Profundidad de la Napa pozo “Reserva Fundo Polpaico”	47
Figura 3-14: Profundidad de la Napa pozo “Rincón de los Molinos”	48
Figura 3-15: Curvas equipotenciales prom. entre 2009 y 2013 y pozos monitoreo zona estudio.....	50
Figura 3-16: Estaciones de calidad química DGA y mediciones de estudios existentes.....	51
Figura 3-17: Distribución de la red de canales y predios en la zona de estudio	53
Figura 3-18: Derechos de aprovechamiento de aguas aprobados en la zona de estudio.....	55
Figura 3-19: Variación mensual del Q (m ³ /s) para diferentes probabilidades de excedencia	60
Figura 3-20: Variación mensual del caudal (m ³ /s) para diferentes probabilidades de excedencia en los predios preseleccionados	62
Figura 3-21: Variable 1 Conductividad hidráulica	67

Figura 3-22: Variable 2 Cercanía y conexión a fuente de agua.....	69
Figura 3-23: Variable 3 Profundidad del nivel freático.....	71
Figura 3-24: Valor de aptitud del territorio (VA), Chacabuco-Polpaico.....	72
Figura 3-25: Resultados Fase I: Caso Base.....	74
Figura 3-26: Resultados Fase I: Simulación 1.....	74
Figura 3-27: Resultados Fase I: Simulación 2.....	74
Figura 3-28: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA, Chacabuco-Polpaico.....	76
Figura 3-29: Ubicación de Pozos con Estratigrafía.....	77
Figura 3-30: Estratigrafía y habilitación de pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco, sector Este Casas de Chacabuco.....	80
Figura 3-31: Estratigrafía del pozo ND-1301-3569, sector oeste Casas de Chacabuco.....	81
Figura 3-32: Estratigrafía del pozo ND-1301-887, sector oeste Casas de Chacabuco.....	81
Figura 3-33: Estratigrafía del pozo ND-1301-162, sector El Colorado.....	82
Figura 3-34: Estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún.....	83
Figura 3-35: Estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún....	84
Figura 4-1: Ubicación de calicatas y pozos con estratigrafía en alrededores, en los sectores pre seleccionados del área de estudio.....	87
Figura 4-2: Esquema de referencia prueba de infiltración del doble anillo a carga cte.....	89
Figura 4-3: Instalación prueba de infiltración en terreno.....	90
Figura 4-4: Trabajos en terreno- Sector Casas de Chacabuco.....	92
Figura 4-5: Calicata 1, sector Casas de Chacabuco con estratigrafía descrita.....	93
Figura 4-6: Trabajos en terreno- Sector El Colorado.....	95
Figura 4-7: Trabajos en terreno- Sector Huechún.....	97
Figura 4-8: Ubicación de las muestras de agua.....	104
Figura 4-9: Ubicación de las muestras de agua en el sector casas de Chacabuco.....	105
Figura 4-10: Ubicación de las muestras de agua en el sector El Colorado.....	106
Figura 4-11: Ubicación de las muestras en el sector Huechún.....	107

Figura 4-12: Elementos mayores y parámetros de calidad en el sector de El Colorado	112
Figura 4-13: Elem. mayores y parámetros .calidad en sector Casas de Chacabuco	113
Figura 4-14: Elementos mayores y parámetros de calidad en el sector de Huechún	115
Figura 6-1: Vista en planta del diseño del sistema de infiltración	125
Figura 6-2: Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo CH-01	128
Figura 6-3: Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo CH-02.....	130
Figura 6-4: Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo CH-03.....	132
Figura 6-5: Imagen de filmación. Se observa a la izquierda ranuras con cúmulos de PVC y a la derecha ranuras semi-tapadas en agua semi-turbia.....	134
Figura 6-6: Canal construido.....	135
Figura 6-7: Esquema decantador.....	137
Figura 6-8: Esquema dispositivo de medición.....	138
Figura 6-9: Diagrama de ubicación equipos de medición.....	140
Figura 6-10: Equipo usado y ubicación para la medición de caudales.	142
Figura 6-11: Equipo usado para la medición de niveles e instalación en el pozo CH-01	144
Figura 6-12: Pozómetro para medir profundidad del agua subterránea en pozos	144
Figura 6-13: Equipo usado para la medición niveles (Izq.) y turbidez (Der).....	145
Figura 6-14: Equipo para muestreo hidroquímico.(Set B)	148
Figura 6-15: Equipo de medición multiparámetros	149
Figura 6-16: Pp. acumulada cada 24 horas en estación Río Aconcagua, Chacabuquito....	150
Figura 6-17: Ubicación de estación DGA usada para el monitoreo de la precipitación.....	151
Figura 6-18: Sistema de telemetría	152
Figura 7-1: Esquema infiltración en pozo zona no saturada y parámetros utilizados en fórmula 5.1.....	157
Figura 7-2: Gráfico para obtención del coef. conductividad no saturada, Cu, Zagar (1953).	158
Figura 7-3: Registro de la Prueba N°1 de infiltración.....	160
Figura 7-4: Esquema de ensayo Lefranc y los parámetros utilizados en su cálculo.	161

Figura 7-5: Diagrama semilogarítmico del descenso en función del tipo de la Prueba N°3.	163
Figura 7-6: Registro de la Prueba N°2 y N°3.	165
Figura 7-7: Caudales Pruebas de Infiltración	169
Figura 7-8: Ubicación Pozos en zona de Estudio.	170
Figura 7-9: Evolución de Niveles Pozos Zona de Estudio	171
Figura 7-10: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-01 (infiltración)	173
Figura 7-11: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02	175
Figura 7-12: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02 detalle	175
Figura 7-13: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-03	177
Figura 7-14: Gráfico razón ascenso caudal.	179
Figura 7-15: Ubicación Puntos de Muestreo	180
Figura 7-16: Parámetros Físico-Químicos: pH.	182
Figura 7-17: Parámetros Físico-Químicos: SDT y Turbidez.	182
Figura 7-18: Parámetros Físico-Químicos: Temperatura.	183
Figura 7-19: Parámetros relevantes y normados de interés para pruebas de infiltración.	186
Figura 7-20: Diagrama de Piper	187
Figura 7-21: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA	191
Figura 7-22: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA	192
Figura 7-23: a) Discretización espacial y condiciones de borde modelo numérico.	195
Figura 7-24: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 1.	197
Figura 7-25: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 40.	198
Figura 7-26: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 50.	199
Figura 7-27: Perfil de niveles del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial para el año 1, año 40 y año 50	200

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 abastecimiento hídrico. Este recurso tiene una recarga natural restringida, relacionada con la estacionalidad del agua superficial. Debido a lo anterior, es deseable analizar la 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.

El sector acuífero de Chacabuco-Polpaico, en la región Metropolitana, fue declarado como área de restricción por la DGA para nuevas extracciones de aguas subterráneas mediante resolución N°286 del 1 de septiembre de 2005. Por este motivo la Comisión Nacional de Riego (CNR) considera relevante el entendimiento del sistema subterráneo del acuífero que se desarrolla en la cuenca del estero Chacabuco, la identificación de sitios para recargar y el desarrollo de pruebas técnicas.

En este contexto, la CNR encargó a GeoHidrología Consultores Ltda. (GeoH) desarrollar un estudio de recarga artificial del acuífero en la subcuenca de Chacabuco-Polpaico. Este estudio de recarga artificial incluye la evaluación de posibles zonas y métodos de infiltración, junto a la implementación del proyecto piloto y análisis de resultados en la cuenca del río Maipo, dentro de la subcuenca Mapocho Bajo, provincia de Chacabuco, Región Metropolitana.

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 Casas de Chacabuco 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 de la realización de trabajos en terreno preliminares, 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. Además se desarrollaron pruebas de infiltración, con lo que se determinó la conductividad del acuífero.

Con la información obtenida se implementó un PPRAA en base a pozo de infiltración, el cual se compone en su globalidad de: 1) un canal de aducción, 2) un decantador, 3) un dispositivo de medición, compuesto por un cajón aforador y una cámara de infiltración, 4) un pozo 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 satisfactorios desde el punto de vista del desarrollo general del proyecto, ya que se cumplió con sus objetivos generales y específicos. En particular se realizaron una serie de experiencias de infiltración, con caudales variables hasta 3,3 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 describe tanto las actividades de terreno como de gabinete realizadas para este estudio en conjunto con un completo análisis de resultados y las correspondientes conclusiones. Junto con lo anterior, se incluyen recomendaciones en las que se proyectan los trabajos y actividades para continuar con los proyectos de recarga artificial en el país. 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 Chacabuco-Polpaico, 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 dos 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 la 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

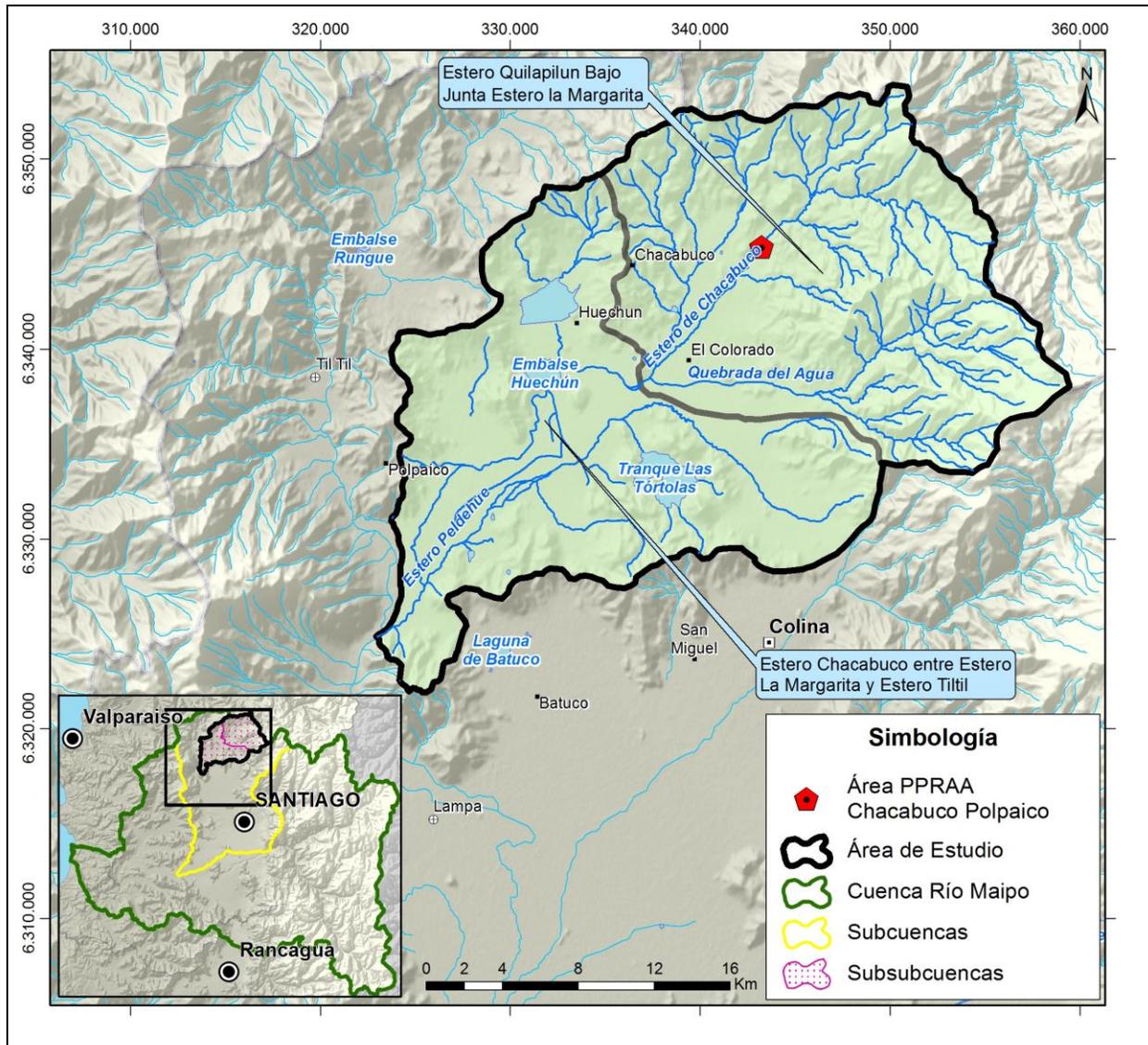
La zona de estudio se ubica en la cuenca del río Maipo, en la subcuenca Mapocho Bajo, específicamente en las sub-subcuencas definidas por la Dirección General de Aguas (DGA): Estero Quilapilún Bajo Junta Estero La Margarita, ubicada al noreste del área y Estero Chacabuco entre Estero La Margarita y Estero Til Til, ubicada al suroeste del área. (Figura 1-1).

El área de estudio se ubica en la Región Metropolitana, provincia de Chacabuco, a unos 35 km al norte de Santiago, comprendiendo una superficie total de 654 km². Se ubican algunos poblados importantes como Chacabuco, El Colorado y Huechún (Figura 1-1).

En el área de estudio hay dos tranques de envergadura: tranque Huechún, perteneciente a Codelco, división Andina y tranque Las Tórtolas perteneciente a Anglo American Chile, de la minera Los Bronces (Figura 1-1). Adicionalmente existe un embalse de riego en la zona de Huechún, aguas abajo del tranque Huechún de Codelco, el cual se llena con agua para uso agrícola sólo cuando existen crecidas del estero Chacabuco.

El sector seleccionado para la realización del estudio se encuentra localizado en la zona de Casas de Chacabuco, circunscrito en la comuna de Colina, provincia de Chacabuco, Región Metropolitana. El acceso al condominio se emplaza cercano a la Ruta 57 CH (Autopista Los Libertadores), aproximadamente 20 Km al norte de Colina o 15 Km al sur del Santuario de Auco, ver Figura 1-2

Figura 1-1: Ubicación del área de estudio



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

Figura 1-2: Ubicación proyecto piloto.



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

2 METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

El estudio Prueba Piloto Recarga Artificial del acuífero de Chacabuco-Polpaico 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 llamado Discusión (capítulo 8), 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 hidrogeológicos del área de estudio,
- Metodología Identificación Zonas de Recarga: Desarrollo de una metodología que definió las zonas de mejor potencial para realizar recarga artificial de acuíferos,
- 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 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 infiltración para determinar las constantes elásticas del acuífero,
- Re-diseño PPRAA: La información obtenida validó el pre-diseño de forma general y se aumentó ligeramente la profundidad de los pozos,
- Construcción de obras: Construcción de obras hidráulicas del sistema de infiltración, tales como: toma, canales de aducción, decantador, sistema de

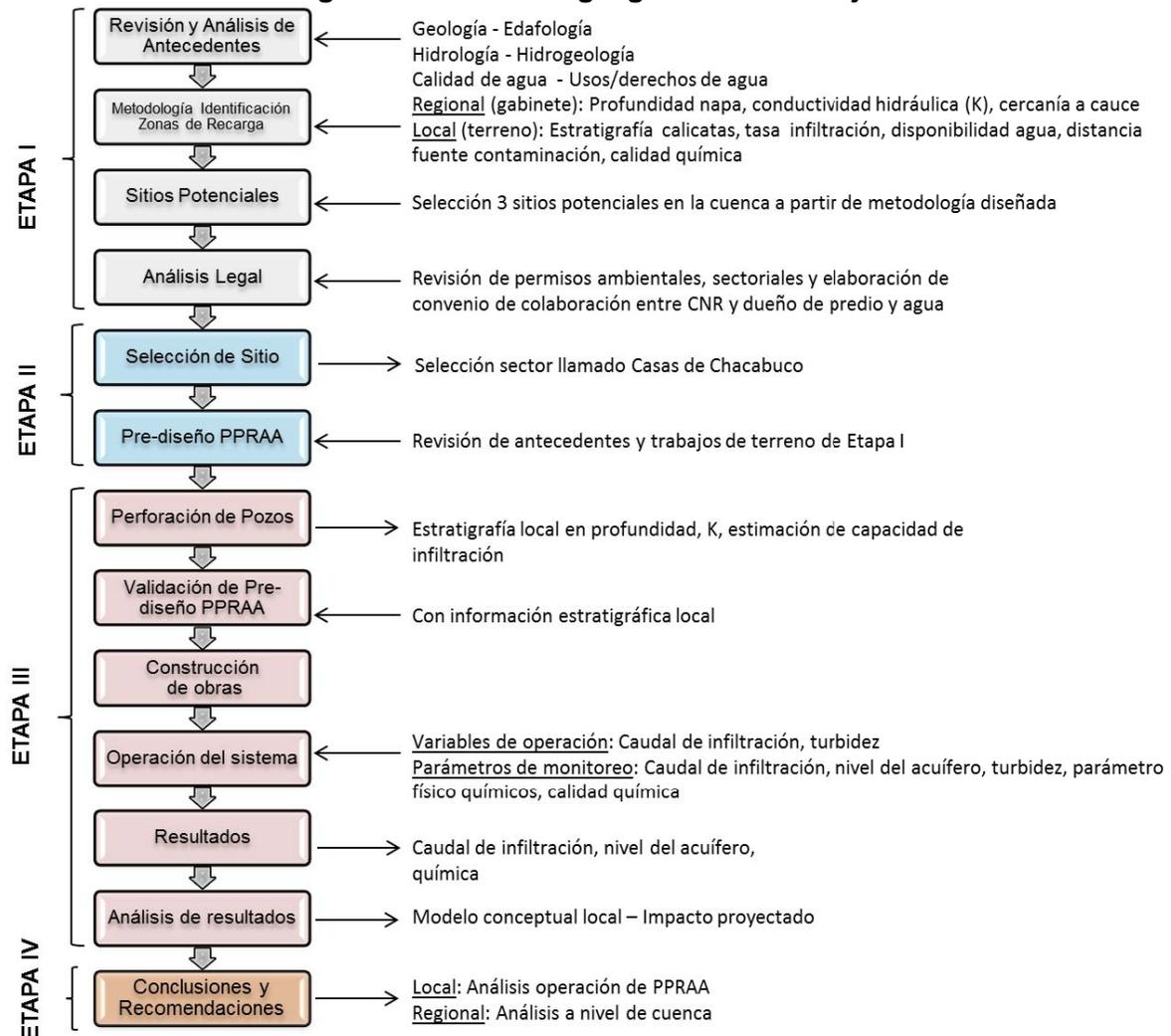
medición (cajón aforador y cámara de infiltración), canal de desagüe. Instalación de equipos de instrumentación del sistema (transductores de presión, turbidímetro),

- 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:

- Conclusiones y 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



3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN 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 para 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 Tabla 3-1 con la información utilizada, seguido de un resumen de los antecedentes principales.

Tabla 3-1: Antecedentes recopilados para el área de estudio.				
Autor	Fecha	Nombre	Fuente	Utilidad para el presente trabajo
Ayala, Cabrera y Asociados	2000	Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Estudio realizado para la DGA.	http://www.dga.cl/	Hidrogeología
Confederación Hidrográfica de Guadiana	2008	Programa hidrológico Viabilidad de recarga de acuífero, Plan Especial del Alto Guadiana, España	http://www.chguadiana.es/	Calidad de aguas
CODELCO	2004	Monitoreo Ambiental División Andina Proyecto Embalse Ovejería	http://www.sea.gob.cl/	Calidad de aguas
DGA	1987	Balance hídrico de Chile	www.dga.cl	Hidrología
DGA	2004	Determinación de la disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo hasta la confluencia con el estero Puangue. Informe técnico	http://www.dga.cl/	Hidrogeología
DGA	2014	s/n	http://www.dga.cl/	Caudales, precipitaciones y temperatura mensual
DGA	2014	s/n	Oficinas DGA	Evaporación, aforos
DGA-CPA	2014	Derechos de aprovechamiento	http://www.dga.cl/	Derechos de aprovechamiento
DGA-BNA	2014	Estadística Hidrometeorológica	http://www.dga.cl/	Niveles estáticos

Tabla 3-1: Antecedentes recopilados para el área de estudio.

DICTUC	1997	Estudio de Impacto Ambiental. Proyecto Tranque de relaves N°5 Cemento Polpaico	http://www.sea.gob.cl/	Calidad de aguas y geología de subsuperficie.
Edáfica - Suelos y medio ambiente	2012	Proyecto plan de recuperación de suelos para la explotación y procesamiento de rocas en cantera; Canteras de Chacabuco	http://www.sea.gob.cl/	Edafología
Gestión Ambiental Consultores S.A.	2011	Modelo conceptual sistema tranque-acuífero sector Ovejería, Proyecto de Expansión Andina 244. Anexo N°4.4 del EIA Proyecto Expansión Andina 244. Estudio preparado para CODELCO-CHILE.	http://www.sea.gob.cl/	Calidad de aguas
Luzio, W., Casanova, M. y Seguel, O.	2010	Suelos de Chile	Oficina CIREN	Edafología
SERNAGEOMIN	1999	Mapa geológico 1:100.000 Área Tiltill-Santiago	Documento físico	Geología de Superficie
SERNAGEOMIN	2003	Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000. Versión digital. SERNAGEOMIN	Mapa digital SERNAGEOMIN	Mapeo geológico de superficie

Ayala, Cabrera y Asociados, 2000. Modelo de simulación hidrológico operacional cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Estudio realizado para la DGA.

Este estudio corresponde a una modelación integral de los recursos hídricos de la cuenca del río Maipo, con el fin de simular la gestión asociada a la utilización de recursos superficiales y subterráneos en los diferentes usos. El trabajo fue desarrollado en varias etapas, que incluyeron estudios básicos (aguas superficiales, aguas subterráneas y demandas de agua), desarrollo y finalmente la operación de los modelos de simulación. Los modelos de simulación contemplaron: (1) modelo de simulación de operación del sistema (modelo integral, superficial y subterráneo simplificado), (2) modelos hidrogeológicos (para 4 sectores hidrogeológicos incluyendo intrusión salina en el sector costero), (3) modelo de calidad de agua subterránea, (4) modelo de calidad de agua superficial y (5) modelo de pronósticos.

La información de mayor interés para el presente estudio, en el trabajo de Ayala, Cabrera y Asociados, 2000, corresponde a los estudios básicos de aguas subterráneas, específicamente formaciones acuíferas. La geología de subsuperficie de la extensa cuenca del río Maipo fue subdividida en dos grandes zonas: (1) la cuenca de los ríos Mapocho y Maipo, incluyendo el interfluvio donde se emplaza la ciudad de Santiago y (2) los principales

valles tributarios de ambos ríos. Dentro de los principales valles tributarios al sistema Maipo-Mapocho, se describen: (1) valle del estero Lampa, (2) valle del estero Colina, (3) valle del estero Angostura y (4) valle del estero Puangue. Dentro de estos sectores, el valle del estero Lampa es de interés para el presente estudio, ya que contiene el sector de Chacabuco-Polpaico.

DGA, 2004. Determinación de la disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo hasta la confluencia con el estero Puangue. Informe técnico.

Este trabajo tiene como objetivo determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en los acuíferos de la región Metropolitana para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento. La evaluación de la disponibilidad de aguas se realiza en base a la aplicación de modelos de simulación hidrogeológica, de acuerdo con los antecedentes disponibles y los criterios que emplea la Dirección General de Aguas en esta materia. El modelo del estudio DGA, 2004, involucra el llano principal del área metropolitana y la provincia de Chacabuco. Como resultado de este estudio se indica que no es posible el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo para los diversos sectores, después de expedientes entre los años 1993 y 1998, a excepción de un sector, cuya fecha es marzo de 2004.

Para el presente estudio es de interés la descripción de sectores y unidades hidrogeológicas.

DICTUC, 1997. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Tranque Relaves N°5 Cemento Polpaico S.A.

Este estudio entrega una evaluación del impacto ambiental del proyecto Tranque de Relaves N°5 de la compañía Cemento Polpaico S.A., sometido a la consideración de la Comisión Nacional de Medio Ambiente de la Región Metropolitana en virtud del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Este documento incluye una descripción del proyecto, el marco legal, caracterización del área de influencia o línea base, evaluación de impactos y plan de manejo ambiental.

El capítulo de caracterización del área de influencia y sus anexos es de especial relevancia para el presente estudio, ya que posee información de calidad de aguas y estratigrafía.

Gestión Ambiental Consultores S.A., 2011. Modelo conceptual sistema tranque-acuífero sector Ovejería, Proyecto de Expansión Andina 244. Anexo N°4.4 del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Expansión Andina 244. Estudio preparado para CODELCO-CHILE.

El objetivo principal del estudio es presentar el modelo hidrogeológico conceptual del sistema Tranque Ovejería-Acuífero, del sector de la rinconada de Huechún, con el fin de caracterizar la situación actual de ese sistema de aguas subterráneas, e inferir el impacto esperado en él, por la ejecución del proyecto de crecimiento de producción a 244 ktpd que desarrolla la

División Andina de CODELCO. La metodología de trabajo corresponde a una recopilación y posterior análisis de antecedentes relacionados con geología, hidrología e hidrogeología.

Este trabajo identificó 12 unidades hidrogeológicas con permeabilidades entre 0,0005 y 77 m/d. Se observa que las aguas subterráneas naturales presentan una química bicarbonatada-cálcica. Por otra parte, los pozos en el área de influencia del tranque muestran una composición sulfatada en su mayoría cálcica. El análisis de la concentración de sulfatos indica que la influencia de las aguas del tranque en las aguas naturales del sector se ha extendido hacia el sur de éste, desde los centros del valle de la rinconada, y hacia el oeste.

Este trabajo entrega un balance de aguas del sistema tranque-acuífero área Huechún para 3 escenarios: (i) condición sin tranque Ovejería (diciembre, 1999), (ii) condición con tranque Ovejería (noviembre, 2008) y (iii) condición con tranque Ovejería y con barrera hidráulica (octubre, 2010). El balance sin tranque Ovejería muestra 74 l/s de entradas y 64 l/s de salidas, con una diferencia entre los flujos de agua de entrada y salida de un 14% (10 l/s), lo que se considera aceptable. Por otra parte el balance con tranque Ovejería y sin barrera hidráulica muestra entradas de 240 l/s, salidas de 228 l/s, con una diferencia entre ingresos y egresos de 12 l/s (6%), lo que se considera aceptable. Por último, el balance con tranque Ovejería y con barrera hidráulica muestra entradas de 240 l/s y salidas de 331 l/s. La diferencia entre ingresos y egresos es igual a 91 l/s (30%). Esta diferencia refleja la disminución de los niveles de las aguas subterráneas en el sector, producto de la operación de la barrera hidráulica. Es decir, el bombeo de la barrera modificaría los niveles estáticos, llevándolos de vuelta a valores existentes antes de la operación del tranque.

Finalmente, la caracterización del impacto sobre el sistema acuífero de la rinconada bajo el escenario de la ejecución del proyecto crecimiento minero muestra una disminución del potencial flujo pasante de agua proveniente del tranque de relaves, alcanzando rangos inferiores a 85 l/s, los que en una fracción importante serán captados con una barrera hidráulica. Como consecuencia, el flujo hacia aguas abajo de la barrera, a través del acuífero, de aguas sulfatadas provenientes del tranque, será de una magnitud aún más reducida.

El trabajo de Gestión Ambiental Consultores S.A., 2011, entrega información relevante para el presente estudio relacionado con calidad de aguas.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

3.2.1 Unidades morfológicas y geología regional

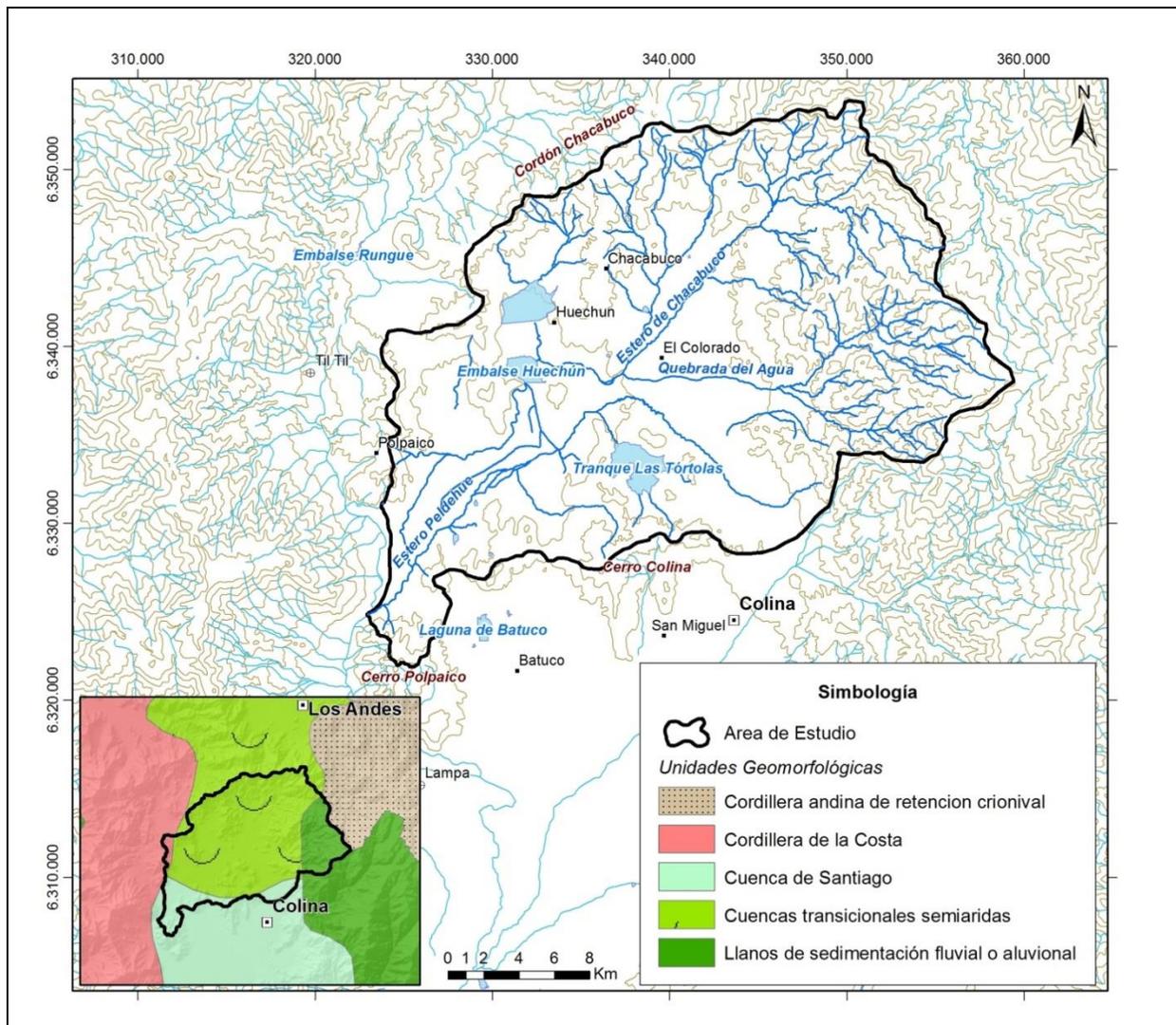
3.2.1.1 Unidades morfológicas

El área de estudio se ubica en la Depresión Intermedia, que en esta latitud es denominada Cuenca Transicional Semiárida (Figura 3-1). Limita al norte con el cordón de Chacabuco, que corresponde a una cadena montañosa que cruza de forma transversal entre la Cordillera de los Andes (que en esta zona corresponde a la cordillera andina de retención crionival) y la Cordillera de la Costa. Este cordón separa el valle del río Aconcagua, del valle del río Maipo. Por el este, el área de

estudio limita con cordones montañosos pertenecientes a la Cordillera de los Andes, por el oeste, con la Cordillera de la Costa y al sur con los cerros de Colina y Polpaico.

El área de estudio es drenada principalmente por el estero Chacabuco, donde aguas arriba del embalse Huechún, su principal tributario corresponden al estero Huechún (o estero de la Cuesta), posteriormente recibe las aguas del estero Quilapilún para desembocar en el embalse Huechún. Bajo el embalse Huechún, el estero Chacabuco recibe las aguas del estero Peldehue, siguiendo un sentido de flujo hacia el suroeste (Figura 3-1).

Figura 3-1: Geomorfología de la zona de estudio



3.2.1.2 Geología de superficie

La geología del área de estudio proviene de la carta geológica 1:100.000 Área Tiltil-Santiago (SERNAGEOMIN, 1999) (Figura 3-2). Este mapa muestra un dominio de rocas volcanoclásticas cretácicas y eocenas, cortadas por intrusivos de edades cretácicas a miocenas. Estas unidades se encuentran formando los principales cerros del área de estudio. Hacia los sectores más bajos en cota, cubriendo las unidades más antiguas, se observan depósitos no consolidados asignados al cuaternario. A continuación se describen brevemente estas unidades.

Rocas estratificadas

Formación Las Chilcas (Kilcv) (Aptiano?-Albiano): Corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria de 3000 m de espesor aproximado. La Formación Las Chilcas aflora en la franja occidental del área de estudio. Se encuentra intruído por cuerpos del Aptiano-Cenomaniano.

Formación Lo Valle (Kslv) (Maastrichtiano-Paleoceno?): Corresponde a una secuencia piroclástica de composición andesítica a riolítica, con intercalaciones de lavas y rocas sedimentarias continentales de hasta 1800 m de espesor. Se observa en los cerros en la franja central de la zona de estudio. Se encuentra intruída por cuerpos del paleoceno-mioceno.

Formación Abanico (OIMa) (Eoceno Superior?-Mioceno Inferior): Corresponde a una secuencia principalmente volcánica andesítica a basáltica, con intercalaciones piroclásticas y sedimentarias continentales con espesor expuesto de aproximadamente 2000 m. Aflora en el sector oriental de la zona de estudio, donde se encuentra intruída por rocas oligo-miocenas.

Sedimentos no consolidados recientes

Relleno artificial (Qra) (Holoceno): Corresponden a depósitos heterocomposicionales, orgánicos e inorgánicos, producto de la actividad antrópica.

Depósitos de remoción en masa (Qrm) (Pleistoceno-Holoceno): Corresponden a sedimentos que incorporan bloques de hasta 10 m de diámetro.

Depósitos fluviales (Qf) (Holoceno): Corresponden a sedimentos no consolidados constituidos por rípios, gravas, gravas arenosas clasto-soportadas, con clastos redondeados.

Depósitos fluviales antiguos (Qfa) (Pleistoceno-Holoceno): Corresponden a sedimentos no consolidados constituidos por gravas, rípios, gravas arenosas, arenas y limos.

Depósitos coluviales (Qc) (Pleistoceno Superior-Holoceno): Corresponden a sedimentos no consolidados formados principalmente por clastos y bloques mal seleccionados.

Depósitos aluviales de piedemonte (Qap) (Pleistoceno Superior-Holoceno): Corresponden a sedimentos no consolidados ubicados en la desembocadura de quebradas mayores.
 Depósitos aluviales (Qa) (Pleistoceno Medio-Pleistoceno Superior): Corresponden a sedimentos no consolidados formados por gravas y arenas, con menor proporción de finos.
 Depósitos lacustres (Ql) (Pleistoceno-Holoceno): Corresponden a sedimentos no consolidados impermeables, formados por limos, arcillas y arenas limosas, finamente laminados o macizos, ubicados en zonas deprimidas, donde la napa freática se encuentra a profundidades menores de 5 m, o aflora en superficie.

Rocas intrusivas

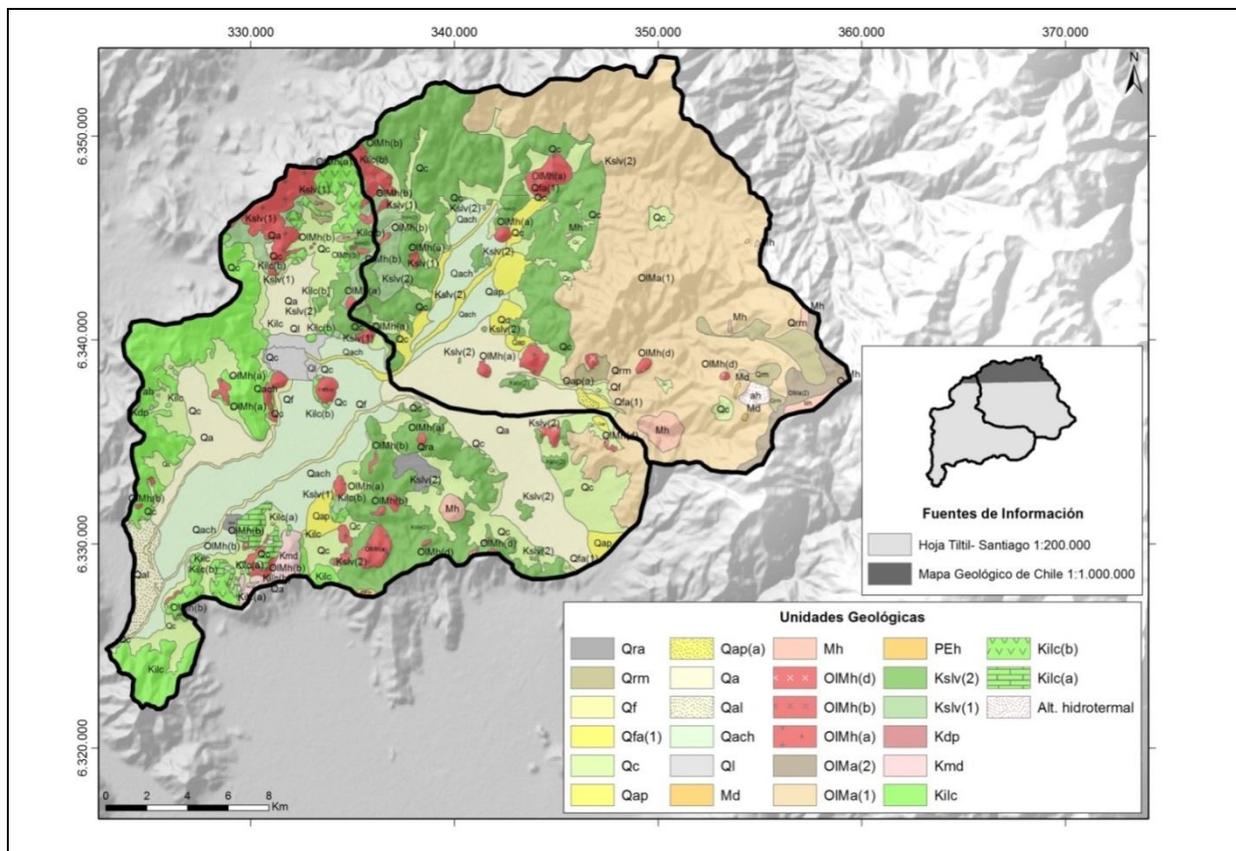
Dioritas cuarcíferas a monzonitas cuarcíferas (Kmd) (Aptiano-Cenomaniano).

Intrusivos hipoabisales (PEh) (Paleoceno-Eoceno).

Intrusivos hipoabisales (OIMh) (Eoceno-Mioceno Inferior).

Intrusivos hipoabisalesandesíticos y dacíticos (Mh) (Mioceno).

Figura 3-2: Geología del área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de SERNAGEOMIN, 1999 y SERNAGEOMIN 2003

3.2.1.3 Geología de subsuperficie

Del informe DICTUC, 1997, se puede obtener una caracterización general de la geología de subsuperficie de toda la zona. En dicho informe se describe el relleno de la cuenca como heterogéneo, tanto de forma vertical como horizontal. El relleno está compuesto por diversos niveles de distintas granulometrías entre los cuales se encuentran capas de arcillas y limos.

La génesis del relleno tendría lugar, principalmente, en los flujos de barro del cuaternario provenientes de los cordones montañosos que enmarcan la cuenca.

En el informe CODELCO (2004), se presentan perfiles transversales con dirección norte-sur y este-oeste para el sector de Ovejería (zona centro-oeste del área de estudio), la información presentada respalda lo dicho en el informe DICTUC, 1997. Los perfiles, elaborados en base a estratigrafía de pozos profundos y geofísica (TEM y sísmica), muestran un relleno sedimentario de un espesor de hasta 150 m compuesto por sedimentos de distintas granulometrías que van desde arcillas a gravas gruesas. En este informe se interpretan estos depósitos como originados por un sistema fluvio-aluvial, asociado al estero Chacabuco.

Por otro lado se recopilaron los expedientes DGA asociados a derechos de agua subterránea. De estos expedientes se extrajo la información estratigráfica disponible y se construyeron columnas estratigráficas (Anexo A). La información estratigráfica obtenida se concentra principalmente en la zona este del área de estudio. Del análisis realizado se puede destacar que son abundantes los niveles de arcilla (o con alto contenido de esta), de potencias que pueden alcanzar decenas de metros. Estos se presentan intercalados con niveles clásticos compuestos por arena y granulometrías gruesas (grava, ripio, bolones), en distintas proporciones. El espesor del relleno sedimentario presenta espesores de al menos 120 m hacia el centro de la cuenca (como se observa en el pozo ND-1301-595).

De los antecedentes revisados se puede concluir que la estratigrafía de la cuenca presenta una gran variabilidad lateral y vertical, con intercalaciones de niveles clásticos de distintas granulometrías y niveles arcillosos, que constituirían diversos niveles acuíferos. El espesor del relleno sedimentario alcanzaría los 150 metros hacia el centro de la zona de estudio.

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 tienen sus límites a lo largo de distintos paralelos que cruzan el país. Estas 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 C, 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 Depresión Intermedia.

Los suelos de la depresión intermedia pueden ser agrupados en: (1) suelos en terrazas aluviales, (2) suelos en posición de cerros, (3) suelos en posición de piedemont, (4) suelos en cuenca de sedimentación lacustre y (5) suelos de origen volcánico (Luzio et al., 2010). La zona de estudio se encuentra en posición de piedemont (Agrolog, 1981), cuyas características se describen a continuación:

Suelos en posición de Piedemont: Estos suelos ocupan una posición intermedia entre los cerros y los valles intermontanos y, en su mayoría, sus materiales de origen provienen de los sedimentos transportados desde las partes más elevadas del relieve. Las pendientes más suaves son de 1 a 3% y las más pronunciadas son de 8 a 15%. Son suelos profundos y moderadamente profundos y solamente en algunos casos son suelos delgados (Luzio et al., 2010).

El sustrato está constituido por gravas angulares y subangulares asociados a una matriz muy variable, cuya granulometría puede ir desde arenas gruesas hasta arcilla y en porcentajes muy variables. Los colores superficiales son pardo, pardo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro que, en algunos casos puede variar a pardo amarillento oscuro en los horizontes más profundos.

A causa del origen de estos suelos, las variaciones texturales pueden ser considerables tanto en superficie como en profundidad; de esta forma las clases texturales de los epipedones puede ser arenoso franco, franco arenosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, franco arcillosa y arcillosa, es decir, casi toda la gama del triángulo textural. En los horizontes más profundos la variabilidad es similar. Cabe hacer notar, eso sí, que dentro de cada perfil las clases texturales son relativamente homogéneas, con lo cual se podría establecer que existen piedmonts con suelos de clases texturales gruesas, medias y finas (Luzio et al., 2010).

La estructura es predominantemente de bloques subangulares medios y finos; en algunas series desaparece (maciza) en los horizontes más profundos. La penetración radical es adecuada y se han descrito raíces finas escasas hasta la profundidad de descripción. El pH de los horizontes superficiales varía entre 6.0 y 7.4; en los horizontes más profundos es un poco más elevado, varía entre 7.2 y 8.3. La saturación de bases (SB) se encuentra siempre sobre 70%. A causa de la posición y las pendientes, estos suelos tienen buen drenaje y sólo en algunas fases se puede presentar un drenaje moderado. La pedregosidad, tanto en el perfil como en superficie, es común a todos los suelos y ha sido calificada desde moderada a abundante.

La mayoría de los suelos pertenece al Orden Mollisol, Grandes Grupos Argixerolls y Haploxerolls; le siguen los suelos pertenecientes al Orden Inceptisol, Gran Grupo Haploxerept (Luzio et al., 2010).

La zona de estudio, dentro de la subcuenca de Rungue-Polpaico, está constituida por extensos piedemonts de inclinación oriente-poniente y norte-sur y cuyas pendientes dominantes son planas a suavemente inclinadas. Los suelos son profundos a moderadamente profundos, de texturas moderadamente finas y finas y fertilidad natural alta.

Estos suelos se encuentran subutilizados debido a la falta de agua de riego (Agrolog, 1981).

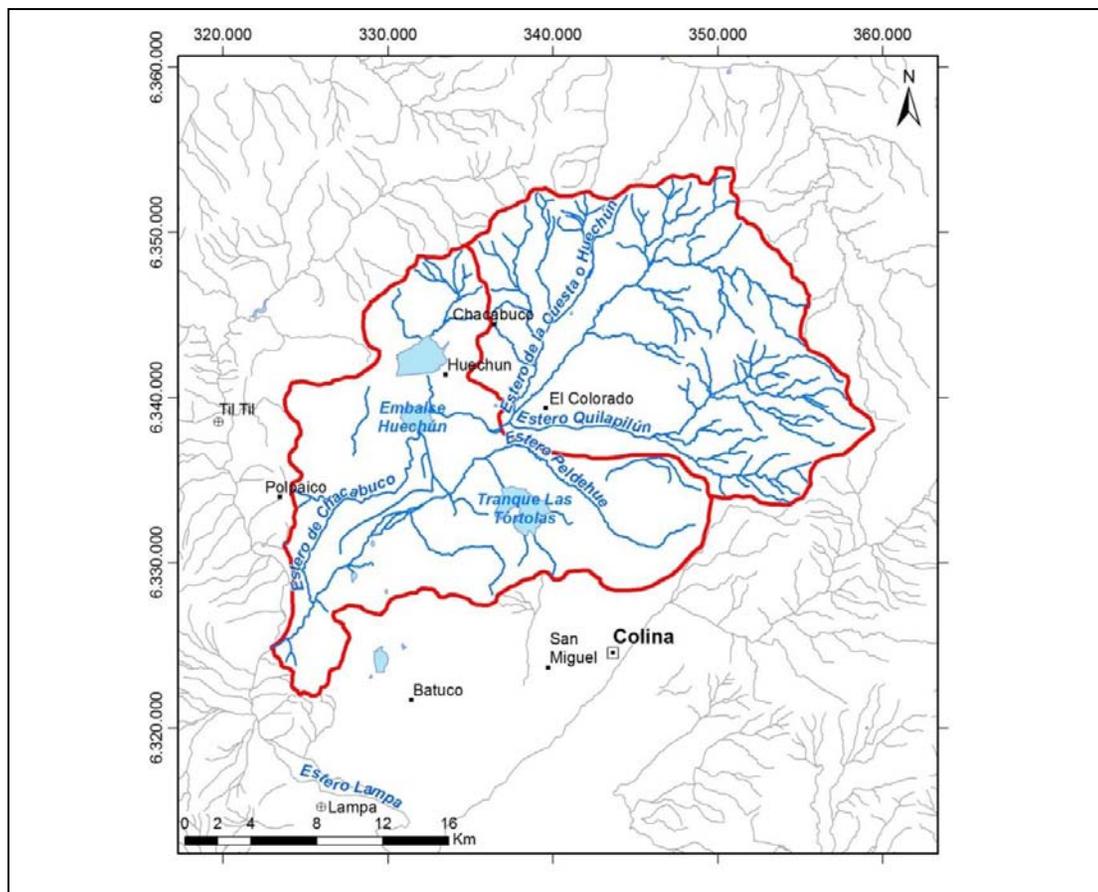
3.2.3 Hidrología

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.

La zona de estudio es drenada principalmente por el estero Chacabuco cuyo principal tributario corresponde al estero Huechún (o estero de la Cuesta), aguas arriba del embalse Huechún, posteriormente recibe las aguas del estero Quilapilún para desembocar en el embalse Huechún (Figura 3-3). Aguas abajo del embalse Huechún, el estero Chacabuco recibe las aguas del estero Peldehue, siguiendo un sentido de flujo hacia el suroeste y para posteriormente drenar en el estero Lampa.

En el año 2005 el sector Chacabuco-Polpaico, perteneciente al acuífero Maipo fue declarado área de restricción de aguas subterráneas según resolución DGA 286.

Figura 3-3: Drenaje de la zona de estudio

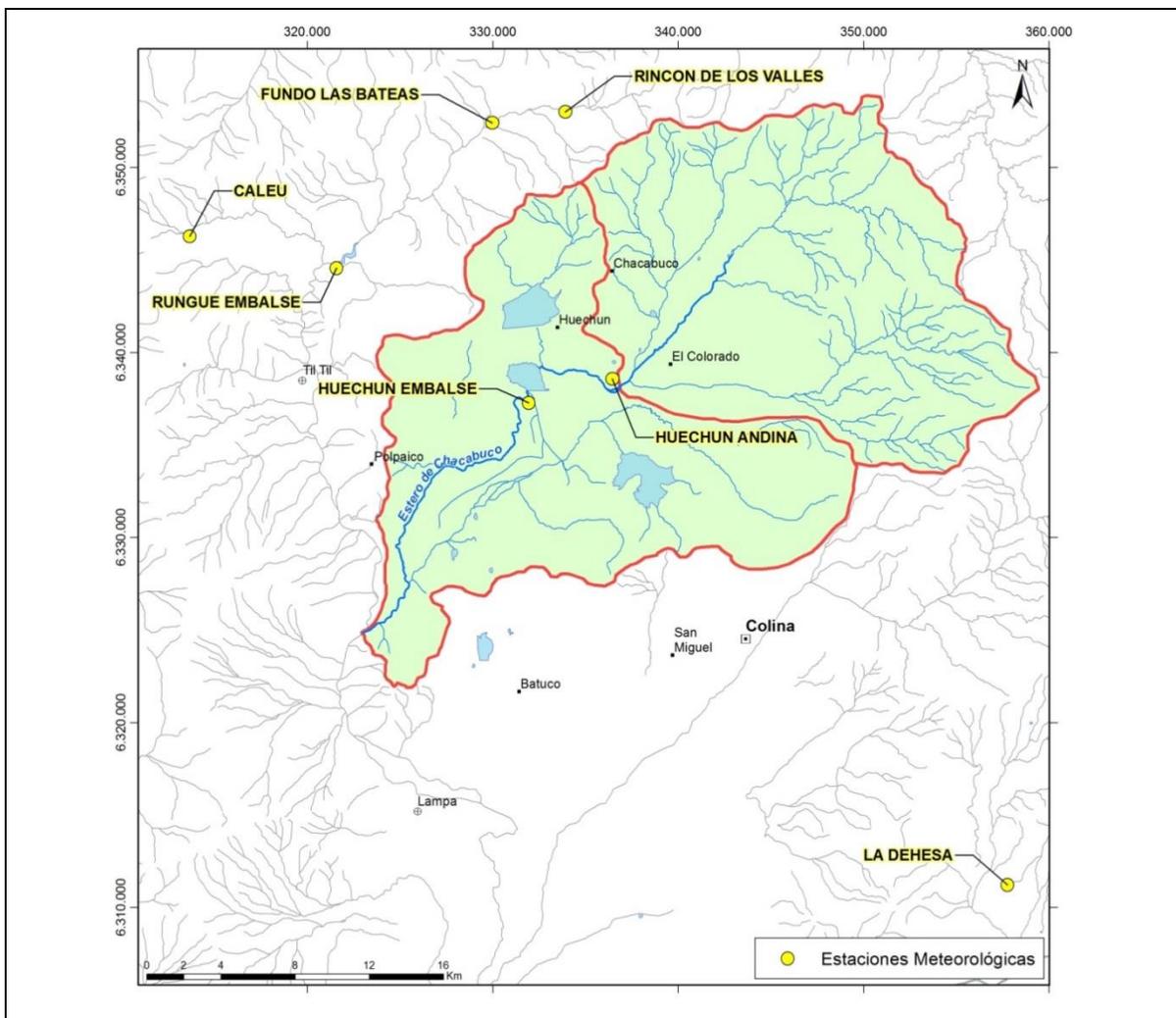


Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA

3.2.3.1 Variables meteorológicas

Se analizó a nivel local la información meteorológica disponible (ver 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 y temperatura (no se contó con información de evaporación en la zona de estudio). Esta información proviene del Banco Nacional de Aguas (BNA) en la Región Metropolitana. Del total de la información disponible se seleccionaron aquellas estaciones que estuvieran dentro o en las cercanías del área de estudio y que presentaran registros apropiados para su utilización, en cuanto a continuidad, homogeneidad y longitud. En la zona de estudio existen dos estaciones meteorológicas monitoreadas por la DGA: Huechún Embalse y Huechún Andina, cuya ubicación junto a otras 5 estaciones cercanas se muestra en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Estaciones meteorológicas en 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.

Tabla 3-3: Estaciones meteorológicas en zona de estudio y alrededores.

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud (msnm)
1	Caleu	05733007-4	Vigente	1957-2013	1.120
2	Fundo Las Bateas	05733010-4	Vigente	1985-2013	810
3	Huechún Andina	05732002-8	Vigente	1994-2013	590
4	Huechún Embalse	05732001-K	Vigente	1988-2013	556
5	La Dehesa	05723001-0	Vigente	1991-2013	920
6	Rincón de los Valles	05733006-6	Vigente	1957-2013	955
7	Rungue embalse	05733008-2	Vigente	2007-2013	700

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

En la Tabla 3-4 se presentan los estadígrafos principales de las serie de precipitación anual en las estaciones seleccionadas en el área de estudio y sus alrededores para el año hidrológico (abril a marzo). Específicamente las estaciones Huechún Andina y Huechún Embalse, dentro de la zona de estudio, muestran que la precipitación promedio anual varía entre 223 y 227 mm, con una desviación aproximadamente igual a la mitad del valor promedio. Lo anterior indica la variabilidad de la precipitación en la zona de estudio. En efecto, se observan años muy secos asociados a bajas precipitaciones y años muy húmedos, asociados a altas precipitaciones.

Tabla 3-4: Estadígrafos principales de series de Pp. anual en zona estudio y alrededores.

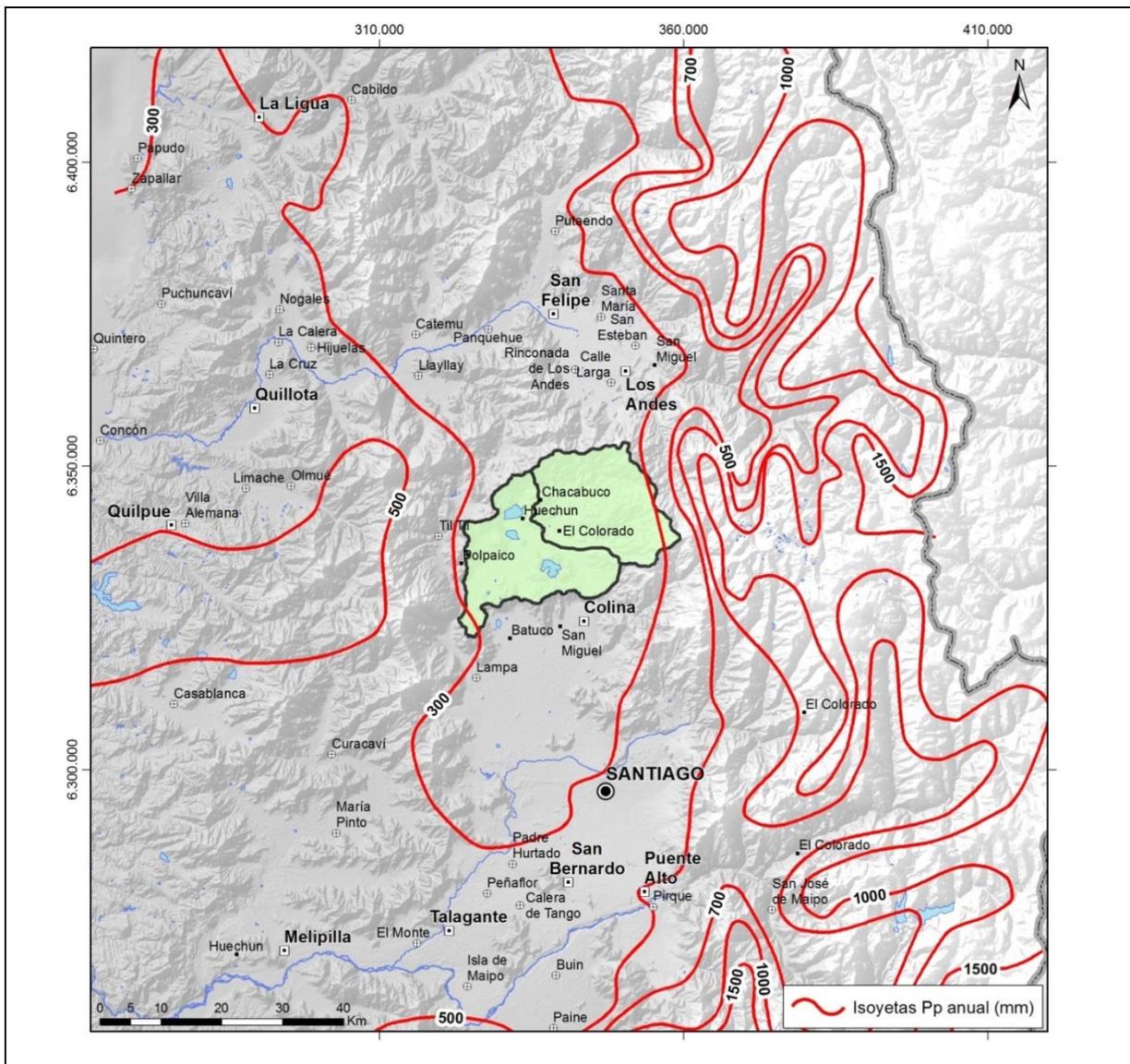
N°	Nombre	Años completos*	Mín. (mm)	Máx. (mm)	Promedio (mm)	Desv. Est. (mm)	Coef. Asim.	Coef. Var.
1	Caleu	51	132,8	1.626,1	541,9	316,2	1,6	0,6
2	Fundo Las Bateas	27	70,5	891,1	322,8	197,3	1,4	0,6
3	Huechún andina	16	80,5	512,0	223,3	106,5	1,2	0,5
4	Huechún embalse	25	66,4	616,7	227,2	135,2	1,4	0,6
5	La Dehesa	13	155,0	876,5	450,3	214,1	0,4	0,5
6	Rincón de los Valles	55	53,0	820,5	289,6	162,4	1,3	0,6
7	Rungue embalse	60	7,5	1.069,9	346,6	223,1	1,1	0,6

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

En la Figura 3-5 se presenta el mapa de isoyetas de precipitación (pp) anual en la zona de estudio obtenidas del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987), en las que se observa que la precipitación media anual corresponde a 300 mm para la zona de estudio.

En la Tabla 3-5 se presentan las precipitaciones promedio mensuales en las estaciones seleccionadas. En la Figura 3-6 se presenta gráficamente la distribución mensual del promedio de la precipitación mensual en las 2 estaciones que se ubican dentro del área de estudio donde se observa que la precipitación se concentra en los meses de invierno (mayo a agosto) y que durante los meses de verano las precipitaciones pueden llegar a ser nulas. Finalmente en la Tabla 3-6 se presenta la precipitación estacional donde se observa la estacionalidad en los meses de invierno, en los cuales se concentra alrededor del 80% de la precipitación del año hidrológico.

Figura 3-5: Mapa de isoyetas medias anuales en la cuenca del estero Chacabuco



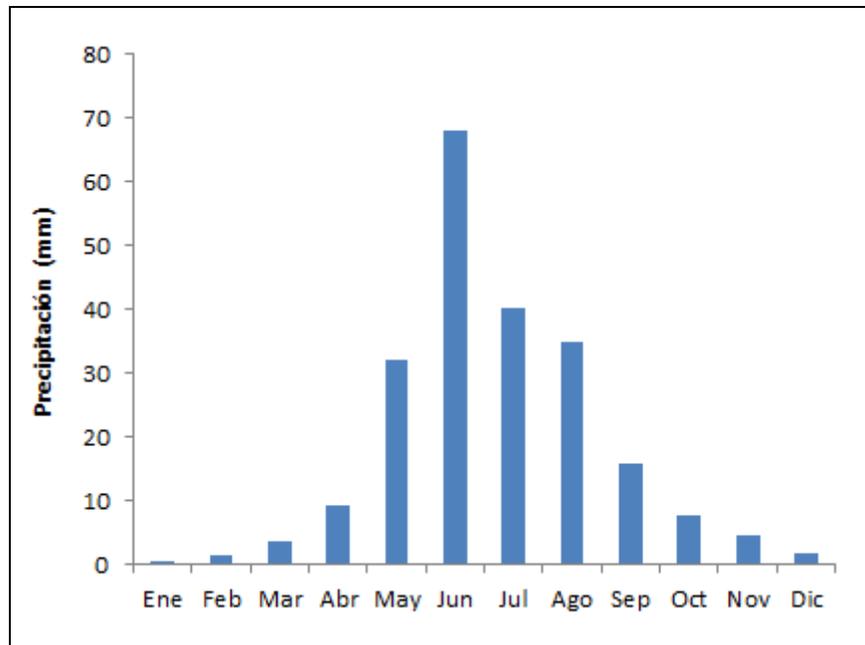
Fuente: Elaboración propia a partir de DGA, 1987.

**Tabla 3-5: Caracterización Pp. mensuales en zona estudio y alrededores.
Valores en mm.**

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Caleu	0	1	6	20	87	140	148	91	33	13	9	2
2	Fundo Las Bateas	0	1	4	12	50	86	72	60	20	9	4	1
3	Huechún andina	0	1	3	8	29	65	40	34	15	8	5	2
4	Huechún embalse	0	1	4	10	36	71	41	36	16	8	4	2
5	La Dehesa	2	1	12	35	69	110	78	69	52	27	10	6
6	Rincón de los Valles	0	0	2	10	44	78	75	45	20	8	5	1
7	Rungue embalse	1	2	2	12	59	97	93	58	21	8	6	1

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Figura 3-6: Promedio Pp. mensual en estaciones ubicadas dentro zona estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Tabla 3-6: Caracterización de Pp. estacional en zona de estudio y sus alrededores.

Nº	Estación	Prec. Año Hid. (mm)	May-Ago		Sep-Abr	
			mm	%	mm	%
1	Caleu	542	459	85	83	15
2	Fundo Las Bateas	323	271	84	52	16
3	Huechún Andina	223	177	79	46	21
4	Huechún Embalse	227	183	80	44	20
5	La Dehesa	450	312	69	138	31
6	Rincón de los Valles	290	242	84	48	16
7	Rungue embalse	347	295	85	51	15

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

3.2.3.1.2 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 3-7 se presenta la estación con información de temperatura.

Tabla 3-7: Estaciones meteorológicas con información de temperatura

Nº	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
3	Huechún Andina	05732002-8	Vigente	1994-2013	590

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

La Tabla 3-8 contiene los estadígrafos principales de las series de temperatura anual en las estación Huechún Andina para el año hidrológico (abril a marzo), cuyo promedio es de 15,6°C. En la Tabla 3-9 se presentan los promedios mensuales de temperatura la que la que alcanza un máximo de 21,8°C en enero. En la Figura 3-7 se presenta la variación mensual de la temperatura para las estaciones seleccionadas, 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 3-8: Estadígrafos principales de series de temperatura

Nº	Nombre	Años Completos*	Mín. (°C)	Máx. (°C)	Promedio (°C)	Desv. Est. (°C)	Coef. Asim.	Coef. Var.
3	Huechún Andina	16	13,6	16,9	15,6	0,8	-1,0	0,05

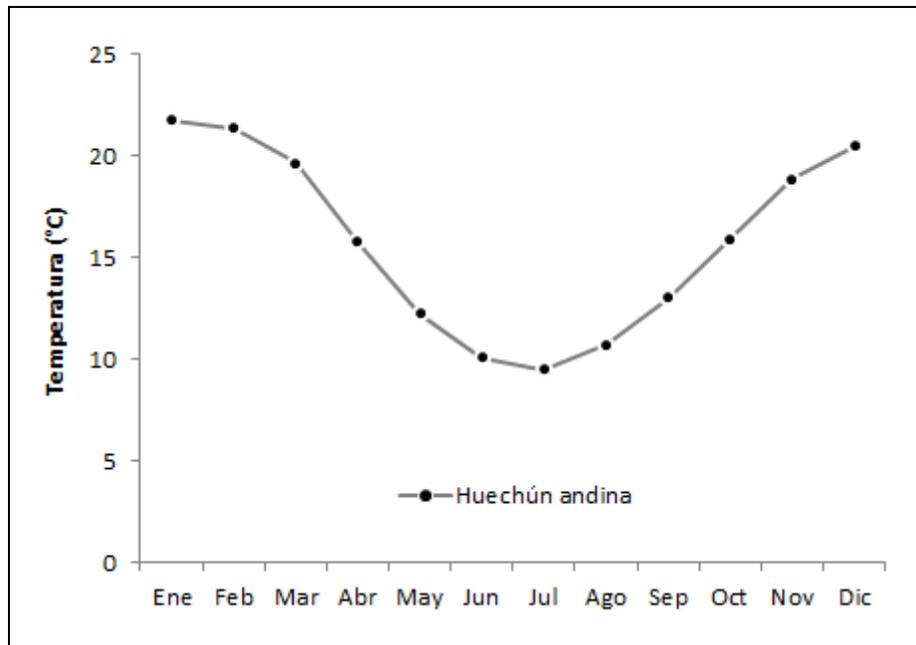
* Considera años con más de 9 meses con registro. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Tabla 3-9: Caracterización de temperaturas (°C) a nivel mensual

Nº	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
3	Huechún Andina	21,8	21,3	19,6	15,8	12,2	10,0	9,5	10,7	13,0	15,9	18,9	20,5

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Figura 3-7: Temperatura promedio mensual en la estación Huechún Andina



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

3.2.3.2 Variables fluviométricas

El canal Chacabuco-Polpaico es el principal canal de riego que abastece la zona de estudio y toma sus aguas desde el río Aconcagua a través de una bocatoma ubicada en Los Riecillos (coordenadas PSAD56 UTM E 375.318, UTM N 6.357.108). En su tránsito hacia la cuenca de Chacabuco, este canal recibe aportes de las quebradas Vilcuya y Gualtatas y cruza el cordón de Chacabuco a través de un túnel paralelo al túnel carretero de la Ruta 57.

A la fecha de este informe no se ha podido obtener información histórica de caudales en este canal. La DGA posee registros del Canal Chacabuco en Bocatoma (código BNA 05402002-3) solo para el año 1985 y actualmente esta estación fluviométrica está suspendida. Por otro lado se han hecho las gestiones para conseguir la información directamente con la Asociación de Canalistas de Chacabuco, sin resultados positivos.

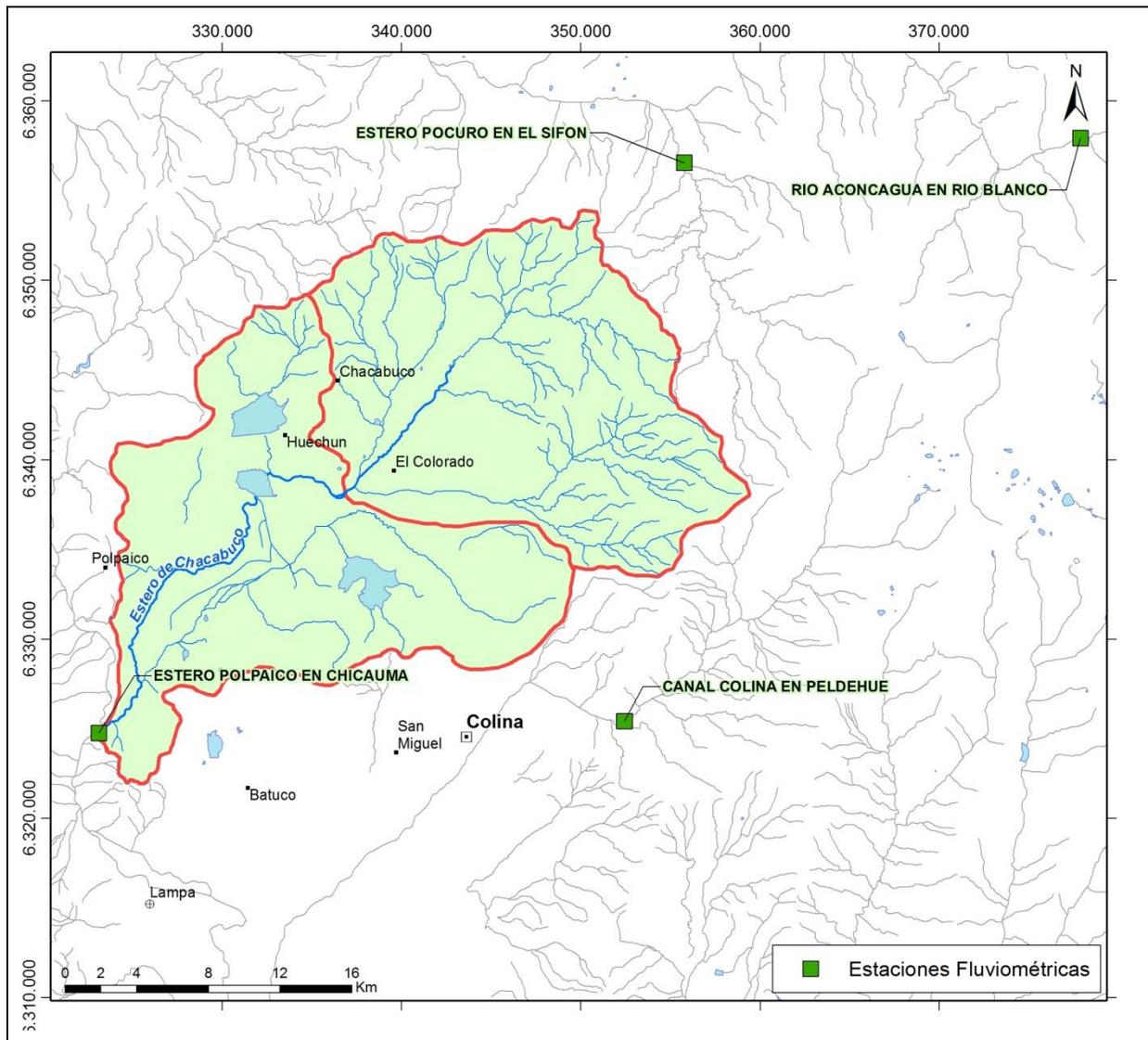
Se analizó a nivel local la información fluviométrica de estaciones en el río Aconcagua en los alrededores de la zona de estudio, para las cuales se obtuvo resultados de estadígrafos principales de los registros y estacionalidad de las series de caudales medios mensuales.

En los alrededores de la zona de estudio se considera como representativa la estación Estero Polpaico en Chicauma y Río Aconcagua en río Blanco ya que se encuentran vigentes, poseen un registro extenso y por su ubicación son buenos indicadores de la disponibilidad de caudal superficial para las pruebas piloto de recarga artificial. Cabe señalar que aguas abajo de la estación Río Aconcagua en río Blanco se encuentra la bocatoma del

canal Chacabuco-Polpaico que toma agua desde el río Aconcagua y la conduce hacia la zona de estudio descargando al estero Chacabuco.

La ubicación de las estaciones meteorológicas de monitoreo de la DGA, en la zona de estudio y sus alrededores, se presentan en la Figura 3-8 y en la Tabla 3-10 se presentan tabuladas.

Figura 3-8: Estaciones fluviométricas en la zona de estudio y sus alrededores



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

En la Tabla 3-11 se presentan los estadígrafos principales y promedio de las series de caudales medios mensuales para el año hidrológico (abril a marzo) y en la Tabla 3-12 se presenta el promedio mensual de las series de caudal medio mensual. Se observa que la

estación Río Aconcagua en río Blanco, con 37 años completos de información, presenta un promedio de 15,9 m³/s con una desviación equivalente a 0,6 veces el promedio. Por otra parte, la estación Estero Polpaico en Chicauma, con 52 años completos, presenta un caudal promedio de 0,9 m³/s con una desviación equivalente al valor promedio. Las desviaciones observadas dan cuenta de la variabilidad en los caudales monitoreados durante años secos, asociados a bajas precipitaciones y años muy húmedos, asociados a periodos de altas precipitaciones.

Tabla 3-10: Estaciones fluviométricas en los alrededores de la zona de estudio

N°	Nombre	Código BNA	Estado	Periodo de registro	Altitud
1	Canal Colina en Peldehue	05735001-6	Vigente	1981-2013	860
2	Estero Pocuro en el Sifón	05411001-4	Vigente	1931-2013	1.000
3	Estero Polpaico en Chicauma	05734001-0	Vigente	1943-2013	500
4	Río Aconcagua en río Blanco	05403002-9	Vigente	1970-2013	1.420

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Tabla 3-11: Estadígrafos principales de las series de caudal medio anual en los alrededores de la zona de estudio

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	Canal Colina en Peldehue	31	0,3	6,1	2,0	1,5	1,3	0,8
2	Estero Arrayán en La Montosa	49	0,3	5,7	1,5	1,0	2,1	0,7
3	Estero Polpaico en Chicauma	52	0,0	4,9	0,9	0,9	2,6	1,0
4	Río Aconcagua en río Blanco	37	1,1	35,8	15,9	9,7	0,3	0,6

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

Tabla 3-12: Promedio mensual de caudales en las estaciones seleccionadas (m³/s) en los alrededores de la zona de estudio

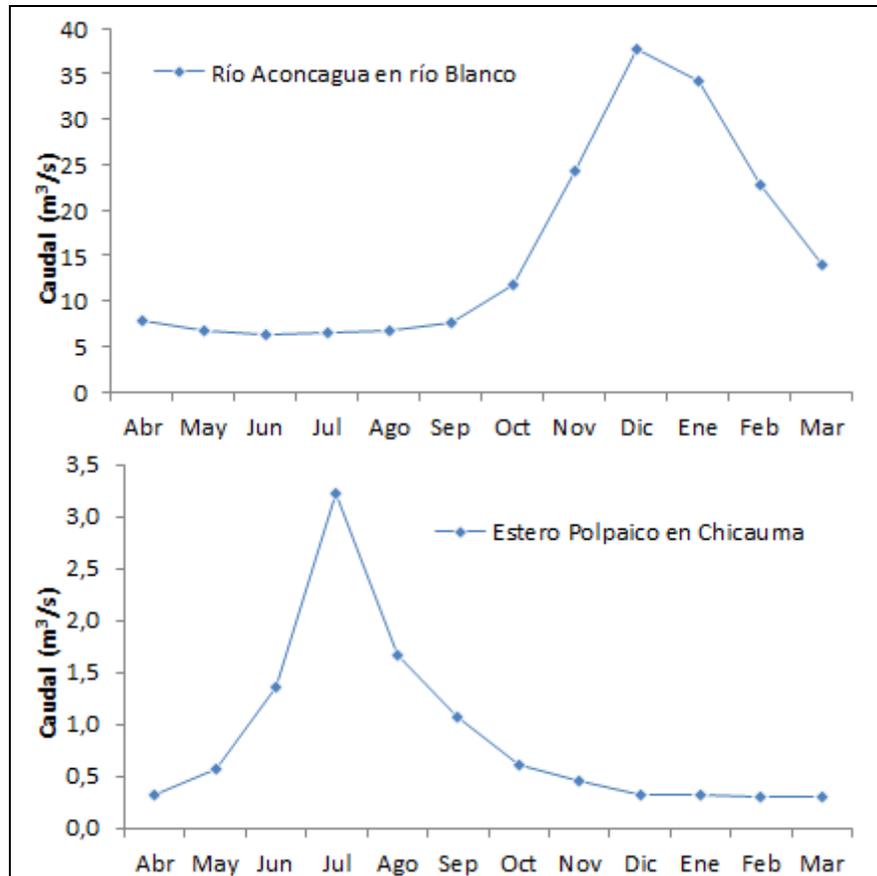
N°	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	Canal Colina en Peldehue	1,8	1,1	0,8	0,7	1,1	2,1	2,1	1,8	2,2	3,2	3,9	2,8
2	Estero Arrayán en La Montosa	1,5	1,0	0,8	0,8	0,9	1,3	1,4	1,3	1,5	2,0	3,1	2,7
3	Estero Polpaico en Chicauma	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	1,4	3,2	1,7	1,1	0,6	0,5	0,3
4	Río Aconcagua en río Blanco	34,2	22,7	14,1	7,8	6,7	6,4	6,4	6,7	7,6	11,8	24,3	37,8

Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

En la Figura 3-9 se muestra la distribución anual de los promedios de caudal medio mensual en las estaciones Río Aconcagua en río Blanco y Estero Polpaico en Chicauma. Se observa el claro comportamiento nival con una baja influencia pluvial con caudales máximos en

diciembre para la estación Río Aconcagua en río Blanco y el comportamiento pluvial con caudales máximos en julio para la estación Estero Polpaico en Chicauma.

Figura 3-9: Prom. Q medio mensual en estaciones más representativas para zona estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

3.2.4 Hidrogeología

3.2.4.1 Unidades hidrogeológicas

La subcuenca del río Mapocho está subdividida en sectores donde se encuentran contenidos acuíferos asociados a depósitos sedimentarios. El sector correspondiente al área de estudio se denomina Chacabuco-Polpaico (DGA, 2004).

El acuífero en el sector Chacabuco-Polpaico está asociado a la cuenca hidrográfica del Estero Chacabuco (Figura 3-15). Las unidades acuíferas principales están asociadas en su cabecera a depósitos coluviales y conos de deyección. En la zona media se distinguen los depósitos del abanico aluvial del Estero Chacabuco, formados por arenas y arenas

gravosas. Finalmente, en su parte baja, se encuentran depósitos lacustres formados por sedimentos limo–arenosos–arcillosos intercalados con depósitos fluviales actuales y antiguos formados por gravas arenosas y arenas.

En base a información estratigráfica de pozos, el trabajo de Ayala, Cabrera y Asociados, 2000, ha definido 3 unidades hidrogeológicas en el sector Chacabuco-Polpaico: (1) Unidad Lampa 1, (2) Unidad Lampa 2 y (3) Unidad Lampa 3. Estas se describen a continuación.

Unidad Lampa 1: Corresponde a un conjunto de sedimentos de grano fino, principalmente arenas con ocasionales gravas y una abundante matriz de arcillas y limos.

Esta unidad se dispone hacia la base de la secuencia, probablemente en contacto con roca basal. Los pozos de este sector, con profundidades de hasta 170 m, no han detectado roca basal, pero sí han constatado la presencia de la unidad Lampa 1 a lo largo y ancho de todo el valle.

No se cuenta con pruebas de bombeo en esta unidad, pero dadas sus características granulométricas, se estima una permeabilidad media cercana a los 10^{-6} m/s (Ayala, Cabrera y Asociados, 2000) equivalente a unos 10^{-1} m/d.

Unidad Lampa 2: Corresponde a un conjunto de sedimentos permeables, de granulometría caracterizada por una fracción clástica mayor de ripios, gravas y arenas gruesas, con una matriz de arena media a fina con muy escasos limos y arcillas. Esta unidad se dispone sobreyaciendo a la unidad Lampa 1.

Esta unidad presenta total continuidad lateral a lo largo del eje longitudinal del valle, con espesores entre 30 y 65 m entre las cabeceras y unos 3 km aguas abajo de la confluencia de los esteros Chacabuco y Quilapilún (Figura 3-3). En este tramo, esta unidad se aprecia en superficie. Aguas abajo del sector anteriormente nombrado, la unidad Lampa 2 se presenta subyaciendo a los sedimentos de la unidad Lampa 3.

La unidad Lampa 2 presenta un espesor máximo de 100 m, según información de sondajes. Esta unidad posee buenas características hidrogeológicas, con una permeabilidad estimada entre 10^{-4} y 10^{-5} m/s (Ayala, Cabrera y Asociados, 2000) equivalentes a unos 10^1 y 10^2 m/d.

Unidad Lampa 3: Corresponde a un conjunto de sedimentos finos que se disponen sobreyaciendo a los depósitos de la unidad Lampa 2.

Está compuesta principalmente por una abundante matriz arcillosa con una escasa fracción de arenas medias a finas.

La unidad Lampa 3 se presenta discontinua hacia las cabeceras del valle y con buena continuidad hacia la parte distal del valle, donde sobreyace y se interdigita con la unidad Lampa 2. Los sedimentos en la zona distal tendrían un origen lacustre.

Los mayores espesores de esta unidad alcanzan los 40 m. Esta unidad es de pobre interés hidrogeológico, con una permeabilidad estimada de acuerdo a su granulometría, cercana a los 10^{-6} m/s (Ayala, Cabrera y Asociados, 2000) equivalente a unos 10^{-1} m/d.

Adicionalmente se ha solicitado información a la DGA respecto de expedientes de pozos en el área de estudio, los que se presentan en Anexo A.

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.

3.2.4.2 Análisis de niveles del agua subterránea

Utilizando información del Banco Nacional de Aguas (DGA-BNA, 2014) se realizaron las siguientes actividades: (1) análisis de la variación temporal de la profundidad del nivel de agua subterránea, utilizando el registro histórico y (2) confección de un mapa de curvas equipotenciales en el área de estudio con el promedio de los niveles para los últimos 5 años (2009-2013). Este trabajo se describe a continuación.

3.2.4.2.1 Variación temporal de la profundidad del nivel del agua subterránea

Se estudiaron los niveles estáticos de 16 estaciones de monitoreo de aguas subterráneas ubicadas en el área de estudio, registros que fueron obtenidos del Banco Nacional de Aguas (DGA-BNA, 2014). Sus características principales se presentan en la Tabla 3-13 y Figura 3-10. Estas estaciones fueron agrupadas de acuerdo al sector que pertenecen, definiéndose así 4 sectores: (1) Chacabuco, (2) El Colorado, (3) Matilde-Polpaico y (4) Tiltil.

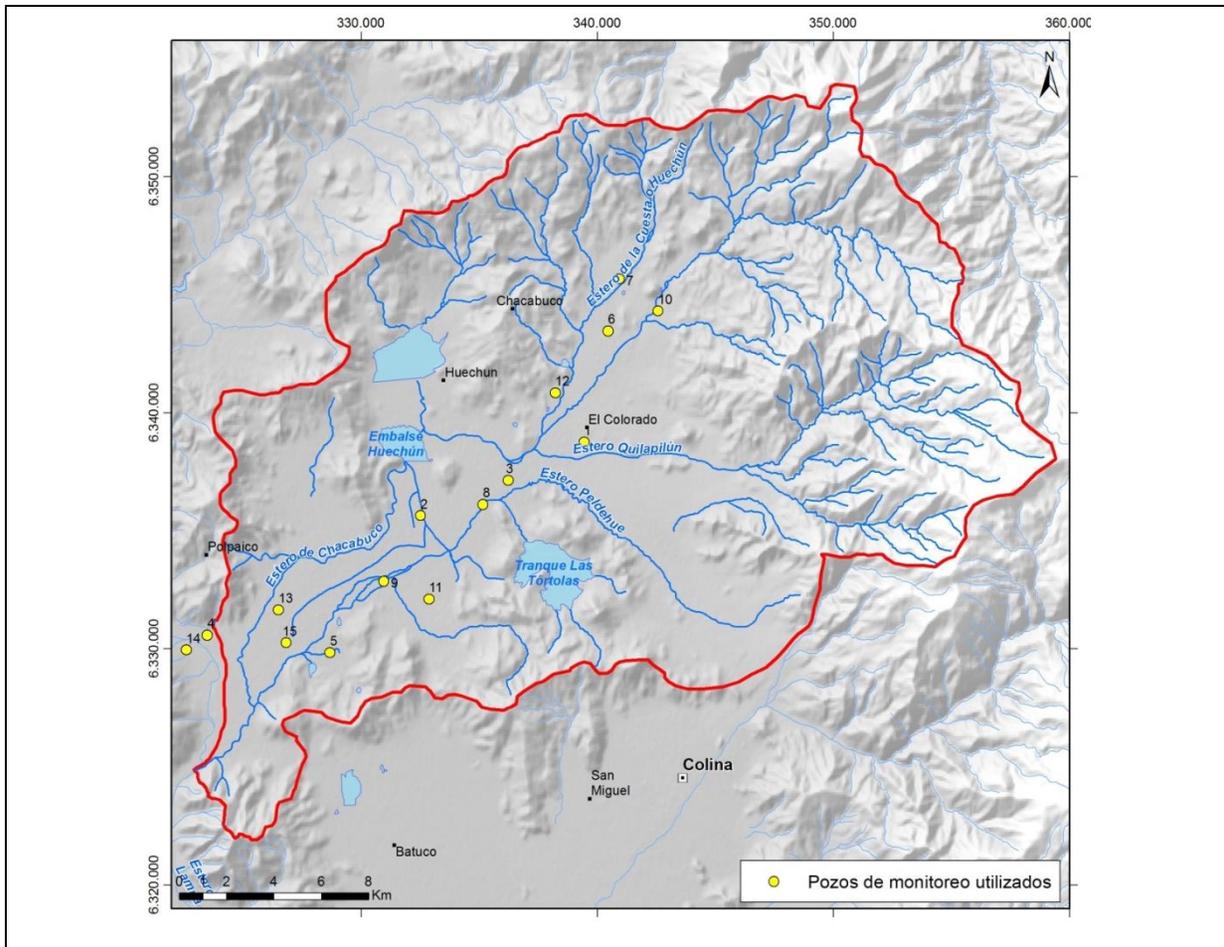
Tabla 3-13: Estaciones de monitoreo en sector de estudio y características principales

Nº	Estación	Código BNA	Altitud aprox. (msnm)	UTM Este	UTM Norte	Sector
6	Fundo Los Tahuretes	05731003-0	657	340.663	6.343.791	Chacabuco
7	Fundo Los Talaveras	05731001-4	688	341.147	6.345.986	Chacabuco
10	Hacienda Chacabuco	05731002-2	712	342.778	6.344.626	Chacabuco

Tabla 3-13: Estaciones de monitoreo en sector de estudio y características principales

Nº	Estación	Código BNA	Altitud aprox. (msnm)	UTM Este	UTM Norte	Sector
12	Los Guayacanes	05731004-9	621	338.423	6.341.166	Chacabuco
1	Asentamiento Chacabuco	05731005-7	641	340.749	6.341.667	El Colorado
3	Cera Unión Huechún	05731006-5	798	344.291	6.347.423	El Colorado
2	Asentamiento Los Maitenes	05732010-9	561	332.726	6.335.956	Matilde-Polpaico
4	Escuela 293 Polpaico	05733012-0	517	323.688	6.330.899	Matilde-Polpaico
5	Fabrica Polpaico	05732008-7	525	328.885	6.330.159	Matilde-Polpaico
8	Fundo Montecarlo (Ex Venceremos)	05732011-7	575	335.363	6.336.432	Matilde-Polpaico
9	Fundo Santa Ana	05732006-0	540	331.165	6.333.187	Matilde-Polpaico
11	Huertos Fam. Cerro Blanco	05732007-9	553	333.071	6.332.419	Matilde-Polpaico
13	Parcela 5 Polpaico	05732005-2	530	326.702	6.331.969	Matilde-Polpaico
14	R. Fundo San Manuel	05733013-9	523	322.792	6.330.266	Matilde-Polpaico
15	Reserva Fundo Polpaico	05732004-4	528	328.979	6.330.715	Matilde-Polpaico
17	Chilectra Polpaico	05732003-6	584	329.847	6.334.489	Matilde-Polpaico
16	Rincón De Los Molinos	05733011-2	583	320.084	6.339.430	Til Til

Figura 3-10: Estaciones de monitoreo en el sector de estudio



Sector Chacabuco.

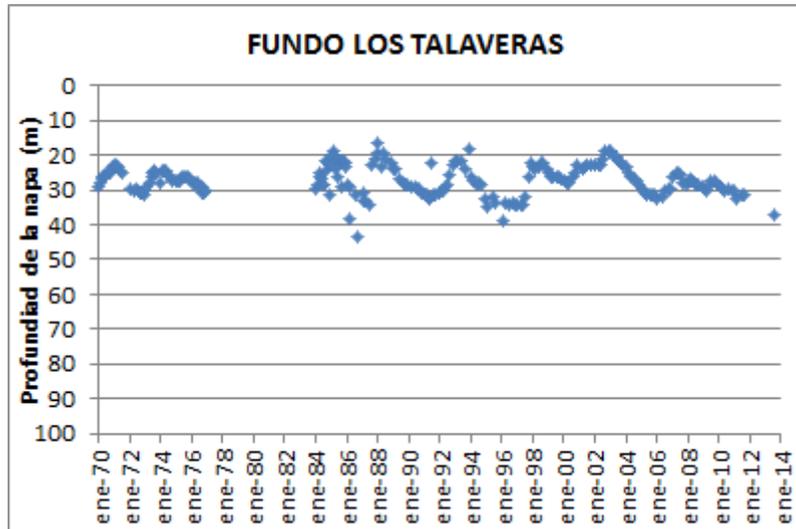
Para el sector de Chacabuco, se seleccionaron 4 estaciones de monitoreo (Fundo Los Talaveras (Nº4), Hacienda Chacabuco (Nº10), Fundo Los Tahuretes (Nº6) y Los Guayacanes (Nº12) (Figura 3-10) (Tabla 3-13) (Anexo C).

En general, en este sector el nivel de la napa presenta oscilaciones cíclicas de gran magnitud (hasta 21 m), situándose el nivel de aguas aproximadamente entre 20 y 35 m de profundidad. Estas oscilaciones muestran periodos donde el nivel disminuyó o aumentó, los que se pueden relacionar con los periodos de precipitaciones mínimas y máximas.

Por ejemplo, entre los años 95 y 98 hubo un déficit de precipitaciones que se puede correlacionar con la disminución de los niveles (Figura 3-11). Por otra parte, el máximo de precipitaciones del año 2002 se puede correlacionar con un peak en los niveles. Como

ejemplo en la Figura 3-11 se presentan los registros del pozo N° 4, el resto de los pozos se presenta en el Anexo C

Figura 3-11: Profundidad de la Napa pozo “Fundo Los Talaveras”

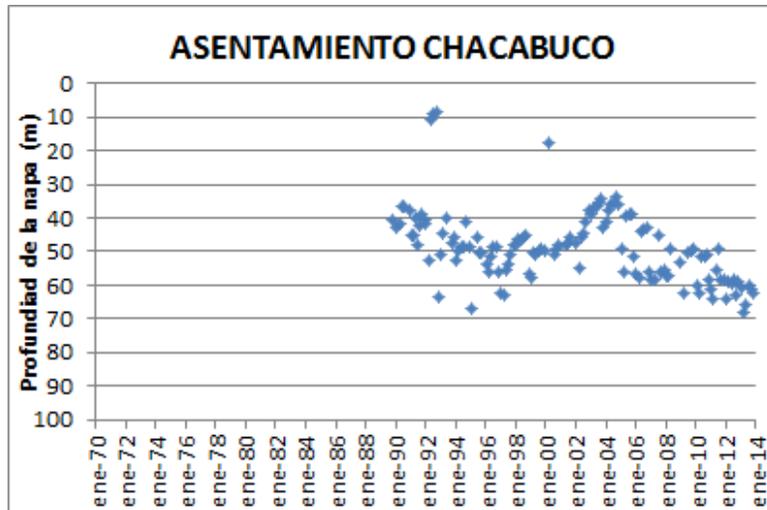


Sector El Colorado.

En este sector se encuentran los pozos “Asentamiento Chacabuco” (N° 1) y “Cera Unión Huechun” (N° 3) (Figura 3-10) (Tabla 3-13) (Anexo C).

El nivel de la napa en este sector es más profundo, encontrándose entre 30 y 70 m de profundidad. El nivel presenta un descenso del orden de 20 m desde el año 1990 hasta el año 1997, seguido de un ascenso del mismo orden que alcanza su máximo en el año 2004 (Figura 3-12). Finalmente se observa un descenso del orden de 30 m hasta el presente.

Figura 3-12: Profundidad de la Napa pozo “Asentamiento Chacabuco”

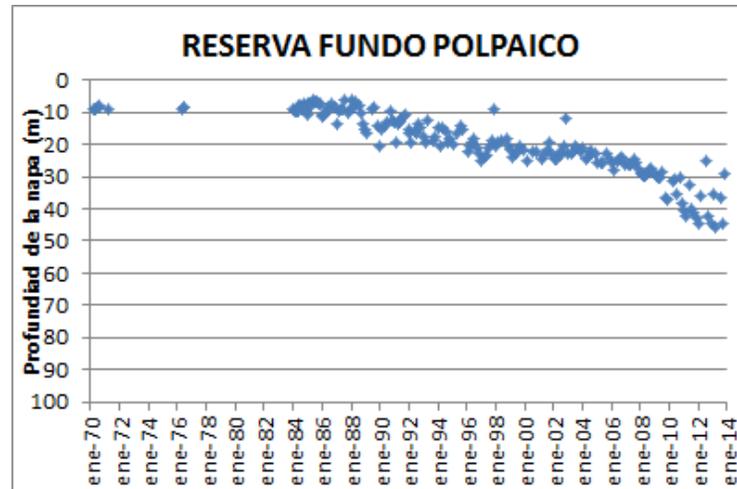


Sector Sta Matilde a Polpaico.

El sector comprendido entre Sta. Matilde y Polpaico, presenta una gran cantidad de estaciones de monitoreo. En este sector se seleccionaron 10 pozos: Asentamiento Los Maitenes(Nº2), Escuela 293 Polpaico (Nº 4), Fabrica Polpaico (Nº 5), Fundo Montecarlo (Ex Venceremos) (Nº8), Fundo Santa Ana (Nº9), Huertos Fam. Cerro Blanco (Nº 11), Parcela 5 Polpaico (Nº 13), R. Fundo San Manuel (Nº14), Reserva Fundo Polpaico (Nº15) y Chilectra Polpaico (Nº17) (Figura 3-10) (Tabla 3-13) (Anexo C).

El análisis de los niveles muestra que entre los años 1970 y 1990, el nivel de la napa en este sector se encuentra somero, con una profundidad cercana a 10 m (Figura 3-13). A partir del año 1990 el nivel de la napa presenta una profundización sostenida a lo largo de los años, llegando a una profundidad máxima de alrededor de 45 m en el presente.

Figura 3-13: Profundidad de la Napa pozo “Reserva Fundo Polpaico”

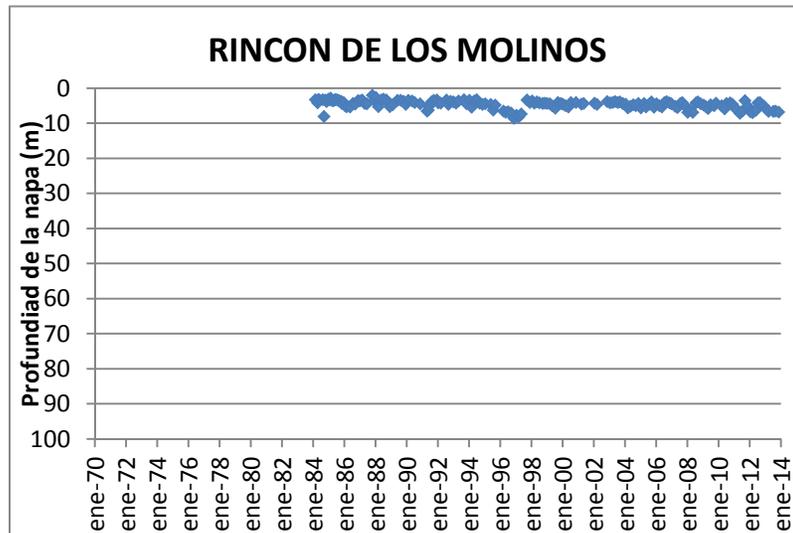


Sector Tiltil.

En este sector se dispone de 1 sólo pozo ubicado a aproximadamente 150 m del estero Tilttil, denominado “Rincón de los Molinos (Nº 16) (Figura 3-10) (Tabla 3-13) (Anexo C).

El análisis de los niveles muestra que el nivel de la napa se encuentra a lo largo del tiempo muy cercano al nivel de terreno, presentando oscilaciones de 2 a 9 m (Figura 3-14). Las variaciones de los niveles se podrían relacionar con la variación a lo largo del tiempo de las precipitaciones. Esto se puede apreciar, por ejemplo, en el descenso del nivel entre los años 1995 y 1996, el que estaría asociado a un período de precipitaciones mínimas (Figura 3-14).

Figura 3-14: Profundidad de la Napa pozo “Rincón de los Molinos”



3.2.4.2.2 Cobertura de isopiezas y sentido de 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 Banco Nacional de Aguas (DGA-BNA, 2014). Con esta información se calculó el promedio de los niveles estáticos registrados en pozos de monitoreo para los últimos 5 años (2009-2013).
2. Luego se indentificó 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) 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 promedio de los niveles estáticos registrados en pozos de monitoreo para los últimos 5 años (2009-2013) varía entre 3 y 66 m, alcanzando los niveles más someros en la zona de Polpaico.

La piezometría obtenida indica que el flujo de agua subterránea tiene una dirección principal este oeste, siguiendo la tendencia de los esteros Chacabuco y Polpaico (Figura 3-15). En las

quebradas tributarias a los esteros principales se tienen flujos de agua que van de norte-sur en el norte y sur-norte en el sur (Figura 3-15), lo que coincide con lo mostrado en la piezometría de CODELCO, 2004, para el sector de Ovejería.

En la zona media del valle, en el punto donde el estero Quilapilún se junta con el estero Chacabuco, inmediatamente al norte del tranque Las Tórtolas, existe un estrangulamiento del acuífero. Al este de este punto se observan gradientes más pronunciados del agua subterránea, razón por la cual las curvas isopiezas han sido dibujadas cada 50 m. Hacia el oeste de este punto, el acuífero presenta una pendiente más suave, por lo que las curvas isopiezas han sido dibujadas cada 10 m.

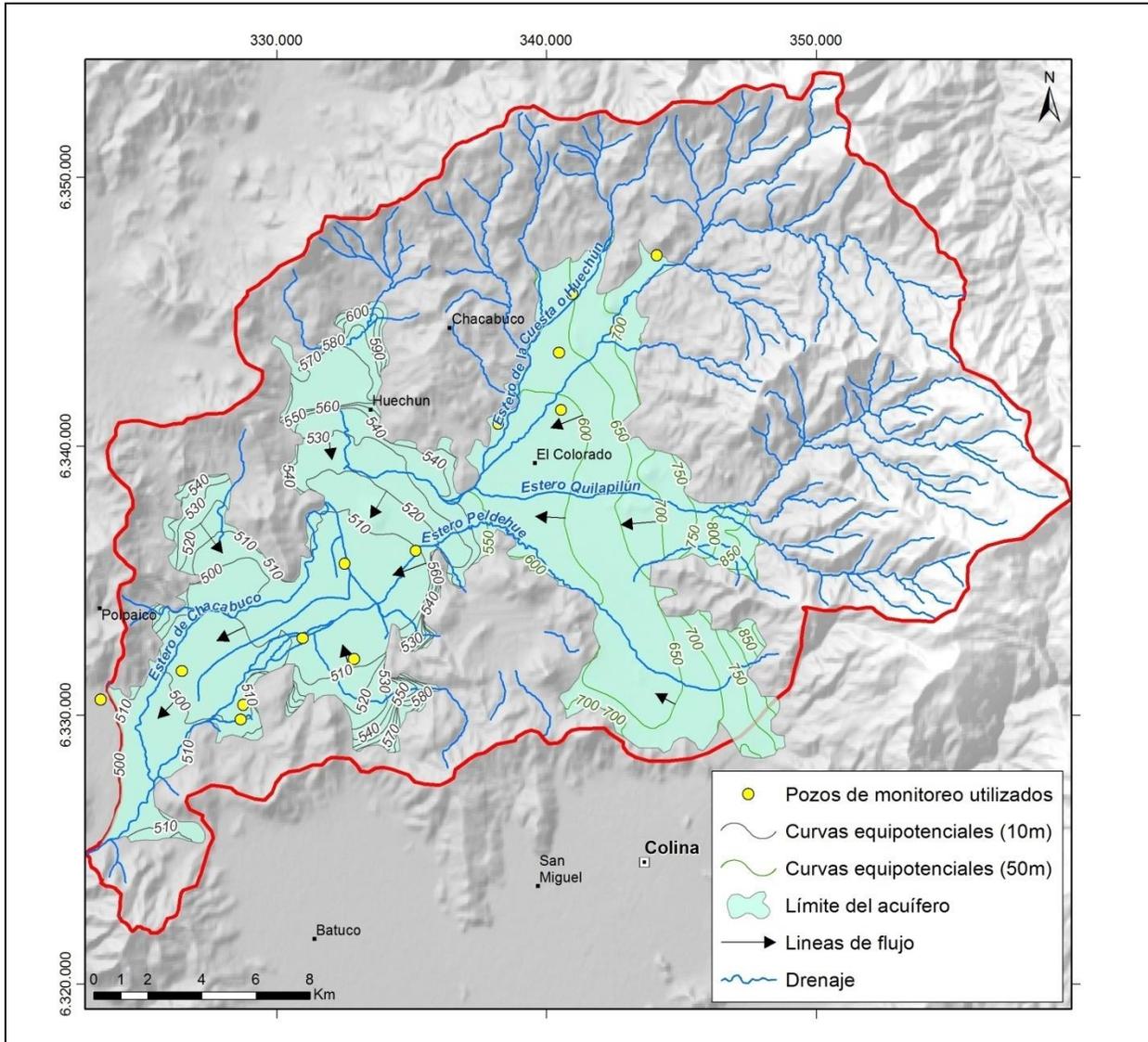
Este angostamiento del valle es relevante a la hora de evaluar proyectos de recarga artificial, pues esta singularidad puede ser aprovechada como punto de recuperación de aguas recargadas en la mitad superior de la cuenca de Chacabuco mediante pozos de bombeo.

3.2.5 Calidad de aguas superficiales y subterráneas

En la zona de estudio no existen estaciones de calidad química superficiales ni subterráneas de la red DGA (Figura 3-16). En este contexto, la caracterización de la componente calidad de aguas para el área de estudio se ha realizado a partir de información documental existente (DICTUC, 1997 y CODELCO, 2004). Específicamente se cuenta con:

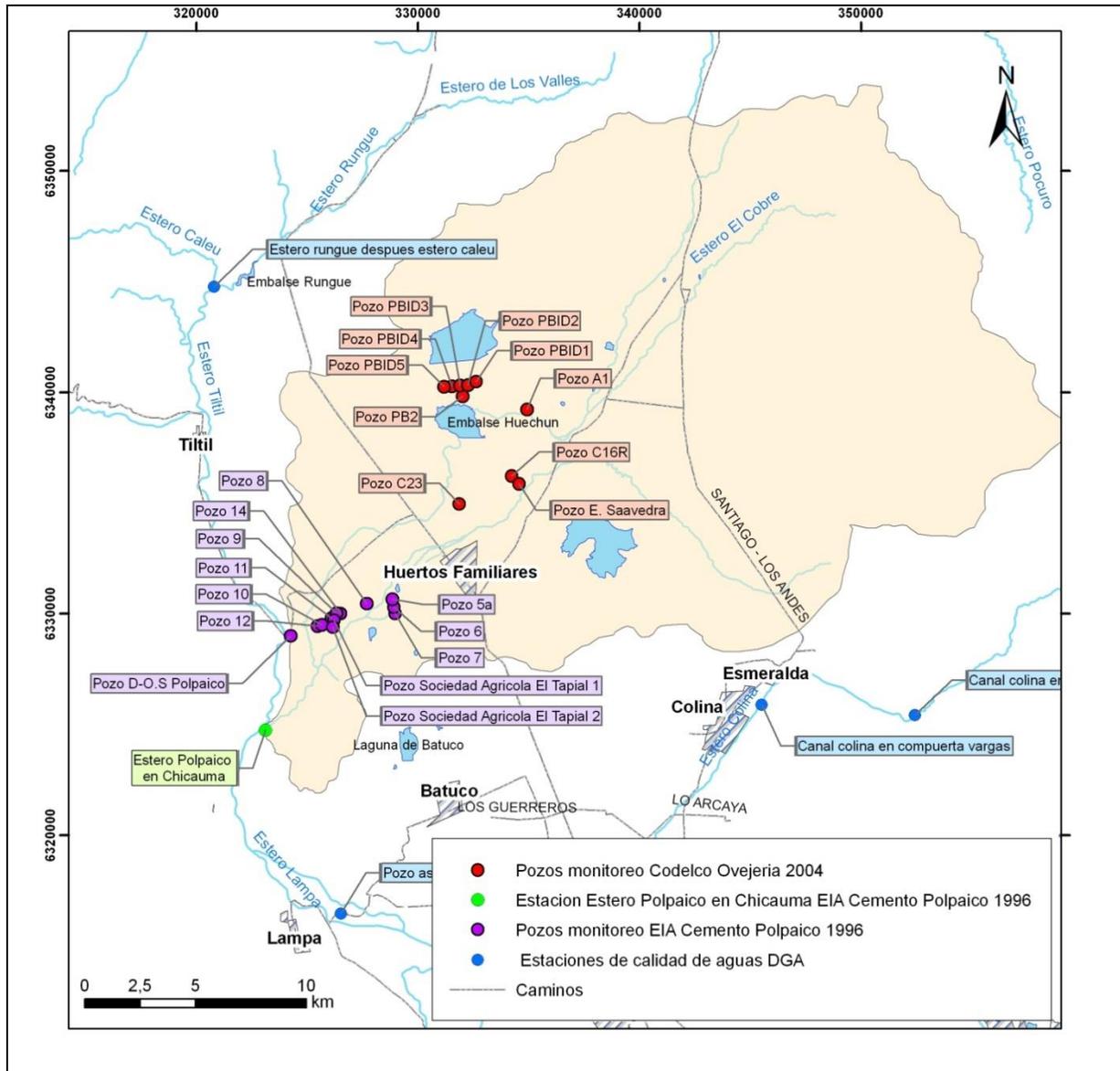
- Datos de calidad química del agua subterránea en 5 pozos y una estación superficial ubicada en el límite sur del área de estudio sobre el Estero Polpaico en Chicauma (DICTUC, 1997). La fecha de monitoreo corresponde al año 1996.
- Información de monitoreo de calidad química del agua en 11 pozos y 2 estaciones aguas superficiales en el sector Huechún (Estero Santa Margarita y Estero Chacabuco) (CODELCO, 2004). El monitoreo se realizó entre julio y diciembre del año 2004.

Figura 3-15: Curvas equipotenciales prom. entre 2009 y 2013 y pozos monitoreo zona estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

Figura 3-16: Estaciones de calidad química DGA y mediciones de estudios existentes



Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-16 presenta la ubicación de las estaciones de calidad DGA junto a la ubicación de información existente de calidad química proveniente de los estudios mencionados. Como se aprecia, la información disponible se concentra en la mitad occidental del área de estudio.

En términos de calidad química del agua para infiltración existen algunas recomendaciones operativas, las que se indican en la Tabla 3-14. Estas recomendaciones indican concentraciones de 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 μ S/cm, para oxígeno disuelto (OD) el valor recomendado es < 8 mg/l y para el pH, valores de 7,5 a 8 (Tabla 3-14). Además se debe evaluar la carga de contaminación orgánica en el contenido de coliformes fecales, DBO y DQO.

Tabla 3-14: Parámetros a observar en aguas para infiltración y límite recomendado

Parámetros	Límites
STD	150 ppm
SST	10 ppm
CE	200 μ S/cm
OD	8 mg/l
pH	7,5-8

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadiana, 2008.

Finalmente, el análisis de calidad de agua debe realizarse comparando la calidad de la fuente de infiltración (aguas superficiales) con la del cuerpo receptor (agua subterránea), lo que se realizará una vez seleccionado el sitio para el desarrollo de la prueba piloto.

3.2.6 Usos/derechos de aprovechamiento de aguas

La zona de estudio, que corresponde al sector acuífero de Chacabuco-Polpaico, tiene un área de 663 km² y está asociada a la cuenca hidrográfica del Estero Chacabuco, junto al sector de Til Til, en el extremo norte de la Región Metropolitana. En la zona media del área de estudio, los esteros Chacabuco, Santa Margarita y Quilapilún juntan sus cauces en la zona de Angostura de Huechún, dando origen al Estero Chacabuco.

3.2.6.1 Canales en la zona de estudio

En la zona de estudio existen 3 pequeños canales (Figura 3-17), que son abastecidos por quebradas locales ubicadas en la parte alta de la zona de estudio y por el Río Colina que se encuentra fuera de esta (Figura 3-17).

Adicionalmente existe un trasvase de agua desde el río Aconcagua hacia Chacabuco que llega a través del estero Santa Margarita y luego sigue por el estero Chacabuco. El canal Chacabuco no interacciona con los 3 canales antes mencionados. En el Anexo D se encuentra un mapa completo del canal Chacabuco, desde su bocatoma en el río Aconcagua hasta su término en el sector de Polpaico.

Durante la ejecución del estudio se hicieron gestiones con la Junta de Vigilancia de la 1° sección del río Aconcagua (fuente del canal Chacabuco) y con la Asociación de

3.2.6.2 Derechos de aprovechamiento

La situación hídrica de derechos y usos sobre el área de estudio fue analizada en el año 2008 cuando se declara Área de Restricción Hidrogeológica para nuevas extracciones de aguas subterráneas el área de aprovechamiento común Chacabuco-Polpaico, que corresponde a la zona de estudio. Posteriormente en el año 2011, en base a una nueva metodología para la estimación de la demanda comprometida se vuelve a declarar la zona Área de Restricción mediante Res. DGA N°286 del 2005. En esta última resolución se indica una demanda comprometida al 31 de diciembre del año 2004 en derechos definitivos para el sector de que corresponde a un caudal aprobado de 12.425 l/s.

En esta materia se realizó una recopilación de los derechos de aprovechamiento otorgados en el área de estudio, 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 Tabla 3-16 presenta un resumen del total de derechos en el área de estudio. Específicamente existen 4.730 l/s de caudal subterráneo aprobado, de los cuales 709 l/s para uso de riego, 457 l/s para uso sanitario, 10 l/s para uso industrial y los restantes 3.554 l/s sin información. En cuanto a derechos superficiales aprobados solo existe un derecho con caudal de 2 l/s. Este caudal es bastante menor a los 12.425 l/s que indica la Res. DGA N°286 del 2005, sin embargo se debe considerar que el análisis realizado con la información del CPA considera solo aquellos derechos que presentan ubicación en base a coordenadas UTM o referencia conocida, por lo tanto puede existir un porcentaje de derechos no considerado, que se debe tener presente. Todos los derechos se utilizan entre los meses de enero a junio y en el mes de octubre.

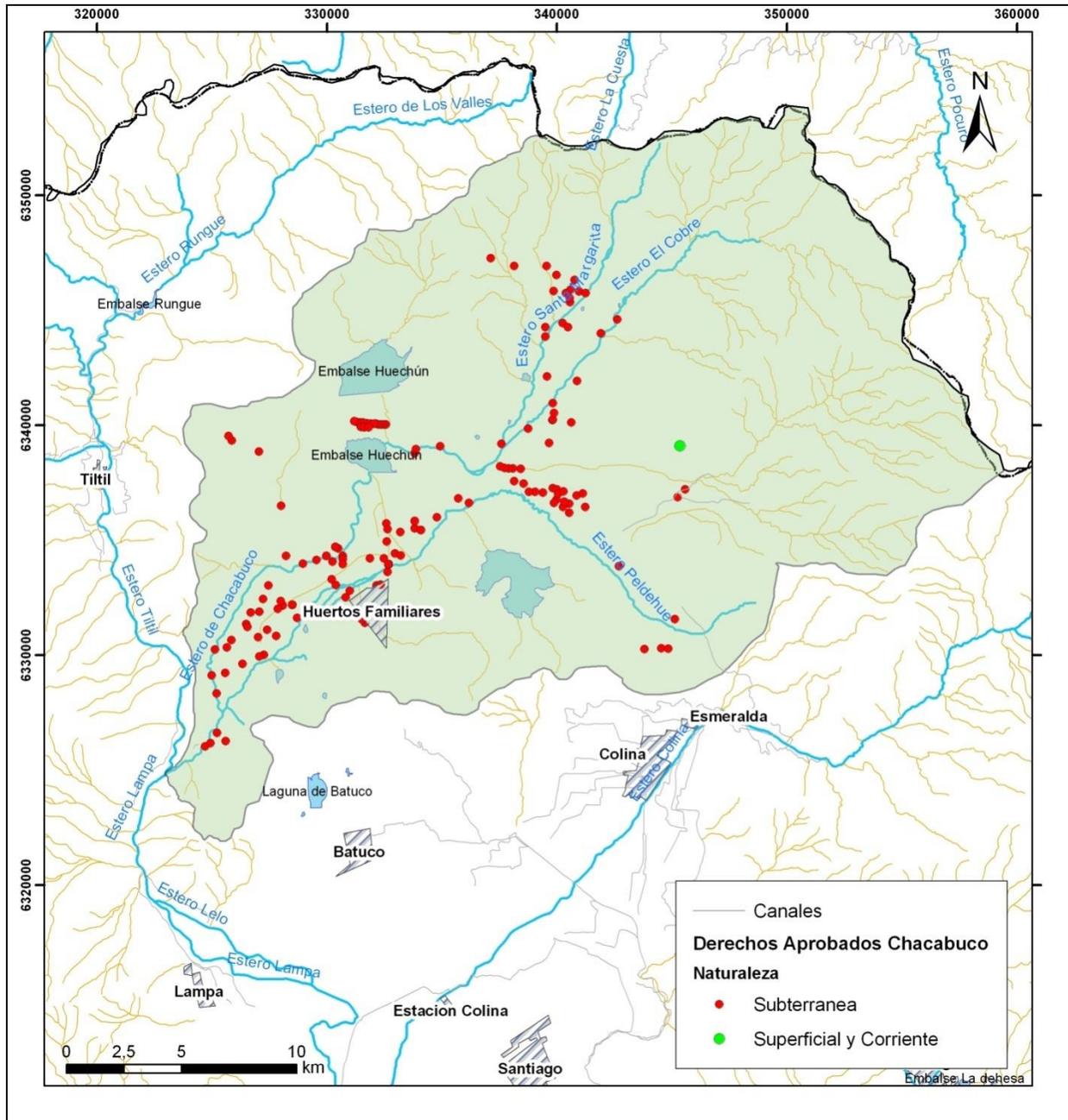
La Figura 3-18 presenta la distribución espacial de los derechos aprobados, donde se observa que la mayoría de los derechos otorgados son de carácter subterráneo y se distribuyen cercanos al cauce de los esteros principales Santa Margarita, El Cobre, Peldehue y Chacabuco.

Tabla 3-16: 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	53	709	15%			0%
Sanitario	14	457	10%			0%
Industrial	1	10	0%			0%
Sin Información	122	3.554	75%	1	2	100%
Total	190	4.730	100%	1	2	100%

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

Figura 3-18: Derechos de aprovechamiento de aguas aprobados en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

3.2.7 Resumen y modelo hidrogeológico conceptual

El área de estudio se ubica en la Depresión Intermedia, que en esta latitud es denominada Cuenca Transicional Semiárida. Por el este, el área de estudio limita con la Cordillera de los Andes, por el oeste con la Cordillera de la Costa, por el norte con el Cordón de Chacabuco y por el sur con los cerros de Colina y Polpaico.

El área de estudio es drenada principalmente por el estero Chacabuco, cuyos principales tributarios aguas arriba del embalse Huechún, son el estero Huechún (o estero de la Cuesta) y estero Quilapilún. Luego de recibir los aportes de estos esteros, el estero Chacabuco desemboca en el embalse Huechún. Bajo el embalse Huechún, el estero Chacabuco recibe las aguas del estero Peldehue, siguiendo un sentido de flujo hacia el suroeste.

La geología de superficie está dominada por rocas volcanoclásticas cretácicas y eocenas, cortadas por intrusivos de edades cretácicas a miocenas. Estas unidades se encuentran formando los principales cerros del área de estudio. Hacia los sectores más bajos en cota, cubriendo las unidades más antiguas, se observan depósitos no consolidados asignados al cuaternario.

El relleno de la cuenca presenta espesores de hasta 150 m. Este presenta una composición bastante heterogénea, tanto lateralmente como en profundidad. El relleno corresponde principalmente a sedimentos de distintas granulometrías que van desde arcillas a gravas gruesas, los que se interpretan como originados por un sistema fluvio-aluvial, asociado al estero Chacabuco (depósitos no consolidados cuaternarios).

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 posición de piedemont. Estos suelos están compuestos por materiales provenientes de los sedimentos transportados desde las partes más elevadas del relieve. Las pendientes más suaves son de 1 a 3% y las más pronunciadas son de 8 a 15%. Son suelos profundos y moderadamente profundos. El sustrato está constituido por gravas angulares y subangulares asociados a una matriz muy variable, cuya granulometría puede ir desde arenas gruesas hasta arcilla y en porcentajes muy variables. Los colores superficiales son pardo, pardo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro. Las clases texturales de los epipedones presentan considerable variación textural, tanto en superficie como en profundidad. Estas pueden ser: arenoso franco, franco arenosa, franco arcillo arenosa, franco arcillo limosa, franco arcillosa y arcillosa, es decir, casi toda la gama del triángulo textural. La estructura es predominantemente de bloques subangulares medios y finos; en algunas series maciza en los horizontes más profundos. La penetración radical es adecuada y se han descrito raíces finas escasas hasta la profundidad de descripción.

La precipitación promedio anual en la zona de estudio, calculada con registro de estaciones con entre 16 y 25 años completos, varía entre 223 y 227 mm, con una desviación aproximadamente igual a la mitad 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 80% de la precipitación del año hidrológico.

La temperatura promedio anual, calculada con registro de una estación con 16 años completos, tiene un valor de 15,6°C. La distribución mensual de las temperaturas promedio muestra un máximo cercano a los 22°C en el mes de enero y un mínimo cercano a los 10°C en el mes de julio.

El promedio anual de las series de caudal medio mensual, calculado para dos estaciones representativas en los alrededores de la zona de estudio (río Aconcagua en río Blanco y estero Polpaico en Chicauma), con registro completo de 37 y 52 años, es de 15,9 m³/s y 0,9 m³/s respectivamente. El primer valor presenta una desviación estándar de 0,6 veces el promedio, mientras que el segundo presenta un valor de desviación equivalente al 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 las mismas estaciones muestra un máximo cercano a los 38 m³/s en diciembre, para la estación río Aconcagua en río Blanco, por lo que se interpreta un comportamiento nival. Por otra parte la estación estero Polpaico en Chicauma muestra un máximo cercano a los 3 m³/s en julio, por lo que se interpreta un comportamiento pluvial.

Las unidades acuíferas principales de la zona de estudio están asociadas en su cabecera a depósitos coluviales y conos de deyección. En la zona media se distinguen los depósitos del abanico aluvial del Estero Chacabuco, formados por arenas y arenas gravosas. Finalmente, en su parte baja, se encuentran depósitos lacustres formados por sedimentos limo-arenosos-arcillosos intercalados con depósitos fluviales actuales y antiguos formados por gravas arenosas y arenas.

En base a información estratigráfica de pozos, estudios anteriores han definido 3 unidades hidrogeológicas en profundidad, las que de base a techo son: Unidad Lampa1, Unidad Lampa 2 y Unidad Lampa 3.

La Unidad Lampa 1 corresponde a un conjunto de sedimentos de grano fino, principalmente arenas con ocasionales gravas y una abundante matriz de arcillas y limos. Esta unidad se dispone hacia la base de la secuencia, probablemente en contacto con roca basal. Los pozos de este sector, con profundidades de hasta 170 m, no han detectado roca basal, pero sí han constatado la presencia de la unidad Lampa 1 a lo largo y ancho de todo el valle. No se cuenta con pruebas de bombeo en esta unidad, pero dadas sus características granulométricas, se estima una permeabilidad media cercana a los 10⁻⁶ m/s equivalente a unos 10⁻¹ m/d.

La Unidad Lampa 2 corresponde a un conjunto de sedimentos permeables, de granulometría caracterizada por una fracción clástica mayor de ripios, gravas y arenas gruesas, con una matriz de arena media a fina con muy escasos limos y arcillas. Esta unidad se dispone sobreyaciendo a la unidad Lampa 1. Esta unidad presenta total

continuidad lateral a lo largo del eje longitudinal del valle, con espesores entre 30 y 65 m entre las cabeceras y unos 3 km aguas abajo de la confluencia de los esteros Chacabuco y Quilapilún. En este tramo, esta unidad se aprecia en superficie. Aguas abajo del sector anteriormente nombrado, la unidad Lampa 2 se presenta subyaciendo a los sedimentos de la unidad Lampa 3. La unidad Lampa 2 presenta un espesor máximo de 100 m, según información de sondajes. Esta unidad posee buenas características hidrogeológicas, con una permeabilidad estimada entre 10^{-4} y 10^{-5} m/s equivalentes a unos 10^1 y 10^2 m/d.

La Unidad Lampa 3 corresponde a un conjunto de sedimentos finos que se disponen sobreyaciendo a los depósitos de la unidad Lampa 2. Está compuesta principalmente por una abundante matriz arcillosa con una escasa fracción de arenas medias a finas. La unidad Lampa 3 se presenta discontinua hacia las cabeceras del valle y con buena continuidad hacia la parte distal del valle, donde sobreyace y se interdigita con la unidad Lampa 2. Los sedimentos en la zona distal tendrían un origen lacustre. Los mayores espesores de esta unidad alcanzan los 40 m. Esta unidad es de pobre interés hidrogeológico, con una permeabilidad estimada de acuerdo a su granulometría, cercana a los 10^{-6} m/s equivalente a unos 10^{-1} m/d.

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 los niveles estáticos registrados en pozos de monitoreo para los últimos 5 años (2009-2013) varía entre 3 y 66 m, alcanzando los niveles más someros en la zona de Polpaico.

El análisis de evolución histórica de niveles (entre la década del '70 y el presente) muestra una tendencia general de profundización de niveles, con una amplitud máxima del orden de 30 m. La excepción la constituye el sector de Tilti, en el cual los niveles se han mantenido relativamente constantes a lo largo del tiempo. Dentro de esta tendencia general se pueden observar mínimos y máximos de niveles relacionados con períodos de abundancia y escasas de precipitaciones respectivamente.

La piezometría obtenida indica que el flujo de agua subterránea tiene una dirección principal este oeste, siguiendo la tendencia de los esteros Chacabuco y Polpaico. En las quebradas tributarias a los esteros principales se tienen flujos de agua que van de norte-sur en el norte y sur-norte en el sur.

En la zona de estudio existen 3 pequeños canales, que son abastecidos por quebradas locales ubicadas en la parte alta de la zona de estudio y por el Río Colina que se encuentra

fuera de esta. Adicionalmente existe un trasvase de agua desde el río Aconcagua hacia Chacabuco que llega a través del estero Santa Margarita y luego sigue por el estero Chacabuco. El canal Chacabuco no interacciona con los 3 canales antes mencionados.

En la zona de estudio existen 4.730 l/s de caudal subterráneo aprobado, de los cuales 709 l/s se destinan a riego, 457 l/s para uso sanitario, 10 l/s para uso industrial y los restantes 3.554 l/s sin información. En cuanto a derechos superficiales aprobados solo existe un derecho con caudal de 2 l/s. Este caudal superficial es bastante menor a los 12.425 l/s que indica la Res. DGA N°286 del 2005, sin embargo se debe considerar que el análisis realizado con la información del CPA considera solo aquellos derechos que presentan ubicación en base a coordenadas UTM o referencia conocida, por lo tanto puede existir un porcentaje de derechos no considerado, que se debe tener presente. Todos los derechos se utilizan entre los meses de enero a junio y en el mes de octubre.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE AGUA

La disponibilidad de caudal superficial para el desarrollo de las pruebas piloto en el sector de Chacabuco-Polpaico está dada por el caudal en el estero Chacabuco. De acuerdo al análisis realizado en la estación Estero Polpaico en Chicauma (estación fluviométrica de referencia para la cuenca), la cuenca en estudio presenta un régimen pluvial, generándose un aumento de los caudales durante el periodo invernal con su máximo en el mes de julio. Se realizó un análisis de frecuencia en la estación Estero Polpaico en Chicauma con el objetivo de cuantificar la disponibilidad de agua, obteniéndose caudales mensuales asociadas a distintas probabilidades de excedencia.

En base a los estadígrafos principales calculados 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. Los resultados del test Chi-cuadrado indican que se rechaza la hipótesis de distribución, sin embargo, la curva sí se considera representativa para valores entre 15 y 85% de probabilidad de excedencia.

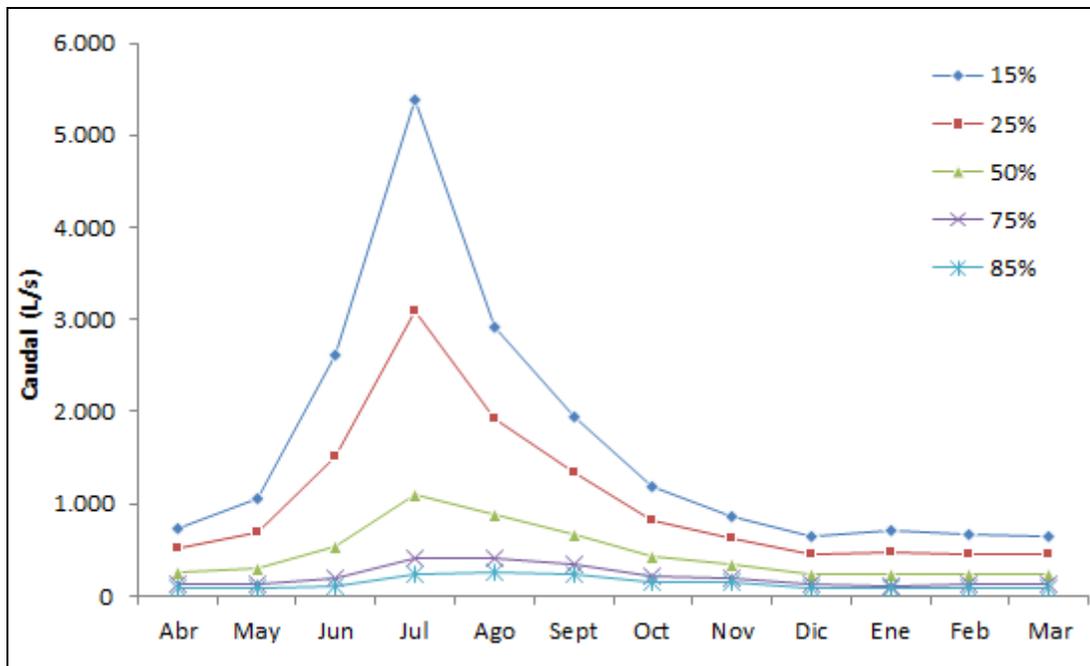
En base a los resultados del análisis de frecuencia, en la Tabla 3-17 se presenta la estimación de los caudales a nivel mensual asociados a probabilidades de excedencia de 15, 25, 50, 75 y 85%. Con esta información se construyeron curvas de variación mensual para la estación Río Aconcagua en Romeral, las que se muestran en la Figura 3-19.

Tabla 3-17: Caudal medio mensual (L/s) para diferentes niveles de probabilidad

Nº	MES	Probabilidad de Excedencia					Caudal medio mensual (m ³ /s)
		15%	25%	50%	75%	85%	
1	Enero	701	471	226	109	73	320
2	Febrero	661	460	234	120	83	305
3	Marzo	646	460	246	131	93	293
4	Abril	744	508	251	124	85	317
5	Mayo	1.067	683	299	131	84	567
6	Junio	2.620	1.508	542	195	113	1.368
7	Julio	5.381	3.093	1.111	399	231	3.233
8	Agosto	2.926	1.920	880	404	266	1.666
9	Septiembre	1.944	1.339	670	336	232	1.080
10	Octubre	1.195	828	420	213	148	614
11	Noviembre	857	626	350	196	144	451
12	Diciembre	653	462	244	129	91	318

Fuente: Elaboración propia

Figura 3-19: Variación mensual del Q (m³/s) para diferentes probabilidades de excedencia



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente el estero Chacabuco recibe aportes desde el canal Chacabuco-Polpaico que tiene su bocatoma en el río Aconcagua, aguas abajo de la junta con el río Blanco, caudal que es utilizado exclusivamente para riego, por lo que no se considera como disponible para el proyecto (comunicación personal de Sebastián Lira, accionista del ramal del canal Chacabuco-Polpaico). De todos modos, de acuerdo a lo indicado por Sebastián Lira, no habría problemas en obtener del orden de 20 L/s durante los meses de invierno desde los derechos del ramal del canal Chacabuco que deriva aguas hacia el sector de Casas de Chacabuco, lo que se corrobora con el análisis de frecuencia.

Para estimar el caudal de los sitios preseleccionado (ver detalle de metodología de preselección en las secciones 3.5 y 4 del presente documento), se realizó una ponderación por el área aportante para cada uno en base al registro de la estación Estero Polpaico en Chicauma (Tabla 3-18)

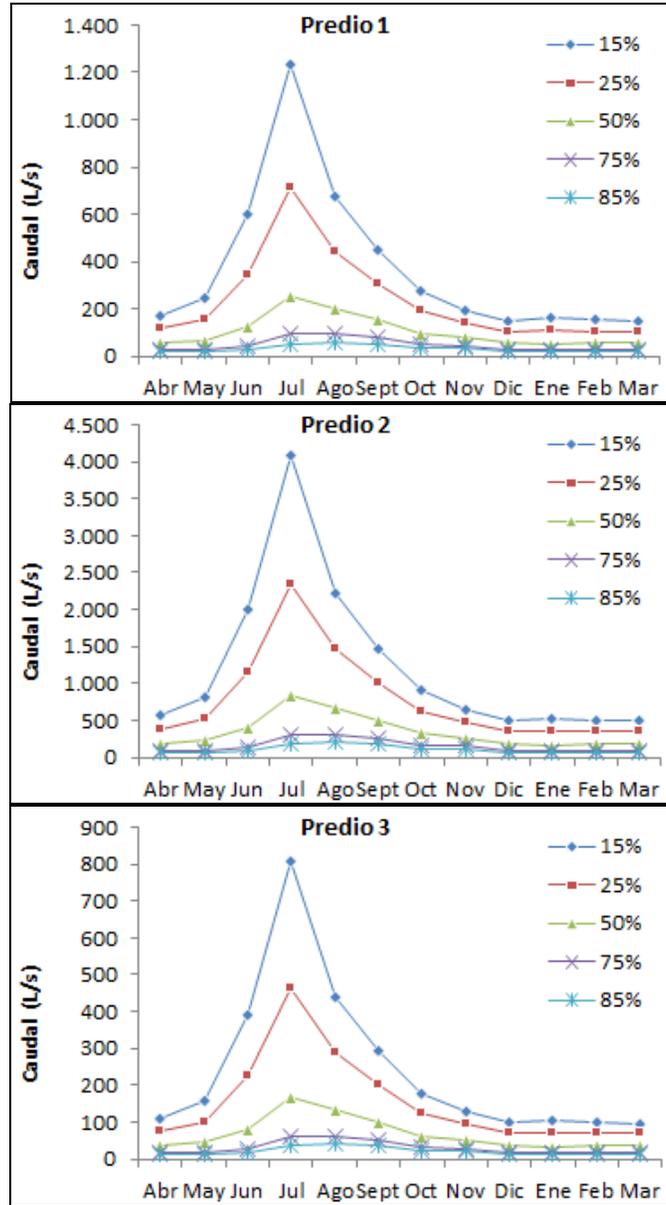
Tabla 3-18: Área aportante a los predios preseleccionados

Punto	Área aportante (Km ²)	Razón de áreas
Estación Estero Polpaico en Chicauma	424,43	1,00
Predio 1(Casas de Chacabuco)	97,2	0,23
Predio 2 (Colorado)	321,0	0,76
Predio 3 (Huechún)	65,3	0,15

* Predios numerados de norte a sur.

Al aplicar la razón anterior a la estación Estero Polpaico en Chicauma se obtienen los caudales para diferentes probabilidades de excedencia en los predios seleccionados, lo que depende netamente de las precipitaciones dado el carácter pluvial de la cuenca. En la Figura 3-20 se presentan las curvas de variación mensual para diferentes probabilidades de excedencia, de las que se concluye que con un 75% de probabilidad de excedencia se contaría con más de 20 L/s en los meses de la época invernal.

Figura 3-20: Variación mensual del caudal (m³/s) para diferentes probabilidades de excedencia en los predios preseleccionados



Fuente: Elaboración propia

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 busca desarrollar 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 eligieron los sitios con las mejores calificaciones de aptitud dentro del área estudiada, los cuales a su vez fueron 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 explican 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 impide el correcto llenado del acuífero y retrasa la disponibilidad del agua infiltrada. Por otra parte, una conductividad muy alta acelera 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 3-19.
- 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 3-19.

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 indica la capacidad del acuífero en la zona a evaluar y es un índice. 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 3-19 se describe en detalle el significado de la valoración de cada variable.

Tabla 3-19: 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 considera 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 fue de corto plazo y se infiltraron caudales reducidos, por lo anterior se analizó esta variable de manera referencial. Sólo se consideraría en la decisión cuando existiese clara evidencia de posible afectación por descarga al canal fuente de contaminantes. En este caso, se adoptaría un valor positivo cuando el agua del canal fuese 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 adopta un valor positivo cuando la fuente se encuentre a más de 3Km de distancia al lugar de donde se realice el proyecto de recarga.

Para que un sitio pueda ser considerado para realizar el proyecto de recarga artificial debe 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 considera caso a caso la factibilidad de los sitios.

Se realizó un análisis de sensibilidad para los ponderadores de cada variable de esta metodología.

3.5 EVALUACIÓN DE METODOLOGÍA EN ÁREA DE ESTUDIO

La aplicación de la metodología considera evaluar 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™,

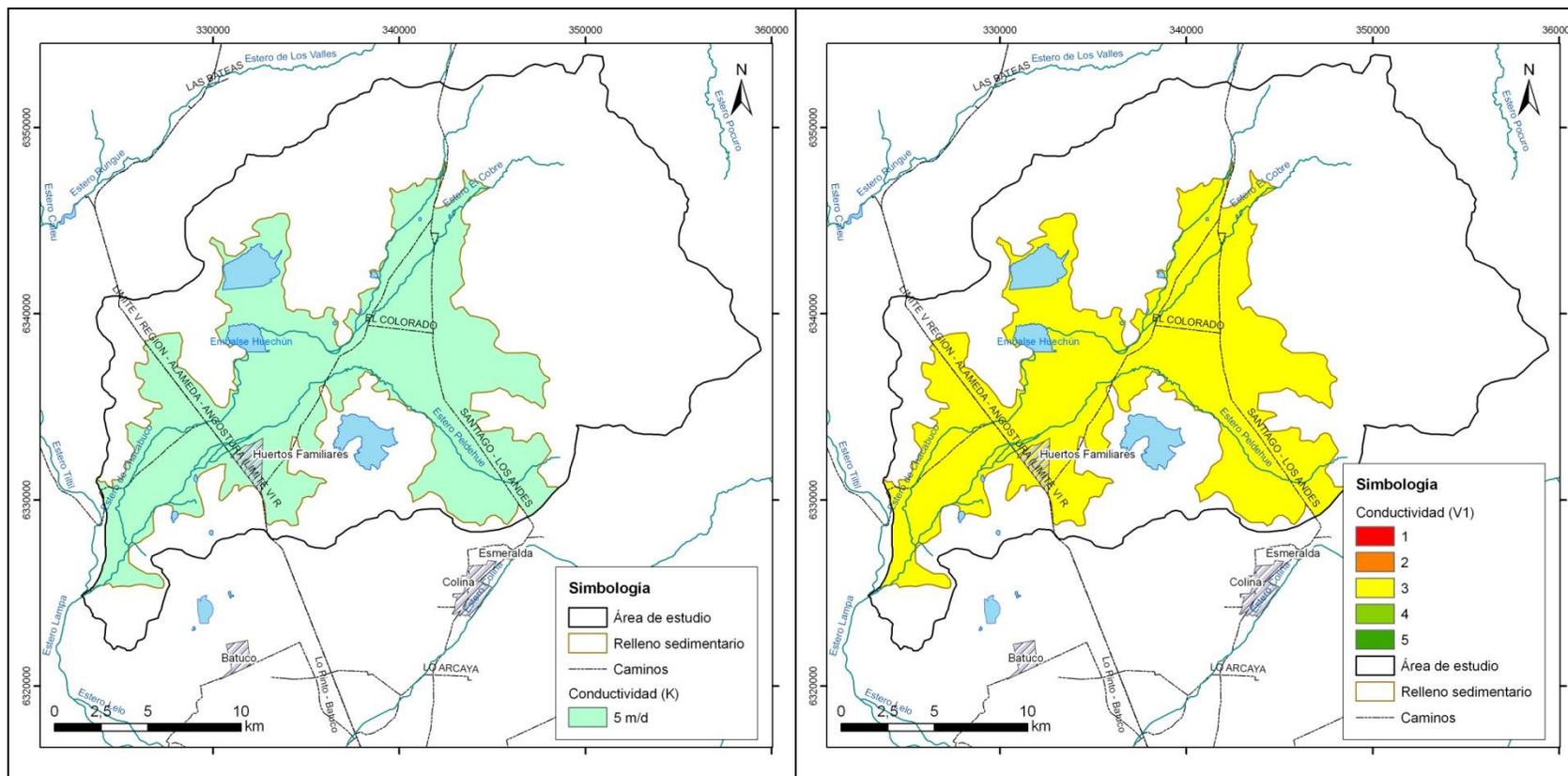
para su procesamiento, análisis y evaluación, determinando el valor de aptitud del territorio analizado.

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 Gestión Ambiental Consultores, 2011 que entrega para la zona de estudio un valor único de permeabilidad de 5 m/d (Figura 3-21 izquierda).

La aplicación de la metodología para esta variable según los rangos de la Tabla 3-19 entrega una clasificación del territorio de estudio en la categoría valor 3 como se muestra en la Figura 3-21 derecha. De acuerdo a este resultado se observa que las características conductivas del territorio son regulares para un proyecto piloto de infiltración en toda la zona de relleno sedimentario del área de estudio.

Figura 3-21: Variable 1 Conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

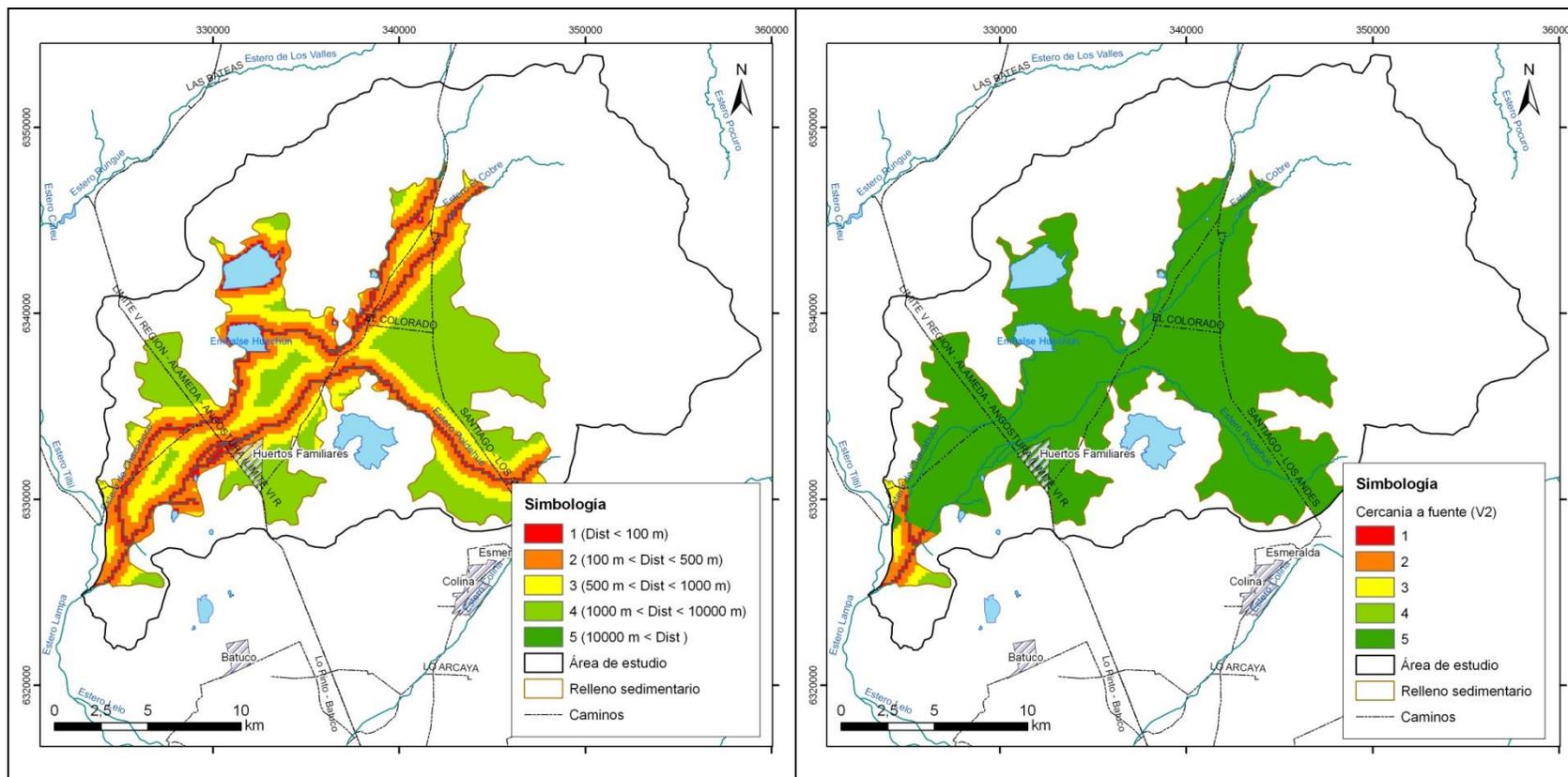
3.5.1.2 Variable 2: Cercanía y conexión a fuente de agua

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 3-19, entrega una clasificación del territorio de estudio en 4 de las 5 categorías definidas (Figura 3-22 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 m, 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, se cumple esta condición en la mayor parte del territorio (ver sección 3.5.1.3), por lo tanto, la variable toma un valor 5 como se aprecia en la Figura 3-22 derecha. De acuerdo a este resultado, se observa que los cuerpos de agua superficial presentes en el territorio no interfieren con el proyecto de infiltración, con excepción del sector cercano a la junta del estero Chacabuco con el estero Til Til.

Figura 3-22: Variable 2 Cercanía y conexión a fuente de agua



Fuente: Elaboración propia

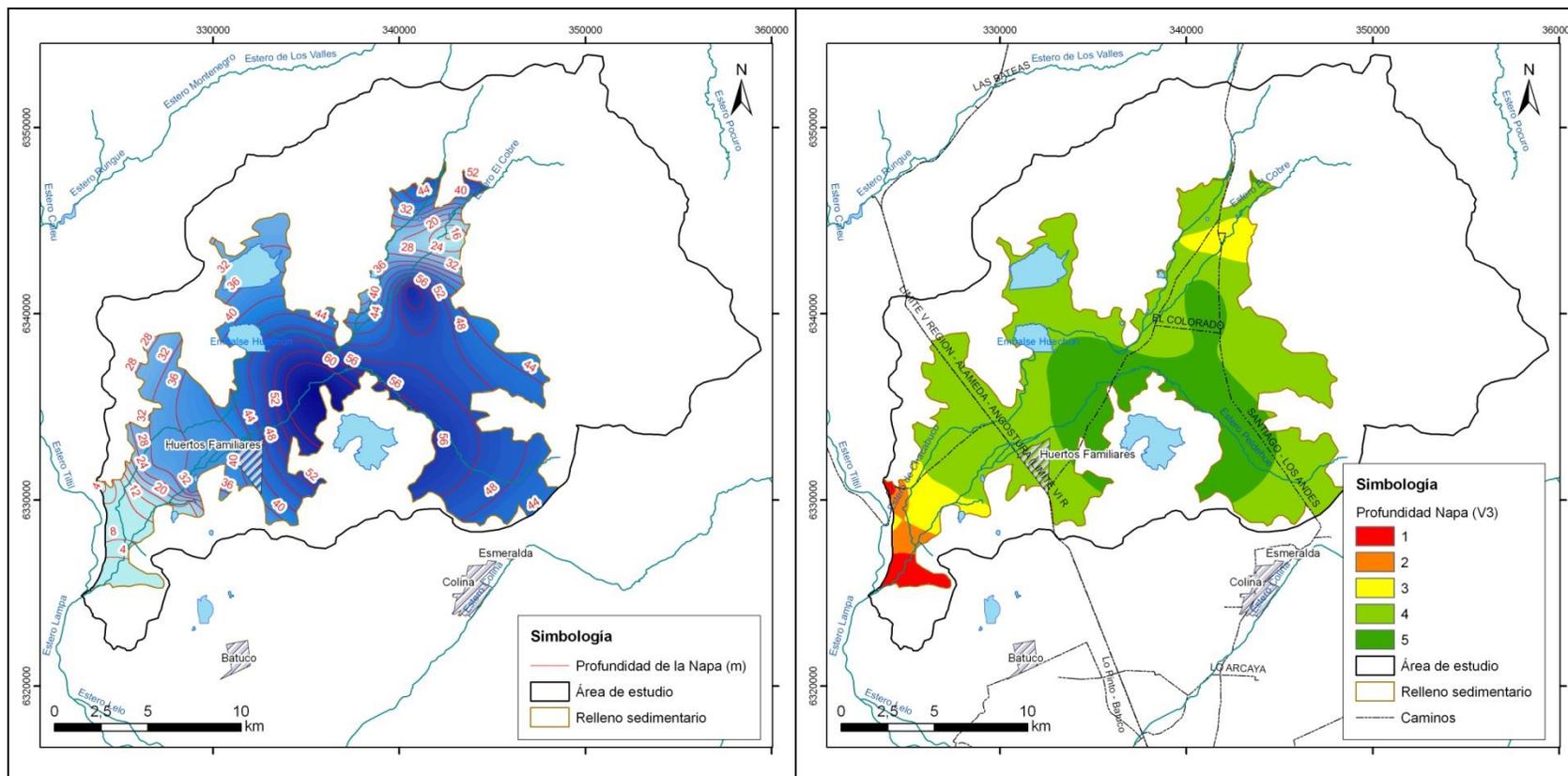
3.5.1.3 Variable 3: Profundidad de la napa

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 y con la cual se construyó la piezometría de la zona, presentada en la sección 3.2.4.2.2. De esta forma, se genera un plano de curvas isofreáticas como se muestra en la Figura 3-23 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 3-19.

La Figura 3-23 derecha, presenta el resultado anterior, indicando que la profundidad de la napa favorece un proyecto de infiltración en la mayor parte del territorio analizado (color verde claro y verde oscuro), donde las profundidades oscilan entre los 20 y 60 metros aproximadamente, destacando el sector ubicado al sur este del embalse Huechún con una profundidad mayor.

Figura 3-23: Variable 3 Profundidad del nivel freático



Fuente: Elaboración propia

3.5.1.4 Resultados

El valor de aptitud general de la zona de estudio, calculado como el promedio de las 4 variables anteriores, se presenta en la Figura 3-24. 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

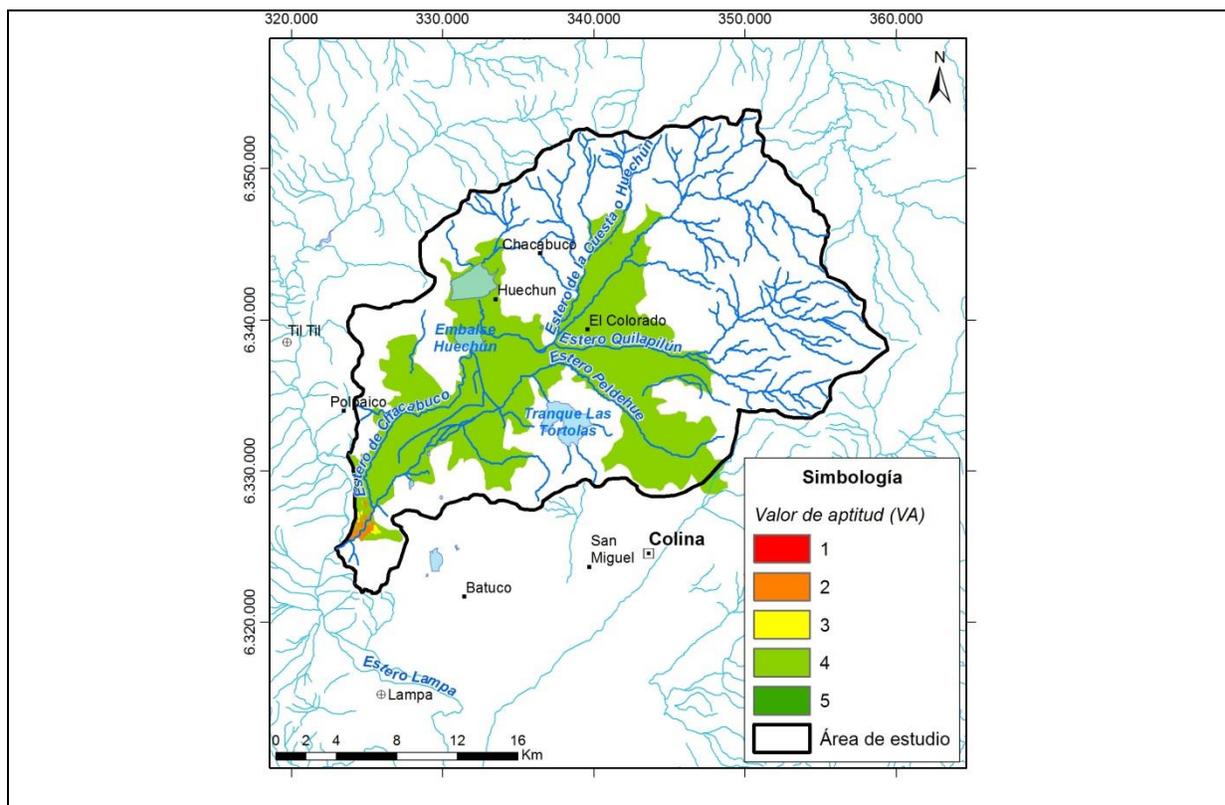
Valor “3”: Territorio con una aptitud media para un proyecto de recarga artificial

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

La mayor parte del área de estudio presenta la categoría 4 (aptitud *alta*), con un área muy pequeña hacia el extremo suroeste del área de estudio, con valores 2 y 3 (aptitud *baja* y *media* respectivamente). En consecuencia, casi toda el área de estudio sería adecuada para realizar un proyecto de recarga artificial.

Figura 3-24: Valor de aptitud del territorio (VA), Chacabuco-Polpaico



Fuente: Elaboración propia

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

La metodología considera un promedio de los tres parámetros considerados en que la suma ponderada le da igual importancia a los valores de cada una de las variables. Se realiza 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 3-20

Tabla 3-20: 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.

Los resultados de las simulaciones se presentan desde la Figura 3-25 a la Figura 3-27. En ella se aprecia que los valores de aptitud de la simulación difieren en pequeños sectores con el caso base, pero no entre ellos. Las diferencias entre el caso base y las simulaciones se observan hacia el extremo suroeste del área de estudio y aproximadamente 5 km al noreste de la localidad de El Colorado (sector Casas de Chacabuco), donde el valor de aptitud pasa de 4 (bueno) a 3 (medio).

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, a excepción del sector Casas de Chacabuco, donde la aptitud pasaría de buena a media.

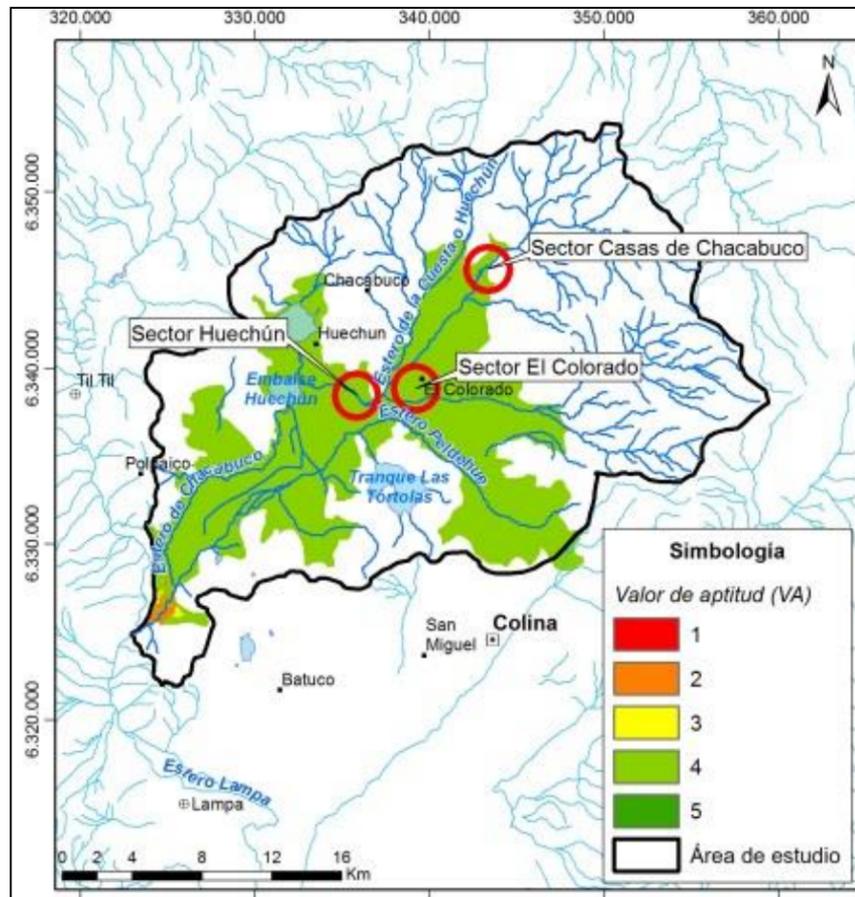


Figura 3-25: Resultados Fase I: Caso Base

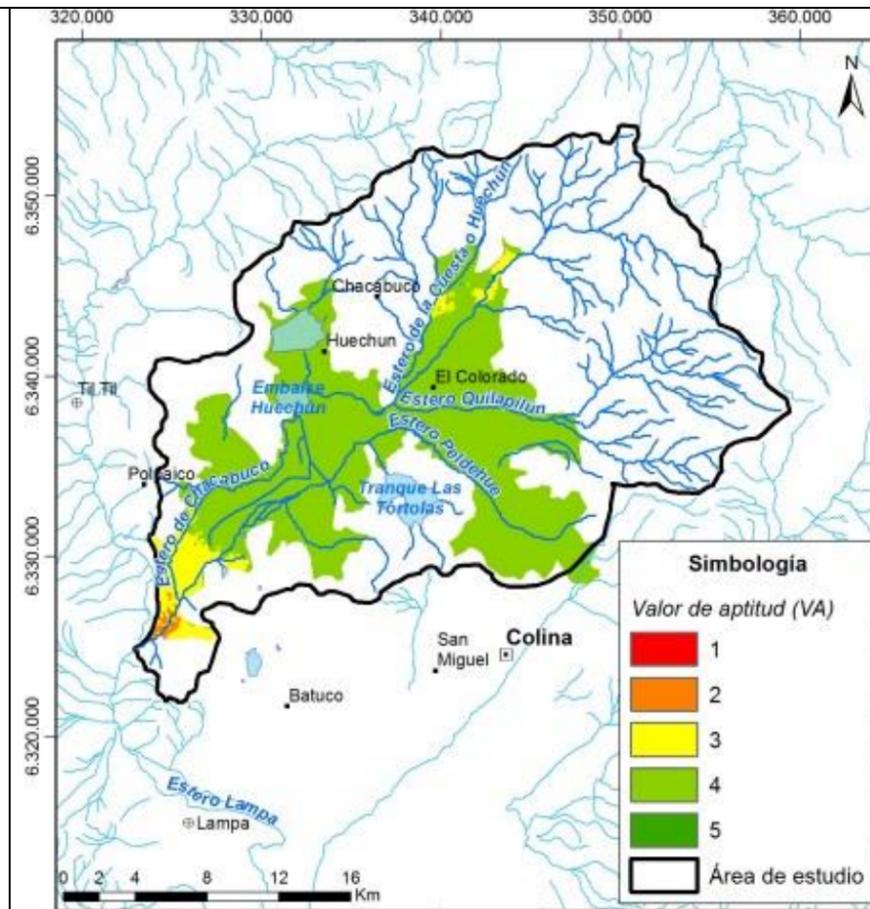


Figura 3-26: Resultados Fase I: Simulación 1

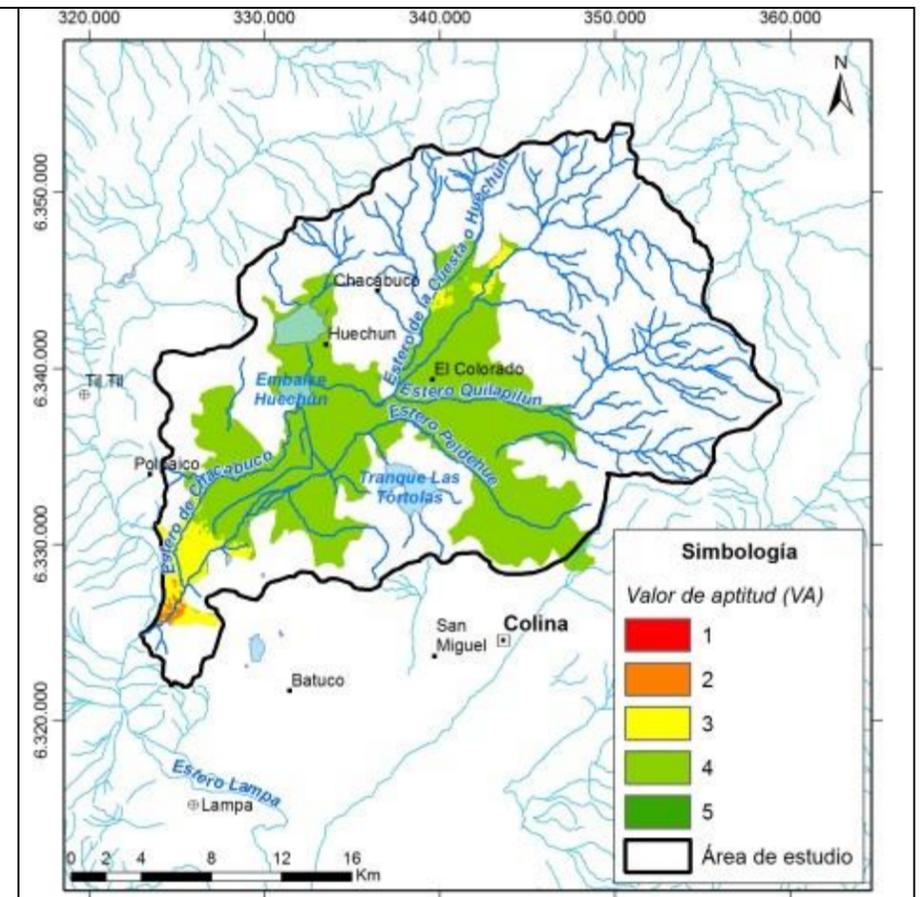


Figura 3-27: Resultados Fase I: Simulación 2

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 continuó estudiando la factibilidad de realizar el PPRAA. La Tabla 3-21 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 E.

Tabla 3-21: Sector y dueño de potenciales sitios de recarga

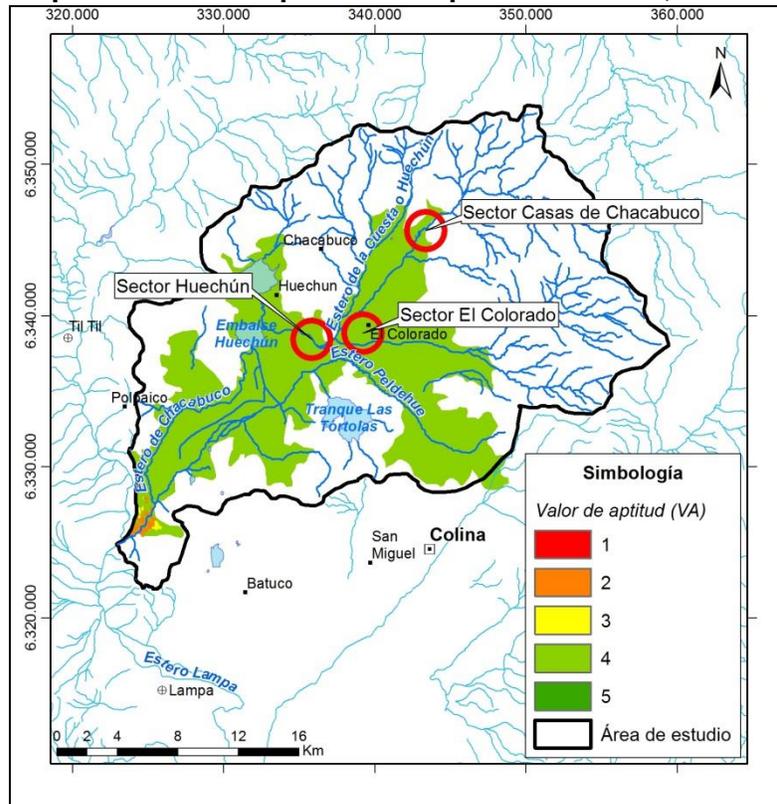
Sector	Sitio (dueño)
Huechún	Juan Alessandrini
Casas de Chacabuco	Sebastián Lira
Colorado	Mario Basualto

3.5.2.2 Búsqueda de sitios: Resultados Revisión antecedentes

La Figura 3-28 presenta la propuesta de tres sitios potenciales para realizar un proyecto piloto de recarga artificial de acuífero. La propuesta se basa en el resultado de la evaluación de la metodología y las visitas a terreno realizadas como parte de este estudio.

En la zona de estudio se identificaron 3 sectores potenciales. Estas son de norte a sur: (1) Casas de Chacabuco, (2) sector El colorado y (3) sector Huechún.

Figura 3-28: Propuesta de sitios potenciales para un PPRAA, Chacabuco-Polpaico



Fuente: Elaboración propia

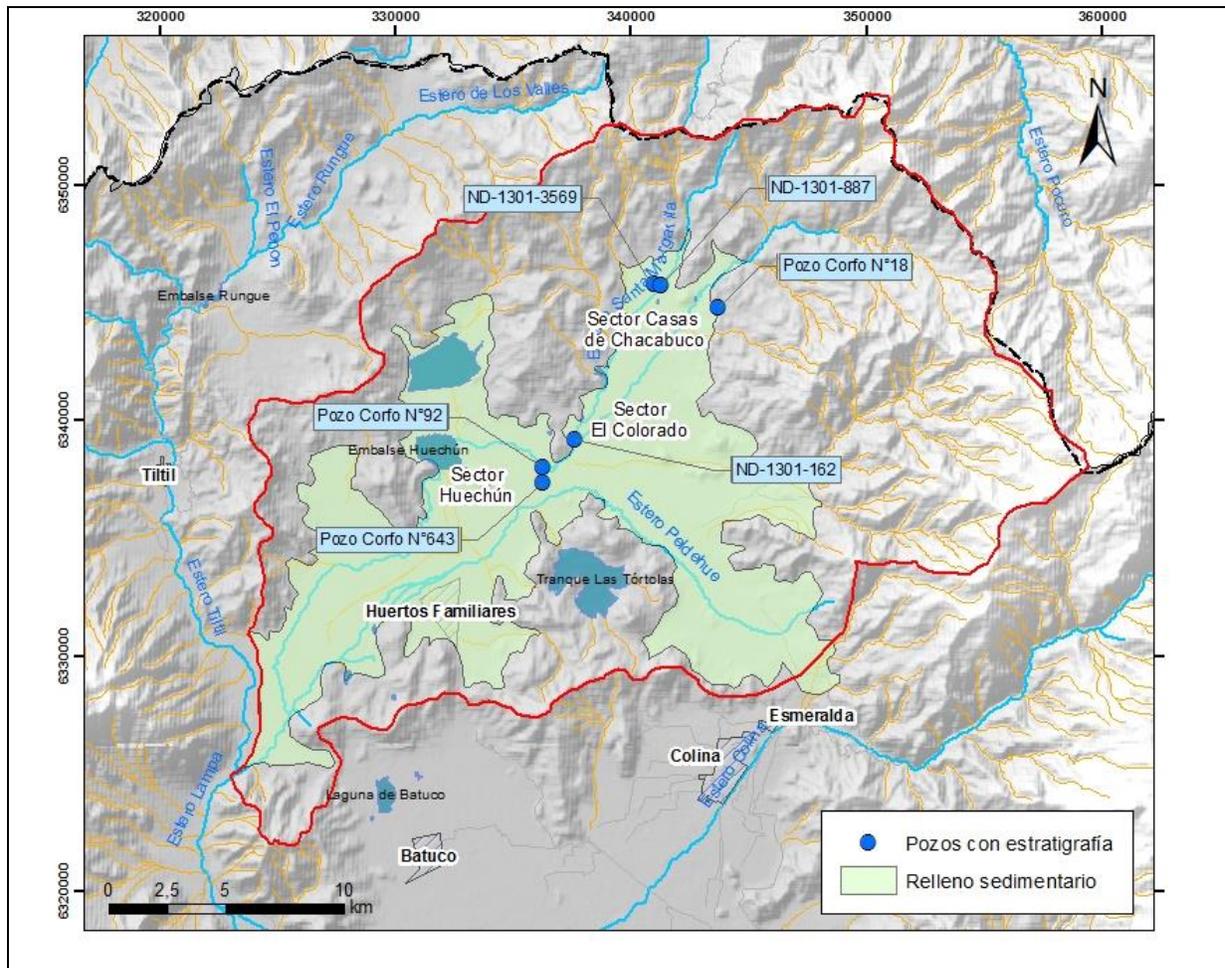
3.5.2.2.1 Estratigrafía de pozos para las zonas propuestas

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

Con la información estratigráfica proveniente de los expedientes de pozos DGA se confeccionaron 3 columnas estratigráficas, 2 en el sector Casas de Chacabuco y 1 en el sector El Colorado (Figura 3-29). En el CIREN se recolectó información de la estratigrafía de 3 pozos Corfo, 1 en el sector de Casas de Chacabuco y 2 en el sector de Huechún.

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 de los años 2009-2013. Por otra parte, el nivel estático incluido en los pozos Corfo, corresponde al medido durante la construcción de estos, entre los años 1950 y 1960.

Figura 3-29: Ubicación de Pozos con Estratigrafía



Fuente: Elaboración propia

A continuación se describe la estratigrafía de cada sector.

Sector Casas de Chacabuco

En el sector Casas de Chacabuco se cuenta con los pozos DGA ND-1301-3569 y ND-1301-887 en la parte oeste y el pozo Corfo Hacienda Chacabuco hacia el este (Figura 3-29).

Según el análisis de niveles para los últimos 5 años, el nivel estático se encontraría cercano a las 17 m bajo la superficie en los alrededores del pozo Corfo Hacienda Chacabuco (pozo Hacienda Chacabuco, Anexo C) (Figura 3-30), mientras que en el sector de los pozos ND el nivel estático se encontraría aproximadamente 40 m bajo superficie (Figura 3-31 y Figura 3-32).

De acuerdo a lo anterior, el espesor de relleno sobre la napa sería cercano a los 17 m en el este del sector Casas de Chacabuco. En este sector el pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco muestra 5 m de greda con arena muy gruesa sobre el nivel estático, sobreyacido por 5 m de greda con ripio y 7 m de terreno gredoso con bolones hacia superficie (Figura 3-30). Dado que este espesor descrito es principalmente greda, se infiere que no posee buenas características hidrogeológicas, por lo que la unidad que podría alojar el acuífero se encontraría a partir de los 34 m de profundidad, profundidad bajo la cual predominan las arenas.

Hacia el oeste del sector Casas de Chacabuco los pozos ND-1301-3569 y ND-1301-887 muestran en sus primeros 40 m un predominio de la fracción arcillosa (Figura 3-31 y Figura 3-32). Por una parte el pozo ND-1301-3569 muestra una intercalación de 10 m de bolones arcillosos y 10 m de ripio arenoso, mientras que el pozo ND-1301-887 muestra 19 m superiores de arcilla, infrayacida por areniscas arcillosas con entre 60 y 75% de arcilla. En este sector el agua se encontraría probablemente alojada en el nivel de ripio, grava y arena descrito bajo los 42 m en el pozo ND-1301-3569, el cual probablemente se hace más arenoso y arcilloso hacia el pozo ND-1301-887.

Sector El Colorado

En el sector El Colorado se cuenta con el pozo ND-1301-162.

En este sector, el espesor de relleno sobre el nivel estático es de 42 m (Figura 3-33). Este relleno está dominado por arcilla con un par de intercalaciones de 2 m de arena y ripio. Bajo los 42 m se observa una capa de 13 m de arena gruesa que probablemente corresponde al acuífero.

Sector Huechún

En el sector Huechún se cuenta con los pozos Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico y Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico.

En este sector, la estadística de los últimos 5 años indica nivel estático promedio de 52 m para el pozo Cera Unión Huechún (Anexo C) y un nivel actual de aproximadamente 70 m.

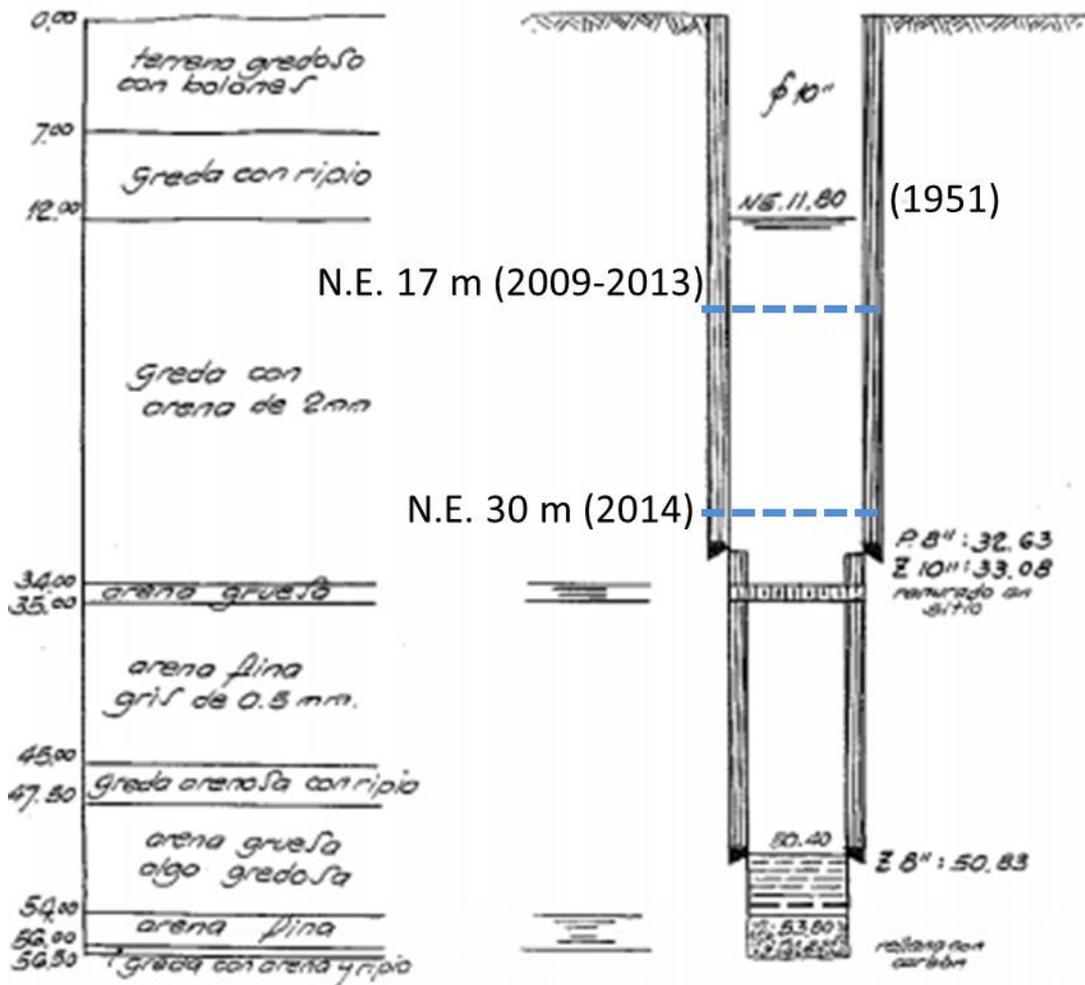
En el sector de Huechún la estratigrafía de pozos indica que los primeros metros desde el subsuelo están dominados por niveles con diverso contenido de arcilla, los que se intercalan con 2 niveles de mejores características hidrogeológicas, entre aproximadamente los 30 y 50 m y los 70 y 80 m de profundidad (Figura 3-34 y Figura 3-35). El nivel más somero corresponde a ripio y arena gruesa el pozo Corfo N° 643 que hacia el sector del pozo Corfo N° 92 disminuye su granulometría a arenas. Por otra parte el nivel más profundo corresponde ripio y arena gruesa en el pozo Corfo N° 643. Según los valores de nivel piezométrico, el nivel más profundo sería el que actualmente surte de agua al pozo.

Estratigrafía del área de estudio

Integrando los resultados del análisis estratigráfico efectuado en los 3 sectores propuestos se puede concluir que en el sector este del área de estudio en los sectores de Casas de Chacabuco y El Colorado, la estratigrafía de los primeros 40 m de profundidad está dominada por la presencia de arcillas, por lo que este relleno tendría mala propiedades hidrogeológicas. Bajo esta capa arcillosa se encontraría el acuífero.

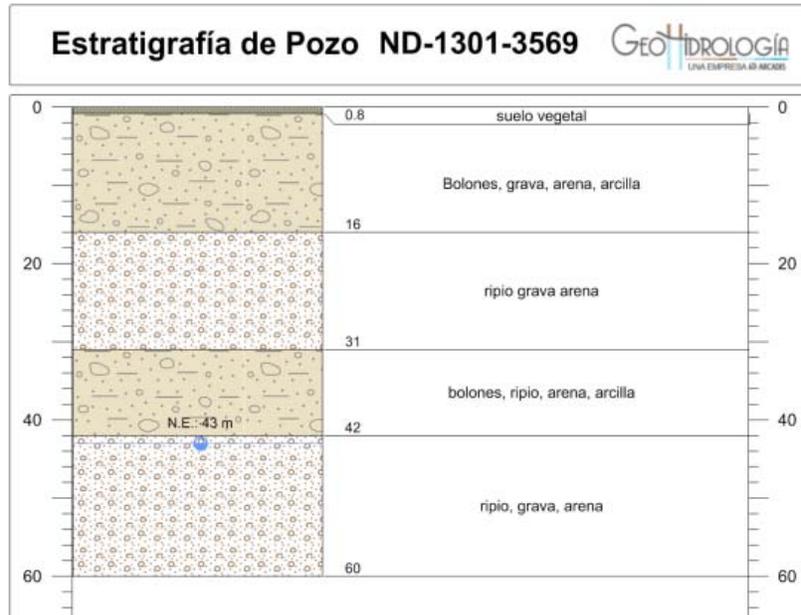
Por otra parte, en el sector de Huechún, la estratigrafía se caracteriza por niveles con diverso contenidos de arcilla, que se intercalan con 2 niveles de mejores características hidrogeológicas, entre aproximadamente los 30 y 50 m y los 70 y 80 m de profundidad. Según los valores de nivel piezométrico, el nivel más profundo sería el que actualmente surte de agua al pozo.

Figura 3-30: Estratigrafía y habilitación de pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco, sector Este Casas de Chacabuco



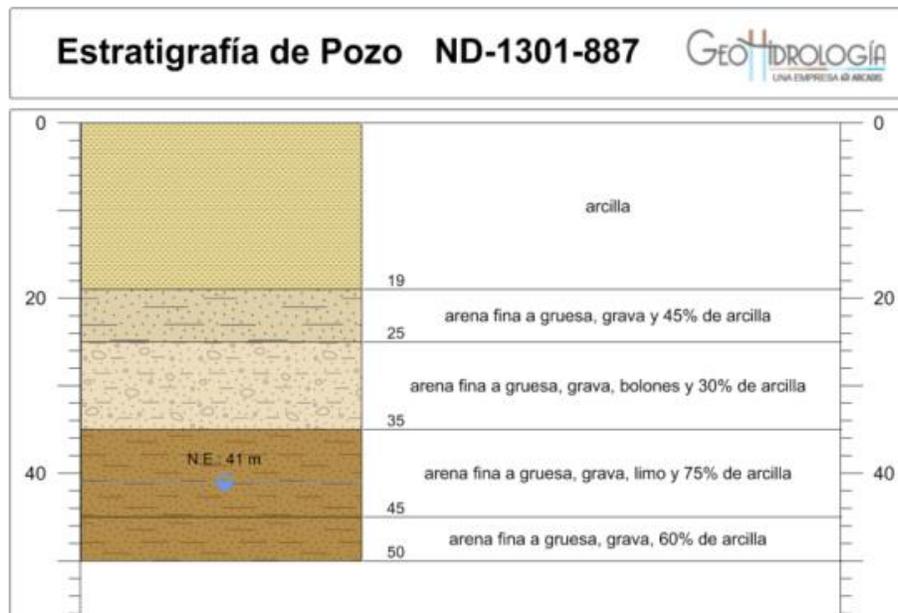
Fuente: CIREN

Figura 3-31: Estratigrafía del pozo ND-1301-3569, sector oeste Casas de Chacabuco.



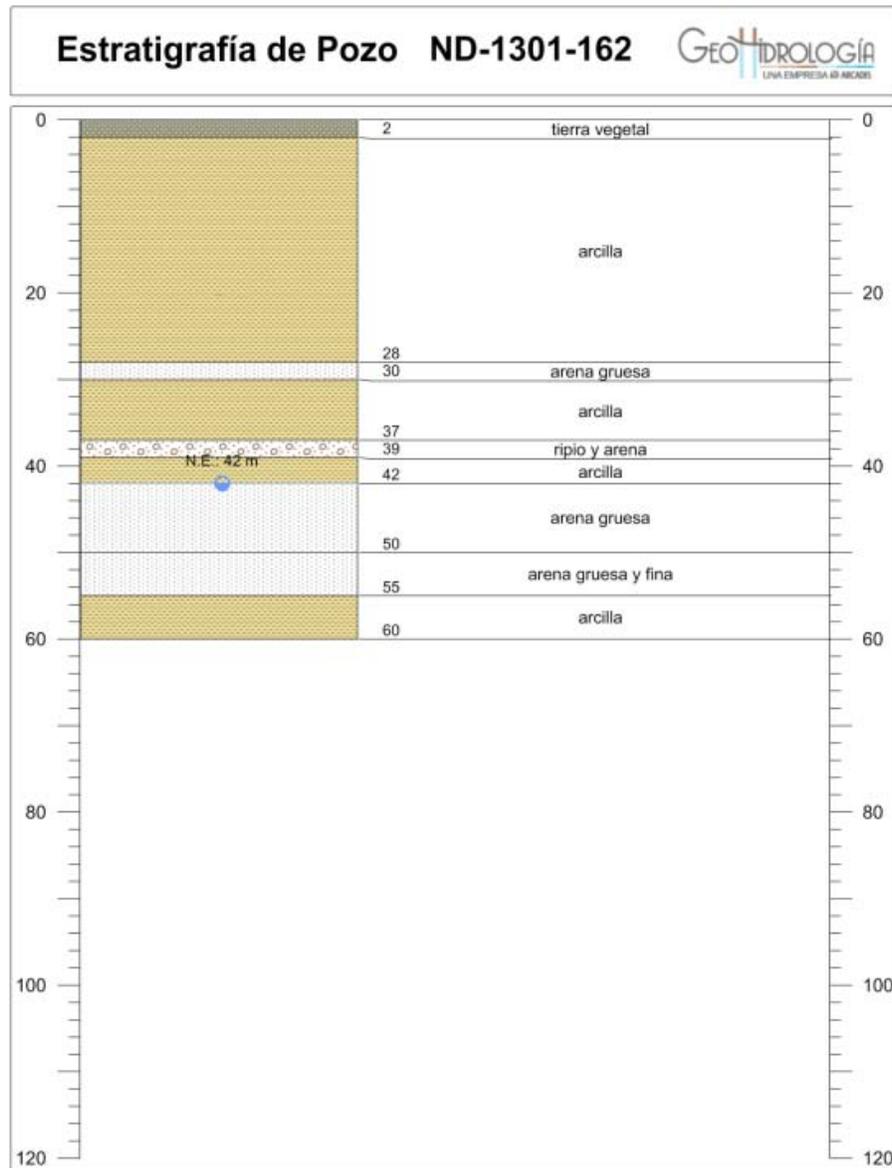
Fuente: Elaboración propia a partir de expedientes de pozos DGA

Figura 3-32: Estratigrafía del pozo ND-1301-887, sector oeste Casas de Chacabuco



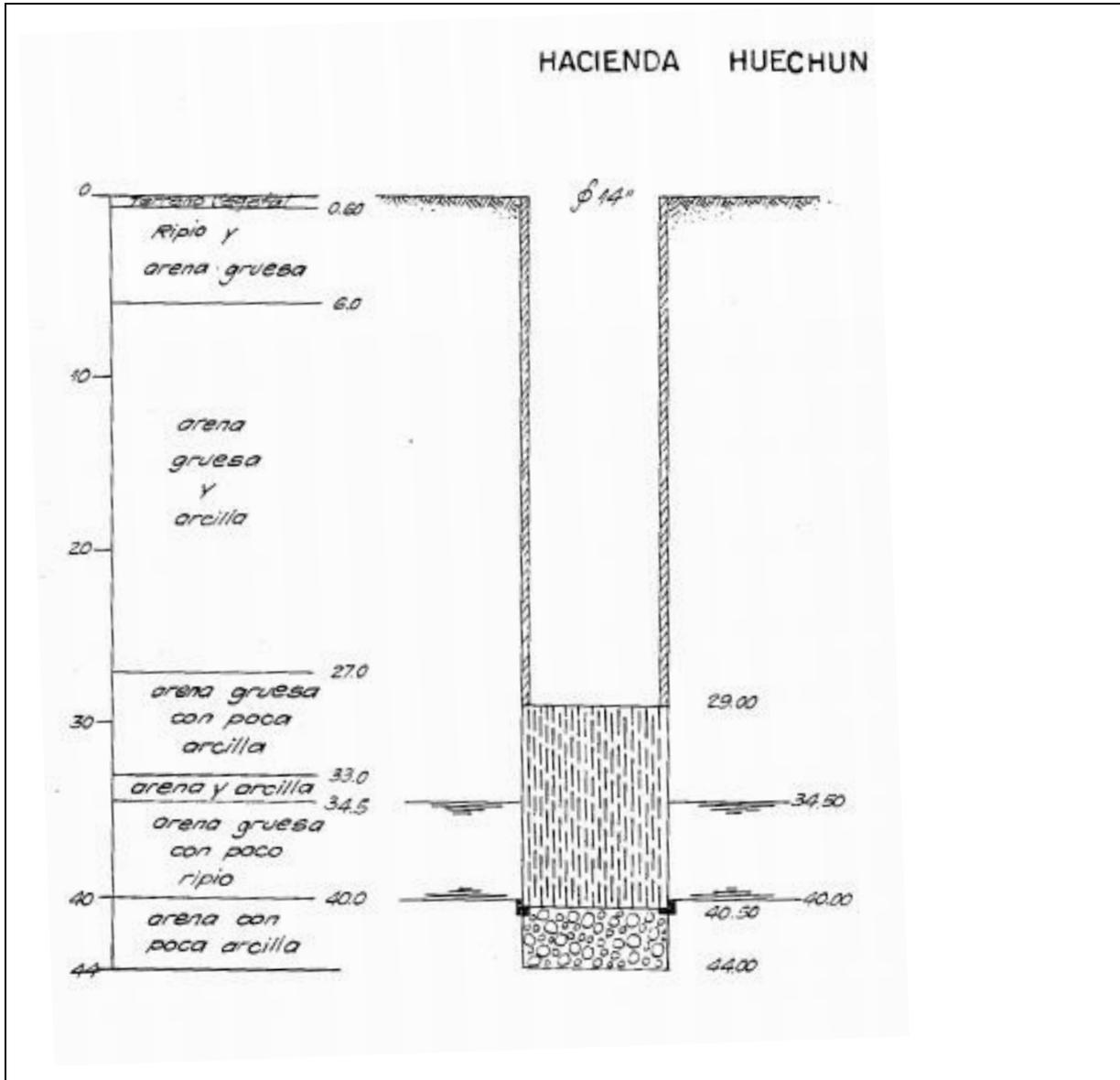
Fuente: Elaboración propia a partir de expedientes de pozos DGA

Figura 3-33: Estratigrafía del pozo ND-1301-162, sector El Colorado



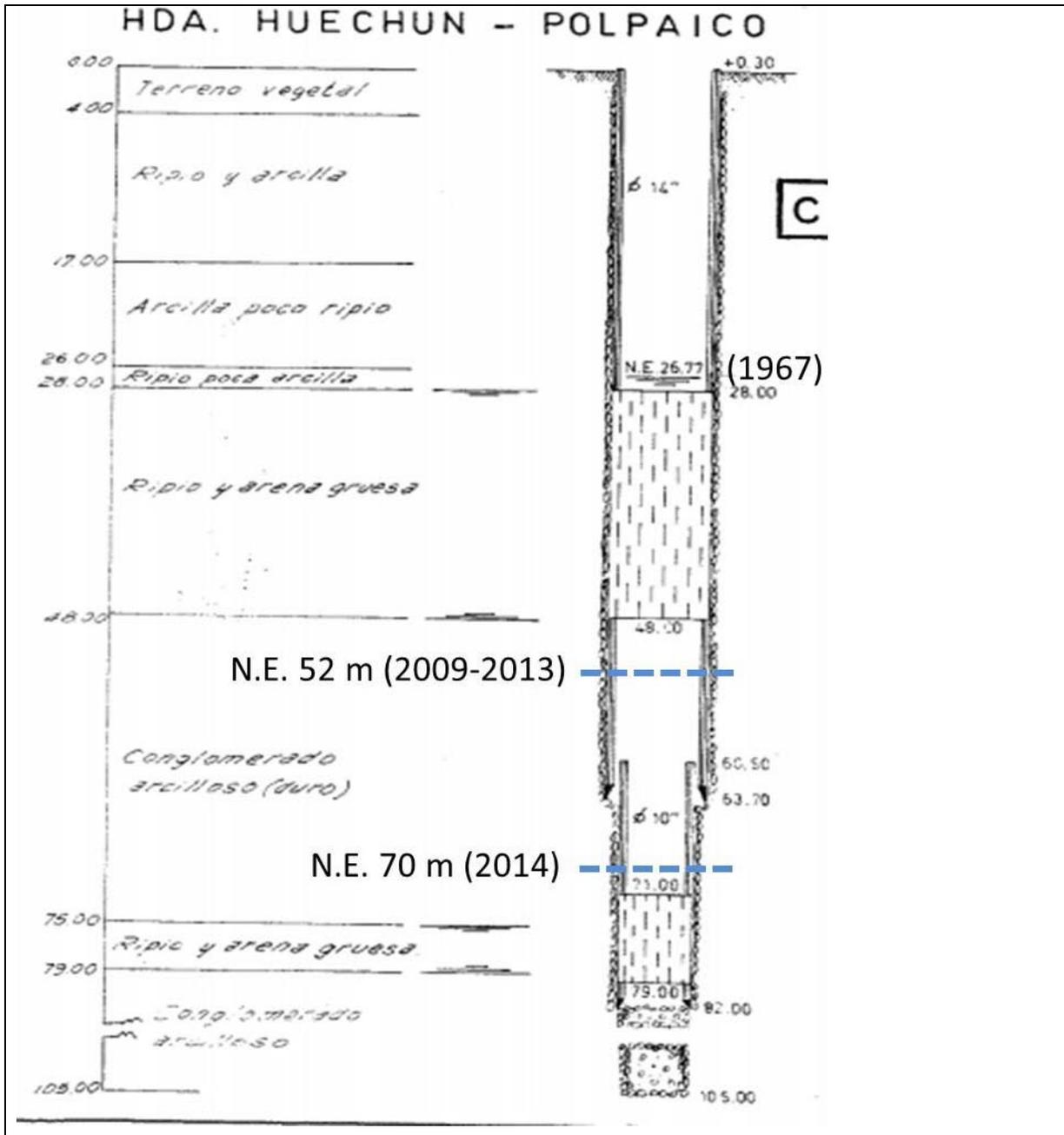
Fuente: Elaboración propia a partir de expedientes de pozos DGA

Figura 3-34: Estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún



Fuente: CIREN

Figura 3-35: Estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico, Huechún



Fuente: CIREN

3.5.3 Fase II

Los sitios propuestos fueron evaluados de acuerdo a la metodología descrita en la sección anterior para la Fase II. A continuación se presenta un cuadro resumen con las características principales de los sitios en la Tabla 3-22 y su respectiva evaluación en la Tabla 3-23.

Tabla 3-22: Características principales de los sitios con miras la evaluación de la Fase II

Sitio (dueño)	Sector	Distancia Curso de Agua	Disponibilidad de Terreno	Disponibilidad de derechos	Cumple con calidad de agua (*)	Distancia Fuente de Contaminación (km)
Juan Alessandrini	Huechún	0,3	Si	Si	-	3,6
Sebastián Lira	Casas de Chacabuco	0,4	Si	Si	-	9,5
Mario Basualto	Colorado	1	Si	Si	-	2,1

Nota: (*) No se incluye una clasificación de calidad de agua en este informe, debido a que los resultados de la campaña de toma y análisis de calidad de agua no alcanzaron a estar listos para esta entrega.

Tabla 3-23: Evaluación de los sitios (Fase II)

Sitio (dueño)	Sector	Evaluación					Total	Resultado
		Cercanía a fuente de agua	Disponibilidad de Terreno	Disponibilidad de Derechos	Calidad de agua (*)	Lejanía a fuente de contaminación		
Juan Alessandrini	Huechún	1	1	1	-	1	4	Idóneo
Sebastián Lira	Casas de Chacabuco	1	1	1	-	1	4	Idóneo
Mario Basualto	Colorado	1	1	1	-	0	3	No idóneo

Nota: (*) La evaluación no contempló esta variable, debido a que los resultados de calidad de agua no alcanzaron a estar listo.

De acuerdo a la metodología presentada se consideran sitios apropiados los que se ubican en Huechún y Casas Chacabuco, pertenecientes a Juan Alessandrini y a Sebastián Lira, respectivamente.

La Tabla 3-24 muestra un resumen del análisis de los sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico.

Tabla 3-24: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico

Sitios identificados y contactados	Sebastián Lira (Casas de Chacabuco)	Juan Alessandrini (Huechún)	Mario Basualto (El Colorado)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Buena	Buena	Buena
Observaciones	Este sitio se ubica en una zona donde existe terrenos sin uso, con una fuente de agua en altura correspondiente a un ramal del canal Chacabuco, en una de las zonas más altas de la cuenca de Chacabuco	Este sitio se ubica en la zona intermedia del área de estudio, existe espacio para desarrollar las pruebas pero poca seguridad hídrica	Propietario posee 14 acciones del canal Chacabuco, sin embargo está en duda la disponibilidad del agua
Pros	<ul style="list-style-type: none"> - Sitio ubicado en la parte alta de la cuenca - Amplio terreno sin uso - Dueños de los derechos de agua se ubican aguas abajo del sitio, luego podrán aprovechar el agua almacenada en sus predios 	<ul style="list-style-type: none"> - Sitio amplio y resguardado - Sitio ubicado a un costado del canal Chacabuco - Dueño del predio y del agua es presidente de la Asociación de Canalistas de Chacabuco - Nivel de la napa actual profundo 	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de la napa actual profundo
Contras	<ul style="list-style-type: none"> - Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Es necesario negociar la entrega de derechos con más de 1 persona 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Dueño no está muy convencido de la utilidad del proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> - Predio pequeño - Dudas respecto de seguridad para las obras
Visión de largo plazo	Cuenca de Chacabuco posee buenas condiciones para el desarrollo de proyectos de recarga artificial de acuíferos. Posee permeabilidad adecuada, un acuífero altamente deprimido, una zona no saturada potente, un angostamiento del valle en la zona media que serviría para bombear el agua almacenada. Sin embargo existe alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua. Este proyecto sería mucho más atractivo si se trajera más agua desde otra cuenca para almacenarla en este valle.		

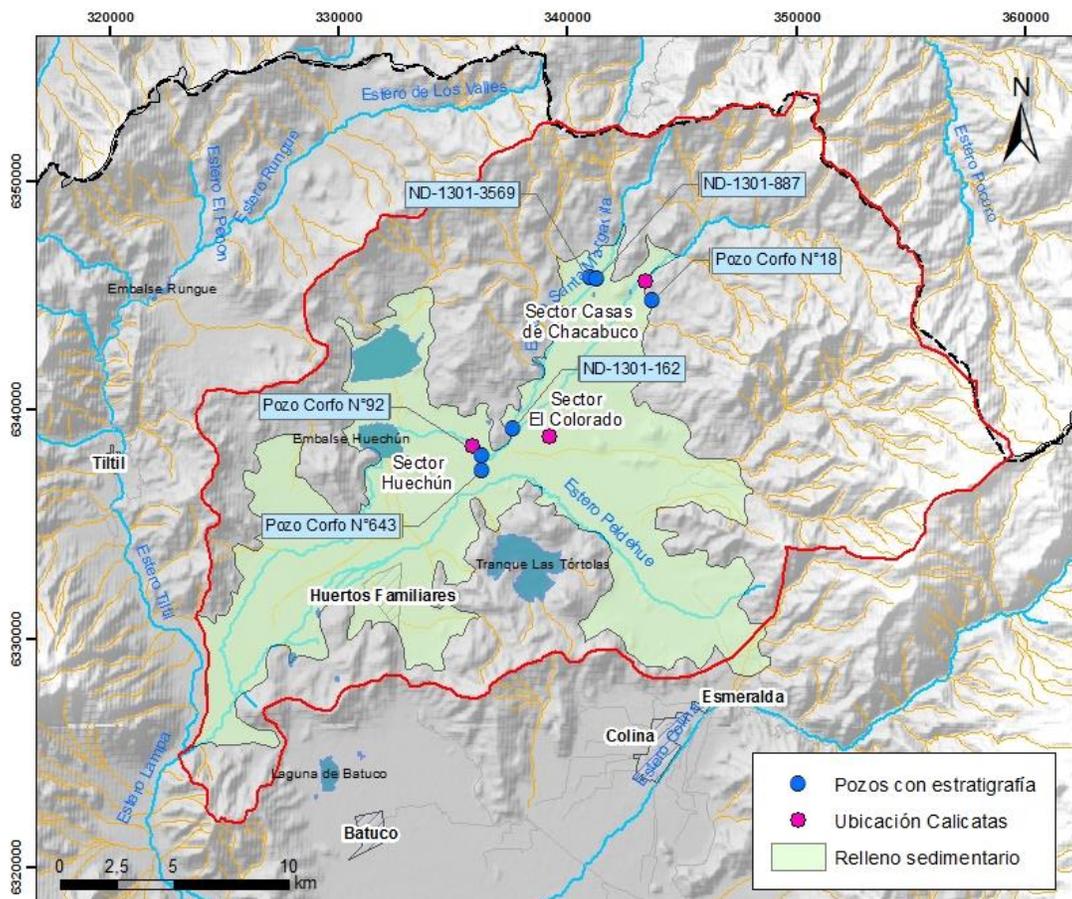
4 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA Y SELECCIÓN DE SITIO

4.1 TRABAJOS EN TERRENO

La semana del 17 al 29 de marzo se realizó los trabajos en terreno en el área de estudio. Estos corresponden 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.

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



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 tiene como objetivo evaluar la aptitud del material del subsuelo que va a ser 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 tiene como fin de preparar el terreno para una medición de infiltración en un estrato identificado durante la inspección de la primera calicata, cuya permeabilidad relativa estimada sea 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 realizó 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 es 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 4-2). 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: $K_{fs}=0,5K_s$.

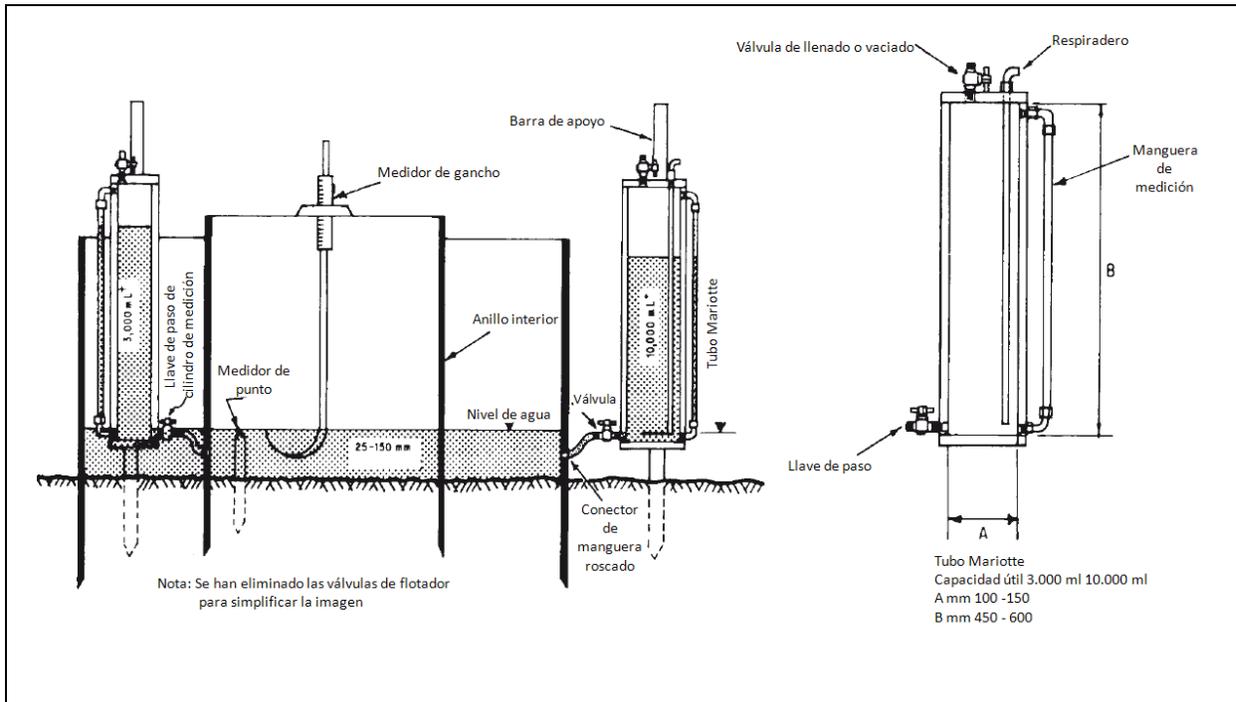
El método consiste en enterrar dos anillos, uno dentro del otro de manera concéntrica llenándolos parcialmente con agua y manteniendo el nivel constante. Para conservar este nivel constante dentro de los anillos, se utilizaron tubos de Mariotté, los que se conectaron a los cilindros tal como se observa en la Figura 4-3. La tasa de descenso medida en el tubo de Mariotté 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.

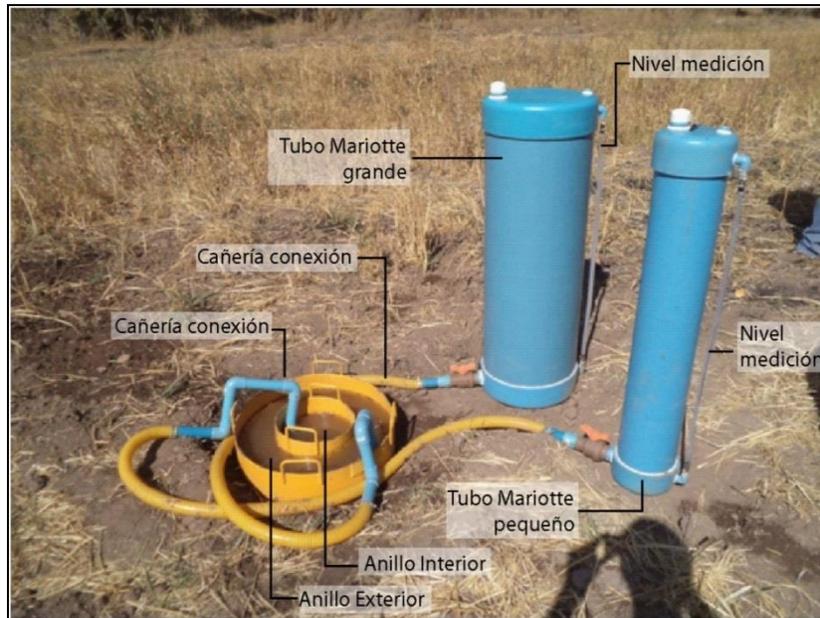
Notar que este valor es variable espacialmente para un mismo tipo de suelo a distancias cortas por lo que para la generación de modelos espaciales una sola medida no es representativa de la conductividad en un área, aun siendo pequeña y supuesta homogénea.

Figura 4-2: Esquema de referencia prueba de infiltración del doble anillo a carga cte.



Fuente: método de prueba estándar para medida de infiltración de suelos en terreno usando un infiltómetro de doble anillo, ASTM International

Figura 4-3: Instalación prueba de infiltración en terreno



Fuente: Elaboración propia

A continuación se detallan los trabajos realizados para cada sitio, junto con los resultados obtenidos.

4.1.2 Resultados trabajos en terreno

4.1.2.1 Sector Casas de Chacabuco

En el sector Casas de Chacabuco, específicamente en el predio denominado Hacienda Chacabuco, se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 3,5 m de profundidad y calicata 2 de 0,5 m de profundidad (Figura 4-4 A y B).

La primera calicata tuvo una profundidad inicial de 2 m, que luego se profundizó a 3,5 m, con el fin de buscar el contacto del nivel encontrado con el próximo nivel, en subsuperficie.

La calicata 1 se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 343.369 y N: 6.345.634 (Figura 4-1), mientras que la calicata 2 se ubicó 2 m al sur de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Tabla 4-1) (Figura 4-5): (1) 3 m de arenisca fina a media arcillosa, con 40% de matriz correspondiente a arcilla plástica, que pasa a arcilla arenosa en algunos sectores, con buena compactación, sin cementación aparente y (2) 0,5 m suelo vegetal pardo oscuro con material orgánico.

La calicata 2 presenta las mismas características encontradas en la de mayor profundidad (Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Resultados descripción de calicatas en el sector de Casas de Chacabuco

Calicata 1 (0-3,5 m)		Calicata 2 (0-80 cm)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,5	Suelo vegetal. Capa de suelo color pardo oscuro con material orgánico. Raíces en posición vertical. Trozos de carbón orgánico.	0 a 0,5	Suelo vegetal
0,5 a 3,5	Arenisca fina a media arcillosa. 60% granos, 40% matriz. Matriz arcilla plástica. Arenisca arcillosa pasa a arcilla arenosa en algunos sectores. Granos de arena heterocomposicionales, muy meteorizados. Muchos de ellos se deshacen al aplastarlos, por los que es difícil la estimación del porcentaje de matriz. Arenisca con mala selección. Líticos de hasta 15 cm dispersos en el horizonte (5%). Buena compactación, no se observa cementación. La capa se observa sin estructuras sedimentarias.	0,5 a 0,8	Arenisca fina a media arcillosa con mismas características que calicata 1.

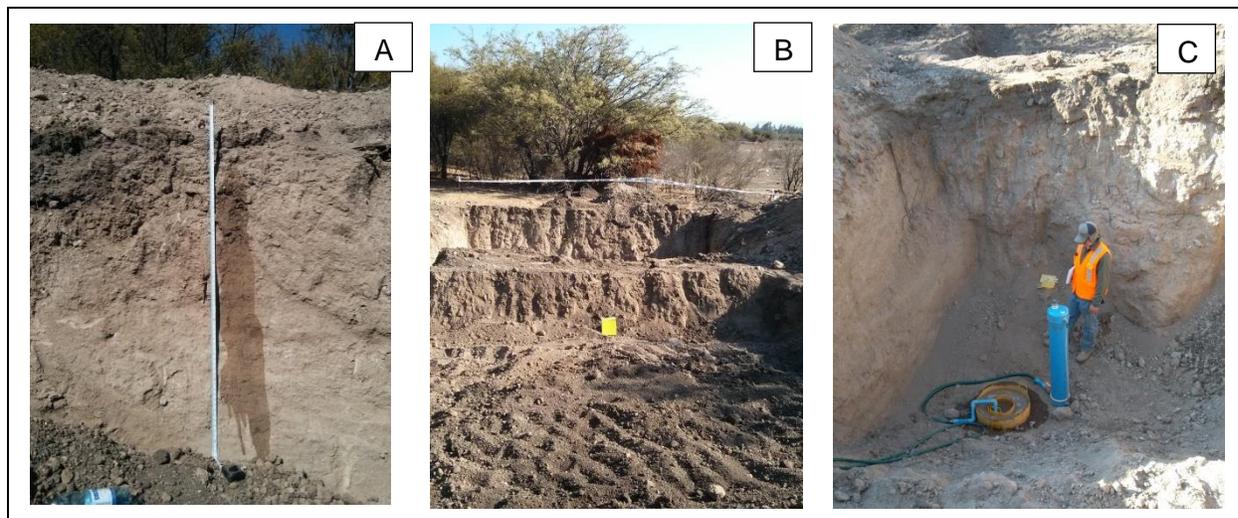
Posteriormente se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-4 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-2. Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo F.

Tabla 4-2: Resultados ensayo de permeabilidad en el sector de Casas de Chacabuco

	A nivel del suelo	Profundidad 0,5 m (Calicata 0-0,5 m)	Profundidad 3,5 m (Calicata 0-3,5 m)
Tasa de infiltración (K_s) (m/d)	0,22	1,70	0,15

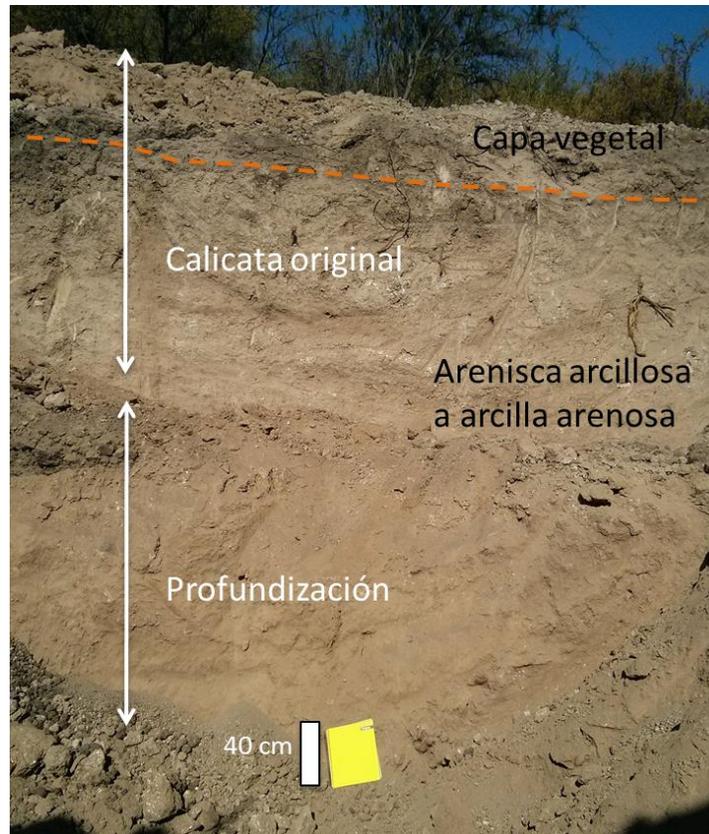
Los resultados de los ensayos de permeabilidad en el sector de Casas de Chacabuco indica una permeabilidad baja, de aproximadamente 0,2 m/d a nivel del suelo y a 3,5 m de profundidad, los que indican la baja capacidad de infiltración del suelo vegetal y la capa de arena arcillosa respectivamente. A 0,5 m de profundidad, hacia la parte alta de la capa de arenisca arcillosa, mejora la tasa de infiltración a 1,7 m/d, valor que se califica como buena permeabilidad.

Figura 4-4: Trabajos en terreno- Sector Casas de Chacabuco



Nota: A. Calicata 1, con profundidad inicial de 2 m.
 B. Calicata 2 (50 cm) en vista principal con calicata 1 (3,5 m) en el fondo, vista al sur.
 C. Prueba de infiltración en calicata 1, 3,5 m de profundidad.

Figura 4-5: Calicata 1, sector Casas de Chacabuco con estratigrafía descrita



Según el análisis estratigráfico realizado para el sector Casas de Chacabuco en el capítulo 3.5.2.2.1, este sector presenta un predominio de material arcilloso en los primeros 35-40 m bajo la superficie. Específicamente, el pozo Corfo N° 18 Hacienda Chacabuco, aproximadamente 1 km al sureste de las calicatas (Figura 4-1), muestra 34 m de greda bajo los cuales se disponen arenas que albergarían el acuífero.

La información anterior indicaría que la capa de arenisca arcillosa a arcilla arenosa identificada en las calicatas se podría extender hasta los 34 m de profundidad. Según comunicación personal del dueño del predio, Rodrigo Andai, esta potente capa de arcilla disminuiría en espesor desde la zona del pozo hacia el sector de las calicatas (de sur a norte), pero la única forma de comprobar esto sería perforando en esta zona.

4.1.2.2 Sector El Colorado

En el sector El Colorado, se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 2 m de profundidad y calicata 2 de 1 m de profundidad (Figura 4-6 A y B).

La calicata 1 se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 339.211 y N: 6.338.840 (Figura 4-1), mientras que la calicata 2 se ubicó 2 m al oeste de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Tabla 4-3): (1) 90 cm de arcilla limosa parda con restos de materia orgánica (2) 20 cm de arena gravosa fina con escasa arcilla y (3) 90 cm de suelo vegetal.

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

Tabla 4-3: Resultados de la descripción de calicatas en el sector de El Colorado

Calicata 1 (0-2 m)		Calicata 2 (0-1 m)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,9	Suelo vegetal: arcilla parda con abundante materia orgánica y algo de limo (20%)	0 a 1	Suelo vegetal
0,9 a 1,1	Arena gravosa: Arena fina polimíctica, los clastos mayores (20 %) son de hasta 7 cm, son de baja esfericidad y moderado redondeamiento, escasa arcilla (5%)	-	-
1,1 a 2	Arcilla parda limosa con restos de materia orgánica escasos clastos de grava gruesa a fina (5-10%)	-	-

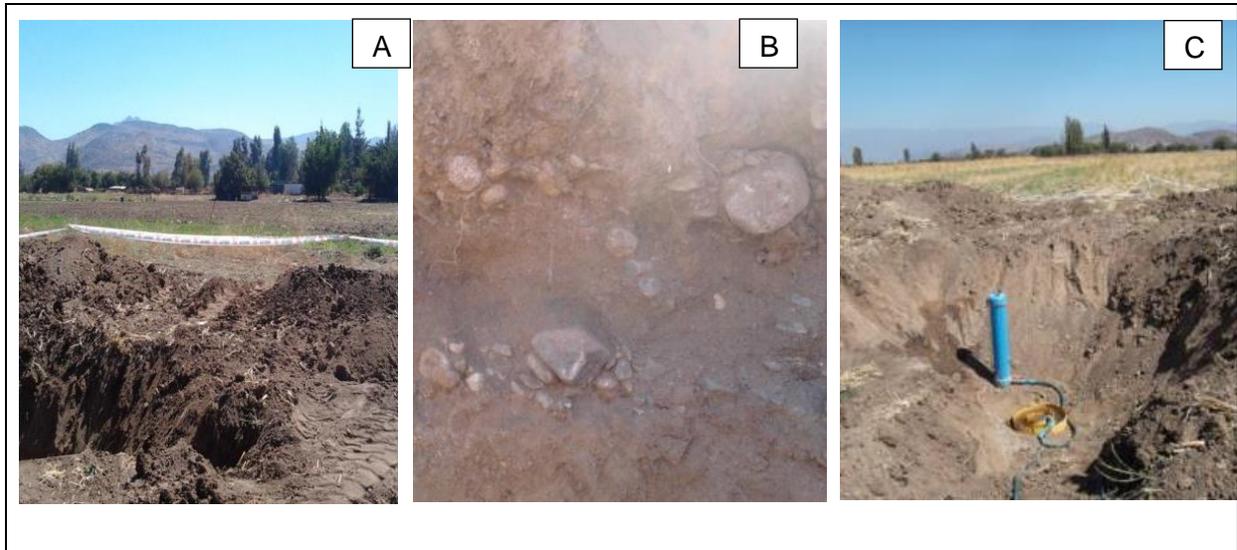
Posteriormente se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-6 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-4. Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo F.

Tabla 4-4: Resultados del ensayo de permeabilidad en el sector de El Colorado

	A nivel del suelo	Profundidad 1 m (Calicata 0-1 m)	Profundidad 2 m (Calicata 0-2 m)
Tasa de infiltración (K_s) (m/d)	0,10	0,21	0,11

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en el sector de El Colorado indican una permeabilidad baja, para todos los niveles medidos. Esto 0,10 m/d para la capa vegetal superficial, 0,21 m/d para la arena gravosa y 0,11 m/d para la arcilla limosa en el fondo de la calicata.

Figura 4-6: Trabajos en terreno- Sector El Colorado



Nota: A. Excavación de calicata 1.
B. Gravas presentes en calicata 1.
C. Prueba de infiltración en calicata 1, 2 m de profundidad.

El análisis estratigráfico realizado para el sector El Colorado en el capítulo 3.5.2.2.1, con los datos del pozo ND-1301-162, ubicado 2 km al oeste de las calicatas (Figura 4-1) indica lo siguiente. Los primeros 42 m desde la superficie están dominados por arcilla con un par de intercalaciones de 2 m de arena y ripio. Bajo los 42 m se observa una capa de 13 m de arena gruesa que probablemente corresponde al acuífero.

Lo anterior indicaría que la capa de arcilla limosa identificada a partir de los 1,1 m en la calicata 1 se podría extender hasta los 42 m de profundidad.

4.1.2.3 Sector Huechún

En el sector de Huechún se excavaron dos calicatas: calicata 1 de 2 m de profundidad y calicata 2 de 1 m de profundidad (Figura 4-7 A y B).

La calicata 1 se ubicó en las coordenadas UTM DWGS-84 E: 335.833 y N: 6.338.421 (Figura 4-1), mientras que la calicata 2 se ubicó 2 m al este de la calicata 1.

La calicata 1 muestra de base a techo (Tabla 4-5): (1) 85 cm de gravas arenosas sobreyacido por 15 cm de suelo vegetal arcilloso.

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 el sector Huechún

Calicata 1 (0-2 m)		Calicata 2 (0-1 m)	
Profundidad (m)	Descripción	Profundidad (m)	Descripción
0 a 0,15	Suelo vegetal: arcilla parda con abundante materia orgánica y algo de limo	0 a 0,15	Suelo vegetal: arcilla parda con abundante materia orgánica y algo de limo
0,15 a 2	Secuencia de gravas arenosas. Los clastos mayores son de hasta 15 cm de baja esfericidad y buen redondeamiento. La arena es gruesa y de moderado a bajo redondeamiento, polimíctica. 10% de arcilla. Se pueden distinguir ciclos granodecrecientes de aproximadamente 30 cm	0,15 a 1-	Secuencia de gravas arenosas. Los clastos mayores son de hasta 15 cm de baja esfericidad y buen redondeamiento. La arena es gruesa y de moderado a bajo redondeamiento, polimíctica. 10% de arcilla. Se pueden distinguir ciclos granodecrecientes de aproximadamente 30 cm

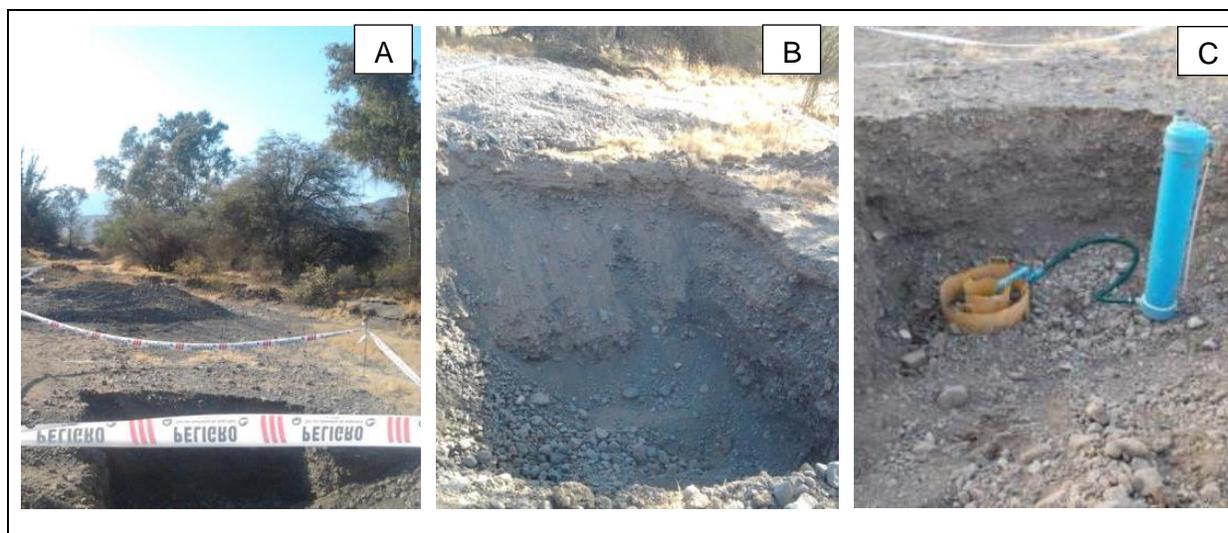
Posteriormente se realizaron los ensayos de infiltración en el fondo de cada calicata y a nivel de superficie (Figura 4-7 C). Los resultados se presentan en la Tabla 4-6. Adicionalmente, el detalle de los datos registrados durante los ensayos se presenta en el Anexo F.

Tabla 4-6: Resultados del ensayo de permeabilidad en el sector de Huechún

	A nivel del suelo	Profundidad 1 m (Calicata 0-1 m)	Profundidad 2 m (Calicata 0-2 m)
Tasa de infiltración (K_s) (m/d)	1,21	4,81	2,07

Los resultados de los ensayos de permeabilidad en el sector de Huechún indican una permeabilidad media a distintas profundidades del sustrato. El nivel superficial de suelo vegetal presenta un valor de 1,21 m/d, mientras que la grava arenosa a 1 m de profundidad presenta una permeabilidad mayor de 4,81 m/d. Por último, la misma capa a 2 m de profundidad disminuye su permeabilidad a 2,07 m/d.

Figura 4-7: Trabajos en terreno- Sector Huechún



Nota: A. Excavación de calicata 1.
B. Excavación de calicata 2.
C. Prueba de infiltración en calicata 2, 1 m de profundidad.

Las calicatas excavadas en el sector de Huechún están localizadas a pocos metros de un curso de agua esporádica que se activa durante el invierno. Por lo tanto, grava arenosa encontrada en gran parte de las calicatas correspondería a depósitos aluviales, depositados por un curso de agua esporádico, durante eventos estacionales, de gran precipitación.

Esta hipótesis es corroborada por la estratigrafía del pozo Corfo N° 92 Hacienda Huechún-Polpaico, ubicado a 700 m al este-sureste de las calicatas (Figura 4-1), siguiendo el curso de la quebrada por donde escurre el curso de agua esporádico descrito anteriormente. Este pozo muestra en sus primeras capas superficiales 60 cm de suelo infrayacido por 5,4 m de ripio y arena gruesa, una estratigrafía muy similar a la encontrada en las calicatas (Figura 3-34). En consecuencia se deduce que la capa de grava arenosa presente en las calicatas podría alcanzar un espesor de al menos 5 m.

Por otra parte, 1200 m al sureste del sector de las calicatas (Figura 4-1) (500 m al sur de la quebrada), la estratigrafía del pozo Corfo N° 643 Hacienda Huechún-Polpaico muestra que la capa superior de 5 m de ripio y arena ha desaparecido, siendo reemplazada por 4 m de suelo vegetal (Figura 3-35).

4.1.3 Medición de calidad de aguas

La medición de la calidad de aguas tiene 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 afectaría negativamente al acuífero.

4.1.3.1 Metodología

4.1.3.1.1 Métodos y tipos de análisis

Se deben tomar dos sets de muestras en distintos momentos: set A de comprobación y set B de control. Los elementos y parámetros a medir se detallan en la Tabla 4-7.

El set A, de comprobación se muestreó y analizó 1 vez, previo a las pruebas de infiltración, con el objetivo de analizar la compatibilidad de la fuente de agua a recargar con 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 la sección 3.1.2.

Por otra parte, el set B, se debe muestrear múltiples veces, durante cada prueba de recarga del piloto, en la Etapa de operación del proyecto. El set B mide los parámetros a verificar.

Tabla 4-7: 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
Mercurio (Hg)	X	
Molibdeno (Mo)	X	
Sodio (Na)	X	X
Níquel (Ni)	X	
Plata (Ag)	X	
Plomo (Pb)	X	

Tabla 4-7: Parámetros mínimos de calidad del agua a medir

Parámetro	Set A (Comprobación)	Set B (Control)
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 4-7, 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 4-8). La tasa de inactivación es medida en declinación \log_{10} por día.

Tabla 4-8: Tasas de inactivación para coliformes para distintos rangos de temperatura

Rango de temperatura (°C)	Tasa promedio de inactivación (log 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 4-8, 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/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 G del presente documento se adjunta el procedimiento de muestreo de aguas de GeoHidrología, que fue utilizado en este proyecto. El laboratorio designado para el análisis de las muestras tomadas es el Laboratorio de Aguas y Riles de DICTUC y ALS Patagonia.

4.1.3.1.2 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 presentaron análisis de los elementos mayoritarios Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y cuando se presentó analizado, el NO_3^- . De esta forma, se trabajó sólo con las muestras de agua que presentaron 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 calculará 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 13 de marzo se realizó el muestreo de agua superficial y subterránea en los 3 sitios preseleccionados. Posteriormente, el día 26 de marzo se realizó un muestreo en una laguna localizada en el sector Casas de Chacabuco (Hacienda Chacabuco). La descripción de los puntos muestreados se presenta en la Tabla 4-9. 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 4-10.

En el sector de Colorado perteneciente al Sr. Basualto se tomaron tres muestras de agua: dos subterráneas y una superficial (Tabla 4-9) (Figura 4-8 y Figura 4-10). Una muestra subterránea corresponde a un pozo ubicado en el predio del Sr. Basualto, mientras que la segunda muestra corresponde a un predio vecino. La muestra superficial fue tomada desde un canal de riego que pasa aledaño a la calle El Colorado.

En el sitio de la Hacienda Chacabuco se tomaron cinco muestras de agua: dos subterráneas, una superficial (Tabla 4-9) (Figura 4-8 y Figura 4-9) y dos muestras superficiales de la laguna existente en el sector, una al lado norte y otra al sur de ésta. Una muestra subterránea corresponde a un pozo que alimenta la laguna, mientras que la segunda muestra corresponde a un pozo ubicado en el mismo sector, usado para otros

finés. La muestra superficial fue tomada desde el canal Chacabuco. Adicionalmente, se tomaron.

Finalmente, en el Fundo Huechún se tomaron tres muestras de agua: dos subterráneas y una superficial (Tabla 4-9) (Figura 4-8 y Figura 4-11). Las muestras subterráneas corresponden a un pozo ubicado en el predio, mientras que la muestra superficial proviene desde un canal Chacabuco.

Tabla 4-9: Ubicación de muestras de agua

Sector	ID muestreo	Tipo	UTM Norte	UTM Este	Observación
El Colorado	CH-P1	Subterráneo	6.338.920	339.252	Pozo en el predio de Mario Basualto
	CH-P2	Subterráneo	6.338.814	338.620	Pozo que alimenta el canal de riego "El Sauce"
	CH-C1	Superficial	6.339.219	339.007	Canal de riego (calle el Colorado)
Casas de Chacabuco	CH-P3	Subterráneo	6.345.254	343.050	Pozo alimentador laguna
	CH-P4	Subterráneo	6.344.891	342.773	Pozo particular
	CH-C2	Superficial	6.345.648	343.412	Canal de riego (en Hda. Chacabuco)
Huechún	CH-P5	Subterráneo	6.337.788	335.881	Pozo en el Fundo Huechún
	CH-P6	Subterráneo	6.338.802	335.052	Pozo en Fundo Huechún cerca del portón de ingreso
	CH-C3	Superficial	6.338.946	335.139	Canal de riego
Casas de Chacabuco	CH-LAGUNA SUR	Superficial	6.344.812	343.105	
	CH-LAGUNA NORTE	Superficial	6.345.333	343.123	Agua estancada, sucia.

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

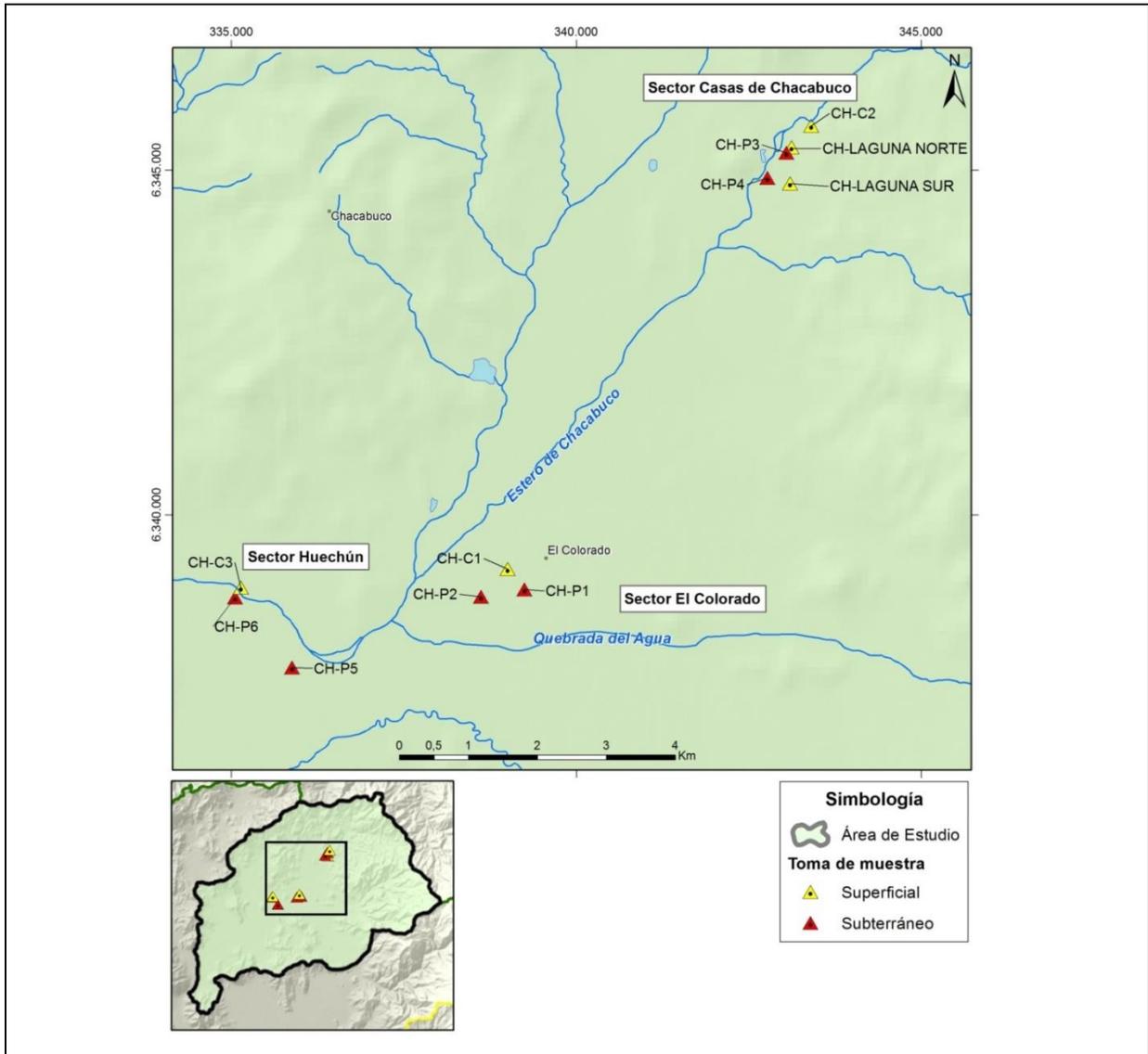
Tabla 4-10: Parámetros *in situ* en los puntos muestreados

ID muestra	CH-P1	CH-P2	CH-C1	CH-P3	CH-P4	CH-C2
Fecha	13/03/2014	13/03/2014	13/03/2014	13/03/2014	13/03/2014	13/03/2014
Hora:	15:00	16:00	15:30	17:10	17:30	16:50
T°C	22,5	22,8	24,6	21,5	20,1	19,1
pH	7,49	7,89	8,08	7,43	7,67	8,54
C.E. (µs/cm)	452	578	621	490	817	487
SDT (ppm)						
OD (ppm)	7,35	7,27	6,23	7,1	6,95	7,63

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

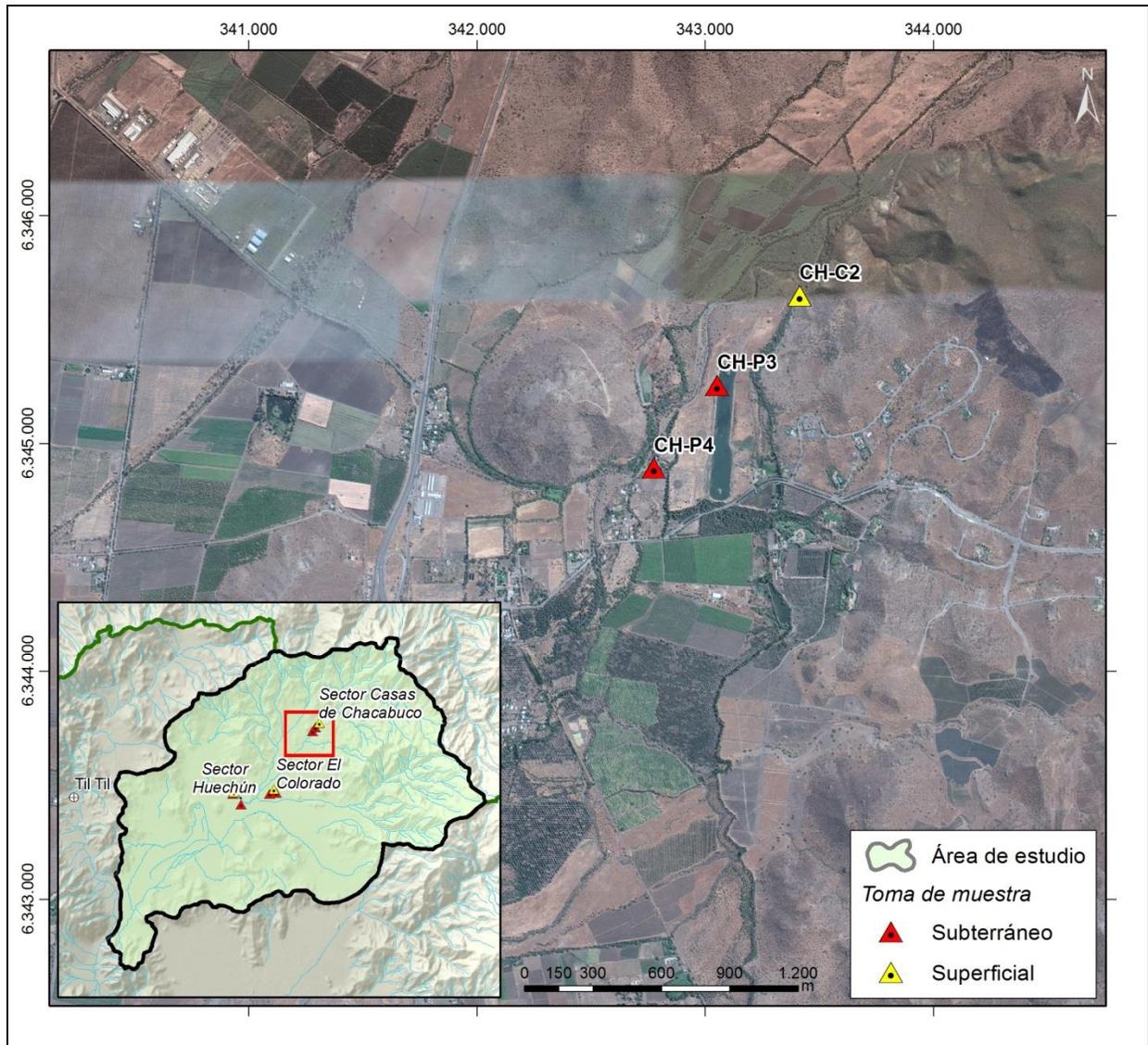
Las muestras fueron entregadas al laboratorio (DICTUC) el día 14 de marzo para su análisis.

Figura 4-8: Ubicación de las muestras de agua



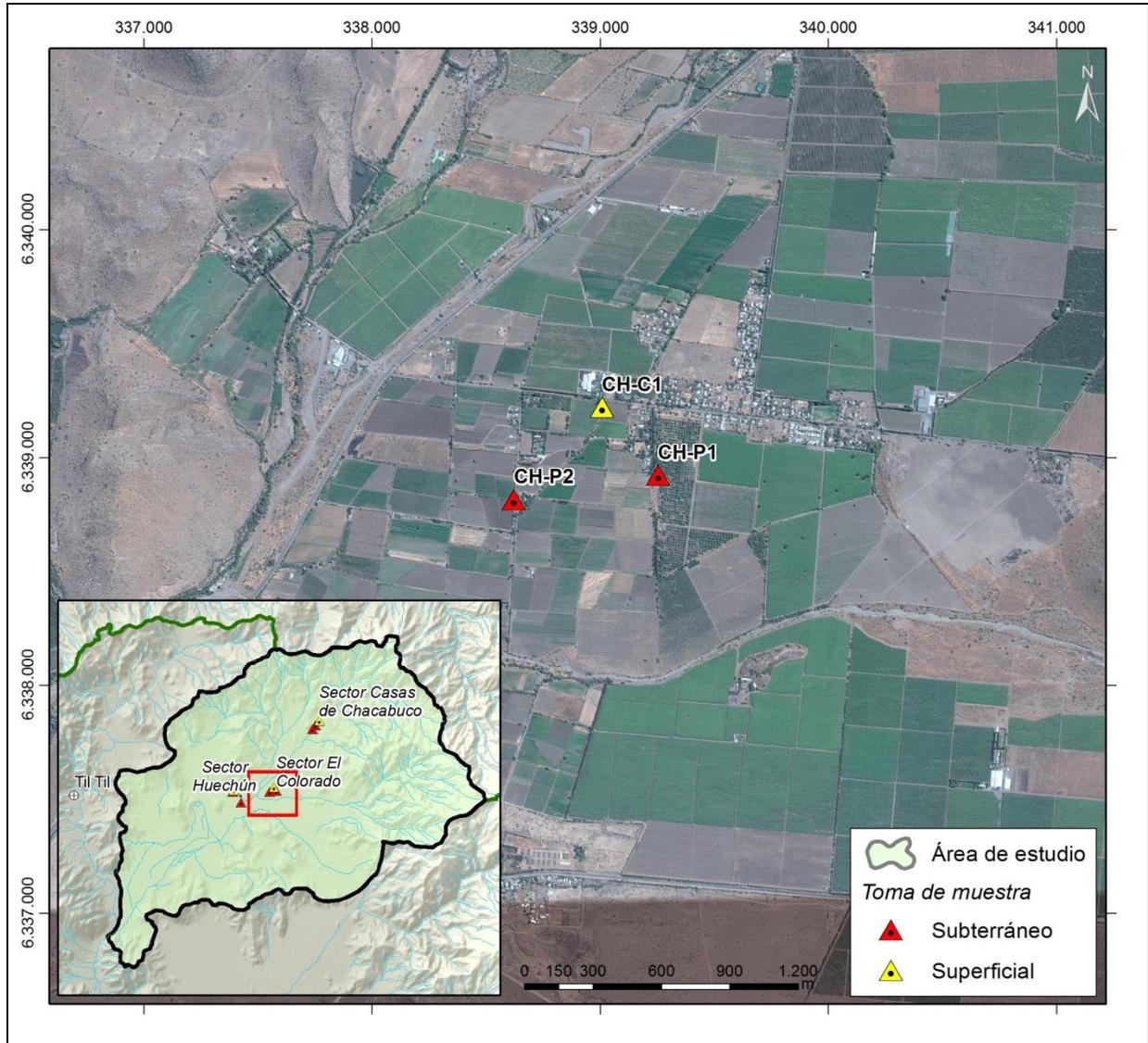
Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía DGA (Datum WGS84 H19S)

Figura 4-9: Ubicación de las muestras de agua en el sector casas de Chacabuco



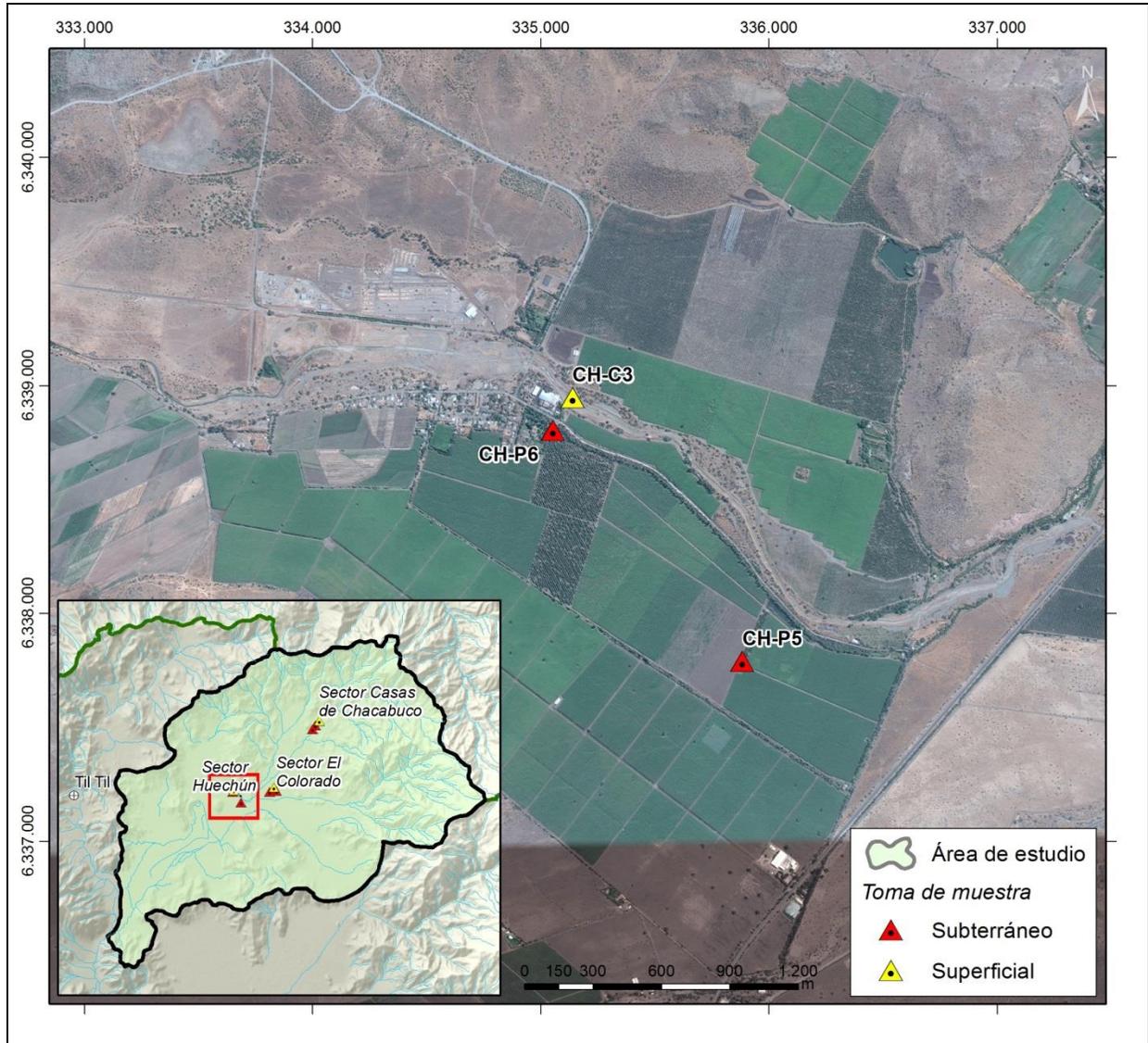
Fuente: Elaboración propia a partir de "2014 Google, Image © 2014 Digital Globe, ©2014Cnes/Spot Image".
(WGS84 H19S)

Figura 4-10: Ubicación de las muestras de agua en el sector El Colorado



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

Figura 4-11: Ubicación de las muestras en el sector Huechún



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 Anexo G1.

Las muestras analizadas en la cuenca de Chacabuco 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* se encuentra entre 452 y 817 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Tabla 4-10).

En la cuenca de Chacabuco se analizaron 11 muestras, 3 en el sector de El Colorado, 5 en el sector de Casas de Chacabuco y 3 en el sector de Huechún. Del total de 11 muestras, 9 fueron validadas mediante el balance iónico (error menor o igual a 8%). Las muestras no validadas corresponden a CH-P4 y CH-P6, que presentan errores de 10% y 9% respectivamente. Estos valores son aún razonables, ya que se encuentran muy cercanos a 8%, por lo que las muestras fueron incluidas en los análisis.

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) N° 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 4-11. 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 DBO_5 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 con valor mayor o igual que 1.6×10^4 NMP/100ml, se grafica igual a este valor. La descripción de los resultados se presenta a continuación para cada sector.

Tabla 4-11: Resultados análisis elem. mayores y parámetros de calidad y comparación con normas.

ID. muestra	CH-P1	CH-C1	CH-P2	CH-C2	CH-P3	CH-P4	CHA-Laguna Norte	CHA-Laguna Sur	CH-C3	CH-P5	CH-P6	Límite permitido según norma	Norma
Sector	El Colorado			Casas de Chacabuco				Huechún					
DBO5 (mg O2/L)	<2	3,3	<2	<2	<2	<2	20,9	17,22	<2	<2	<2	35	DS 90
Nitratos (mg/L)	23,3	33,2	44,6	1,68	15,4	9,35	<0,50	0,9	4,67	38,8	32,7	50	NCh. 409
Sulfatos (mg/L)	49,2	99,8	53,3	106,7	68,4	221,5	74	136,8	130,7	81,4	10,2	250	NCh. 1.333
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	< 10	190	< 10	< 10	< 10	< 10	96	98	< 10	< 10	< 10	80	DS 90
Coliformes fecales (NMP/100ml)	< 2	≥1.6 x10e 4	< 2	130	< 2	< 2	2	40	23	30	< 2	1000	NCh. 1.333

Fuente: Elaboración propia

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

Sector El Colorado

En el sector del El Colorado, el valor de DBO_5 en las muestras de agua subterránea es del mismo orden de magnitud que en el agua superficial (Figura 4-12). Los valores de DBO_5 no superan los 35 mg O_2/L , correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11).

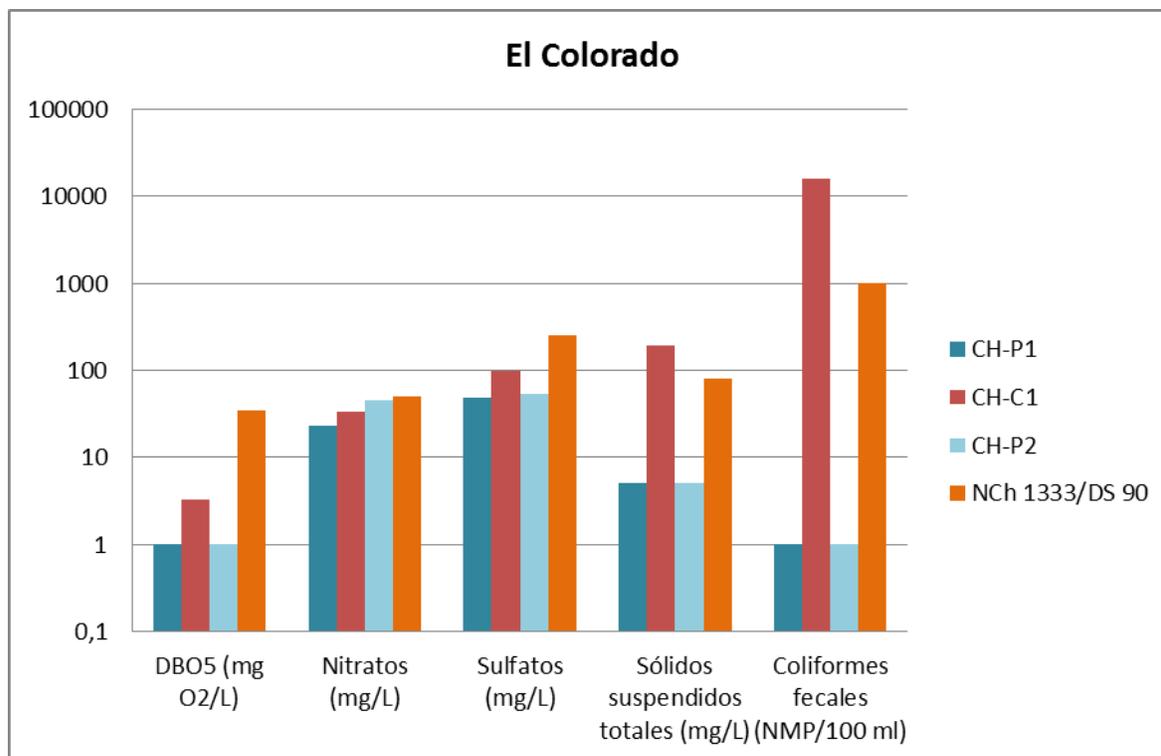
Los nitratos del agua superficial presentan valores similares al agua subterránea. Este valor no supera los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-11).

El parámetro sulfatos muestra valores en el mismo orden de magnitud para agua superficial y subterránea. Estos valores no sobrepasan los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh. 1333 (Tabla 4-11).

Los sólidos suspendidos totales en agua superficial son 2 órdenes de magnitud mayor que en el agua subterránea. Además, este valor en agua superficial (CH-C1) muestra un valor de 190 mg/L, superando los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS N° 90 (Tabla 4-11).

Por último, los coliformes fecales en el agua superficial son 4 órdenes de magnitud mayor que en el agua subterránea (Figura 4-12). El valor de coliformes fecales obtenido para la muestra superficial CH-C1 es $\geq 1.6 \times 10^4$ NMP/100 ml. A modo de referencia se debe indicar que este valor se encuentra por sobre el límite permitido en la norma de agua para riego (NCh. 1333), que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-11).

Figura 4-12: Elementos mayores y parámetros de calidad en el sector de El Colorado



Fuente: elaboración propia

Sector Casas de Chacabuco

En el sector de Casas de Chacabuco, la muestra de agua superficial del canal posee los mismos valores de DBO₅ que las muestras de agua subterránea (Figura 4-13). Por otra parte, las muestras de agua superficial de la laguna presentan rangos de DBO₅ 1 orden de magnitud mayor que el agua subterránea. Los valores de DBO₅ de todas las muestras no superan los 35 mg O₂/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11).

El nitrato muestra valores levemente mayores para el agua subterránea, comparada con el agua superficial de laguna y canal. Este valor para todas las muestras no supera los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh. 1333 (Tabla 4-11).

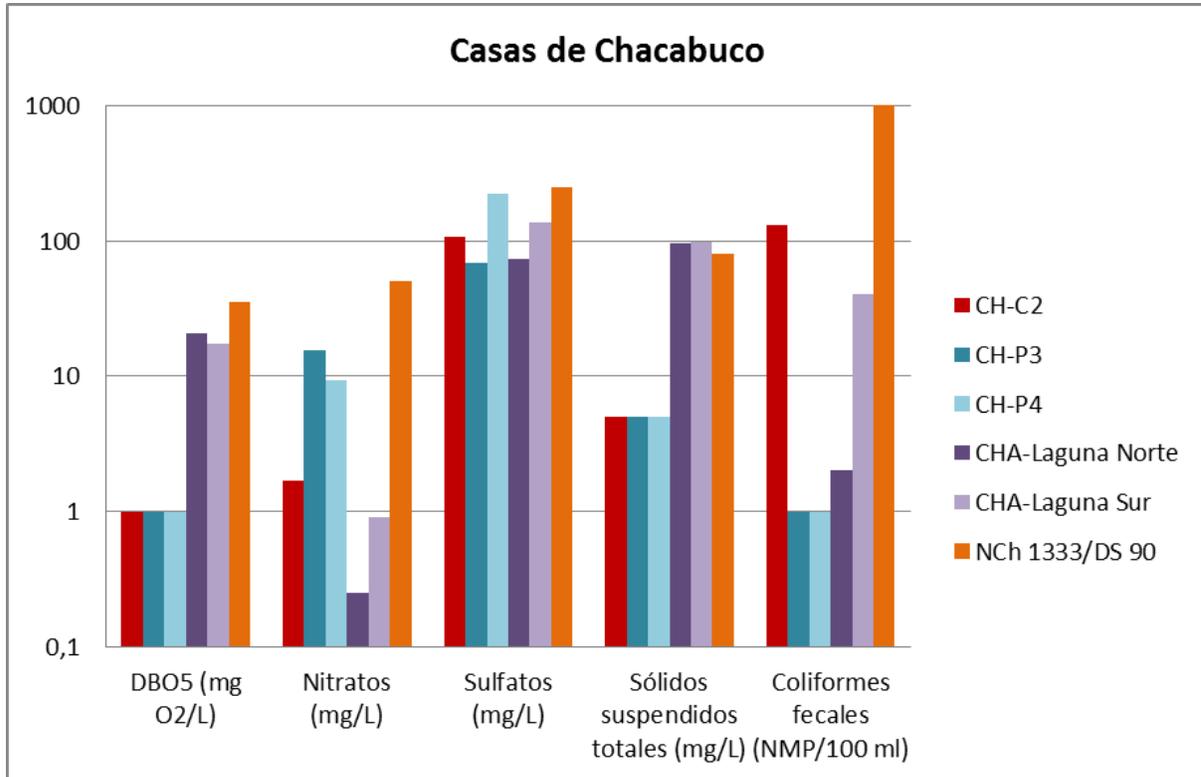
Los resultados de N, P, K muestran que las aguas de la laguna no se encuentran eutrofizadas, ya que los valores medidos se encuentran dentro de lo esperado para un agua superficial (Anexo G2). En efecto, los valores de nitrato son muy menores, 50 veces menos de lo permitido en agua potable, para el fósforo la concentración es igual en las aguas superficiales y subterráneas, mientras que el potasio la concentración en la laguna es inferior a la que presenta el canal. Los análisis si muestran una biomasa existente (alga) que se refleja en la demanda biológica y bioquímica de oxígeno.

El sulfato en el agua superficial (CH-C2) se muestra levemente mayor que en una muestra de aguas subterráneas (CH-P3), pero dentro del mismo orden de magnitud. Estos valores no sobrepasan los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333. (Tabla 4-11).

Tanto los sólidos suspendidos totales se observan en rangos muy similares para aguas superficiales y subterráneas y no superan los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11). La excepción se observa en los valores de sólidos suspendidos en las muestras CHA-Laguna Norte y CHA-Laguna Sur, los que son 1 orden de magnitud mayor que en las demás muestras, probablemente asociados a la presencia del alga. Los valores de sólidos suspendidos totales en la laguna son de 96 mg/L y 98 mg/L, para las muestras CHA-Laguna Norte y CHA-Laguna Sur respectivamente. Estos valores superan levemente los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11).

Por último, el valor de coliformes fecales es muy similar para las muestras de agua subterránea (CH-P3 y CH-P4) y el lado norte de la laguna (CHA-Laguna Norte), mientras que este parámetro es 1 orden de magnitud mayor en el lado sur de la laguna (CHA-Laguna Sur) y 2 órdenes de magnitud mayor en el canal (CHA-C2) (Figura 4-13). Estos valores, que varían entre <2 y 130 NMP/100 ml se encuentran por debajo del límite permitido en la norma de agua para riego (NCh 1333), que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-11).

Figura 4-13: Elem. mayores y parámetros .calidad en sector Casas de Chacabuco



Sector Huechún

En el sector de Huechún, el valor de DBO_5 es muy similar para el agua superficial y el agua subterránea (Figura 4-14). Los valores de DBO_5 no superan los 35 mg O_2/L , correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11).

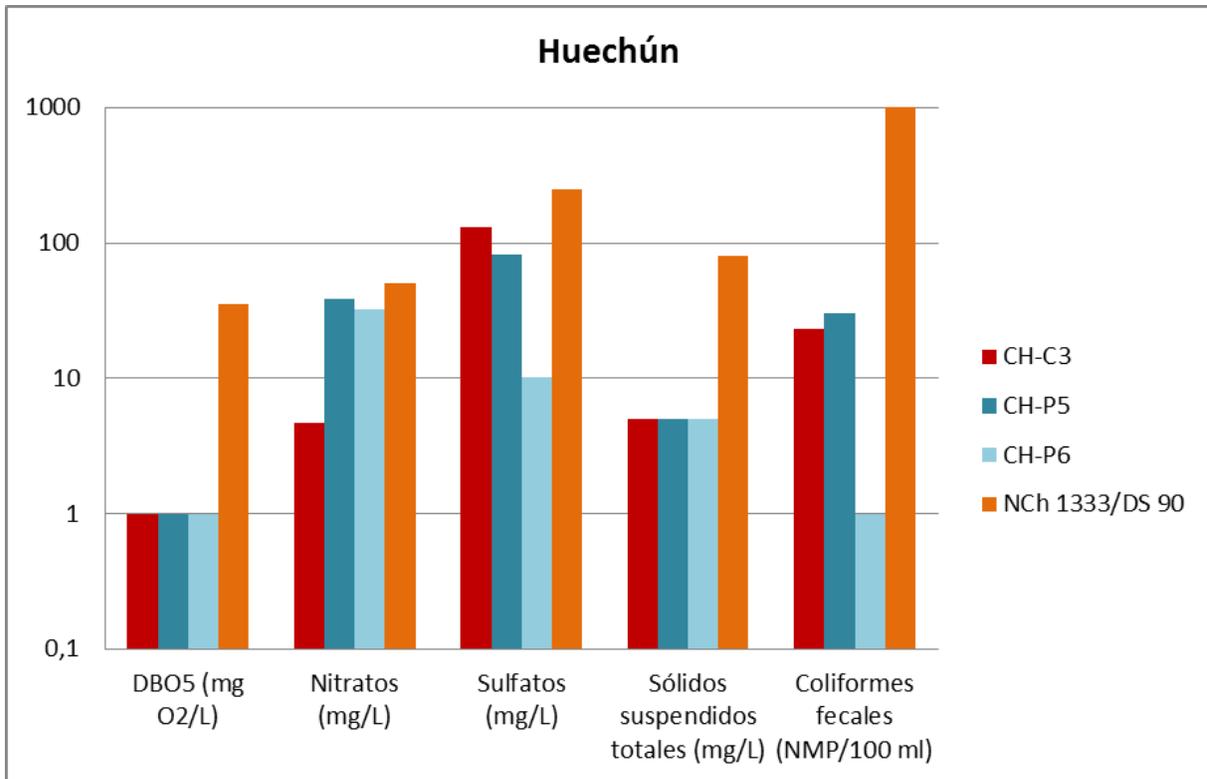
El parámetro nitratos se observa 1 orden de magnitud mayor para agua subterránea comparado con agua superficial. Estos valores se encuentran por debajo de los 50 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-11).

El parámetro sulfatos muestra un valor mayor para la muestra superficial CH-C3 de 130,7 mg/L, comparadas con las muestras subterráneas CH-P5 y CHP6 que muestran 81,4 y 10,2 mg/L respectivamente (Figura 4-14 y Tabla 4-11). Estos valores de sulfatos no sobrepasan los 250 mg/L, correspondiente al límite establecido por la NCh 1333 (Tabla 4-11).

Los sólidos suspendidos totales muestran valores similares entre agua superficial y agua subterránea. Estos valores no superan los 80 mg/L, correspondiente al límite establecido por el DS 90 (Tabla 4-11).

Por último, los coliformes fecales en las muestras CH-C3 (superficial) y CH-P5 (subterránea) muestran valores 1 orden de magnitud mayor que la muestra CH-P6 (subterránea) (Figura 4-14). Estos valores son menores que lo permitido en la norma de agua para riego (NCh. 1333) que permite hasta 1000 NMP/100 ml (Tabla 4-11).

Figura 4-14: Elementos mayores y parámetros de calidad en el sector de Huechún



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 G2).

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 4-12.

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 $VC-VP < 1 \text{ OM.}$, 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 4-12: Resumen de análisis de parámetros más relevantes para recarga artificial

	Nombre muestra	¿Valores bajo la norma?					¿VC-VP<1 OM.?				
		CH-C1	CH-C2	CHA-Laguna Norte	CHA-Laguna Sur	CH-C3	CH-C1	CH-C2	CHA-Laguna Norte	CHA-Laguna Sur	CH-C3
		Sector	EI Colorado	Casas de Chacabuco		Huechún	EI Colorado	Casas de Chacabuco		Huechún	
Elementos mayores y parámetros de calidad	DBO5 (mg O2/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI
	Nitratos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO
	Sulfatos (mg/L)	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI
	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI
Elementos menores	Elementos menores	SI	SI	SI	SI	SI	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia

Nota: VC: Valor parámetro en canal, VP: Valor de parámetro en pozo, OM.: orden de magnitud

Según se observa en la Tabla 4-12, las únicas muestras de agua superficial que cumplen con el primer criterio (valores bajo la norma) en todos los parámetros evaluados, son las muestras CH-C2 y CH-C3, en el sector Casas de Chacabuco y Huechún respectivamente.

Por otra parte, al evaluar el segundo criterio, la única muestra que cumple con todos los parámetros a excepción de coliformes fecales es CH-C2, en Casas de Chacabuco. Este valor es de 130 NMP/100 ml.

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 anteriormente, los coliformes fecales presentan un decaimiento exponencial, dependiente del rango de temperaturas.

Según los datos in situ, la temperatura del agua subterránea en el sector Casas de Chacabuco es de aproximadamente 20°C (CH-P3 y CH-P4 en Tabla 4-10). Para esta temperatura, el trabajo de John y Rose (2005) indica una tasa promedio de inactivación de 0,4 log/día. Tomando en cuenta esta tasa, una población inicial (N_0) de 130 NMP/100 ml en el canal de Casas de Chacabuco (CH-C2) decaería (N_t) a 52 NMP/100 ml en 1 día y a 1 NMP/100 ml en 5 días (Tabla 4-13). En un tiempo (t) de 5 días esta agua no alcanzaría a llegar a los pozos de bombeo.

Tabla 4-13: Cálculo decaimiento de coliformes fecales sector Casas de Chacabuco

No (NMP/100 ml)	Nt (NMP/100 ml)	k (log/día)	t (días)
130	52	0,4	1
130	1	0,4	5

Fuente: Elaboración propia

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

Dado el decaimiento rápido de los coliformes, los que pasarían de una población de 130 NMP/100 ml a 1 NMP/100 ml en 5 días (Tabla 4-13), al inyectar el agua del canal al agua subterránea, se concluye que el agua del canal en el sector de Casas de Chacabuco sería apta para infiltración.

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 3.5 y 4 del presente informe, junto con la discusión llevada a cabo con la CNR en las reuniones del 17 y 24 de marzo (Minutas Reuniones 4 y 5 respectivamente, Anexo H) . Como resultado se definió que la PPRAA se realizará en el sector llamado Casas de Chacabuco.

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 y el agua del acuífero. Para este sitio se consideró dos fuentes probables de agua para

infiltración, siendo éstas: 1) agua del Canal los Baños y 2) agua de la laguna de la Hacienda Chacabuco. En el sector de la laguna los valores de DBO, DQO (cantidad de materia orgánica) y sólidos suspendidos son mucho mayores que el agua subterránea (1 a 2 órdenes de magnitud) (Figura 4-13). Sin embargo, el resto de los parámetros son muy similares al agua subterránea. Por otra parte, el agua del canal presenta valores de DBO, DQO y sólidos suspendidos muy similares al agua subterránea, por lo que se escogió esta fuente para ser utilizada en las pruebas de infiltración.

A continuación se presenta un resumen de los criterios utilizados para la definición del sitio desarrollados en el capítulo 3.5 y 4 del presente proyecto, 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 los trabajos de terreno y c) temas estratégicos.

Según el análisis fase I, la mayor parte de la zona de estudio presenta una alta aptitud para la recarga artificial. Tomando en cuenta esta información, junto con las visitas a terreno, se proponen 3 sectores potenciales para realizar el proyecto. Estos son: sector Casas de Chacabuco, sector El Colorado y sector Huechún. Por otra parte, el análisis fase II indica que dentro de estos 3 sectores propuestos, tanto el sector Huechún como el sector Casas de Chacabuco serían idóneos para propósitos del proyecto. Estos sectores presentan cercanía a la fuente de agua, disponibilidad de terreno, disponibilidad de derechos, lejanía a la fuente de contaminación, promediando un total de 4 de 4 puntos posibles en la evaluación.

En términos regionales (cuena) el análisis de los datos de terreno, complementado con estratigrafía de pozos cercanos indica que el espesor no saturado en la zona de estudio estaría dominado superficialmente por la presencia de arcilla. Este relleno poseería malas propiedades hidrogeológicas para realizar infiltración a través de balsas, por lo que, independiente del sector escogido, el terreno es apto para infiltración mediante pozo.

En base a lo anteriormente expuesto y a un análisis estratégico sostenido en conversaciones con la CNR (ver anexo H), se escogió el sector Casas de Chacabuco (Hacienda de Chacabuco). Dado que el dueño de este predio tiene una buena disposición para la construcción de las obras, existen dos fuentes probables de agua (laguna y canal Los Baños) y el director de la asociación de canal de Chacabuco apoya el proyecto, y además, se encuentra directamente involucrado en la facilitación de derechos de agua para realizar la prueba. En la Tabla 4-14 se presenta un resumen de las principales características de los 3 sitios evaluados.

Tabla 4-14: Análisis crítico de sitios escogidos en la cuenca de Chacabuco-Polpaico

Sitios identificados y contactados	Sebastián Lira (Casas de Chacabuco)	Juan Alessandrini (Huechún)	Mario Basualto (El Colorado)
Aptitud del sitio de acuerdo a metodología	Alta	Alta	Alta
Observaciones	Este sitio se ubica en una zona donde existe terrenos sin uso, con una fuente de agua en altura correspondiente a un ramal del canal Chacabuco, en una de las zonas más altas de la cuenca de Chacabuco	Este sitio se ubica en la zona intermedia del área de estudio, existe espacio para desarrollar las pruebas pero poca seguridad hídrica	Propietario posee 14 acciones del canal Chacabuco, sin embargo está en duda la disponibilidad del agua
Pros	<ul style="list-style-type: none"> - Sitio ubicado en la parte alta de la cuenca - Amplio terreno sin uso - Dueños de los derechos de agua se ubican aguas abajo del sitio, luego podrán aprovechar el agua almacenada en sus predios 	<ul style="list-style-type: none"> - Sitio amplio y resguardado - Sitio ubicado a un costado del canal Chacabuco - Dueño del predio y del agua es presidente de la Asociación de Canalistas de Chacabuco - Nivel de la napa actual profundo 	<ul style="list-style-type: none"> - Nivel de la napa actual profundo
Contras	<ul style="list-style-type: none"> - Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Es necesario negociar la entrega de derechos con más de 1 persona 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua - Dueño no está muy convencido de la utilidad del proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> - Predio pequeño - Dudas respecto de seguridad para las obras
Visión de largo plazo	Cuenca de Chacabuco posee buenas condiciones para el desarrollo de proyectos de recarga artificial de acuíferos. Posee permeabilidad adecuada, un acuífero altamente deprimido, una zona no saturada potente, un angostamiento del valle en la zona media que serviría para bombear el agua almacenada. Sin embargo existe alta incertidumbre respecto de la disponibilidad de agua. Este proyecto sería mucho más atractivo si se trajera más agua desde otra cuenca para almacenarla en este valle.		

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 Chacabuco- Polpaico. 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 I.

5.1.1 Conclusión y plazos análisis legal

Conforme a lo analizado, se concluye 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 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 y por lo tanto, no existe procedimiento claro de los pasos a seguir. En efecto, 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 tiene 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. A la fecha esta metodología aún no es pública.

Basados en lo anterior, y en que el proyecto presenta una escala menor, que sólo se contempla la inyección de agua y no su bombeo posterior, se decidió tratar el proyecto como una prueba de infiltración y no como un proyecto de recarga artificial de acuífero, por tanto, no requiere de la autorización por parte de la DGA.

Por otro lado, 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 cuenca de Chacabuco se redactaron dos convenios, debido a que el dueño del predio donde se construyeron las obras pertenece a una sociedad diferente al dueño de los derechos de agua utilizados para la operación del sistema. En efecto, los convenios fueron firmados entre 1) CNR y Rodrigo Andai en representación de la Sociedad inmobiliaria y Comercial AC S.A, dueño del predio, y 2) CNR y Samuel Lira Salinas, representante legal de la Sociedad Agrícola el Olivar de Chacabuco Ltda, dueña de los derechos de agua.

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 las siguientes Resoluciones:

1. ORD CNR N° 2915 emitido el 2 de julio de 2014: Convenio que acredita aporte de recursos hídricos para la ejecución del proyecto
2. ORD CNR N° 2916 emitido el 2 de julio de 2014: Convenio que acredita aporte de propiedad superficial para la ejecución del proyecto

Las Resoluciones aprobatoria y ambos convenios de colaboración se presentan íntegramente en el Anexo J.

6 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL

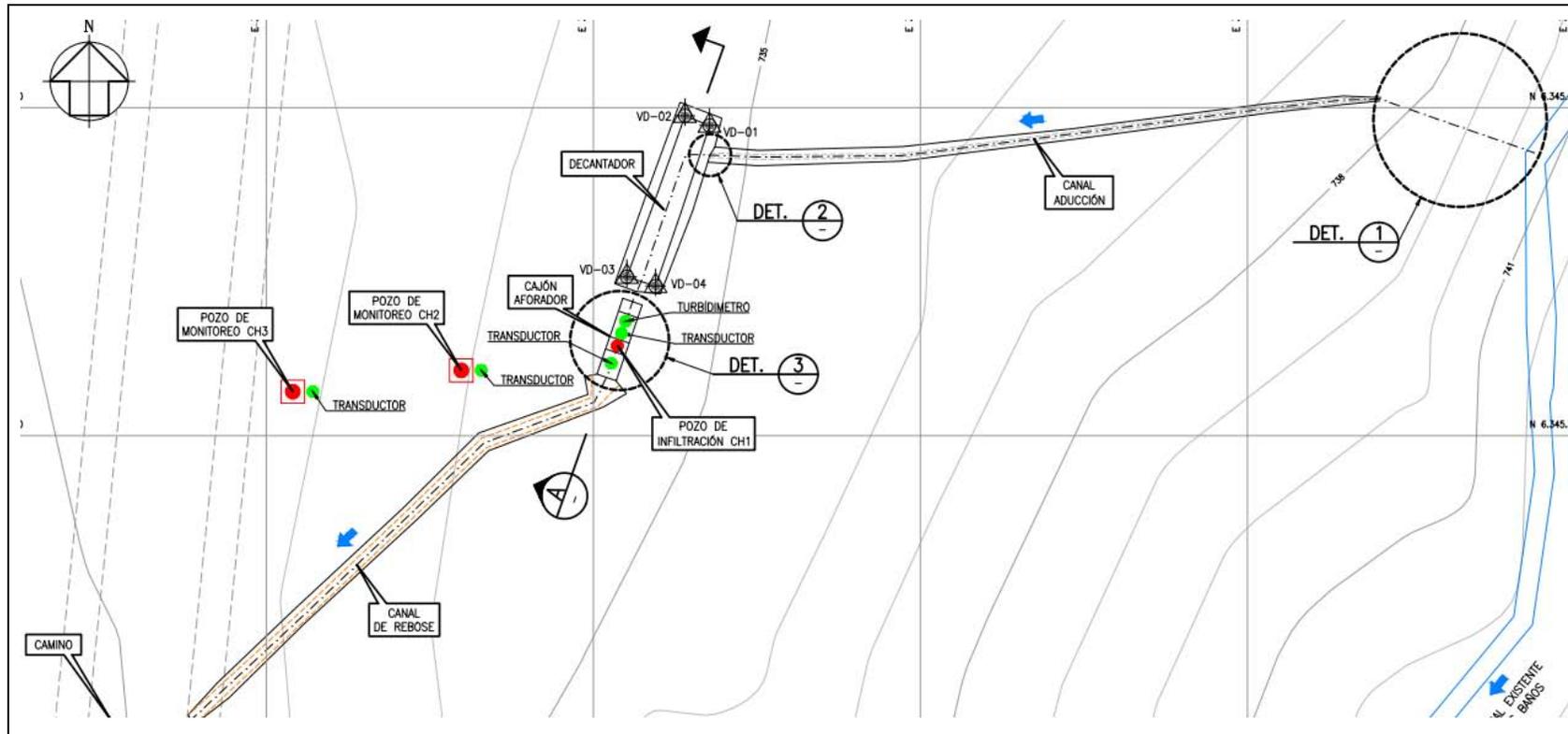
El diseño de las obras se realizó en dos etapas: a) una primera etapa que se ha denominado pre-diseño del PPRAA, que se desarrolló en función de datos estratigráficos locales obtenidos de la revisión y análisis de antecedentes y de los datos de terreno descritos en el acápite 4.1 (ver Anexo K, con el 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 no es apto para la realización de infiltración a través de balsas. Se decidió diseñar el sistema con pozos de infiltración

2. Pre-diseño 1. El pre-diseño del proyecto, de acuerdo a las bases de licitación, consideró la construcción de un pozo de infiltración y dos pozos de observación cada uno de aproximadamente 36 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 cuales incluyeron: 1) verificar los planos que detallan el loteo del sector, para la venta futura de sitios 2) verificar que las obras estuviesen en el límite de dos lotes, considerando específicamente que los pozos fuesen perforados cercanos al límite de dos sitios y 3) las obras no fuesen construidas sobre el futuro camino de acceso al sector.
3. Perforación de pozo de infiltración. Durante la perforación del pozo de infiltración se fue analizando las muestras estratigráficas por geólogos de GeoH. 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 CH-01, CH-02 y CH-03 de 40, 38 y 38 m respectivamente. Los tres pozos cumplen con el criterio de perforación por debajo del nivel piezométrico.
4. Diseño final del sistema. Se realizaron pequeñas modificaciones al sistema de recarga pre-diseñado, en particular se modificó:
 - Cambio en la toma del proyecto, generándose una tubería de pvc entrada que conecta el canal los baños a un canal de aducción que transporta, superficialmente, el flujo de agua hasta el decantador
 - Profundidad de los pozos CH-01, CH-02 y CH03 desde 36 metros cada uno a 40, 38 y 38 m respectivamente.
 - Cambio de dirección del decantador, quedando finalmente alineado con la curva de nivel, con el objetivo de que al construir se genere menor movimiento de tierra

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 mediante una tubería de PVC que fue introducida en la pared del canal y llegó hasta el canal de aducción del sistema y luego hasta el decantador, donde el caudal fue regulado a través de una válvula volumétrica. El decantador se instaló como medida de seguridad ya que no se espera que el canal transporte gran cantidad de material particulado. El decantador fue revestido para evitar filtraciones. Posterior al decantador, se construyó el “Dispositivo de medición” compuesto por: 1) cajón aforador y 2) cámara de infiltración, ambos forman parte del sistema de medición de caudales e infiltración compuesto por vertederos triangulares. Los medidores miden antes y después del pozo de infiltración y permiten determinar el flujo infiltrado por diferencia de mediciones. Finalmente se dispone de canal revestido para el remanente que fue conducido hasta el camino existente, de acuerdo a lo indicado por el dueño de la propiedad. Se debe tomar en cuenta que la regulación de caudal consideró no generar remanentes de manera de no perder agua. Por lo tanto no se espera la utilización continuada de este último canal.

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



Fuente: Elaboración propia.

(WGS84 H19S)

6.1 DETALLE DE LAS OBRAS DISEÑADAS

Como se mencionó anteriormente lo primero que se construyó en el proyecto, fueron los pozos de infiltración y 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 la obras, se presenta en el Anexo S.

6.2 PERFORACIÓN DE POZOS

Como parte del proyecto se construyó un pozo de infiltración CH-01 y dos pozos de monitoreo CH-02 y CH-03, cuyas características se presentan en la Tabla 6-1. Adicionalmente se presentan las observaciones realizadas durante la filmación del pozo CH-02.

La construcción de las obras fue ejecutada por la empresa Quinta Ingeniería y Construcción entre los días 27 de mayo y 4 de Julio de 2014, bajo la supervisión técnica de GeoHidrología Consultores.

Los trabajos de perforación se efectuaron en Hacienda Chacabuco ubicada en la localidad homónima (Figura 1-1). 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)
CH-01	Infiltración	343.223	6.345.381	27/5/2014- 04/7/2014	40	30,28
CH-02	Observación	343.212	6.345.380	21/5/2014 – 26/5/2014	38	31,68
CH-03	Observación	343.202	6.345.380	27/5/2014 – 31/5/2014	38	31,56

En general, al observar las muestras obtenidas por los distintos métodos de perforación de los tres sondajes, se puede resumir la estratigrafía del sector como una secuencia aluvial gravosa con clastos polimícticos de tamaño bloque dominante, con una matriz principalmente arcillosa a arenosa. Los clastos se observaron sub-angulosos y redondeados.

6.2.1 Pozo de infiltración CH-01

La perforación se realizó con la máquina *Bucyrus Erie H5*, mediante sistema de percusión en 16" de diámetro hasta los 29 m de profundidad, luego se perforó con trepano de

12" hasta los 40 m. El pozo fue habilitado con tuberías ciegas y ranuradas en PVC de 6" de diámetro. El detalle de la habilitación se indica en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2: Resumen de habilitación del pozo CH-01 (Stick Up = 0,5 m).

Tipo	Desde (m)	Hasta (m)	Diámetro	Long. Tramo (m)	N° Tuberías
Ciego	0	10,19	6"	10,19	2
Ranurado c/ pta. lápiz	10,19	40	6"	29,81	5

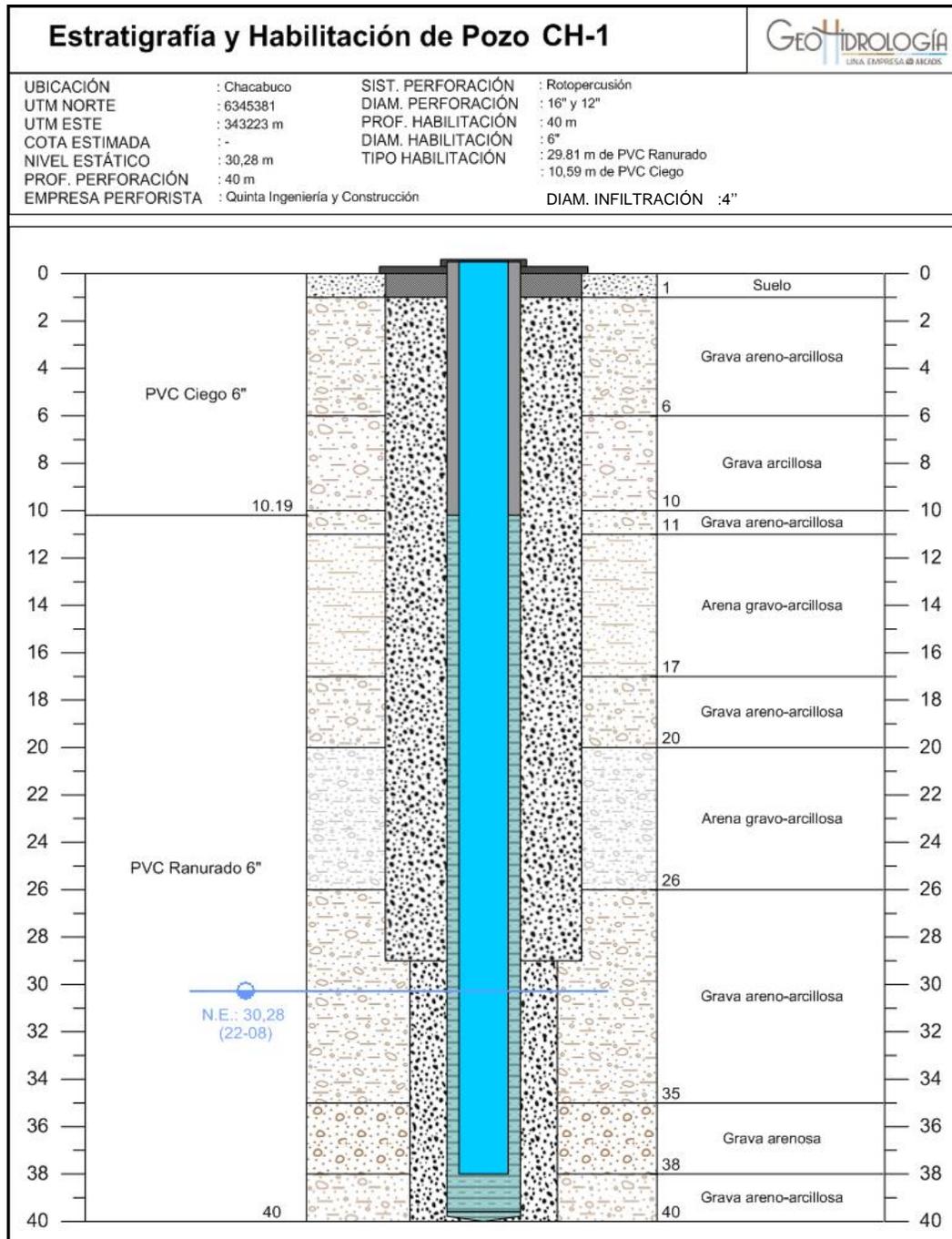
Fuente: Elaboración propia

El día 2 de Julio se realizó el desarrollo de pozo mediante *swabbing* e inyección de aire, luego entre el 3 y 4 de julio se realizó el engravillado y sello sanitario. Finalmente, el día 18 de Julio se instaló 38 m de PVC ciego de 4" de diámetro con el objetivo de evitar la entrada de burbujas de aire al acuífero, las que ocluyen los poros generando zonas impermeables. En la Figura 6-2 se observa un esquema de la estratigrafía y habilitación del pozo CH-01.

La estratigrafía del pozo perforado corresponde a una secuencia aluvial no consolidada de 40 m de espesor, de color café, la cual presenta distintos niveles de acuerdo a su granulometría, cabe mencionar que entre los 0 y 35 m la secuencia presenta una cantidad de arcilla entre 20 y 40%.

El primer metro corresponde a suelo compuesto por grava arenosa, luego entre los 1 – 11 m se encuentra una grava areno – arcillosa de color café oscuro, polimíctica volcánica y con fragmentos tamaño grava hasta 5 cm, entre los 6 y 10 m la grava presenta mayor cantidad de arcilla y menor de arena. Entre los 11 – 17 m se encuentra un nivel de arena gravo - arcillosa café oscuro, con un 40 % de arcilla y polimíctica volcánica. Luego entre los 17 y 20 m se encuentra un nivel de grava areno – arcillosa polimíctico volcánico, de fragmentos sub-angulosos y sub-esféricos. Entre los 20 y 26 m se encuentra un nivel de arena gravo – arcillosa de fragmentos sub-redondeados, de hasta 4cm de diámetro. Finalmente, se encuentra un nivel de grava arenosa entre los 26 y 40 m, donde se presenta entre los 35 y 38 m menor contenido de arcilla de toda la secuencia, que corresponde al 10%.

Figura 6-2: Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo CH-01



Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Pozo de observación CH-02

La perforación se llevó a cabo con la máquina *Boart Long Year* DB 540, mediante sistema de aire reverso y diamantina con *casing advance*. Primero se realizó perforación guía en 5" de diámetro, llegando hasta los 38 m de profundidad, para luego ser ensanchado a 6" hasta la misma profundidad. El pozo fue habilitado con tuberías de PVC ciegas y ranuradas de 4" de diámetro hasta los 37,78m. La habilitación se indica en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3: Resumen de habilitación del pozo CH-02(Stick Up = 0,5 m).

Tipo	Desde (m)	Hasta (m)	Diámetro	Long. Tramo (m)	N° Tuberías
Ciego	0	13,93	4"	13,93	3
Ranurado c/ pta. lápiz	13,93	37,80	4"	23,87	4

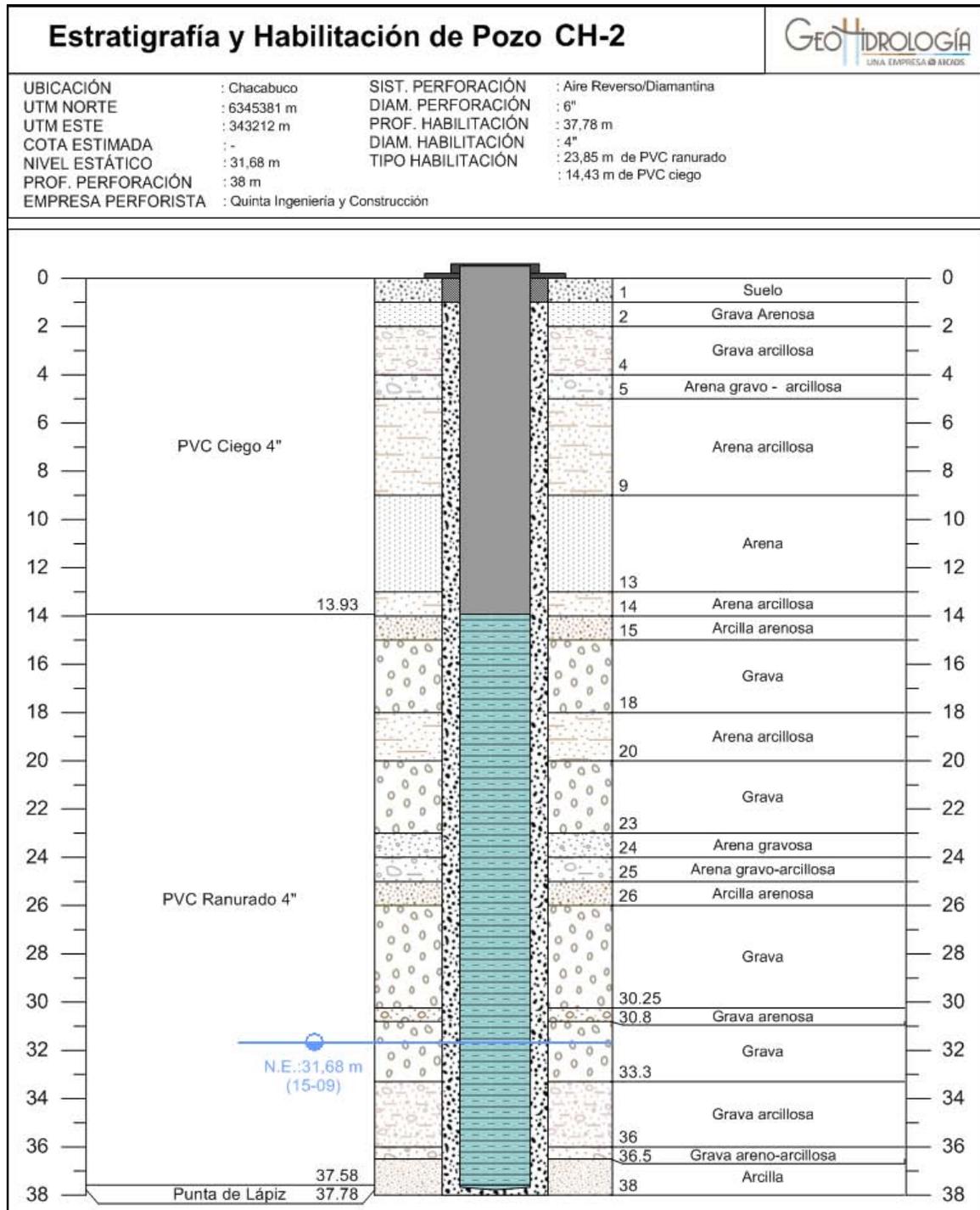
Fuente: Elaboración propia

El 26 de mayo se rellenó el espacio anular con grava de 3 – 9 mm de diámetro, finalmente el 31 de mayo se confeccionó el sello sanitario. En la Figura 6-3 se puede observar un esquema de la estratigrafía y habilitación del pozo CH-02.

La estratigrafía del punto perforado corresponde a una secuencia aluvial no consolidada de 38 m de espesor, la cual presenta distintos niveles de acuerdo a su granulometría.

El primer metro corresponde a suelo compuesto de limo y arcilla en un 90%. Luego, se encuentra un nivel de grava con contenido de arcilla entre 15 y 45%. Entre los 4 y 15 m se encuentra una arena arcillosa que presenta variaciones en su contenido de arcilla entre 5 y 50%. Entre los 15 y 18 m corresponde a grava con poco contenido de arcillas, de fragmentos andesíticos a dacíticos de hasta 15 cm de diámetro, y que se observan sub-angulosos. Bajo este nivel, entre los 18 y 26 m se encuentran intercalaciones de arena arcillosa, grava, arena gravosa a gravo – arcillosa y arcilla arenosa. Luego, entre los 26 y 36,5 m se encuentra una grava gruesa con fragmentos tamaño bloque, de composición polimíctica volcánica sin contenido de arcilla, con intercalaciones de niveles gravosos con mayor contenido de arena y arcilla. Finalmente, la base de la secuencia corresponde a un nivel de arcilla bien seleccionado, de color café pardo y compacto.

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



Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Pozo de observación CH-03

La perforación se llevó a cabo con la máquina *Boart Long Year* DB 540, mediante sistema de diamantina con *casing advance*. Primero se realizó perforación guía en 5" de diámetro, llegando hasta los 38 m de profundidad, para luego ser ensanchado a 6" hasta la misma profundidad. El pozo fue habilitado con tuberías de PVC ciegas y ranuradas de 4" de diámetro hasta los mismos 38 m de profundidad. La habilitación se indica en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4: Resumen de habilitación del pozo CH-03 (Stick Up = 0,5 m).

Tipo	Desde (m)	Hasta (m)	Diámetro	Long. Tramo (m)	N° Tuberías
Ciego	0	14,11	4"	14,11	4
Ranurado c/ pta. lápiz	14,11	38	4"	23,89	4

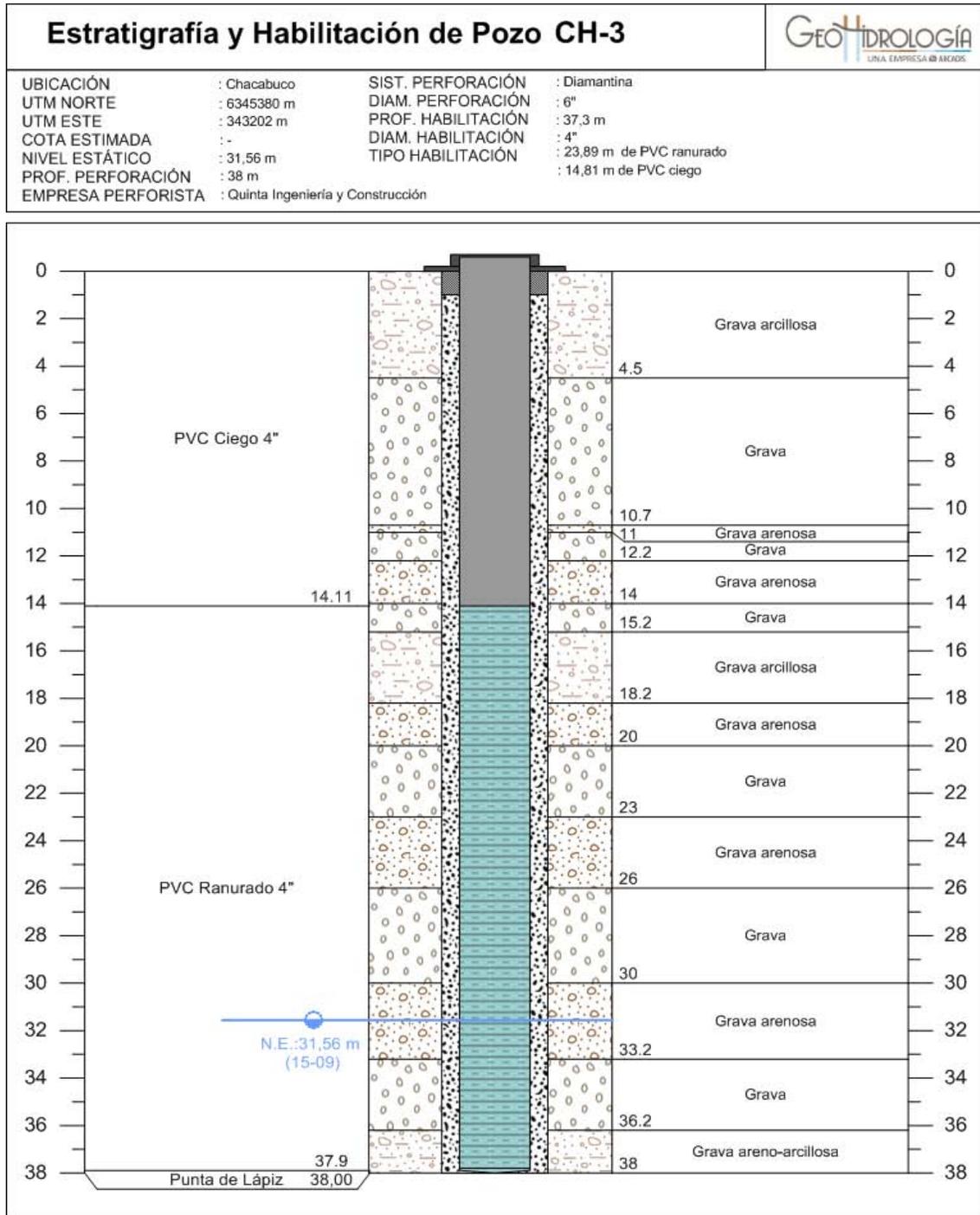
Fuente: Elaboración propia

El 30 de mayo se rellenó el espacio anular con grava de 3 – 9 mm de diámetro, finalmente el 31 de mayo se confeccionó el sello sanitario. En la Figura 6-4 se puede observar un esquema de la estratigrafía y habilitación del pozo CH-03.

La estratigrafía del punto perforado corresponde a una secuencia aluvial no consolidada de 38 m de espesor compuesta, en general, por gravas tamaño bloque de composición volcánica, andesítica y dacítica, cuyos fragmentos son sub-angulosos a angulosos y van desde grava gruesa a bloques.

La secuencia esta intercalada por niveles con mayor contenido de arena y arcilla. El techo, entre los 0 y 4,5 m corresponde a grava gruesa con 30% de arcilla. Luego, entre los 4,5 y 10,7 m se encuentran niveles de grava, con presencia de clastos tamaño bloque y de arcilla menor al 5%. Luego, entre los 10,7 y 15,2 m se observa una intercalación de grava arenosa con niveles de grava. Entre los 15,2 y 18,2 m hay un nivel de grava con 30% de arcilla. Finalmente, entre los 18,2 y 38 m se observan intercalaciones de grava con grava arenosa, de similares características litológicas, pero que difieren en sus porcentajes de clastos tamaño grava, arena y bloque.

Figura 6-4: Esquema de estratigrafía y habilitación de pozo CH-03.



Fuente: Elaboración propia

Al analizar las 3 estratigrafías presentadas se aprecia que las unidades hidrogeológicas son similares y los estratos encontrados se repiten en gran medida en las perforaciones realizadas. El pozo CH-01 es ligeramente distinto a los otros dos pozos y se debe principalmente a que el método de perforación no permite el grado de detalle que se obtiene de los métodos en que se perforaron los restantes. Por su parte, en los pozos CH-02 y CH-03 se aprecia una gran similitud en la mayoría de los estratos encontrados y sólo existen algunas diferencias que pueden ser producidas por acuñamientos de las unidades encontradas. El pozo CH-03 se considera como el más representativo ya que fue perforado con método diamantina que permite un detalle mayor en la descripción estratigráfica.

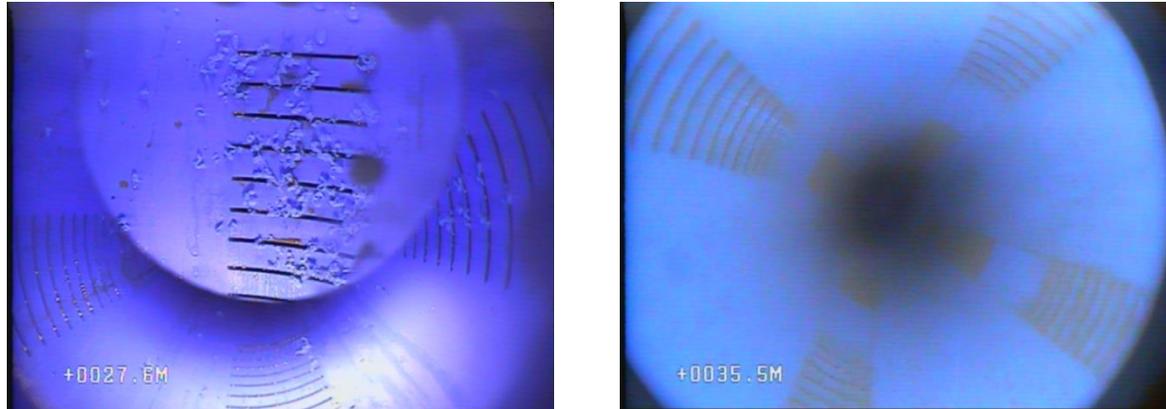
6.2.4 Filmación de pozo CH-02

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 28 de Julio de 2014 se filmó el pozo de observación CH-02. El pozo de Infiltración no fue filmado debido a que se encuentra instalada una tubería ciega de PVC de 4" por dentro de la habilitación de 6", la cual impide el ingreso de la cámara de filmación.

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 L.

El pozo se encuentra en excelente estado estructural y buen estado de limpieza. Las ranuras semi-tapadas permiten el ingreso de agua al interior de la tubería sin problema, y por lo tanto cumple su objetivo de pozo de monitoreo. Sólo el tramo entre los 26,7 y 30,9 m se observaron cúmulos de PVC en las ranuras asociados a la fabricación del material. Sobre el nivel de agua, las tuberías ciegas y ranuradas se encuentran completamente limpias. Bajo el nivel de agua se observaron ranuras semi tapadas debido a que el agua se encuentra semi-turbia. En la Figura 6-5 se observa un ejemplo del estado del agua y ranuras del pozo y en la Tabla 6-5 se indica estado estructural, limpieza y comentarios.

Figura 6-5: Imagen de filmación. Se observa a la izquierda ranuras con cúmulos de PVC y a la derecha ranuras semi-tapadas en agua semi-turbia.



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-5: Resumen de la filmación del pozo CH-02.
Las profundidades se encuentran sin descontar stick up.**

Profundidad (m)	Habilitación	Estado Estructural	Estado Limpieza	Comentarios
0,7	PVC ciego	Bueno	Limpio	PVC húmedo
1,8	PVC ciego	Bueno	Limpio	
2,2	Unión PVC	Bueno	Limpio	
8,1	Unión PVC	Bueno	Limpio	
14,0	Unión PVC	Bueno	Limpio	
14,1-19,1	PVC ranurado	Bueno	Limpio	
19,1	Unión PVC	Bueno	Limpio	
20,1-25,4	PVC ranurado	Bueno	Limpio	
25,8	Unión PVC	Bueno	Limpio	
26,7-30,9	PVC ranurado	Regular	Limpio	Ranurados con cúmulos de PVC
31,7	Unión PVC	Bueno	Limpio	
33,1	PVC ranurado	Bueno	Limpio	
33,4	Nivel Estático			Agua semi-turbia
33,7	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
35,0	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
35,4	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
35,6	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
36,4	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
37,2	PVC ranurado	Bueno	Semi-tapado	Agua semi-turbia
37,4	Fondo Pozo		Sucio	Agua semi-turbia

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 Chacabuco Polpaico.

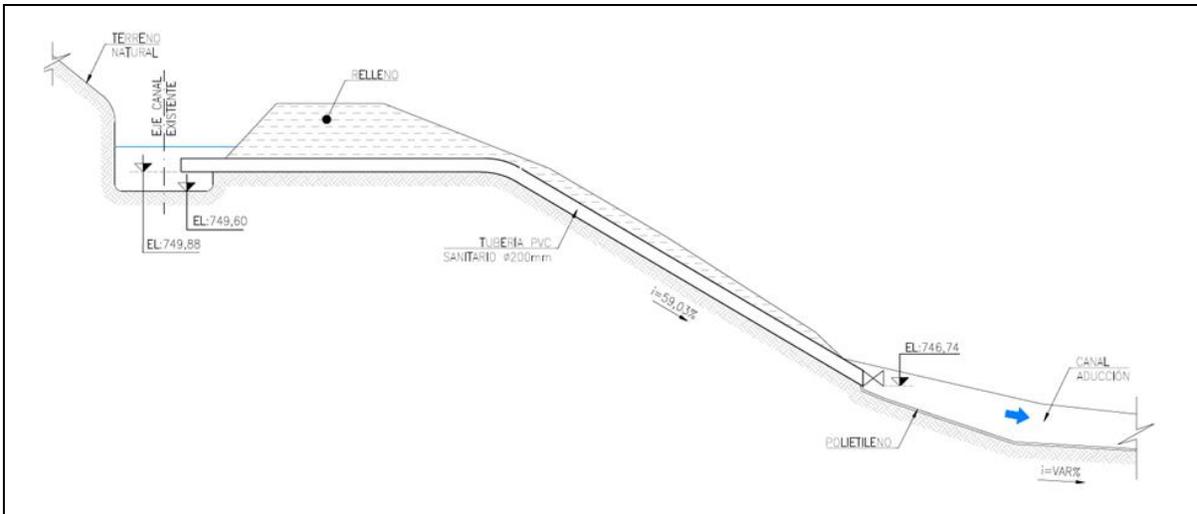
El plano as built general de la infraestructura del PPRAA, con el detalle de cada una de las obras, se presenta en el Anexo S.

6.3.1 Sistema de captación

Se utilizó para estos efectos, una toma desde el canal Los Baños mediante una tubería de PVC que fue introducida en la pared del canal y llegó hasta el canal de aducción. El diseño conceptual y de detalle se aprecia en la Figura 6-6. La tubería permitió tomar el agua del canal sólo realizando un peraltamiento de éste sin realizar obra adicional. El peraltamiento se obtuvo mediante sacos de arena.

La tubería fue de PVC sanitario de 200 mm y de 10 metros de largo y contó con una válvula de bola en la salida, para controlar el caudal. Se pudo detener el flujo a través de la toma mediante el cierre de la válvula. La tubería de PVC descargó al canal de aducción recubierto con polietileno, tal como se muestra en la figura.

Figura 6-6: Canal construido

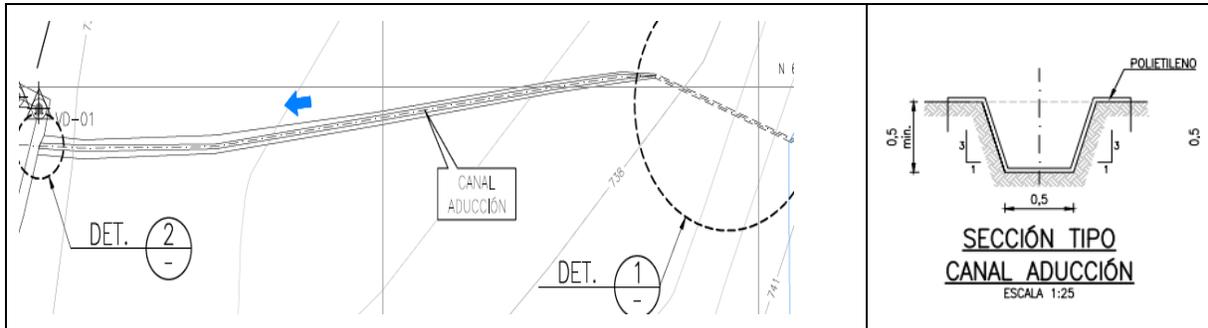


Fuente: Elaboración propia

Conducción 1: Entre captación y obra de decantación

Luego de la captación, el agua fue llevada mediante canal revestido de polietileno. La longitud del canal de aducción es de aproximadamente 41,2 m de largo.

Tabla 6-6: Canal de aducción

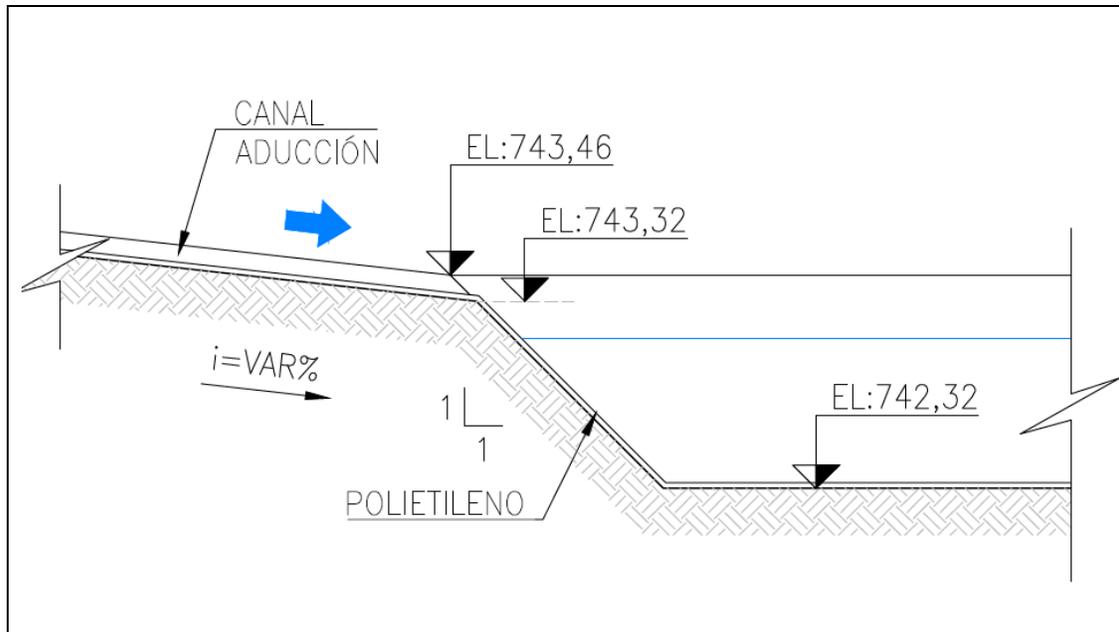


6.3.2 Obra de decantación

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 10 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 6-7 se puede apreciar esta obra.

Figura 6-7: Esquema decantador



Fuente: Elaboración propia

6.3.3 Conducción 2: Entre decantador y dispositivo de medición

Desde la salida de la obra de decantación, el agua fue conducida hacia el dispositivo de medición mediante una tubería de PVC de 200 mm. La Tubería posee pequeños agujeros que permiten filtrar el agua que entra al dispositivo de medición, eliminando las hojas y ramas que flotan en el decantador.

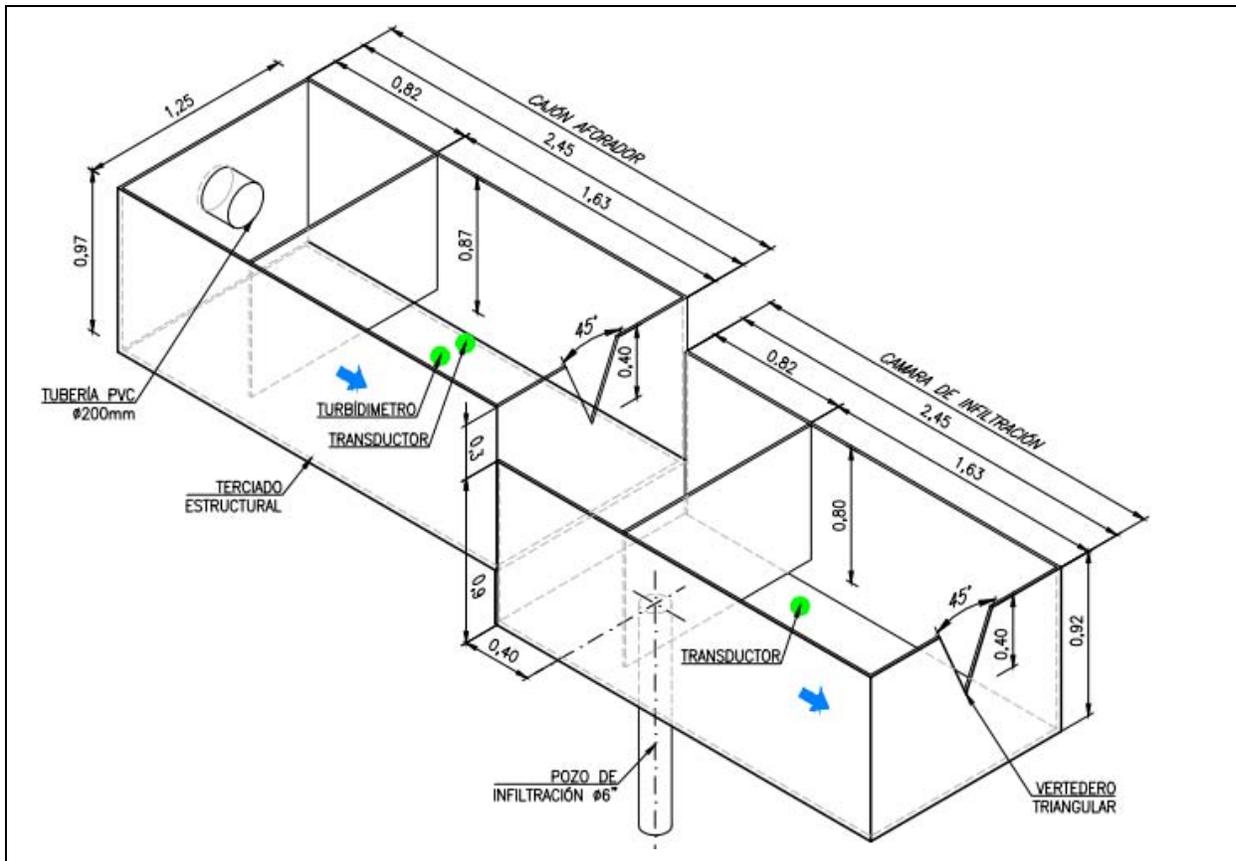
6.3.4 Dispositivos de medición

El dispositivo de medición, está compuesto por dos secciones: 1) cajón aforador y 2) cámara de infiltración, ver Figura 6-8. Ambas secciones poseen vertederos donde es posible medir el caudal. Cuando existe rebose, es decir, sale agua desde la cámara de infiltración, el caudal de infiltración se mide como la diferencia entre ambos vertederos.

Los dispositivos de medición son consecutivos y permiten saber exactamente el flujo infiltrado por la diferencia de ambos. Ambos tienen las mismas dimensiones y sólo tienen diferencias en las cotas de fondo. El segundo de ellos en el sentido del flujo es el que opera como cámara de infiltración ya que la boca del pozo se encuentra en el fondo de este dispositivo. En el caso de que la regulación del caudal no sea exactamente la infiltrada o el pozo presente problemas de colmatación, el segundo dispositivo permite controlar el flujo remanente que escapa al sistema. Las dimensiones de cada uno de los dispositivos son de 1,2 m de ancho, 2,4 m de largo y 0,9 m de altura. Los vertederos son de 45° y se ubican a 0,5 m del fondo. Se espera que el caudal máximo de operación del sistema sea de 15 L/s lo

que implica una altura de escurrimiento de aproximadamente 23 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.

Figura 6-8: Esquema dispositivo de medición



Fuente: Elaboración propia

6.3.5 Pozo de Inyección

El diseño del pozo de inyección y su habilitación se presenta en Figura 6-2. El diseño corresponde a un pozo de infiltración de 40 m de profundidad, con un NE de la napa de 30,28 m. Es efecto, el pozo posee una profundidad mayor a 5 m bajo el NE encontrado, tal cual como se indica en los términos de referencia.

6.3.6 Canal de desagüe

Por posibles emergencias se construyó un canal de descarga de aproximadamente 33,5 m de largo y un ancho de 0,6 m. La descarga se realizó al camino proyectado que se encuentra aguas abajo de los pozos de monitoreo. Se estimó que en el caso de haber remanentes descargados a este camino, éstos no infiltrarían al acuífero debido al estrato arcilloso superficial.

Tabla 6-7: Esquema canal de rebose



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.

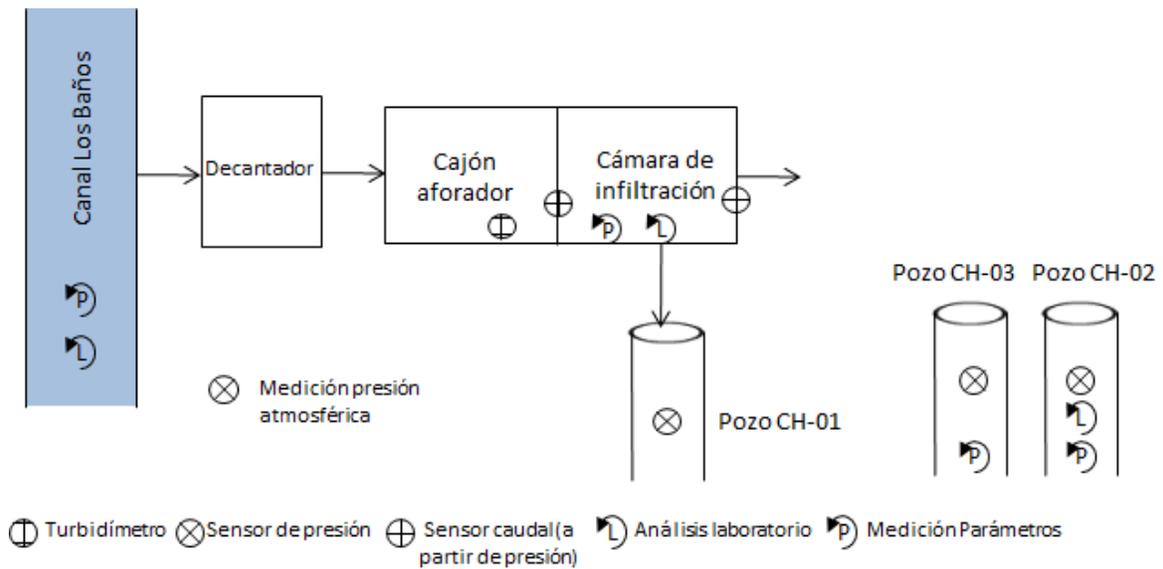
Dado la descripción anterior, el proyecto de recarga piloto contempló la implementación de una red de monitoreo de la operación del sistema compuesta por medidores de nivel y turbidez, a través de los cuales se puede establecer el caudal de infiltración (medido a la entrada y salida del pozo), la calidad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

Para las variables más determinantes de operación (turbidez y caudal de infiltración), 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 6-1 considerando lugar de medición, equipo a utilizar, frecuencia estimada de medición y si se contempla telemetría o no. La Figura 6-9 presenta un diagrama esquemático de su ubicación.

Figura 6-9: Diagrama de ubicación equipos de medición.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-8: 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 cámara de infiltración	Transductor de presión	Leeg. Sensor de niveles hidrostático capacitivo 0-5m	Continuo	Si
		Vertedero triangular de rebose de la cámara de infiltración				
Respuesta del acuífero	Niveles	Pozos de observación 1 y 2	Transductor de presión	HOBO. U20L water level logger	Continuo	No
		Pozo de infiltración				
		Presión atmosférica (Ambiental)				
Control de variables críticas	Turbidez	Cámara de infiltración	Turbidímetro	SOLITAX scSS Wiper with sc200 Controller	Continuo	Si
Control de los efectos de la infiltración	Parámetros químicos (Set B)	Canal alimentador antes de la toma	Análisis de laboratorio	-	Mensual	No
		Pozos de observación 1 y 2				
		Cámara del pozo de infiltración				
		Antes del decantador				
	Después del decantador	Análisis de laboratorio	-	Una vez	No	
	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				
Cámara del pozo de infiltración						
Variables meteorológicas	Precipitación	Estación de la DGA: Río Aconcagua en Chacabucquito	-	-	Continuo	Si (*)

(*) Estación con telemetría de la DGA.

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 M. 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, es decir, entre 2,2 y 2,9 m aguas arriba del vertedero, considerando una altura normal de agua de 0,73 m calculada en la Etapa 2 para un caudal de 15 l/s. Una fotografía del equipo se presenta en la Figura 6-10.

Figura 6-10: Equipo usado y ubicación para la medición de caudales.



Fuente: Catálogo del producto y elaboración propia

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 6-9. El resumen de su ubicación es el siguiente:

- 1 por cada pozos de observación, instalado a 30 cm del fondo del pozo
- 1 en el pozo de infiltración, instalado a 30 cm del fondo de la perforación,
- 2 por cada uno de los vertederos triangulares instalados, 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 dispositivos 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 6-13) para medir 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 M se encuentra el catálogo del producto.

Adicionalmente se utilizaron los transductores de presión marca Leeg para medir la altura de agua sobre los vertederos ubicados en el sistema de medición. Este tipo de transductor se encontraba conectado a telemetría.

El producto y su ubicación se presenta en la Figura 6-11 y en el Anexo M se encuentra el catálogo asociado al producto.

Figura 6-11: Equipo usado para la medición de niveles e instalación en el pozo CH-01



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 6-12

Figura 6-12: Pozómetro para medir profundidad del agua subterránea en pozos



Fuente: www.solinst.com y elaboración propia |

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 a utilizar 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 debe cerrar el pozo de infiltración con su respectiva tapa superficial, para impedir la entrada de agua turbia al pozo. Complementariamente se cerraría la compuerta de entrada ubicada en el sistema de captación, para impedir la entrada de agua al sistema en su conjunto. Con respecto al agua que quedase como remanente en el sistema de infiltración, ésta sería extraída con una bomba superficial y descartada en un lugar del predio que no afectase el sector.

Se instaló un turbidímetro en la cámara de infiltración de manera de controlar el parámetro turbidez de manera continua. Este parámetro, leído en el visor del instrumento, en conjunto con la inspección visual le permite 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 del pozo por colmatación.

El equipo de medición utilizado es el modelo SOLITAX sc SS Wiper with 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 cámara de infiltración. El equipo se presenta en la Figura 6-13 y en el Anexo M se incluye su catálogo.

Figura 6-13: 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 Casas de Chacabuco, las aguas utilizadas para infiltrar provienen del canal Los baños, ramal del canal Chacabuco-Polpaico ubicado en el límite nor-oriente del predio. El primer indicador a revisar en el análisis químico (Anexo G1) para comparación de composición de aguas son los sólidos disueltos en que se aprecia que para todas las muestras son muy similares y del mismo orden de magnitud. Las concentraciones de los iones mayores (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} y NO_3^-) se utilizan para determinar la procedencia de las aguas y en algunos casos se pueden distinguir los procesos que éstas han experimentado o experimentarán a raíz de la mezcla con aguas de composición distinta. Las concentraciones de estos iones son similares y la relación entre ellos también es similar (diagrama de piper en Figura 7-20). El único ion que podría ser de consideración es el NO_3^- , que además es un indicador de afectación agrícola (fertilizantes). Las concentraciones encontradas para este ion fueron variadas tanto para las aguas superficiales como subterráneas, lo que indica un grado de afectación en ambos tipos de agua por actividad agrícola presentando valores sobre los 10 mg/L. Sin embargo, al estar presente tanto en la fuente como en el destino, no se consideró como relevante. Las concentraciones de oxígeno altas y el pH relativamente neutro, explican las bajas concentraciones de metales en ambos tipos de agua. Sólo el aluminio presenta algún grado de variabilidad que se explica porque se tomaron concentraciones totales y no disueltas de metales, en que el aluminio generalmente se encuentra presente en el material particulado en las muestras y no disuelto. Lo anterior demuestra que la calidad de ambas aguas (fuente y agua subterránea) son muy similares en todos sus parámetros, excepto coliformes fecales (ver análisis en sección 4.1.3), 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 de acuerdo al procedimiento de muestreo incluido en el Anexo G.

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 sección 4.1.3 del estudio 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:

- Cámara de inyección de pozo: agua a infiltrar (CH-i)
- Pozos de observación (CH-02)

El muestreo lo realizó personal de GeoHidrología y las muestras fueron enviadas antes de 24 horas al laboratorio para la realización de sus análisis. En la Figura 6-14 se presenta el equipo (nevera y frascos) utilizado en terreno.

Figura 6-14: Equipo para muestreo hidroquímico.(Set B)



Fuente: Elaboración propia

6.4.4.2 Parámetros Fisicoquímicos

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 (CH-CA)
- Dos Pozos de observación (CH-02 y CH-03)
- Cámara de inyección de pozo: agua a infiltrar (CH-i)

Los parámetros físico-químicos que corresponde a pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto y Conductividad Eléctrica.

Las características del equipo son:

- El medidor multiparámetro HI 9829 es ideal para mediciones en terreno tal como en lagos, ríos y mares. Se caracteriza por ser resistente, impermeable y fácil de usar.
- El medidor puede mostrar en pantalla desde 1 hasta 12 parámetros simultáneamente.

- El equipo puede medir hasta 15 parámetros seleccionables por el usuario.
- Empleando una de las sondas de la serie HI 76x9829, el HI 9829 puede medir los parámetros de calidad del agua tales como el pH, ORP (Potencial de Óxido Reducción), conductividad, turbidez, temperatura, iones de amonio, nitrato, cloruro (NH₄⁺, NO₃⁻ -N o Cl⁻), oxígeno disuelto (como % de saturación o concentración), resistividad, TDS (Sólidos Totales Disueltos), salinidad y gravedad específica de agua de mar. Se mide la presión atmosférica para compensar la concentración de oxígeno disuelto

La Figura 6-15 presenta una fotografía del equipo y el catalogo se incluye en el Anexo M.

Figura 6-15: Equipo de medición multiparámetros



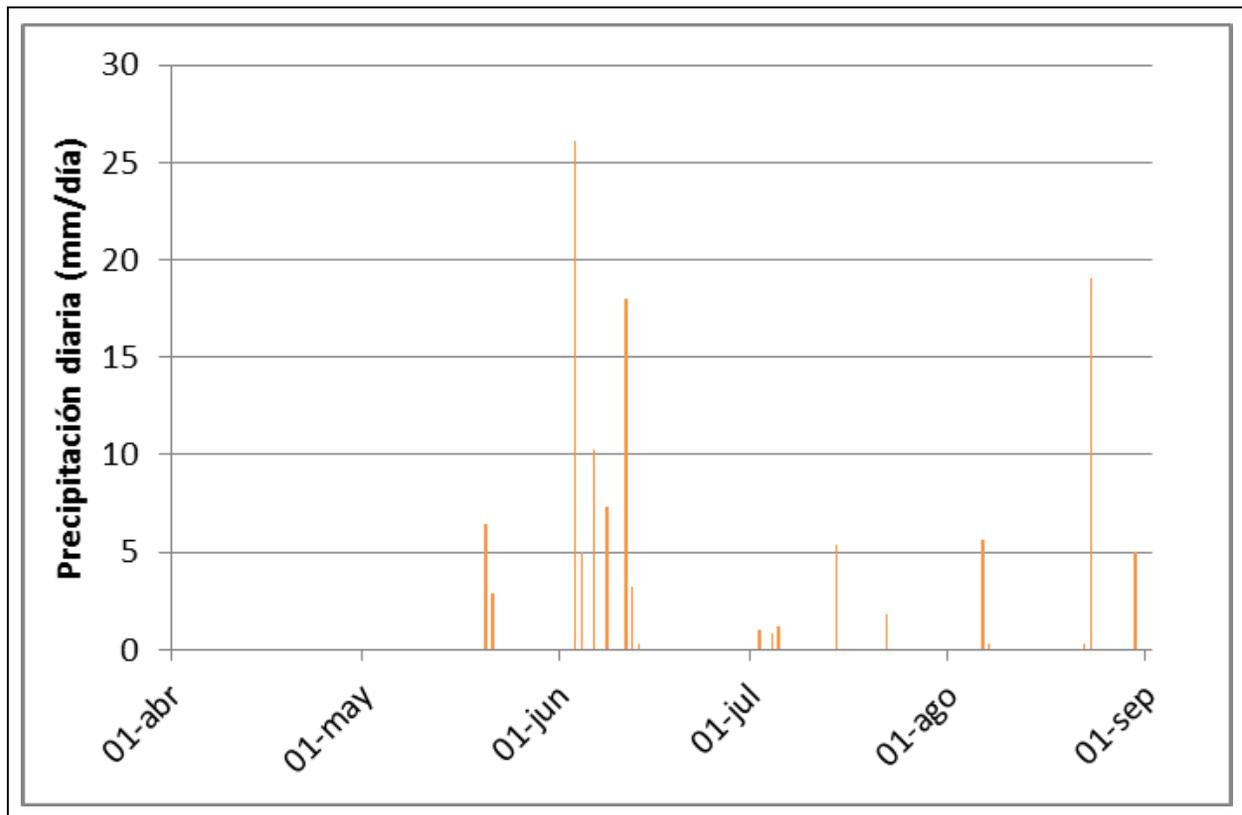
Fuente: www.hannachile.com y elaboración propia

6.4.5 Registro de Precipitación

Se estima que la única variable meteorológica que debe controlarse es la precipitación. El monitoreo de las precipitaciones se realizó indirectamente utilizando la estación meteorológica perteneciente a la Dirección General de Aguas “Río Aconcagua en Chacabuquito” (Código BNA 05410002-7), de la cual es posible obtener los registros históricos. Las precipitación acumulada cada 24 horas son mostradas en la Figura 6-16. En la Figura 6-17 se presenta la ubicación de la estación con respecto al proyecto, la estación se encuentra a menos de 25 Km del lugar de las pruebas.

El registro muestra que la mayor concentración de precipitaciones ocurre durante la primera mitad de junio. Por otro lado, ocurrió una precipitación de magnitud importante pero de duración puntual hacia fines de agosto. Finalmente se aprecian una serie de eventos de magnitud menor, alrededor de 5 mm que ocurrieron a mediados de mayo, a mediados de julio, a comienzos de agosto y a finales del mismo mes.

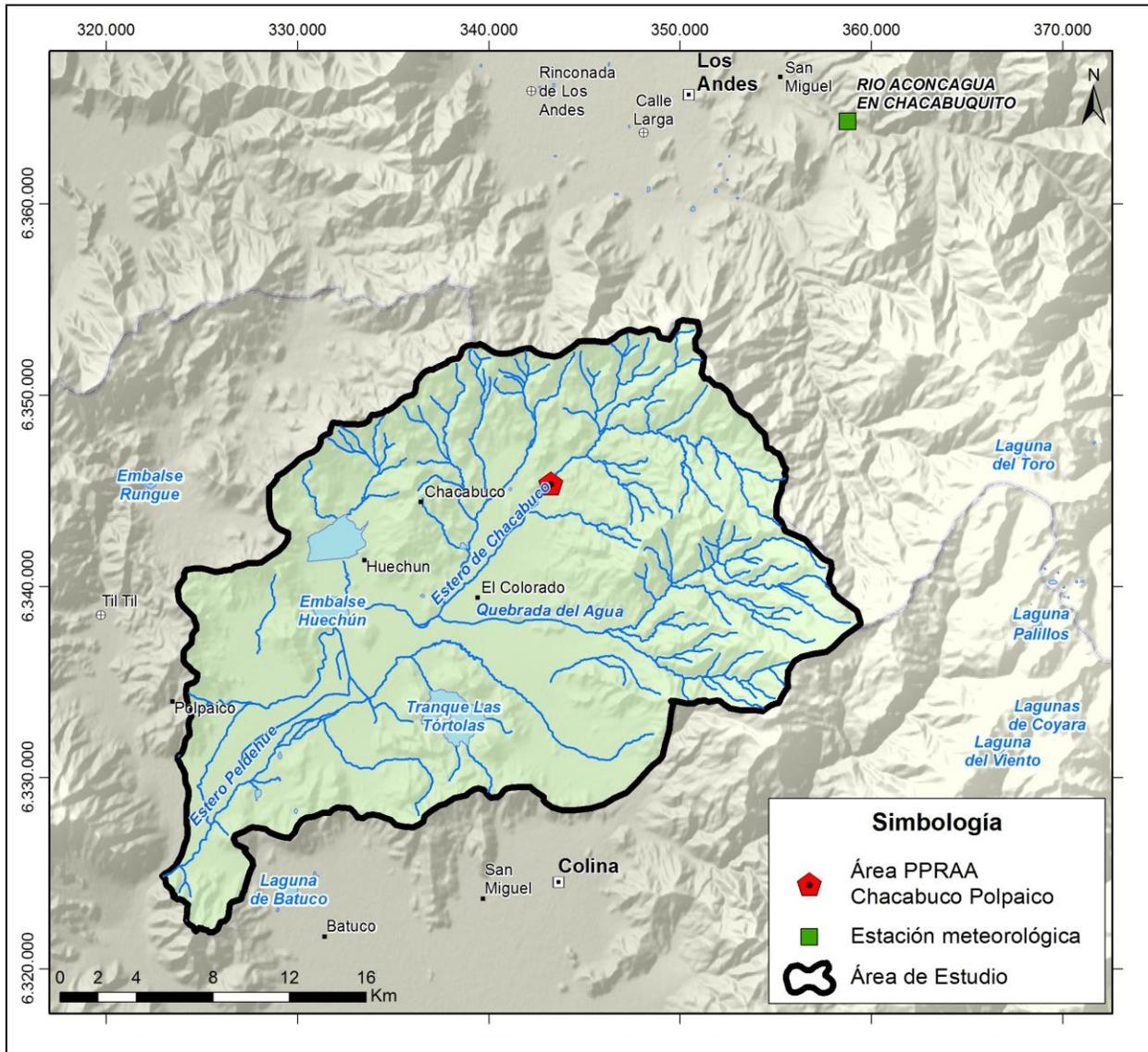
Figura 6-16: Pp. acumulada cada 24 horas en estación Río Aconcagua, Chacabuquito.



Fuente: Elaboración propia

Se estimó que la evaporación no influye en el desarrollo de las pruebas debido a que su magnitud dentro del sistema de infiltración es muy reducida. Esto se debe a que la única superficie susceptible a evaporar es el decantador, el cual sólo presenta un área de 30 m² y de acuerdo a la evaporación promedio (mayor a la esperada durante las pruebas) 2,8 mm/d, el flujo máximo de evaporación sería menor a 0,01 L/s.

Figura 6-17: Ubicación de estación DGA usada para el monitoreo de la precipitación



Fuente: Elaboración propia

6.4.6 Sistema de medición por telemetría

El sistema de telemetría utilizado fue un kit marca Wise box compuesto por los elementos indicados en la Tabla 6-9 y servicio de plataforma ofrecido por Wise Acces.

Tabla 6-9: Elementos que componen el Kit Wise box

Producto	Descripción	Part Number	Unidades
Wisebox	WiseBox TC1 con antena interna, sin DB9.	WBTC1	1
Cable	Cable de poder 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 Wiseaccess

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 6-18 y en el catálogo se incluye en el Anexo M.

Figura 6-18: Sistema de telemetría



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

6.5 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS”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 6-10 presenta su detalle.

Tabla 6-10: Costos de inversión PPRAA Chacabuco-Polpaico

Tipo de obra	Metros perforados	Costo total (\$)
Pozo Infiltración (CH-01)	40	16.065.000
P. Observación 1 (CH-02)	38	9.835.350
P. Observación 2 (CH-03)	37	9.576.525
Pruebas de infiltración	-	6.153.966
Obras Civiles	-	2.722.551
Total (IVA Incluido)		44.353.392

Respecto a las obras civiles, éstas consideran la construcción de: bocatoma, canal de aducción, decantador, revestimiento de canales y decantador, sistema de medición (cajón aforador y cámara de infiltración) y canal de despiche (ver detalle en sección 6.3). Según lo mostrado en la tabla precedente, el ítem más relevante es la perforación de pozos, monto que corresponde al 80% del total de los costos de inversión del proyecto.

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). La Tabla 6-11, 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 6-11: Costos de instrumentación PPRAA Chacabuco-Polpaico

Equipo	Variable monitoreada	PU (\$)	Cantidad	Costo total (\$)
Sensor de niveles hidrostático 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 HOB0	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 \$53.846.426, de los cuales el 18% corresponde a costos de instrumentación y un 82% 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 3,5 L/s (ver sección 7.2). Ver detalle en Tabla 6-12:

Tabla 6-12: Valor referencial de agua infiltrada

Total (IVA Incluido) (\$)	53.846.426
Q máximo infiltrado (L/s)	3,50
Costo \$/(L/s infiltrado)	15.384.693

7 REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 DETERMINACIÓN CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO

Originalmente la determinación de las constantes elásticas se realizaría mediante ensayos de bombeo, sin embargo, el análisis de la información local recopilada durante la perforación del pozo permitió definir que era mejor sustituir las pruebas de bombeo por ensayos de infiltración. Las razones se presentan a continuación:

- Los niveles han disminuido a lo largo del tiempo producto de la explotación subterránea (aproximadamente 20 m en los últimos 5 años),
- Informes de pozos locales realizadas por la empresa Perforaciones FAG en los pozos P4 y P5, realizados en noviembre 2013 (otorgadas por Rodrigo Andai, dueño del predio), indican una baja capacidad de producción con descensos cercanos a 30 m para caudales de aproximadamente 1 L/s (Anexo N),
- Existe un pozo que alimenta la laguna donde se realizan deportes náuticos, según información otorgada por Rodrigo Andai, dueño del predio, el pozo ha disminuido su producción de 25 L/s hace 5 años atrás, a 3,5 L/s en la actualidad,
- Las estratigrafías disponibles dan cuenta de que bajo una capa con alto contenido de finos (situada entre 20 y 30 m de profundidad) se encuentran estratos más permeables (de espesor variable), sin embargo bajo estos estratos también se presentan materiales con contenidos de fino (ver fuente en Figura 6-2).

Toda esta información indica que el estrato aportante de agua subterránea ha variado en el tiempo y que probablemente los niveles estáticos actualmente se encuentren bajo la unidad acuífera con mayor conductividad. Esto produce que los niveles dinámicos durante el bombeo no reciban aportes de esta unidad más conductora y sólo induzcan flujo a través de unidades menos permeables más profundas. Durante la infiltración mediante pozo de inyección se deberían alcanzar los estratos con mayor capacidad conductora y serán éstos los que regularán la infiltración desarrollada.

Las pruebas de infiltración permiten estimar la conductividad hidráulica en aquellos estratos en que se espera el agua ingrese con mayor facilidad desde el pozo de infiltración.

7.1.1 Pruebas de infiltración para determinación de K

En el pozo de infiltración CH-01 se realizaron 4 pruebas para estimar el valor de la conductividad hidráulica, en la medida que se iba avanzando con la perforación. El procedimiento consiste en levantar la entubación a una altura determinada del pozo para realizar cada prueba de infiltración y posteriormente continuar con la perforación. El día 29 de mayo se realizó la primera prueba de infiltración con un caudal de 0,2 L/s a una profundidad de 7 m, la que resultó ser fallida debido a que el pozo se llenó inmediatamente. Posteriormente, el día 18 de junio se realizó la segunda prueba a una profundidad de 23 m con un caudal de 1 L/s, el día 27 de junio se realizó la tercera prueba de infiltración con un caudal de 4,5 L/s a una profundidad de 37 m y por último se interpretaron los datos de la recuperación de nivel posteriores a esta última. El objetivo de las pruebas realizadas fue

verificar la capacidad de infiltración del pozo. A continuación se presentan las metodologías utilizadas para interpretar los resultados obtenidos en los tres ensayos llevados a cabo con éxito.

Las dos primeras pruebas de infiltración consistieron en inyectar un caudal constante de agua hasta que los niveles registrados en los pozos se estabilizaran mientras que, la tercera y última consistió en un ensayo de recuperación del nivel freático después de una estabilización de su nivel.

Durante las pruebas realizadas se recolectaron datos de caudal, tiempo de ensayo y niveles en el pozo, mediante transductor de presión. En total se realizaron 3 ensayos completos con distinta metodología, cuya base teórica se explica a continuación.

- Prueba N°1 “Prueba de infiltración a 23 m”,
- Prueba N°2 “Ensayo Lefranc a 37 m”,
- Prueba N°3 “Ensayo de recuperación a 37 m”.

Un resumen de los resultados se presenta en la siguiente Tabla 7-1:

Tabla 7-1: Resumen pruebas infiltración

Prueba	N°1	N°2	N°3
Fecha de realización	19-6-2014	17-6-2014	27-6-2014
Caudal (L/s)	1	4,5	- (*)
Profundidad donde se realizó la prueba (m)	23	37	37
K (m/d)	1,9	4,5	7,6

(*)Método transiente (caudal variable)

7.1.2 Prueba N°1

Para la Prueba N°1 de infiltración realizada a 23 m, el pozo aún no alcanzaba la napa subterránea. El análisis de los datos fue realizado mediante la metodología propuesta por Zagar (1953), obtenida del documento técnico “Theory and problems of water percolation” y cuyo campo de utilización se aplica a pozos sin nivel de napa presente, con una superficie de infiltración que abarca el fondo y una porción del total de la pared del pozo, es decir, pozos que se encuentran parcialmente entubados. La permeabilidad K (m/d) se estima como:

$$K = \frac{1}{C_u \cdot r_p} \cdot \frac{Q}{h} \quad (7.1)$$

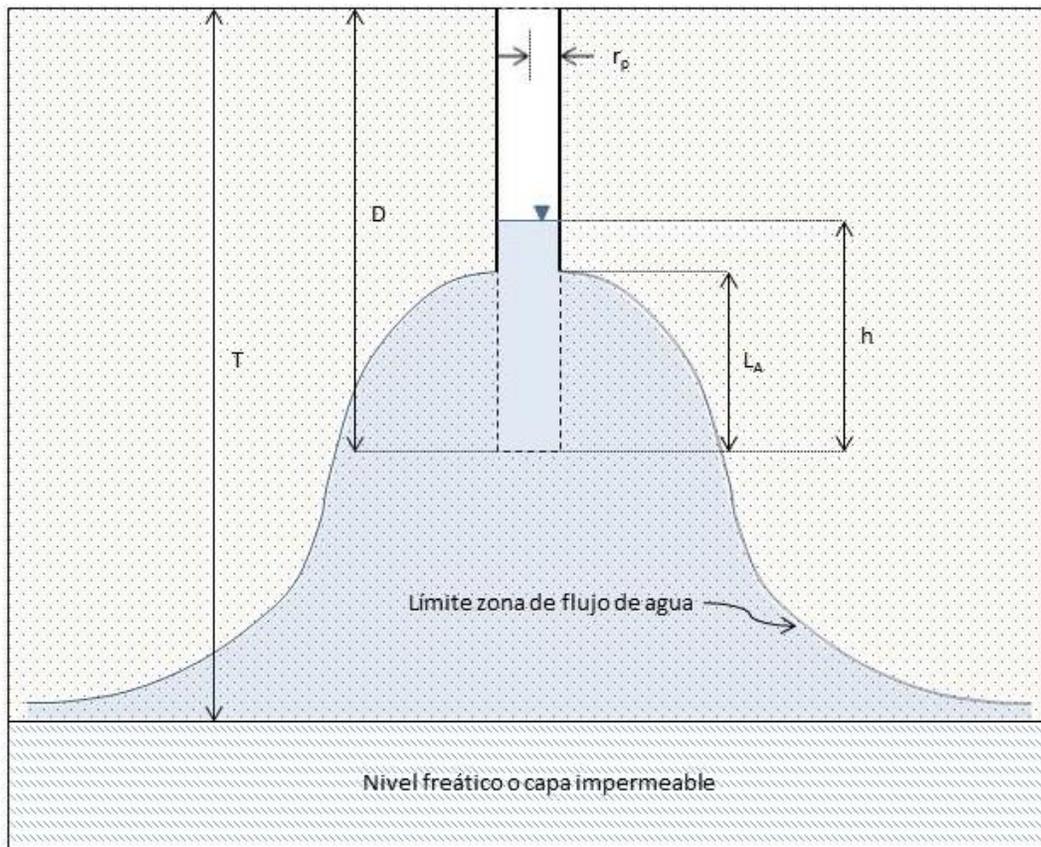
donde,

- K= conductividad hidráulica (m/d),
- Q= caudal de infiltración (m³/d),
- r_p= radio del pozo (m),
- h= altura de agua alcanzada en el pozo (m),

C_u = coeficiente de conductividad no saturada. Se obtiene de un gráfico cuyas variable de entrada son L_A/h y h/r_p . (Figura 7-2), donde
 L_A = zona no entubada del pozo (1m),
 D = profundidad de perforación (m),
 T = profundidad del nivel freático (m).

En la Figura 7-1 se presenta el esquema con los parámetros utilizados para calcular la conductividad hidráulica del terreno mediante las pruebas de infiltración en zona no saturada.

Figura 7-1: Esquema infiltración en pozo zona no saturada y parámetros utilizados en fórmula 5.1



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7-2 se presenta el gráfico (Zagar, 1953) a partir del cual se obtiene el coeficiente (coef) de conductividad no saturada (C_u) a partir de los valores de L_A , h y r_p . El valor de C_u es adimensional al igual que las relaciones que lo determinan, h/r_p y L_A/h . De esta forma se puede usar el ábaco presentado en la Figura 7-2 con unidades del Sistema Internacional.

Figura 7-2: Gráfico para obtención del coef. conductividad no saturada, C_u , Zagar (1953).

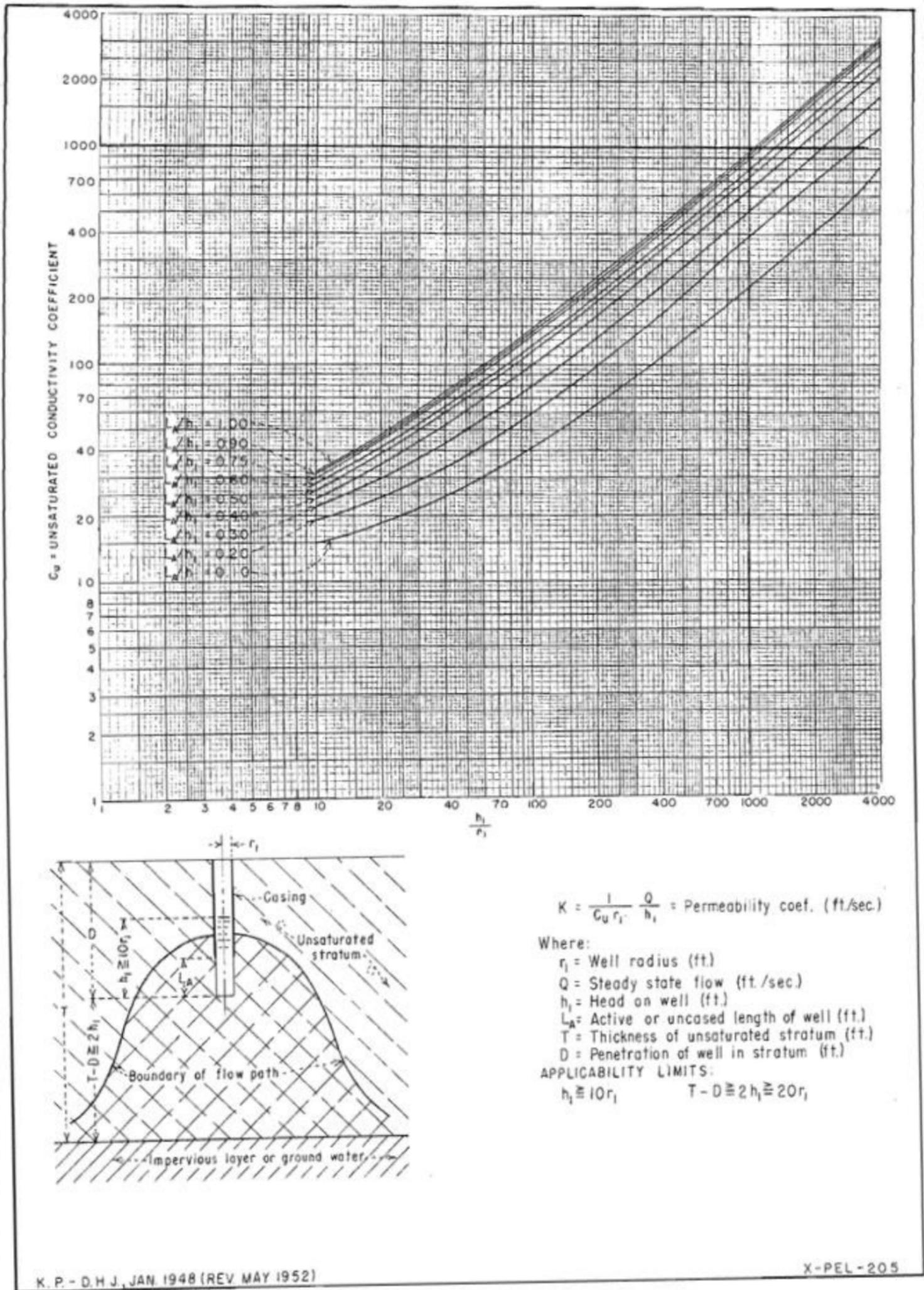


Figure 43 - Conductivity Coefficients for Permeability Determination in Unsaturated Strata with Partly Penetrating Cylindrical Test Wells.

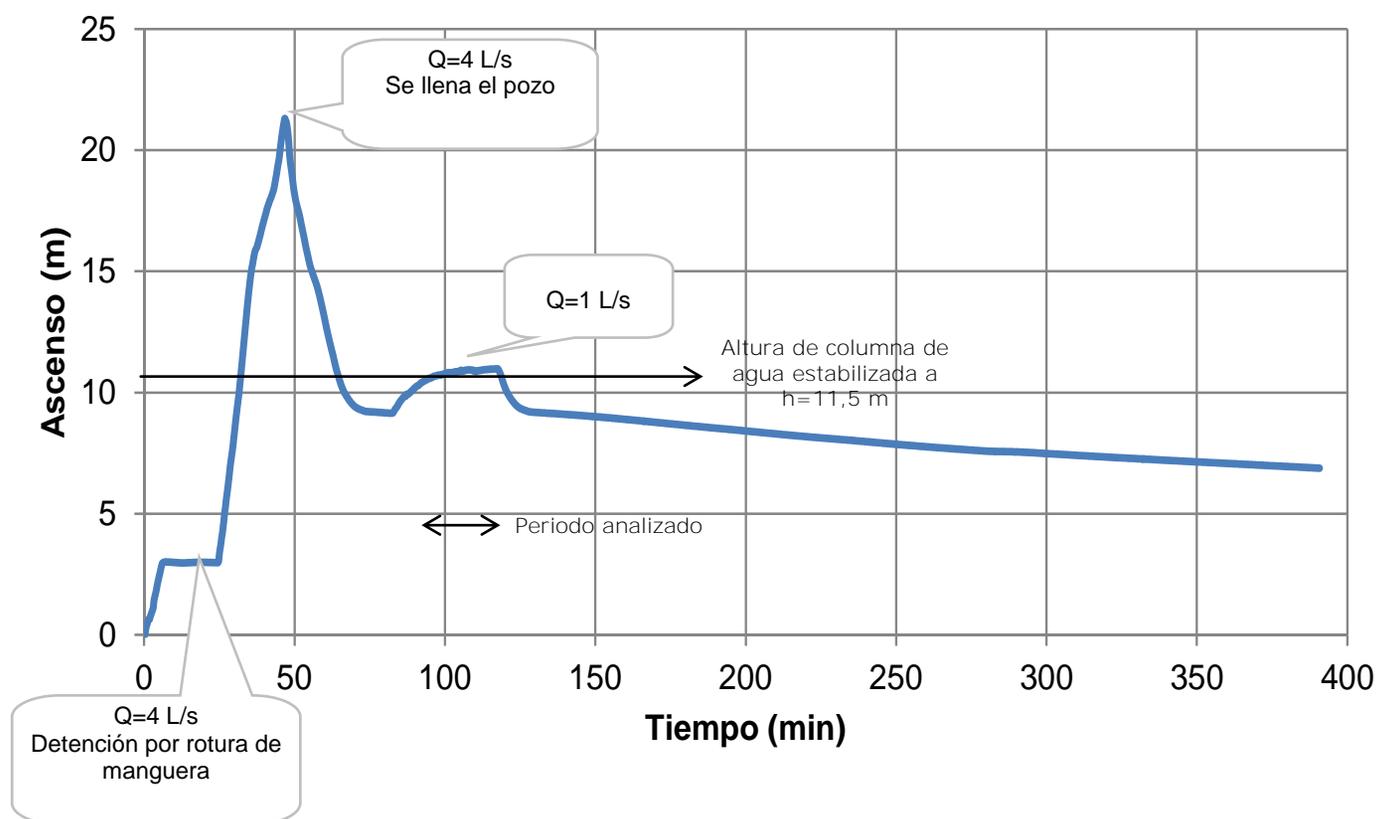
En la Tabla 7-2 se presentan los parámetros utilizados para la estimación de la conductividad hidráulica y su valor obtenido. En la Figura 7-3 se presenta el gráfico de los registros obtenidos. La aplicación de la metodología de Carl N. Zagar (1953) requiere el cumplimiento de tres condiciones, como se puede observar en la Tabla 7-2, y como una de ellas no se cumple, el resultado obtenido debe usarse solo como valor de referencia. Ver Anexo Q.

Tabla 7-2: Parámetros de la Prueba N°1 de infiltración del pozo CH-01.

Pozo CH-01			Unidades
Radio pozo	r_p	0,0762	m
Profundidad perforación	D	23	m
Altura Infiltración	L_A	1,0	m
Profundidad N.F.	T	30,28	m
Caudal	Q	1	L/s
Altura columna de agua	h	11,5	m
Coefficiente adimensional (ábaco)	C_u	52	-
Condición1($h > 10r$)	ok		
Condición2($T - D > 2h$)	no		
Condición3($2h > 20r$)	ok		
Conductividad Hidráulica	K	1,9	m/d

Fuente: elaboración propia.

Figura 7-3: Registro de la Prueba N°1 de infiltración.



Fuente: elaboración propia.

7.1.3 Prueba N°2

Para la Prueba N°2, realizada a 37 m donde el pozo sobrepasa el nivel de la napa, los datos fueron analizados mediante el método de Lefranc. Su fórmula establece que la permeabilidad, K (m/d), se puede estimar como:

$$K = \frac{Q}{C \cdot h} \quad (7.2)$$

donde,

K = conductividad hidráulica (m/d),

Q = caudal (m^3/d),

h = altura de agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático previo (m),

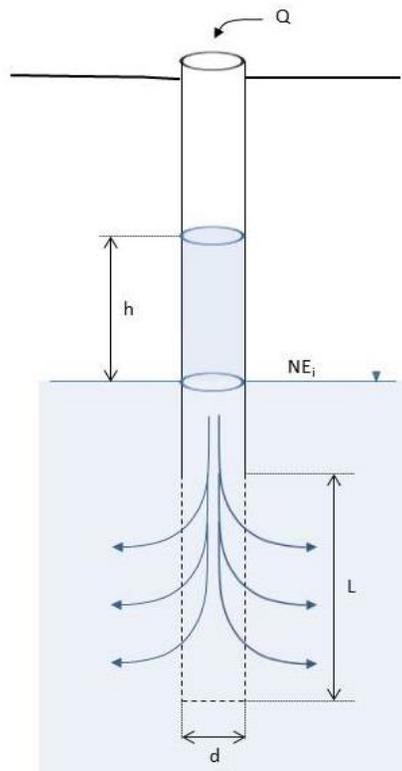
C = coeficiente de forma $C = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{Ln(L/r_p)}$ si $\frac{L}{2 \cdot r_p} > 4$,

D = diámetro del pozo (0,15 m (6")),

L = longitud de la zona filtrante (2 m).

En la Figura 7-4 se presenta el esquema con los parámetros utilizados para calcular la conductividad hidráulica del terreno mediante el método "Lefranc".

Figura 7-4: Esquema de ensayo Lefranc y los parámetros utilizados en su cálculo.



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7-3 se presentan los parámetros utilizados para calcular la estimación de la conductividad hidráulica y su valor obtenido mediante el método de Lefranc. En la Figura 7-6 se presenta el diagrama con los registros de los niveles durante la prueba de infiltración. Ver Anexo Q

Tabla 7-3: Parámetros de la prueba de infiltración del pozo CH-01.

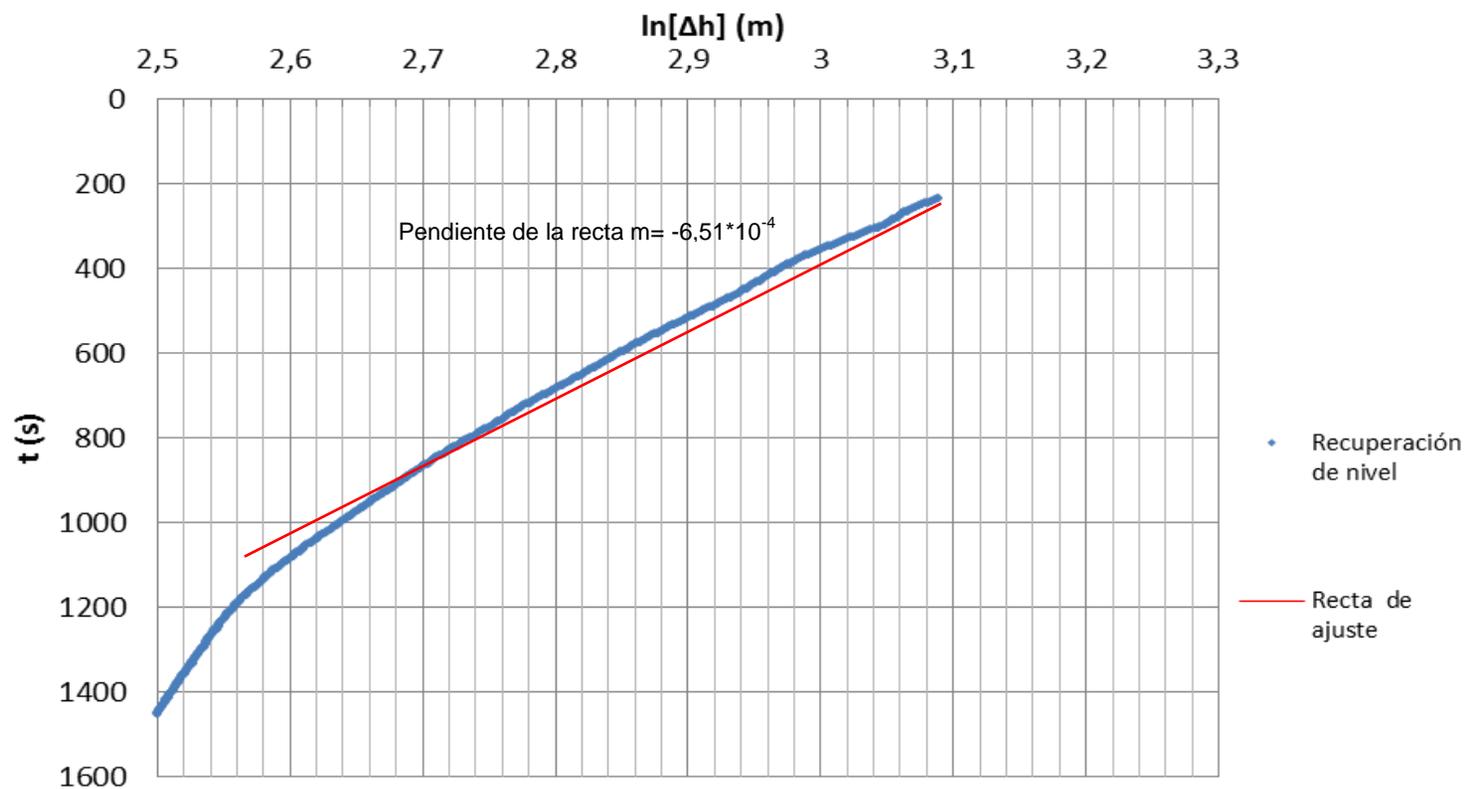
Pozo CH-01			Unidades
Radio pozo	r_p	0,0762	m
Altura Infiltración	L	2,0	m
Profundidad N.F.	T	30,28	m
Caudal	Q	4,5	L/s
Altura columna de agua	h	22,22	m
Coficiente Forma	C	3,84	m
Condición $\frac{L}{2 \cdot r_p} > 4$	ok		
Conductividad Hidráulica	K	4,5	m/d

Fuente: elaboración propia.

7.1.4 Prueba N°3

La Prueba N°3 de interpretación de la recuperación de nivel, inmediatamente después de finalizada la Prueba N°2, se realizó a una profundidad de 37 m con una elevación de la entubación de 2 m mediante el método Lefranc en régimen transitorio. La permeabilidad, K (m/d), puede ser estimada a partir de la relación entre el logaritmo neperiano del incremento del ascenso de la columna de agua, $\ln[\Delta h(m)]$, con el tiempo $t(s)$. A partir del gráfico $\ln[\Delta h]$ vs. t se estima el valor de la permeabilidad, K (m/d), ya que es directamente proporcional al valor de la pendiente representada (Figura 7-5).

Figura 7-5: Diagrama semilogarítmico del descenso en función del tipo de la Prueba N°3.



Fuente: elaboración propia.

A partir del valor de la pendiente de la recta ajustada se estima la conductividad hidráulica, K (m/d) como:

$$K = \frac{-r_p^2}{4 * C * m} \quad (7.3)$$

donde,

K= conductividad hidráulica (m/d),

r_p = radio del pozo (m),

C= coeficiente de forma $C = \frac{2 * \pi * L}{Ln(L/r_p)}$ si $\frac{L}{2 * r_p} > 4$,

m= pendiente de la recta de ajuste (Figura 7-5),

L= longitud zona filtrante.

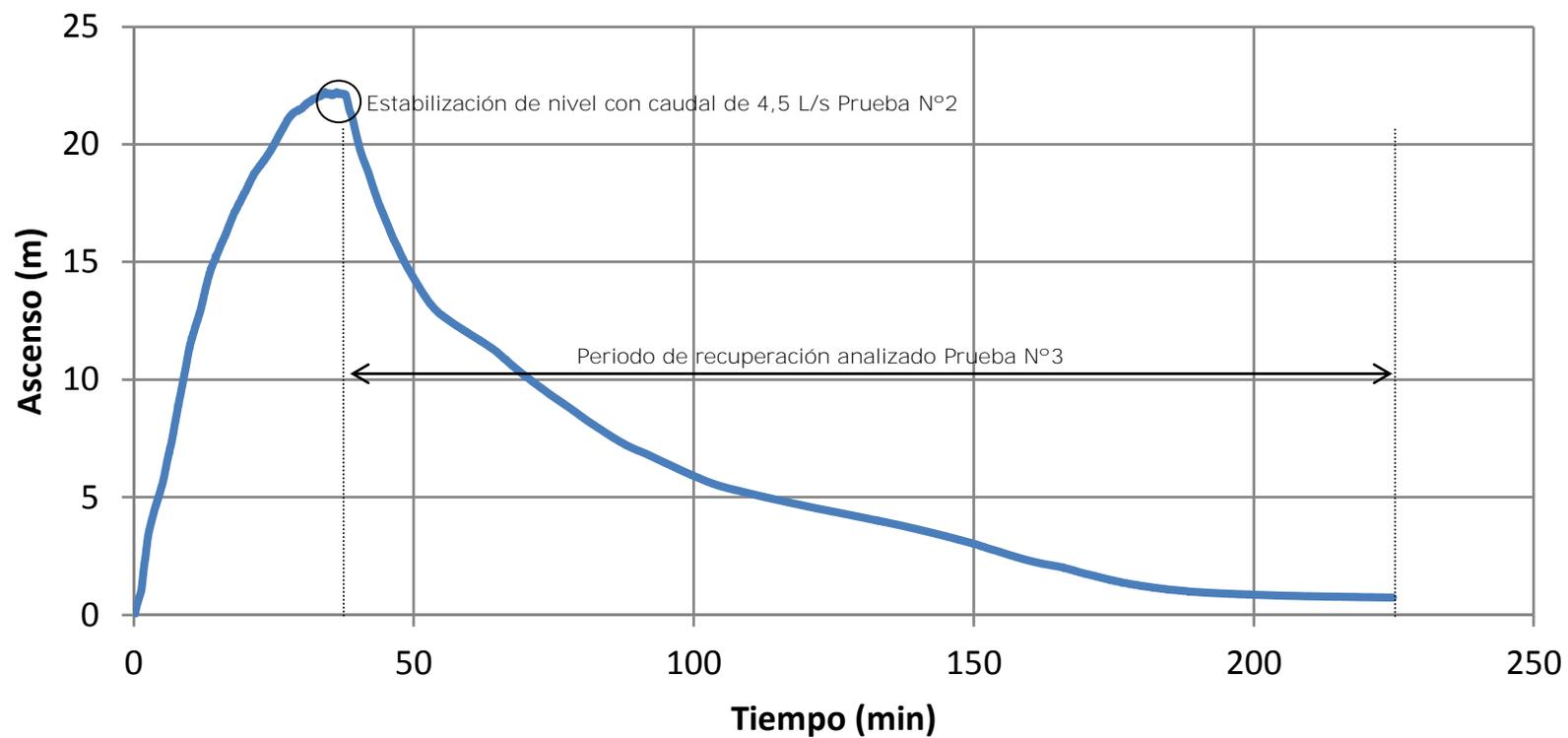
En la Tabla 7-4 se presentan los parámetros utilizados para la estimación de la conductividad hidráulica y su valor obtenido mediante el método presentado. En la Figura 7-6 se presenta el diagrama con los registros de los niveles durante la prueba de infiltración. Ver Anexo Q.

Tabla 7-4: Parámetros de la prueba de infiltración del pozo CH-01.

Pozo CH-01			Unidades
Radio pozo	r_p	0,0762	m
Profundidad N.F.	NE	34,7	m
Altura Infiltración	L_A	2,0	m
Incremento nivel en pozo inicial	h_0	22,1	m
Incremento nivel en pozo final	h_f	1,2	m
Pendiente de la recta de ajuste	m	$-6,51 * 10^{-4}$	
Coeficiente de forma	C	3,84	
Condición $\frac{L}{2 * r_p} > 4$	OK		
Conductividad Hidráulica	K	7,6	m/d

Fuente: elaboración propia.

Figura 7-6: Registro de la Prueba N°2 y N°3.



Fuente: elaboración propia.

En la interpretación de todas las pruebas se obtuvieron valores de conductividad hidráulica del mismo orden de magnitud con valores de 2, 4 y 8 m/d para la Prueba N°1, Prueba N°2 y Prueba N°3 respectivamente. La geología del pozo CH-01 presentada en la Figura 6-2 se observa un material clasificado como arena gravo-arcillosa en la profundidad de realización de la Prueba N°1 (23 m) y un material de grava arenosa para la profundidad de la Prueba N°2 y N°3 (37 m). Por esta estratigrafía se debiera esperar que la conductividad hidráulica fuera mayor a 37 m que en los 23 m de profundidad, cosa que se cumple al comparar el resultado de la Prueba N°1 con la Prueba N°2 y N°3. Cabe destacar que el rango de variación significativo de la conductividad hidráulica formado por estos 3 ensayos es estrecho, siendo de 1 a 10 m/d. Este rango de parámetros se encuentra dentro de lo considerado en la metodología de evaluación de sitios potenciales para realizar recarga artificial (1 a 5 m/d). Se considera que esta situación es fortuita y no es extrapolable a la totalidad del área en que se realizó esta evaluación.

7.2 OPERACIÓN DEL SISTEMA PPRAA

Las pruebas consistieron fundamentalmente en realizar variaciones de caudal de infiltración y registrar la respuesta del sistema, tanto en niveles como en calidad química. A continuación se presenta la descripción detallada de estas pruebas y los principales resultados obtenidos.

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, bombeos, etc.).

Como primera actividad se consideró la puesta en marcha del sistema de infiltración, junto con los equipos de medición y de telemetría. Para lo cual se realizaron una serie de pruebas de corta duración y de caudales pequeños. Las pruebas de infiltración se realizaron mediante un pozo de inyección y fueron 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 tuvo 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.
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. 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.
5. Reanudación de las pruebas de infiltración.

7.2.2 Descripción de las pruebas

Se realizaron 11 pruebas entre los días 28 de agosto de 2014 y 12 de octubre de 2014, donde se experimentaron distintos caudales de infiltración incluyendo caudales nulos. Previo a estas pruebas, se realizó una marcha blanca de 6 días para comprobar el funcionamiento del sistema, rangos de operación y tiempos de estabilización para los caudales de infiltración impuestos. Junto con lo anterior, se estimó que la estabilización de niveles para los caudales impuestos se obtiene aproximadamente 7 horas después de la variación de estos últimos. Los valores obtenidos en la puesta en marcha fueron variando durante el transcurso de las pruebas disminuyendo la capacidad de infiltración y aumentando los tiempos de estabilización.

En la Tabla 7-5 se presenta un resumen de cada una de las pruebas realizadas donde se incluye la fecha de inicio y término de cada prueba, el caudal de infiltración promedio utilizado y los caudales de infiltración máximos y mínimos alcanzados durante la prueba. El volumen total infiltrado durante las pruebas fue de 3.217 m³. En algunas de las pruebas

(9 y 11) se imponen caudales nulos, los que sirven para determinar recuperación en el sistema y las respuestas del acuífero al volver a infiltrar.

Junto con lo anterior, en la Figura 7-7 se presenta un gráfico con los caudales infiltrados a través del tiempo. Se puede apreciar que las variaciones experimentadas dentro de cada prueba son importantes y responden entre otros factores a las variaciones observadas en el canal que alimenta el sistema. A pesar de ello, se logra realizar experiencias dentro de todo el rango posible de caudales.

Tabla 7-5: Resumen Pruebas de Infiltración

Prueba	Fecha Inicio	Fecha Término	Promedio de Caudal (L/s)	Máximo Caudal (L/s)	Mínimo Caudal (L/s)
P01	28/08/2014	30/08/2014	1,08	1,26	0,94
P02	30/08/2014	02/09/2014	1,01	1,38	0,84
P03	02/09/2014	04/09/2014	1,17	1,32	0,92
P04	04/09/2014	06/09/2014	1,64	2,09	1,34
P05	06/09/2014	08/09/2014	2,08	2,53	1,70
P06	08/09/2014	11/09/2014	1,26	1,50	1,02
P07	11/09/2014	14/09/2014	1,77	2,38	1,19
P08	14/09/2014	18/09/2014	2,27	3,26	1,92
P09	20/09/2014	23/09/2014	0,00	0,01	0,00
P10	23/09/2014	28/09/2014	0,82	2,31	0,54
P11	28/09/2014	09/10/2014	0,00	0,01	0,00

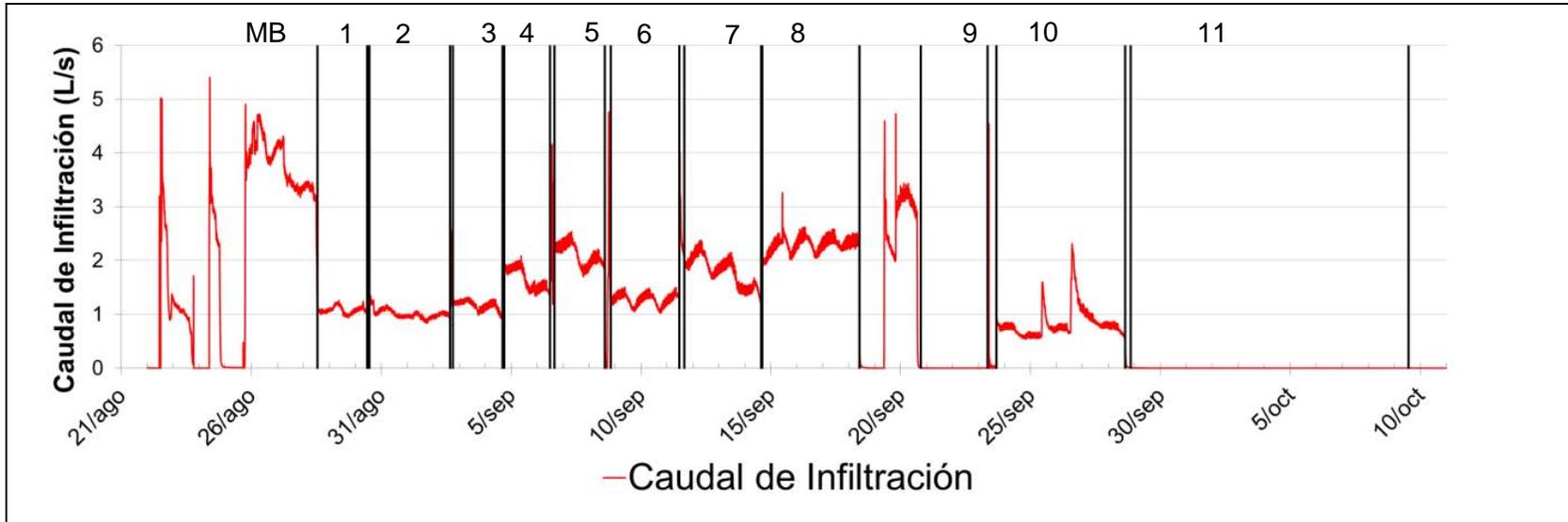
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 7-7 también se puede apreciar cierta oscilación de los caudales, de periodo aproximado de 24 horas lo que se puede explicar por las variaciones que presenta el uso de las aguas entre el día y la noche, en que probablemente las labores de riego se desarrollen de manera diurna y exista una menor disponibilidad de agua en esta parte del día. Entre las pruebas 8 y 9 se verifica que el caudal máximo de infiltración bajó a 3,2 L/s. Se debe notar que en el gráfico aparecen algunos valores puntuales mayores a los caudales máximos individualizados.

Estos valores en general se producen en periodos de ajuste en que las lecturas de ambos vertederos no están estabilizadas y el pozo aún no ha alcanzado la superficie. Lo anterior produce que la resta de las lecturas arroje valores mayores a los reales durante estos casos puntuales. Los cálculos presentados en Tabla 7-5 no consideran estos valores transientes.

La asociación de canalistas indicó expresamente que se debía infiltrar la totalidad del caudal extraído del canal y no operar con rebose. Por lo anterior, se optó por no realizar pruebas con los caudales máximos de infiltración debido al riesgo de perder agua por el canal de rebase.

Figura 7-7: Caudales Pruebas de Infiltración

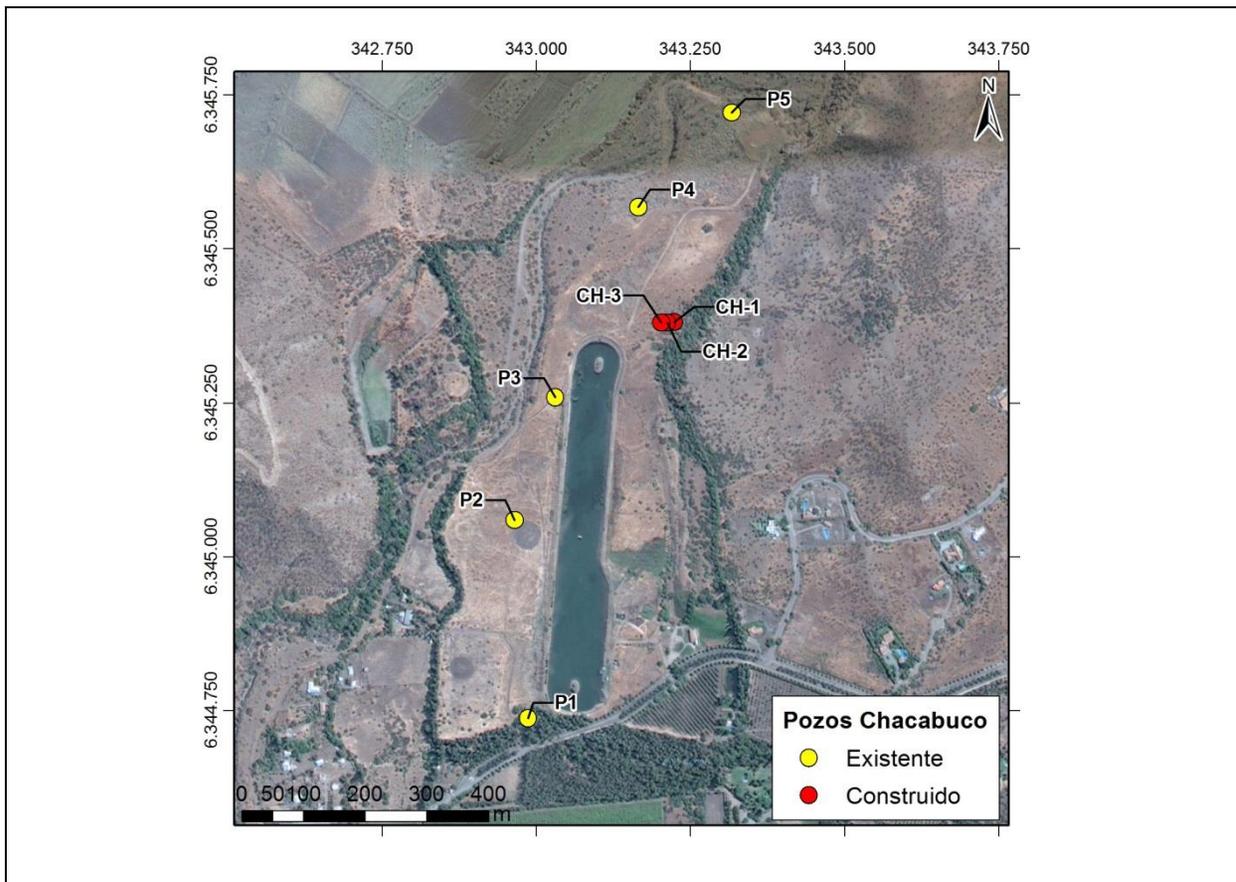


Fuente. Elaboración propia

7.2.3 Caudal de infiltración y análisis de niveles

En primer lugar se presenta el registro efectuado durante el transcurso del proyecto que incluye pozos cercanos a los pozos de infiltración y observación construidos. El registro cuenta con 5 pozos (P1, P2, P3, P4 y P5) en que 2 de ellos (P2 y P3) funcionan como pozos de bombeo. En la Figura 7-8 se presenta la ubicación de cada uno de los pozos y en la Figura 7-9, la evolución de los niveles de los pozos que no son de bombeo.

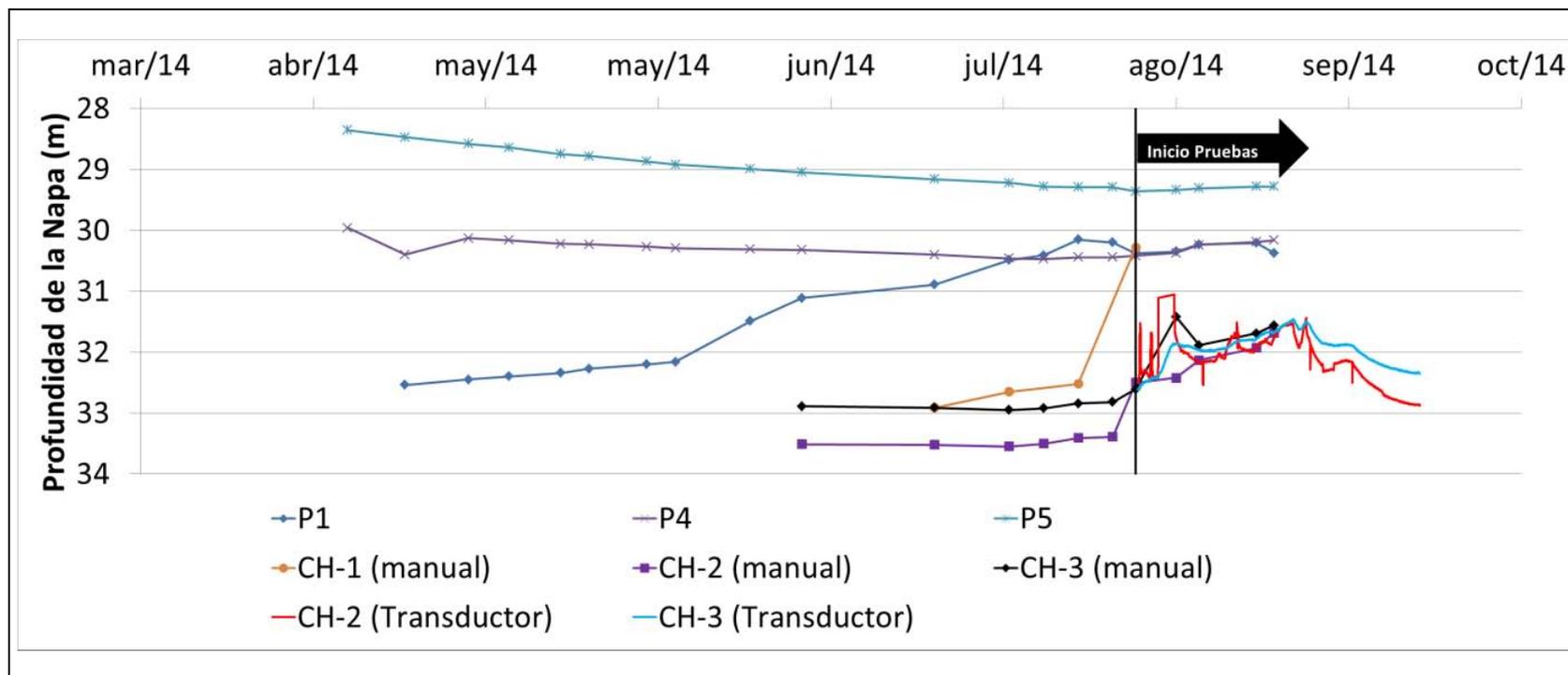
Figura 7-8: Ubicación Pozos en zona de Estudio



Fuente. Elaboración propia

La tendencia que muestran los pozos construidos CH-02 y CH-03 (Figura 7-9) sugiere que el comportamiento de ellos es similar a los pozos P4 y P5, los cuales al inicio del registro (abril) presentan un descenso sostenido que comienza a estabilizarse a partir de julio, debido probablemente a la partida del funcionamiento del canal. Lo anterior, debe ser considerado en el análisis de impacto en los pozos de observación al que se le restaron las variaciones naturales que presenta el acuífero (pozo P4). Para el caso del pozo CH-01, estas variaciones son despreciables.

Figura 7-9: Evolución de Niveles Pozos Zona de Estudio



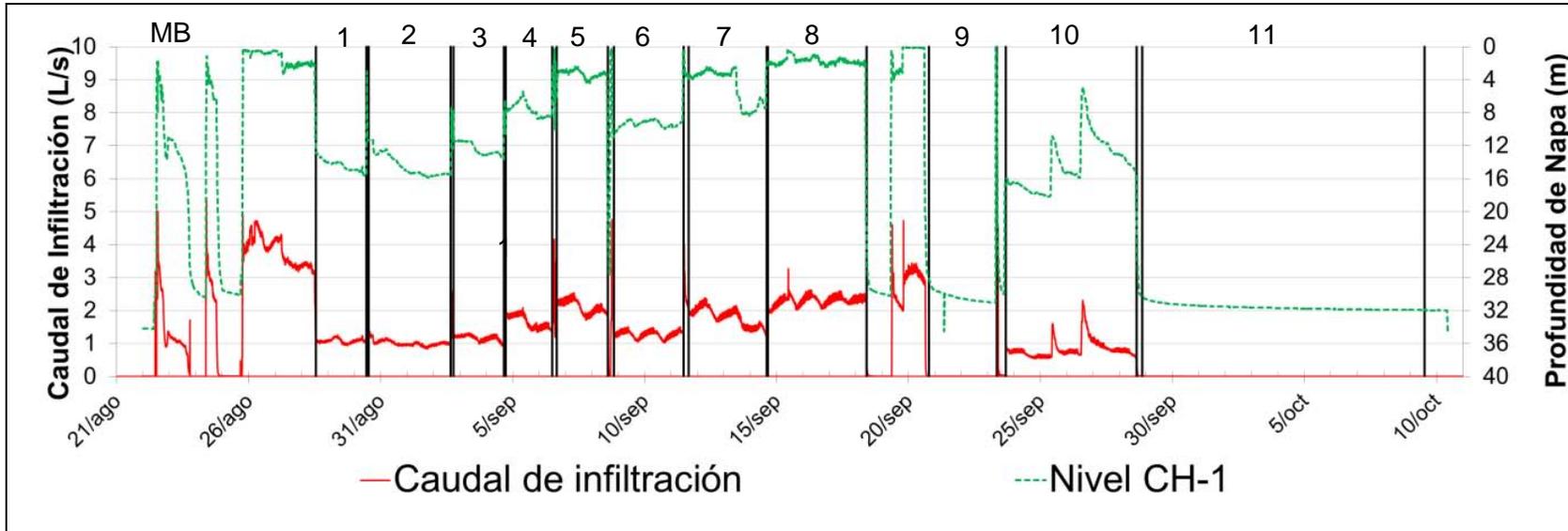
Fuente. Elaboración propia

Los niveles se analizan para los pozos CH-01 (pozo de infiltración), CH-02 y CH-03 en donde se instalaron transductores de presión que registraron los niveles cada 10 minutos. Cada uno de los niveles presentados fue corregido de acuerdo a las variaciones que presentó el pozo P4 durante las pruebas con el objetivo de visualizar sólo los efectos de la infiltración. Notar que las escalas presentadas en cada uno de los pozos varían para observar mejor los rangos de variación de cada pozo. Estos rangos de variación distintos responden al comportamiento radial que produce la inyección o bombeo en un punto en particular. Las observaciones realizadas a mayor distancia del punto de inyección presentan menores variaciones.

De acuerdo a lo anterior, el pozo de inyección es el que presenta la mayor variación de niveles con respecto a los caudales inyectados. Las características hidráulicas del acuífero condicionan estos aumentos de altura en el pozo con respecto al caudal infiltrado. Esta relación entre caudal-altura podría variar en el tiempo si las características hidráulicas cambian. En la Figura 7-10 se presentan los niveles del pozo de CH-01 que es el pozo de infiltración donde se aprecia una clara dependencia entre los niveles desarrollados y las variaciones en caudal. En particular se aprecia la disminución de la capacidad de infiltración en el tiempo al comparar los valores alcanzados en la marcha blanca y en la prueba N°8. En esta última se alcanzan ascensos similares que en la marcha blanca, pero con un caudal considerablemente menor.

Los máximos ascensos logrados fueron alcanzados cuando se sobrepasa el nivel de terreno, es decir se forma una columna de 30,28 m sobre el nivel inicial. Antes de comenzar las pruebas la profundidad inicial se registró a los 30,28 m de profundidad y al final de la prueba 11 el nivel de estabilización llegó hasta cerca de los 32 m de profundidad. Por lo tanto, el nivel del acuífero descendió alrededor de 1,7 m durante el transcurso de las pruebas. Este descenso responde a la tendencia natural del sitio, adicional a la corrección realizada con el pozo P4, y no es atribuible a las pruebas realizadas ya que éstas provocarían el efecto contrario.

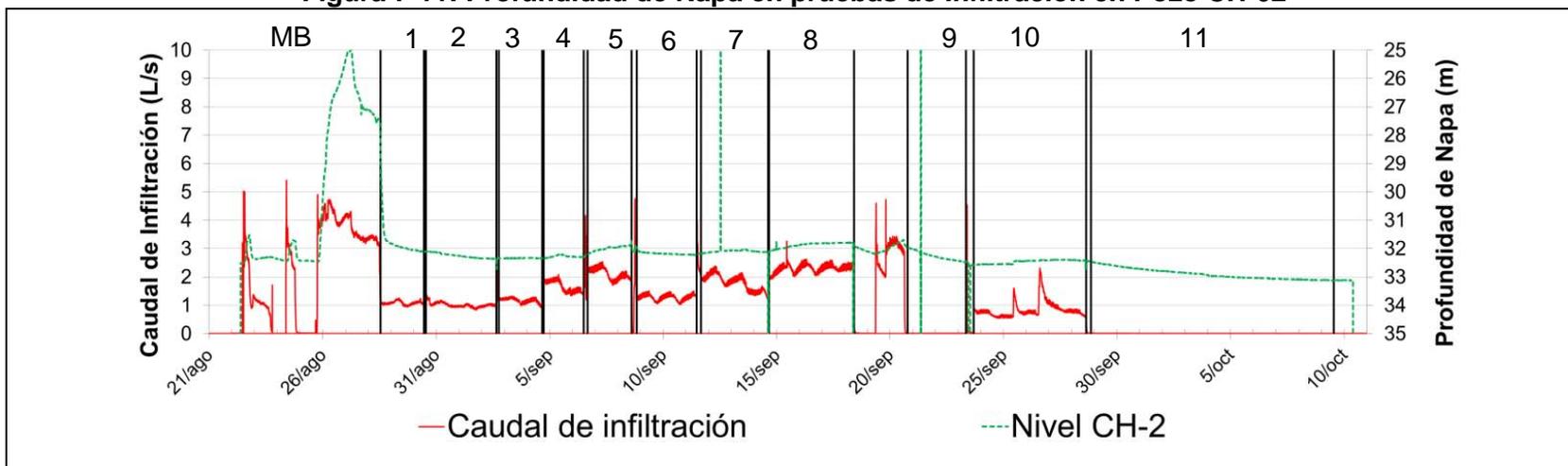
Figura 7-10: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-01 (infiltración)



Fuente. Elaboración propia

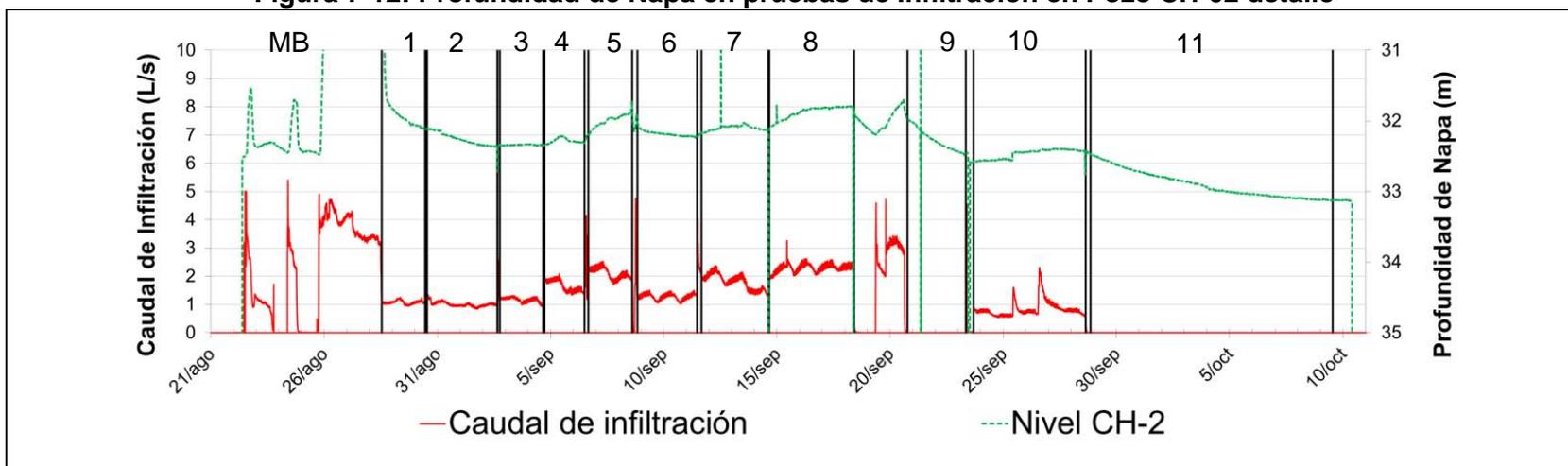
Para el caso del pozo CH-02, que se encuentra a 11 m del pozo de infiltración, se presentan los niveles en Figura 7-11. Este pozo presenta un ascenso de 8 m durante la marcha blanca del sistema cuando se establecen infiltraciones continuas de más de 3 L/s. Este tipo de ascenso no se vuelve a repetir y sólo se producen subidas de nivel por debajo de 1 m durante el resto de las pruebas. Por esta razón se presenta la Figura 7-12 donde se cambia la escala de visualización para ver en mayor detalle los ascensos experimentados en las pruebas. Resulta evidente que la respuesta de este pozo a las variaciones de infiltraciones es sustancialmente menor en magnitud y además se manifiesta de manera retardada. Este último aspecto (demora en la respuesta ante variaciones de caudal) se aprecia al comparar ambos pozos en las pruebas 1, 2 y 3, además de las pruebas donde se impone caudal nulo, en que en todas ellas la estabilización se alcanza antes en el pozo CH-01 que en el pozo CH-02.

Figura 7-11: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02



Fuente. Elaboración propia

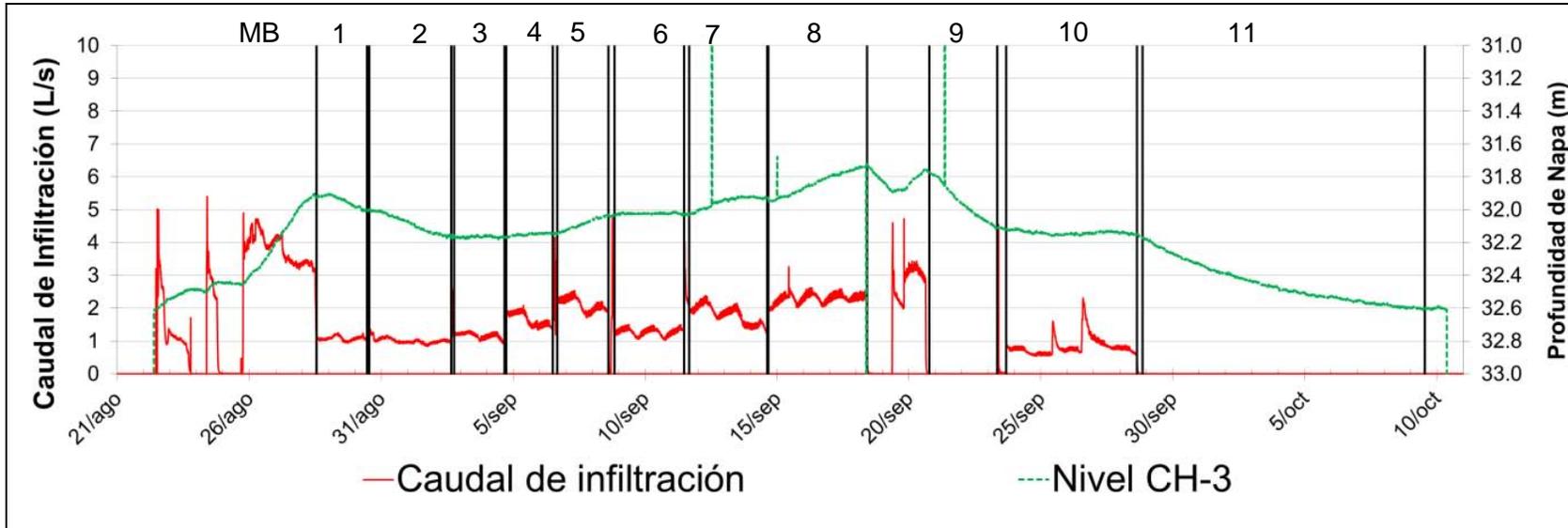
Figura 7-12: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-02 detalle



Fuente. Elaboración propia

Para el caso del pozo CH-03 que se encuentra a 21 m del pozo de infiltración se reducen aún más los ascensos provocados por las infiltraciones realizadas en el pozo CH-01. Junto con lo anterior se aumenta el retardo en la estabilización de los niveles. En general se aprecia un solo gran pulso provocado por la totalidad de las pruebas de infiltración en que existen pequeños cambios de pendiente o descensos en cada una de las variaciones realizadas. La variación máxima con respecto al nivel inicial es de 1 m.

Figura 7-13: Profundidad de Napa en pruebas de Infiltración en Pozo CH-03



Fuente. Elaboración propia

Como se enuncia en la explicación de los niveles del pozo CH-01, se aprecia una reducción en la capacidad de infiltración que se traduce en que a lo largo de la prueba el acuífero presenta ascensos mayores para los mismos caudales infiltrados.

Se realizó el ejercicio de calcular los cociente entre el ascenso desarrollado y el caudal de infiltración a lo largo del tiempo los cuales se exponen en la

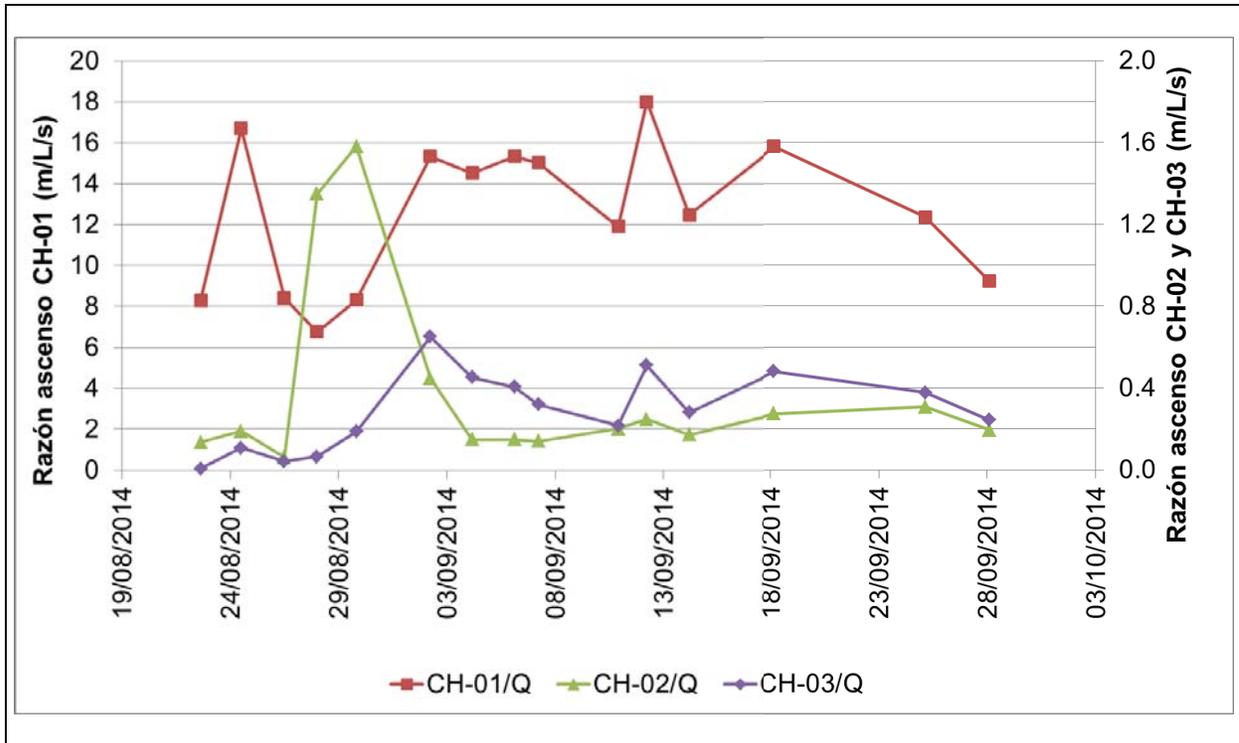
Tabla 7-6 y en Figura 7-14. El ejercicio se realiza en momentos en que se ha logrado la estabilización de los niveles para el pozo CH-01. De acuerdo al gráfico, se aprecia un comportamiento similar entre CH-01 y CH-03 lo que sugiere un grado de conexión entre ellos mayor que al que puedan tener con el CH-02. En tanto que claramente los valores son distintos con CH-01 que parte con un valor de 8,3 m/L/s y alcanza valores de hasta 18 L/s/m. En tanto que CH-02 y CH-03 presentan valores bajo 0,8 m/L/s la mayor parte del tiempo.

Como se verá más adelante los valores de turbidez que presentan las aguas de infiltración son bastante bajos. Sin embargo, estas aguas pueden haber producido un grado de colmatación que explique la disminución en la capacidad de infiltración detectada. Otra explicación es la humectación de contenido arcilloso el cual produzca una disminución en la conductividad hidráulica.

Tabla 7-6: Razón ascenso caudal

Fecha	Q (L/s)	Delta h/Q (m/L/s)		
		CH-01/Q	CH-02/Q	CH-03/Q
22/08/2014	3,22	8,3	0,1	0,0
24/08/2014	3,13	16,7	0,2	0,1
26/08/2014	4,37	8,4	0,1	0,0
27/08/2014	3,38	6,8	1,3	0,1
29/08/2014	1,00	8,3	1,6	0,2
02/09/2014	1,02	15,3	0,4	0,7
04/09/2014	1,13	14,5	0,1	0,5
06/09/2014	1,44	15,3	0,1	0,4
07/09/2014	2,31	15,0	0,1	0,3
10/09/2014	1,14	11,9	0,2	0,2
12/09/2014	2,18	18,0	0,2	0,5
14/09/2014	1,42	12,5	0,2	0,3
18/09/2014	2,29	15,8	0,3	0,5
25/09/2014	0,60	12,4	0,3	0,4
28/09/2014	0,85	9,2	0,2	0,2

Figura 7-14: Gráfico razón ascenso caudal



Fuente. Elaboración propia

7.2.4 Calidad química

En el presente capítulo corresponde a un análisis temporal de la evolución de la calidad química de las aguas subterráneas, cuyo acuífero fue objeto de infiltración, con el propósito de evaluar la afección de éste último. Con este fin, se comparan 3 sets de parámetros en distintos puntos a lo largo del tiempo.

El análisis se realizó según 3 criterios: 1) parámetros físico-químicos, 2) parámetros relevantes y normados 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 7-7. Su ubicación geográfica se presenta en la Figura 7-15.

Tabla 7-7: Puntos de muestreo Chacabuco

Punto de muestreo		ID	Tipo de muestra	Tipo de muestreo
Pozo de observación 1	CH-02	PO-01	Agua subterránea	Set B PFQ
Pozo de	CH-03	PO-02	Agua subterránea	PFQ

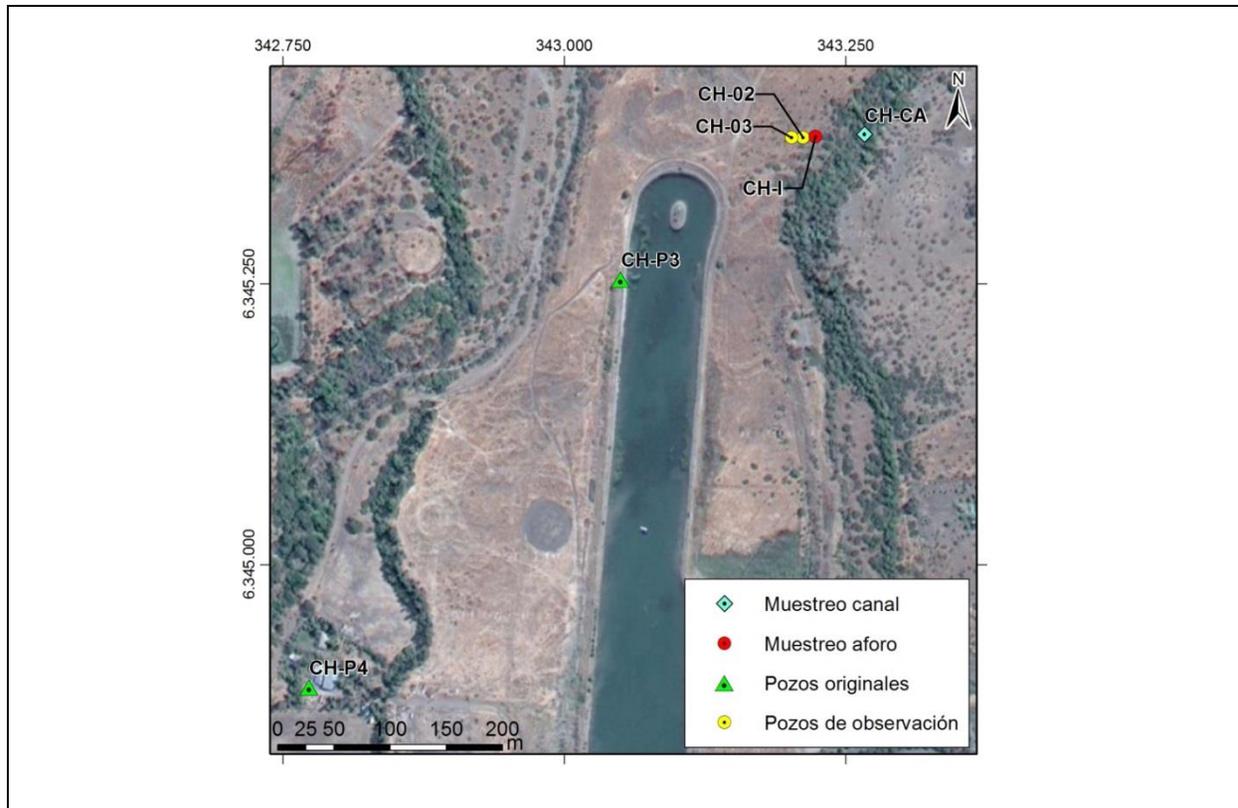
Tabla 7-7: Puntos de muestreo Chacabuco

Punto de muestreo		ID	Tipo de muestra	Tipo de muestreo
observación 2				
Canal alimentador	canal del que se extraen las aguas para alimentar el sistema de infiltración	LO-CA	Agua superficial	PFQ
Agua a infiltrar	ubicada en el cajón aforador, justo antes de entrar al pozo de infiltración	CH-I	Agua superficial	Set B PFQ

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

Los pozos CH-P3 y CH-P4 (nomenclatura distinta al acápite anterior), son pozos que originalmente se encontraban dentro del predio. Estos pozos dan cuenta de la composición de las aguas original del acuífero en el área de estudio.

Figura 7-15: Ubicación Puntos de Muestreo



Fuente. Elaboración propia

7.2.4.1 Parámetros físico-químicos

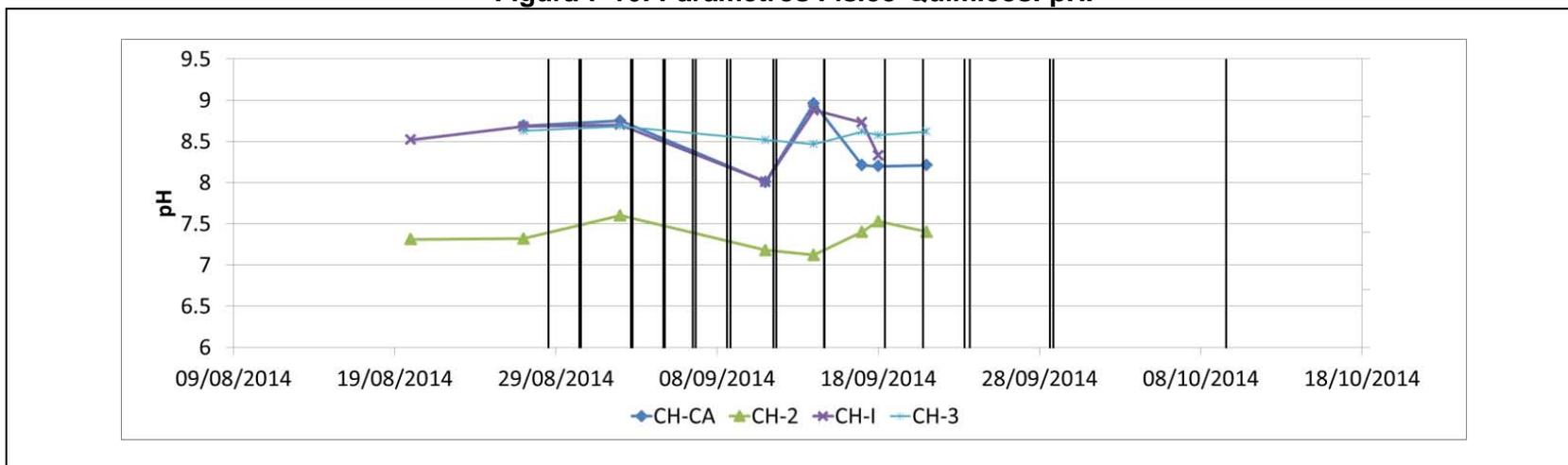
Los parámetros físico-químicos fueron medidos periódicamente, incluyendo pH, conductividad y temperatura (T°). Junto con ellos se midió de manera continua la turbidez de las aguas ya que constituye una variable crítica para el buen funcionamiento de los sistemas de infiltración. Los parámetros descritos se presentan en Figura 7-16, Figura 7-17 y Figura 7-18. En la Tabla 7-8 se presentan las fechas de la medición de parámetros y sus respectivos resultados.

Tabla 7-8: Resumen de medición de parámetros físico-químicos

Punto de Muestreo	Fecha	Temperatura (°C)	valor pH	Cond. (ms/cm)	TDS (ppm)
CH-I	20/08/2014	14,7	8,52	0,37	190
CH-I	27/08/2014	10,9	8,68	0,36	170
CH-I	02/09/2014	13,2	8,7	0,46	230
CH-I	11/09/2014	10,6	8,01	0,32	160
CH-I	14/09/2014	16,1	8,88	0,34	170
CH-I	17/09/2014	12,6	8,73	0,32	150
CH-I	18/09/2014	11,8	8,33	0,41	410
CH-I	21/09/2014	12,6	8,73	0,32	150
CH-02	20/08/2014	19,7	7,31	0,89	450
CH-02	27/08/2014	15,5	7,32	0,44	220
CH-02	02/09/2014	15,5	7,6	0,44	220
CH-02	11/09/2014	19,3	7,18	0,44	220
CH-02	14/09/2014	19,2	7,12	0,34	170
CH-02	17/09/2014	14,8	7,4	0,3	150
CH-02	18/09/2014	13,7	7,53	0,32	160
CH-02	21/09/2014	14,8	7,4	0,3	150
CH-CA	27/08/2014	11,4	8,69	0,35	180
CH-CA	02/09/2014	14,7	8,75	0,39	200
CH-CA	11/09/2014	10,6	8,01	0,35	170
CH-CA	14/09/2014	18,6	8,96	0,59	240
CH-CA	17/09/2014	10,5	8,21	1,3	670
CH-CA	18/09/2014	12,12	8,2	0,84	410
CH-CA	21/09/2014	10,5	8,21	1,3	670
CH-03	27/08/2014	18,5	7,51	0,67	330
CH-03	02/09/2014	17,2	7,67	0,68	340
CH-03	11/09/2014	20,7	7,19	0,6	300
CH-03	14/09/2014	17,3	7,05	0,58	280
CH-03	17/09/2014	17	7,48	0,46	230
CH-03	18/09/2014	17,4	7,36	0,49	250
CH-03	21/09/2014	17	7,48	0,46	230

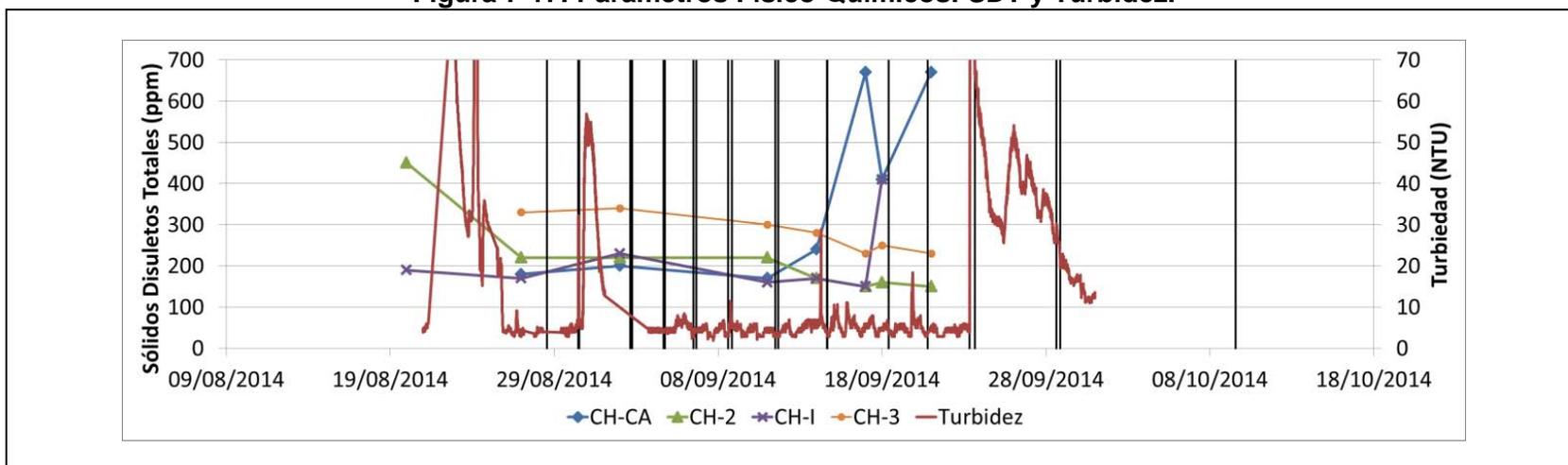
A continuación se presenta la evolución en el tiempo de estos parámetros, contrastando la etapa previa, durante y posterior a las pruebas de infiltración.

Figura 7-16: Parámetros Físico-Químicos: pH.



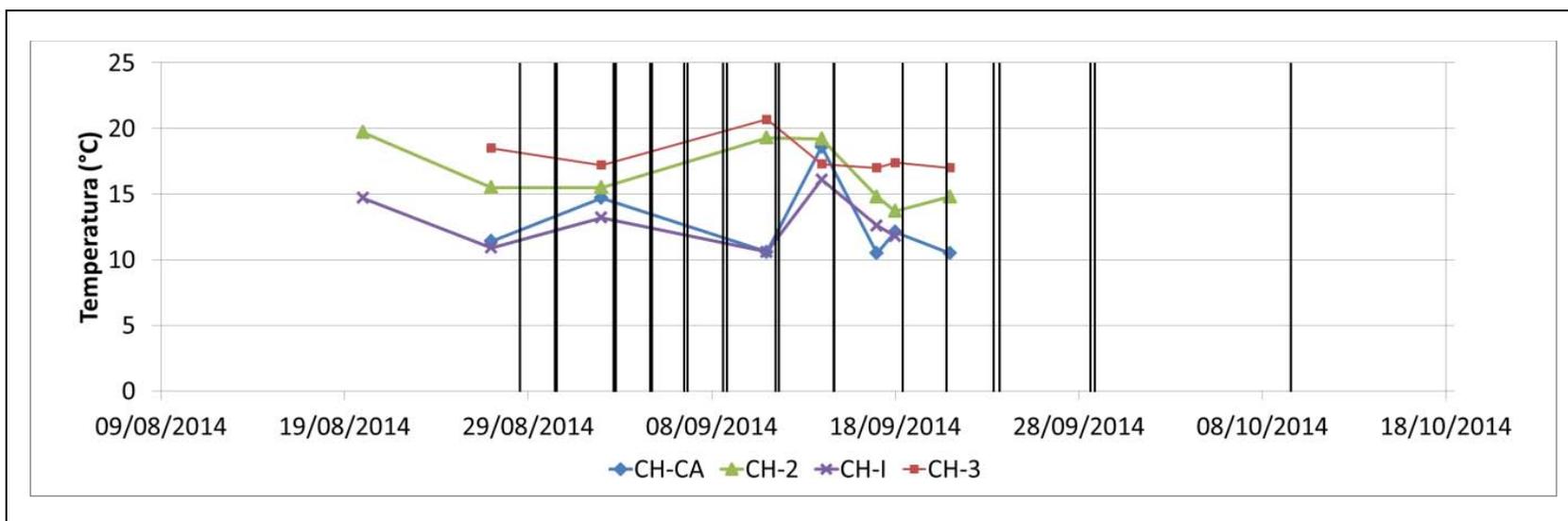
Fuente. Elaboración propia

Figura 7-17: Parámetros Físico-Químicos: SDT y Turbidez.



Fuente. Elaboración propia

Figura 7-18: Parámetros Físico-Químicos: Temperatura.



Fuente. Elaboración propia

Al observar la evolución del pH (Figura 7-16) se aprecia que las aguas a infiltrar son una unidad mayor que las aguas subterráneas. Esta diferencia prevalece en el tiempo. Se puede observar también que las aguas del canal son muy similares a las aguas de infiltración CH-I lo cual se explica debido a que son las mismas aguas y no se realizó mezcla con aguas subterráneas. No se observan variaciones claras en las aguas subterráneas (CH-02) atribuibles a las pruebas de infiltración. El pozo CH-03 presenta valores mayores de pH con respecto a CH-02 de aproximadamente 1 unidad, sin embargo las variaciones son muy similares.

En cuanto a la turbidez (Figura 7-17), se observa que la mayor parte del tiempo se encuentra bajo los 10 NTU. Sólo hubo tres episodios en que se sobrepasa este valor, y de acuerdo a las asociaciones de regantes esto ocurre por un cambio en la fuente del canal, que pasa desde aguas lluvias recolectadas por el canal, a aguas de deshielos provenientes del río Aconcagua, la que trae mayor cantidad de sólidos en suspensión. Sólo en la prueba N°11 se decidió detener la prueba, debido a que el valor de turbidez se mantuvo por sobre el umbral de manera sostenida (Figura 7-17), en las dos restantes el aumento de turbidez fue puntual y disminuyó rápidamente, por lo que decidió no detener la prueba, dado que el riesgo de afectación al pozo es mínimo.

En la misma Figura 7-17 se presentan los valores de sólidos disueltos, los cuales resultan ser parecidos entre CH-CA, CH-I y CH-02 con valores cercanos a los 200 ppm. Sólo el pozo CH-03 presenta valores mayores cercanos a 300 ppm, sin embargo la variación en el tiempo es parecida al pozo CH-02. Existieron algunos valores en el canal que fueron más elevados durante las pruebas, sin embargo estos episodios no se observan en las mediciones de turbidez, debido que el agua previamente a llegar al punto de medición de turbidez pasa por un sedimentador.

Los valores de temperatura (Figura 7-18) también resultan ser parecidos y en torno a los 15°C. Sin embargo, los pozos CH-02 y CH-03 presentan valores cerca de un grado mayor a las aguas superficiales. Esto podría cambiar en épocas más templadas invirtiéndose la relación en donde las aguas superficiales deberían presentar mayor temperatura que las aguas subterráneas.

7.2.4.2 Parámetros relevantes y normados

Los parámetros relevantes y normados corresponden a DQO, nitratos, sulfatos, sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales.

En Tabla 7-9 se puede apreciar en primer lugar los valores de DQO, que dan cuenta del contenido de materia orgánica presente en las aguas. Para este parámetro las muestras de aguas subterráneas, las aguas del canal y de las aguas de infiltración presentan un contenido bajo el límite de detección para este parámetro. Esto último, sugiere que las aguas de alimentación son bastante limpias.

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 CH-02 por lo que este pozo podría estar menos afectado a la actividad agropecuaria. Por otra parte, las aguas del canal presentan concentraciones bajas de nitrato. Durante la operación del sistema de recarga artificial no se aprecian cambios considerables de este parámetro y los valores en CH-02 y CH-I resultan ser bajos.

El contenido de sulfato es el único parámetro que podría acusar cierta variación en la calidad química producto de las infiltraciones. El pozo CH-P4 presenta una concentración por sobre los 200 mg/L en el acuífero como también el pozo CH-02 antes de las pruebas de infiltración. En tanto que las concentraciones del canal, tanto en las muestras tomadas en marzo como en las realizadas antes y durante las pruebas (CH-I), son relativamente bajas respecto de las aguas subterráneas. Estos valores menores pueden haber bajado la concentración del CH-02 (durante las pruebas) producto de la mezcla o desplazamiento de las aguas. Esta hipótesis se contrapone con las mediciones en el pozo CH-P3 que da cuenta de concentraciones bajas en el acuífero, por lo que las variaciones podrían también deberse a variaciones estacionales o según la ubicación de los pozos en el área de estudio.

Los valores medidos de sólidos suspendidos muestran concentraciones bajas en el acuífero según lo que se puede apreciar en los pozos CH-P3 y CH-P4. Las concentraciones del canal, tanto en las mediciones de marzo como en las más recientes, son relativamente bajas con valores por debajo de los 70 mg/L. Todo esto se contrapone a las concentraciones encontradas en el pozo CH-02 que se ubican por sobre los 400 mg/L lo que puede estar dado por remanentes de la perforación que no pudieron ser evacuados durante el desarrollo del pozo y las pruebas posteriores.

Por último, al observar los coliformes fecales, se aprecia que los únicos valores de consideración son los que presenta el mismo punto CH-I, alcanzando 7.000 NMP/100ml. Este contenido de coliformes se atenúa al entrar al acuífero, encontrando solo 4 NMP/100ml en la muestra CH-02.

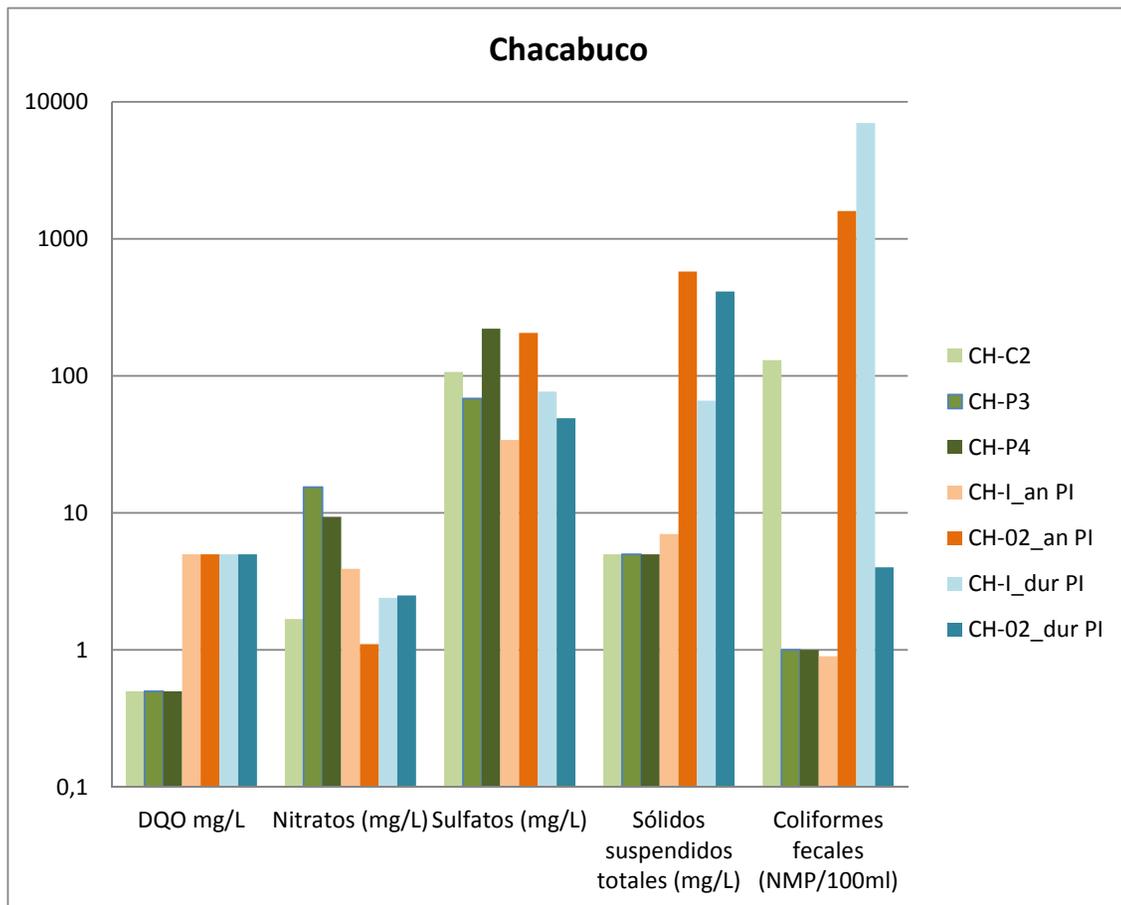
El resultado del análisis de todos los analitos, incluidos en el Set B, fue realizado por el laboratorio ALS, y se presenta en el Anexo P.

Tabla 7-9: Analitos de Interés Pruebas de Infiltración

ID. muestra	Antes de realizar Pruebas de Infiltración (Set A)					Durante las Pruebas de Infiltración (Set B)	
	CH-C2	CH-P3	CH-P4	CH-I	CH-O2	CH-I	CH-O2
Fecha de muestreo	13/03/2014	13/03/2014	13/03/2014	20/08/2014	20/08/2014	23/09/2014	23/09/2014
DQO mg/L	<1	<1	<1	< 10	< 10	< 10	< 10
Nitratos (mg/L)	1,68	15,4	9,35	3,9	1,1	2,4	2,5
Sulfatos (mg/L)	106,7	68,4	221,5	34	206	77	49
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	< 10	< 10	< 10	7	577	66	414
Coliformes fecales (NMP/100ml)	130	< 2	< 2	0,9	1600	7000	4

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7-19: Parámetros relevantes y normados de interés para pruebas de infiltración.

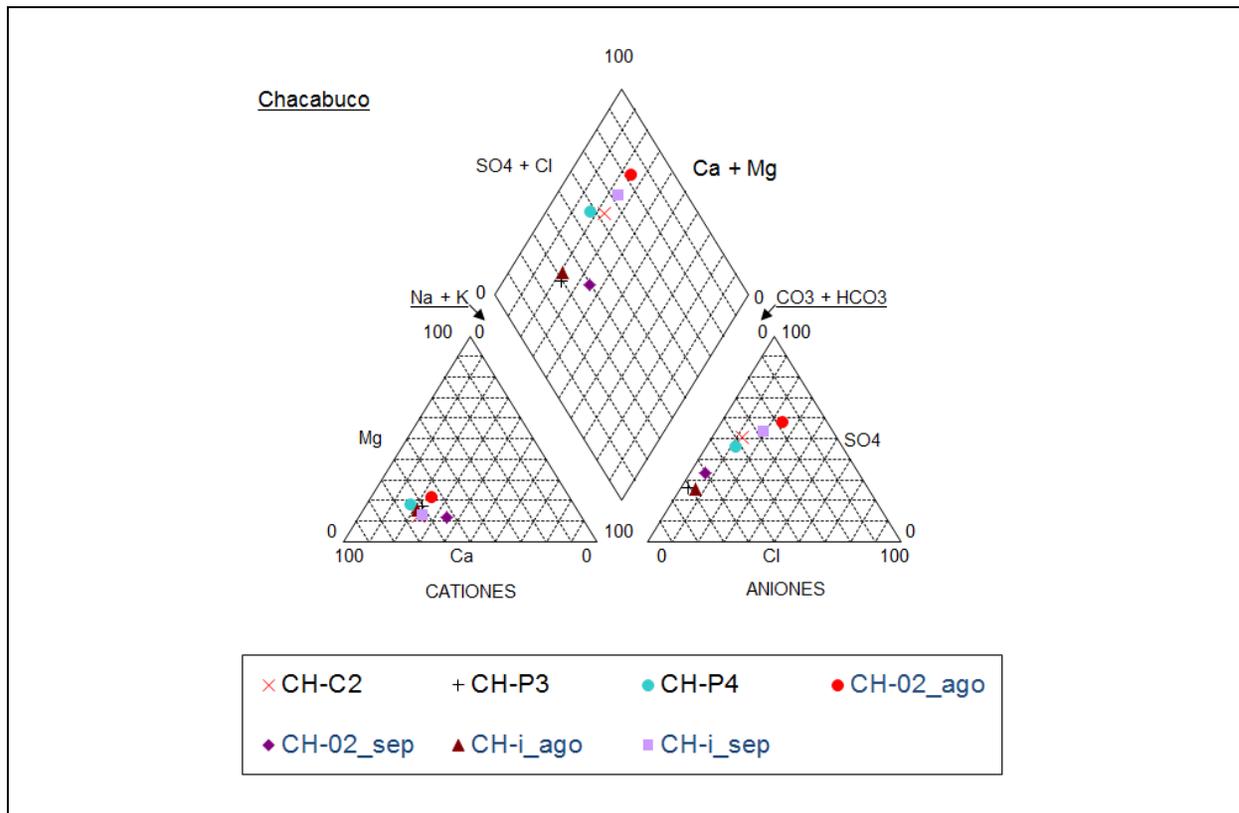


Fuente: Elaboración propia.

7.2.4.3 Composición química

Al analizar el diagrama de piper (Figura 7-20) se aprecia que con respecto a los cationes las aguas son similares con una clara signatura cálcica. Por el contrario, al analizar los aniones se observa que éstos fluctúan entre una predominancia sulfatada y bicarbonatada. En particular se destaca mediante flechas en la Figura 7-20 la evolución de los aniones con respecto a antes y durante las infiltraciones en las muestras CH-I y CH-02. En estas últimas se observa una variación de predominancia aniónica de sulfatada a bicarbonatada. Por otra parte, las aguas de infiltración (CH-I) también varían su predominancia aniónica, pero en el sentido contrario. Las muestras tomadas en marzo presentan un grado similar de variación en su predominancia aniónica presentando. En particular las muestras de aguas subterráneas CH-P3 y CH-P4 resultan ser distintas, en donde la primera es bicarbonatada y la segunda sulfatada. Por lo anterior, no se puede asegurar que los cambios de predominancia en el pozo de observación CH-02 sean producto de las infiltraciones realizadas. En la Tabla 7-10 se presentan las concentraciones utilizadas para construir el diagrama de piper

Figura 7-20: Diagrama de Piper



Fuente. Elaboración propia

Tabla 7-10: Principales Iones Analizados

Pozo	CH-02_ago	CH-02_sep	CH-i_ago	CH-i_sep	CH-C2	CH-P3	CH-P4
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Cl-	64.10	6.90	5.90	20.00	19.1	5.3	42.6
SO4=	206.00	49.00	34.00	77.00	106.7	68.4	221.5
HCO3-	78.69	112.30	113.93	50.00	99.5	235.4	258.0
NO3-	1.11	2.52	3.90	2.39	1.68	15.4	9.35
Na+	39.96	31.57	18.60	18.55	24.9	25.1	34.2
K+					3.08	0.01	0.03
Mg++	18.28	5.74	7.25	5.27	7.18	10.0	18.4
Ca++	77.04	41.96	47.63	41.64	59.3	58.7	108.1

En resumen, no es posible asegurar que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos sean producto de las pruebas de infiltración desarrolladas.

7.3 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.

7.3.1 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.

Las muestras obtenidas en las perforaciones y en particular la del pozo CH-03, que fue perforado con el método diamantina (lo que permite un detalle mayor en la descripción estratigráfica) sugieren la existencia de 3 unidades hidrogeológicas impermeables (UH 1, UH 3 y UH 5) que corresponden a grava gruesa con 30% de arcilla intercaladas por dos unidades permeables (UH 2 y UH 4) compuestas por grava y grava arenosa. Las unidades permeables presentan una potencia de alrededor de 11 m y 18 m para UH 2 y UH 3 respectivamente, mientras que las unidades impermeables poseen espesores de alrededor de 5 m y 3 m para las unidades UH 1 y UH 3 respectivamente. Finalmente la unidad UH 5 es de al menos 3 m de espesor (Ver Figura 7-21).

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 7-9 donde se presenta la evolución registrada en los pozos cercanos al emplazamiento de las obras de infiltración (menor que 600 m), durante el transcurso del presente estudio. Se aprecia una disminución sostenida de los niveles del acuífero desde mediados de abril hasta comienzos de agosto, esta disminución es de una magnitud que varía entre 0,5 m y 1 m para los pozos P4 y P5 respectivamente. Durante este periodo el pozo P1 incrementó su nivel casi 2,5 m, lo que no es consistente con lo observado en los pozos P4 y P5. Este comportamiento se explicaría por la influencia del ramal del canal Chacabuco, que se encuentra en la cercanía del pozo P1. A partir del inicio de las pruebas de infiltración se observa que los niveles tienden a mantenerse constantes. Por otro lado, no es posible establecer una relación clara entre los cambios en los niveles de los pozos y las precipitaciones en la zona, que de forma mayoritaria ocurrieron en la primera mitad de junio (ver sección 6.4.5). Esto se puede explicar debido a que la primera unidad hidrogeológica del suelo corresponde a una capa impermeable (UH-01), que no permitiría el ingreso directo a la napa de la precipitación que cae sobre el área de estudio.

Para facilitar el análisis del funcionamiento hidráulico, éste 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 sur. Particularmente, en el sistema de pozo de infiltración y pozos de observación se presenta el sentido hacia el suroeste, influenciado por el ramal del canal Chacabuco, que estaría recargando el sector. Estas direcciones de flujo se conservan durante el periodo en el que se desarrolló el estudio.

El comportamiento de los niveles sin recarga artificial (Figura 7-21) da cuenta de la existencia de 1 acuífero libre cuya napa se encuentra dentro de la unidad hidrogeológica UH 4. Con la información recopilada hasta el momento, no es posible afirmar que frente a un escenario de recarga importante que permitiera elevar el nivel de acuífero por sobre el estrato impermeable UH 3, se generaría un acuífero colgado y las características de confinamiento de la napa que normalmente se encuentra libre sin recarga artificial.

La infiltración se realizó a través del pozo de infiltración CH-01 y representa un flujo entrante hacia el acuífero, levantando los niveles en forma de cono de infiltración. Durante las pruebas de infiltración el sentido regional del flujo no varía. Como es de esperarse, el efecto se apreció en mayor medida en el pozo CH-02 (que aumenta 1,4 m aproximadamente), ya que es el más cercano al pozo de infiltración. El pozo CH-03 presenta un efecto menor (1,2 m aproximadamente) ya que se encuentra más alejada del punto de inyección.

Las aguas en el sistema presentan una composición natural del tipo cálcica, sulfatada-bicarbonatada y con conductividades eléctricas entre 0,3 y 1,3 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 no es posible asegurar que las variaciones en calidad y concentraciones encontradas en los análisis químicos sean producto de las pruebas de infiltración desarrolladas.

Las Figura 7-21 y Figura 7-22 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 7-21: Diagrama del análisis conceptual sin PPRAA

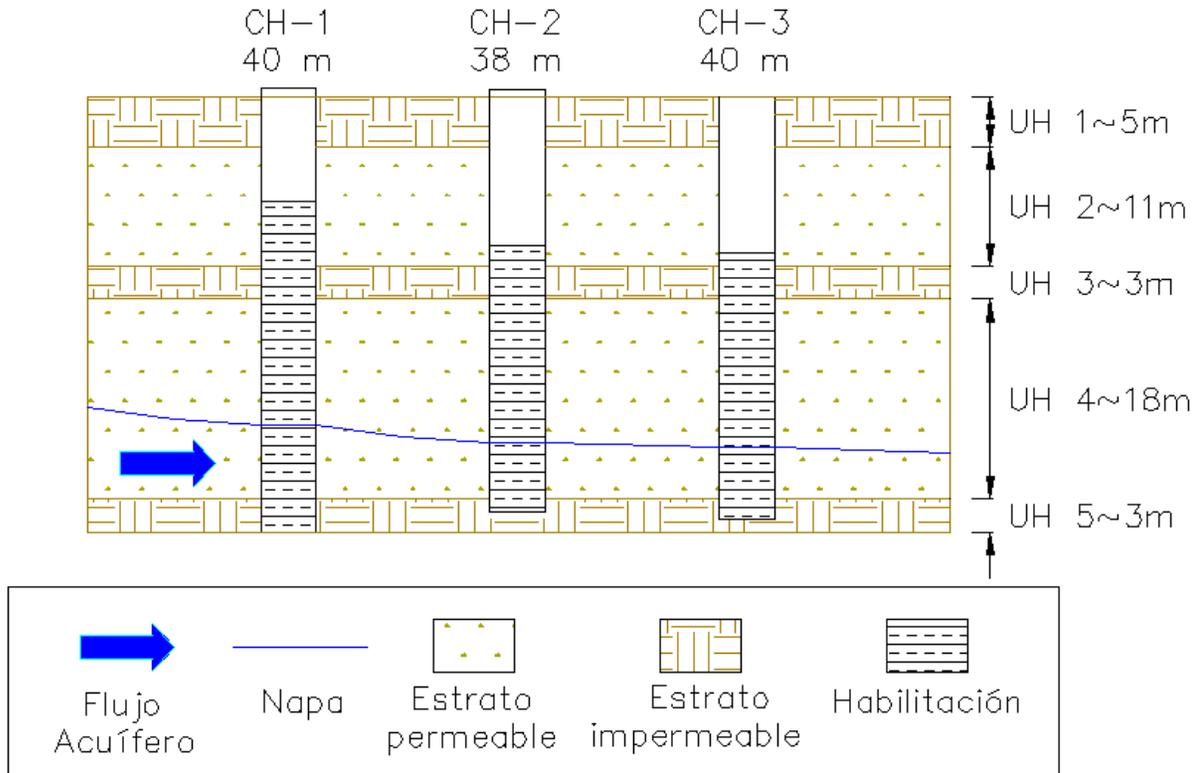
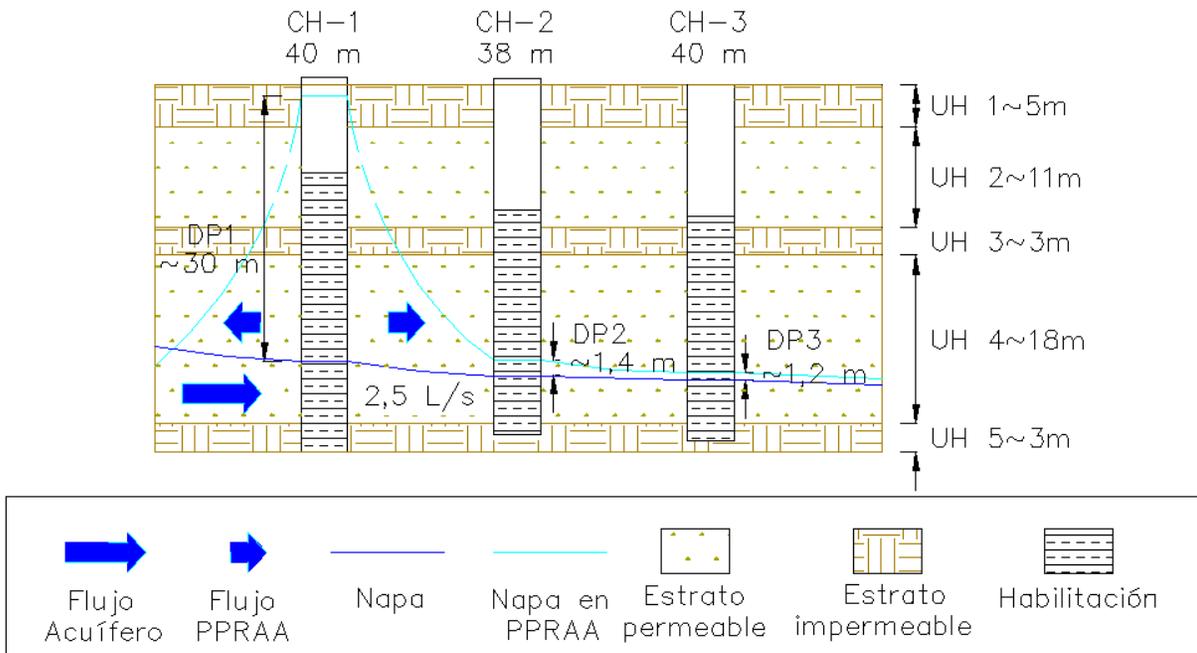


Figura 7-22: Diagrama del análisis conceptual durante las PPRAA



7.4 EFECTO PROYECTADO EN LOS 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, a través de 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, así 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.

7.4.1 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.

7.4.1.1 Discretización espacial y temporal

El dominio de modelación considera una superficie total de 644 Km², el cual fue definido considerando el límite del acuífero presentado en la Figura 3-15.

La discretización espacial en vertical considera una capa con 150 m de espesor. Las cotas de superficie de la capa se definieron a partir de la topografía disponible. La profundidad de la capa se definió considerando las características de geología de subsuperficie presentadas en el acápite 3.2.1.3, donde se menciona que el espesor del relleno sedimentario alcanzaría los 150 m. Según esto, y a modo de simplificación, las cotas de fondo de la capa se calcularon restando 150 m a la topografía disponible del área de estudio. De acuerdo a lo anterior, el dominio presenta un espesor fijo de 150 m.

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 61 filas y 66 columnas, es decir, 4.026 celdas. Posteriormente el modelo fue refinado localmente en torno a los cursos del drenaje superficial 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 37.020, de las cuales 32.079 están activas, lo que constituye un 87% de las celdas. En la Figura 7-23 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).

7.4.1.2 Propiedades hidráulicas

El modelo numérico considera dos zonas de conductividad hidráulica: la primera representa la mayor parte de la zona de estudio, con una permeabilidad horizontal de 5 m/d, que proviene de lo reportado en la evaluación de la metodología para identificar las posibles zonas de recarga artificial (acápite 3.5.1.1) donde se considera un único valor de permeabilidad para la zona en estudio; y la segunda zona, con una conductividad hidráulica horizontal de 0,2 m/d, que fue asignada a la parte alta de la cuenca para representar de mejor manera la variación del nivel freático. Cabe mencionar que se consideró isotropía horizontal ($K_x=K_y$) y anisotropía vertical ($K_z=K_x/10$).

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.

7.4.1.3 Condiciones de borde

En términos generales, el modelo considera el uso de tres tipos de condiciones de borde (ver Figura 7-23):

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 la información topográfica y de profundidad de la napa disponible para el área de estudio.
2. De flujo especificado: aplicada en las zonas donde no ingresa flujo al modelo (celdas inactivas y el fondo de la mono-capa) y en la zona de recarga artificial. La recarga artificial se aplica en un área de 200 x 200 m, ubicada en el sector El Colorado dentro de la zona con mayor valor de aptitud definida en la metodología (ver Figura 3-25), donde se infiltra un caudal total de 500 L/s durante 6 meses consecutivos al año.
3. Mixta: para los flujos que son dependientes del nivel de la napa se incluye una condición de borde tipo dren, que permite representar el drenaje superficial de la cuenca.

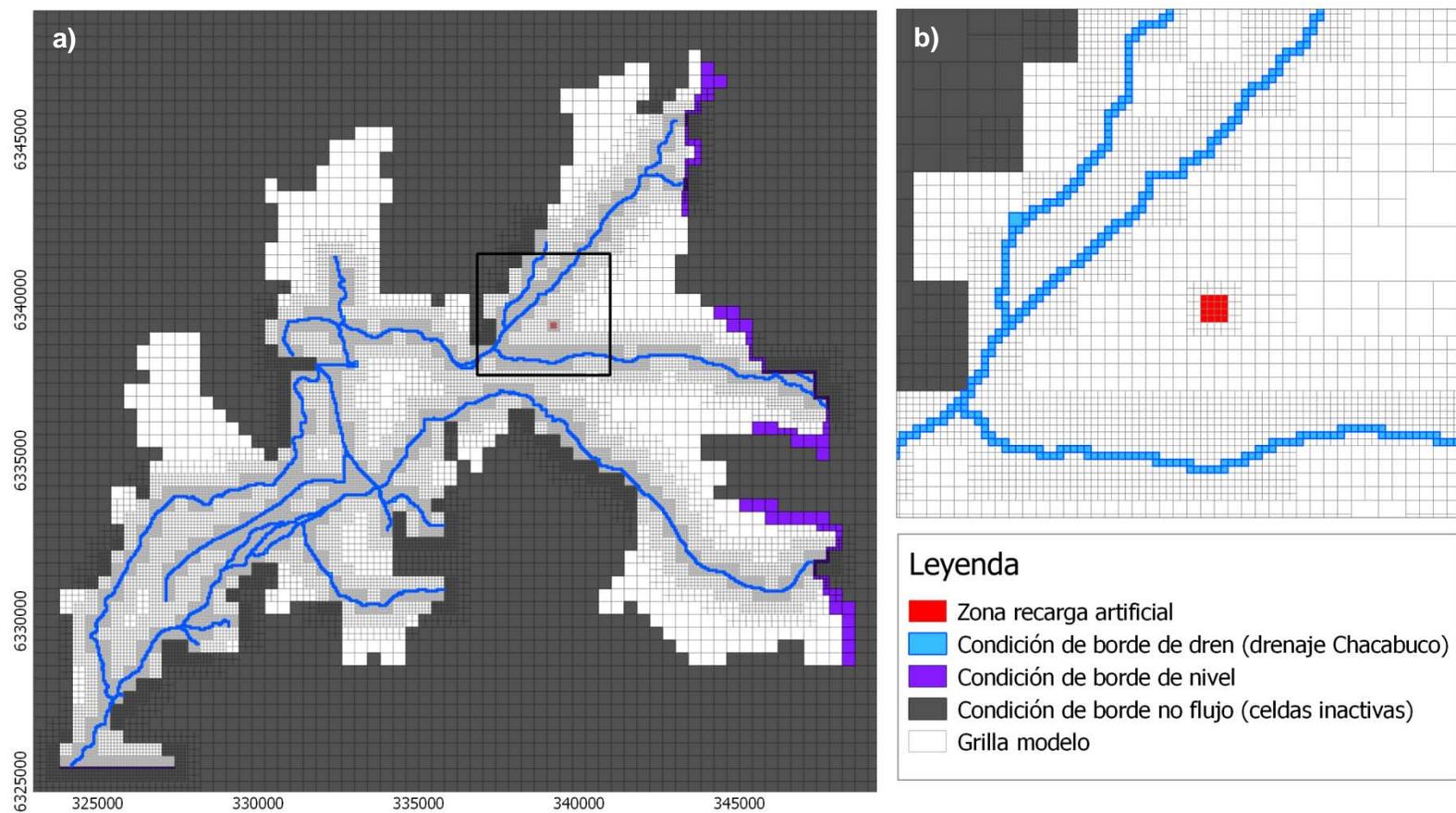
Debido a que este modelo constituye un ejercicio simplificado, no se considera la recarga superficial por precipitaciones, la recarga superficial por riego, la evaporación, la presencia de pozos de extracción, ni la red de canales de riego existente.

Se debe notar que la zona de recarga para este modelo no hace diferencia si la recarga es efectuada mediante pozos o balsas. En este mismo sentido, el modelo no considera flujo en zona no saturada y la recarga alcanza el acuífero de manera instantánea como un flujo de entrada.

7.4.1.4 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 7-23: a) Discretización espacial y condiciones de borde modelo numérico.
b) Detalle zona de recarga artificial**



7.4.2 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 500 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 a través de la red de drenaje superficial. El tiempo para el cual el drenaje capta el 10% de la recarga, es decir 50 L/s, es de 40 años.

En la Figura 7-24 a la Figura 7-26 se presentan los ascensos de nivel respecto de la condición inicial sin recarga artificial para el año 1, año 40 y año 50, para el sexto mes con recarga artificial que corresponde al momento del año con mayor ascenso de niveles. En estas figuras se observa la evolución temporal del ascenso de niveles. En la Figura 7-27 se presentan los resultados para el nivel del acuífero en el sexto mes de recarga artificial de los mismos años, en comparación con la topografía, en un perfil transversal que pasa por la zona de recarga artificial. Se observa el domo generado en los niveles en torno a la zona de recarga artificial y su evolución en el tiempo.

Se realizó también un análisis de sensibilidad observando la variación del tiempo en que los flujos hacia la red de drenaje superficial varían en 50 L/s (10% de la recarga impuesta). La sensibilidad se realizó variando el nivel de los drenes, la conductividad hidráulica del relleno, el almacenamiento y la conductancia de los drenes. En la Tabla 7-11 se presenta un resumen de resultados para todos los casos simulados, donde se observa que la variable más sensible es la conductividad hidráulica del relleno.

Tabla 7-11: Tiempo para que el 10% de la recarga sea captada por el río

Simulación	Tiempo (días)	Tiempo (años)
Caso base	14448	40
Nivel drenes _{caso base} -1 m	14267	39
$K_{\text{caso base}} \times 0,5$	N.A.	N.A. (*)
$K_{\text{caso base}} \times 2$	8121	22
$S_y = 3\%$	10676	29
$S_y = 15\%$	N.A.	N.A. (**)
Conductancia drenes _{caso base} $\times 0,1$	14114	39
Conductancia drenes _{caso base} $\times 10$	15025	41

(*) 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 22 L/s.

(**) 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 42 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 Chacabuco-Polpaico.

Figura 7-24: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 1

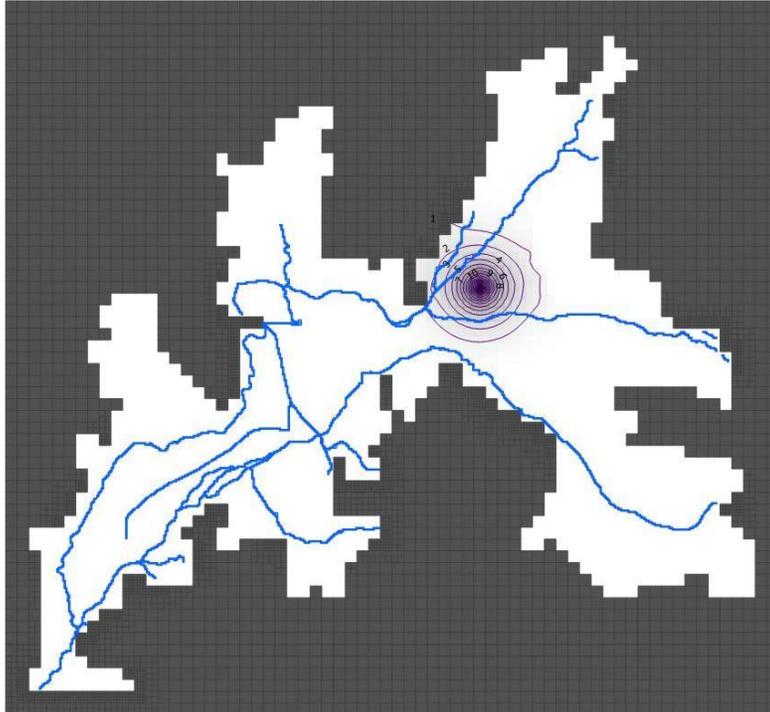


Figura 7-25: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 40

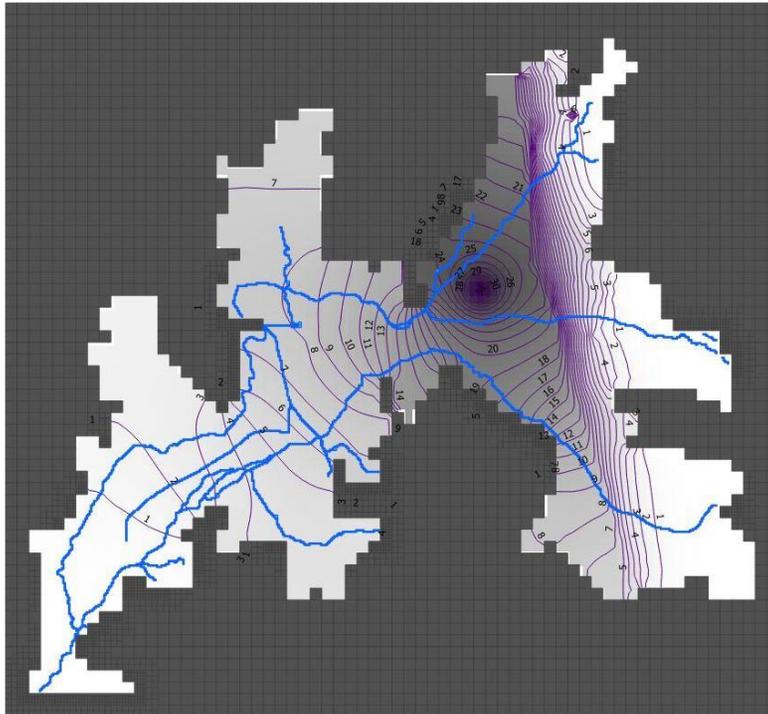


Figura 7-26: Ascenso nivel del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial - año 50

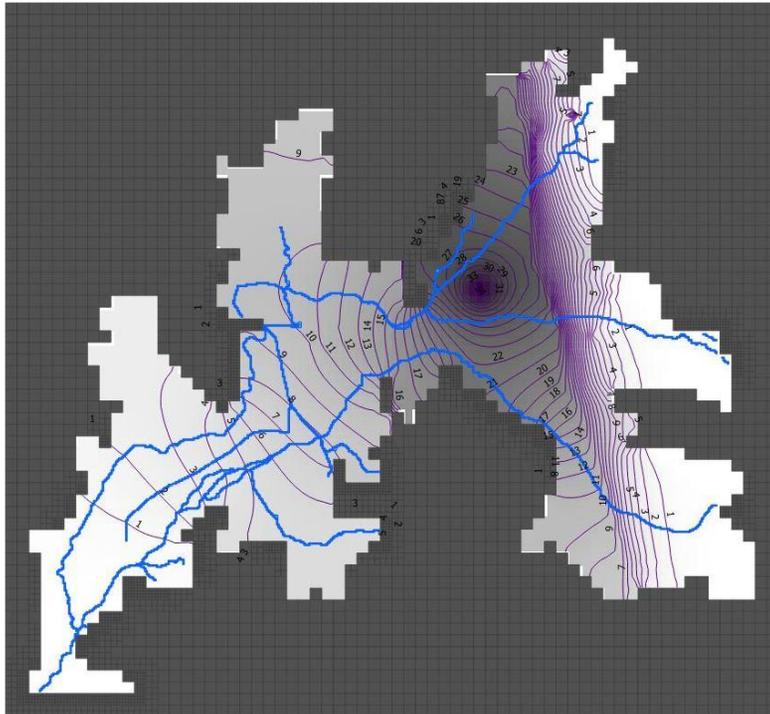
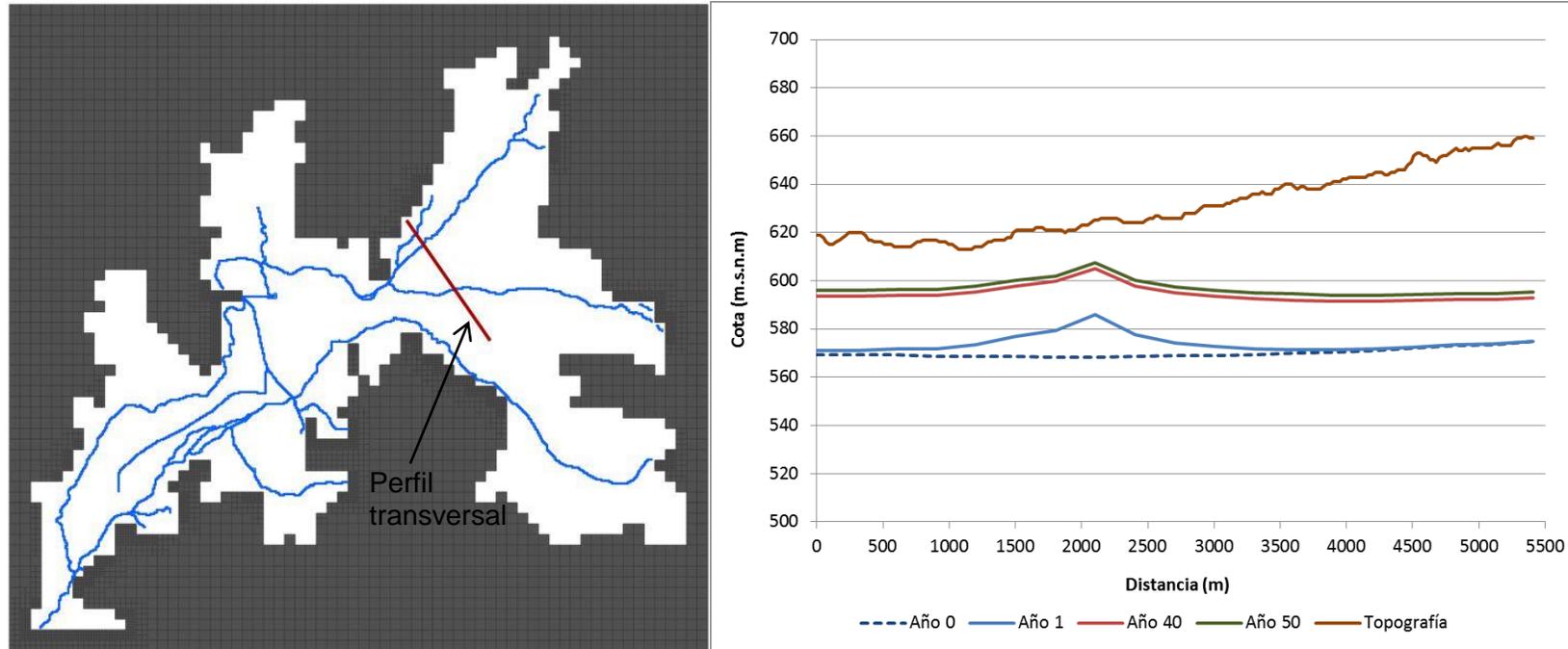


Figura 7-27: Perfil de niveles del acuífero luego de 6 meses de recarga artificial para el año 1, año 40 y año 50



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 para evaluar los efectos. 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. En efecto, respecto de la geología subsuperficial no existe un entendimiento de la geometría y composición de los distintos estratos del subsuelo. Se sugiere la confección de un modelo hidrogeológico conceptual que permita 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. Esto resulta particularmente importante en un acuífero como este, en el que se ha prácticamente extinguido el acuífero superficial, lo que lo hace muy atractivo para proyectos de recarga artificial.

Respecto de la información de profundidad y nivel de la napa, existe poca representatividad espacial, ya que la DGA sólo cuenta con 16 pozos en todo el acuífero, dejando amplias e importantes zonas sin información, están ellos ubicados cercanos a la red de drenaje. 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. La extensión temporal de la serie de niveles es adecuado ya que en muchos de ellos cuentan con 20 años o más de registros.

Respecto de la información de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de rendimiento específico), prácticamente no existe información que esté sistematizada y analizada que permita caracterizar el acuíferos por sectores o capas. En efecto, se tiene sólo un valor referencial para todo el acuífero y no se hace diferencia de este valor en profundidad.

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 8 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 cuenta 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 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, con una tendencia clara a la disminución dependiendo de la profundidad de los pozos. Información que ha sido recopilada como parte de este proyecto en base a entrevistas con gente que posee pozos en la zona, pero no existen registros para comprobarlo.

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, como se mencionó anteriormente prácticamente no existe información analizada. En este sentido se requeriría un estudio hidrológico que permitiera definir zonas homogéneas en planta y profundidad.

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.

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.

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 Chacabuco-Polpaico la situación no es crítica, sin embargo, de acuerdo a los términos de referencia (TDR) se debía perforar 5 m bajo la profundidad del acuífero, lo que

no necesariamente se condice con las necesidades de información de un proyecto como este. En el caso de Chacabuco que existe una serie de capas hubiese sido recomendable hacer un pozo exploratorio de al menos 50 m de profundidad previo al diseño del pozo de infiltración. De este modo el pozo se diseña específicamente para las características del terreno, dejando las ranuras en aquellas unidades donde se desea infiltrar.

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, no en términos de mantener el caudal constante, si no en términos de poder regular de manera precisa el caudal al valor deseado para cada prueba específica. En este sentido es que se recomienda para futuras pruebas considerar la utilización de distintos tipos de válvulas de modo de escoger la que permita una mayor precisión en la regulación del caudal.

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.

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.

Es importante señalar que el monitoreo permanente de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales), medidos con sondas multiparamétricas, no estaban incluido en los términos de referencia (TDR) y se considera que aportan mucha información respecto de la evolución química del agua de inyección y del comportamiento de la calidad química del acuífero con una resolución espacial y temporal más pequeña a un costo muy inferior al análisis en el laboratorio. Las muestras de agua para análisis son caras y no se justifica la toma de muestra con una frecuencia mayor a la considerada en los TDR, por lo que se recomienda que se incorpore como parte de las variables a monitorear en futuros proyectos.

8.7 PRUEBAS HIDRÁULICAS

Dado que el espesor saturado presente en el pozo es pequeño, no es posible realizar una prueba de bombeo. Por lo anterior, la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero se realizó a través de pruebas de infiltración. Durante las pruebas realizadas se recolectaron datos de caudal, tiempo de ensayo y niveles en el pozo, mediante transductor de presión. En total se realizaron 3 ensayos completos con distinta metodología, y a distintas profundidades. Todas las pruebas entregaron valores de conductividad hidráulica del mismo orden de magnitud con valores de 2, 4 y 8 m/d y razonables para este tipo de rellenos.

Si bien las pruebas de infiltración resultan de mucha utilidad para describir la zona no saturada, es recomendable contar con un pozo de mayor profundidad donde poder realizar una prueba de bombeo.

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. Los resultados obtenidos en estas pruebas se pueden catalogar como satisfactorios, por cuanto el número de pruebas realizadas y los caudales infiltrados están dentro de lo esperado para el tipo de relleno del acuífero.

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. Faltó tiempo para determinar el efecto real sobre el acuífero, ya que los ascensos de nivel medidos fueron pequeños, situación que se explica porque parte importante del agua inyectada pasa a rellenar el espacio poroso de la zona no saturada, hasta saturarla. Este mismo fenómeno podría explicar la baja en la tasa de infiltración observada, junto con la colmatación producto de los sólidos suspendidos, aun cuando la calidad del agua infiltrada en general cumplió con los criterios de operación. También influye en la respuesta del acuífero el comportamiento natural de los niveles, que tal como se demostró presentan una clara tendencia a la disminución.

Respecto de la calidad química en general se observa que la turbiedad generalmente se encontró bajo el criterio de corte de operación, aumentado sólo hacia el final de las pruebas producto del agua de deshielo que fluye en el río Aconcagua en esta época del año.

El corto periodo de las pruebas no permitió identificar cambios en la calidad de agua del acuífero. En efecto, ninguno de los parámetros analizados mostró mezcla de aguas. Respecto de la calidad de agua de inyección se debe indicar que el único parámetro presentó valores altos fue los coliformes fecales, sin embargo, dadas las concentraciones y condiciones presentes en el sitio, se considera poco riesgoso, ya que de acuerdo a la literatura especializada (John y Rose, 2005) su tiempo de vida media es de unos pocos días. Sería recomendable contar con pruebas de mayor duración que permitirán corroborar empíricamente el comportamiento de los coliformes en aguas subterráneas.

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, a través de 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 500 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 (quebradas) desde donde finalmente se pierde por escurrimiento. El criterio definido fue el 10% de la infiltración es decir 50 L/s.

El análisis demostró que la pérdida de agua mayor o igual al 10% ocurre a partir del año 40, es decir, se puede recargar de manera artificial en la zona de estudio un caudal de 500 L/s, durante 40 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. Lo anterior es particularmente importante en un acuífero como Chacabuco-Polpaico, por cuanto ha presentado un descenso sostenido de sus niveles durante más de una decena de años, lo que ha llevado prácticamente a la desaparición del acuífero superior, por lo que en caso de existir recursos hídricos disponibles se podría realizar una recuperación de este acuífero, con la consiguiente ganancia para los agricultores de la zona.

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 y finalmente la realización de un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuíferos (PPRAA).
- 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 16) 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. En este sentido los parámetros conductividad hidráulica, profundidad de la napa y cercanía a cuerpos de agua superficial, resultan adecuados para evaluar aptitud de zonas para la 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 aplicar la metodología en la cuenca del área de estudio se obtiene que prácticamente la totalidad del área utilizable (relleno) presenta valores de aptitud buena. Así, se estima que en general la cuenca es apropiada para proyectos de recarga artificial.
- En particular, mediante los trabajos desarrollados en terreno en 3 zonas de la cuenca, se corroboró la factibilidad de desarrollar proyectos de infiltración mediante pozos y se determinó que los sitios no son aptos para desarrollar recarga mediante balsas de infiltración. Los resultados de la prueba de infiltración realizados en el piloto coinciden con la aptitud calculada y tras realizar las pruebas se pudo corroborar que la metodología fue adecuada para esta cuenca y que el diseño propuesto (pozos de infiltración) fue el correcto.
- De la operación de las pruebas de infiltración del proyecto piloto se obtiene que la capacidad de infiltración del acuífero es adecuada, ya que se logra infiltrar un caudal medio de 2,5 L/s, utilizando un pozo de infiltración de 40 m de profundidad. Adicionalmente se debe considerar que el acuífero tiene un almacenamiento disponible de al menos 20 m, debido a que prácticamente se ha extinguido el acuífero superficial. No obstante, para aumentar la capacidad de infiltración del piloto, se recomienda analizar el comportamiento del sistema utilizando pozos a presión.

- Las pruebas del PPRAA requieren un mayor tiempo de operación para obtener conclusiones más representativas del funcionamiento del sistema en el tiempo y de este modo evaluar el efecto real de las pruebas en el acuífero, por ejemplo obtener datos precisos de los ascensos de niveles en la napa.
- 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 una representación detallada de los cursos superficiales existentes podrían variar los resultados presentados.
- 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.

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 obtenido sido catalogados con buena aptitud.
- Mejorar la red de monitoreo de niveles, especialmente en términos de profundidad del acuífero y conductividad hidráulica. Esto permitirá determinar 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 realizará recarga artificial.
- 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 (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. De este modo es importante contar con una buena caracterización del medio, lo que permitirá corroborar las aptitudes del sitio, preparar un diseño especial o bien buscar otro sitio con mejores cualidades para el proyecto de recarga. En este caso se podría haber perforado un pozo exploratorio de al menos 50 m de profundidad previo al diseño del pozo de infiltración.

- Si bien las pruebas de infiltración resultan de mucha utilidad para describir la zona no saturada, es recomendable contar con un pozo de mayor profundidad donde poder realizar una prueba de bombeo, que permita corroborar los valores de los parámetros elásticos.
- Dado los resultados de la operación del PPRAA, se recomienda probar un sistema de infiltración en base a pozos a presión, con el objetivo de aumentar la capacidad de infiltración del sitio.
- Dado que el canal presenta una alta variabilidad del flujo pasante (alta variación de niveles), se recomienda diseñar una toma de agua que independice la operación del sistema de las fluctuaciones horarias y diarias en los caudales afluentes.
- Sería recomendable contar con pruebas de mayor duración en la zona, de al menos un año, que permitan evaluar en el mediano plazo los efectos de la recarga en los niveles del acuífero y calidad química del agua subterránea.

10 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Stick up: Tramo de la habilitación de un pozo que sobresale de la superficie del terreno. Generalmente mide entre 0,5 y 1 m 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 qué 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

AC-01: Pozo de infiltración

AC-02: Pozo de monitoreo

Pp: Precipitación

m.c.a: 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.