




ETAPA IV - CORRECCIONES

**ESTUDIO DE CUENCA RÍO ELQUI BAJO, REGIÓN DE
COQUIMBO**

29 de diciembre de 2022

CÓDIGO SAFI N° 358.243

Fecha	Emitido para	Firma
29 de diciembre de 2022	 DOH	 <i>Leonardo Almagro</i>
		N° de páginas: 210
		ETAPA IV - CORRECCIONES
		DOH-2202-04-1

EQUIPO DE TRABAJO:



Inspector Fiscal:

Ing. Civ. Anyenett Bachmann Yañez

Jefe de Proyecto:

PhD. MSc. Leonardo Almagro Landó

Jefe de Terreno:

Ing. Civ. Daniel Álvarez

Prof. en Hidrogeología:

Gonzalo Lagas

Prof. en Geología:

David Cabello

Aseguramiento Calidad:

Su Hsen

Ingeniero B:

César Millar

Profesionales de Apoyo

MSc. Ing. Civ. Cristian Pino

Geol. Ricardo Salazar

Adm. Noelle Nelson

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	15
2	Objetivos.....	17
2.1	Objetivo general.....	17
2.2	Objetivos específicos y alcances	17
3	Metodología	19
3.1	Análisis crítico de antecedentes.....	19
3.2	Ejecución de labores de terreno	20
3.2.1	Catastro de captaciones existentes	20
3.2.2	Pruebas de bombeo	21
3.2.3	Ensayos de infiltración	22
3.2.4	Gamma natural	23
3.2.5	Tomografías eléctricas	24
3.3	Desarrollo del modelo conceptual	26
3.4	Desarrollo del modelo numérico y simulaciones.....	26
4	Área de estudio.....	26
5	Elqui Bajo - Modelo Conceptual Hidrogeológico.....	29
5.1	Antecedentes	29
5.1.1	Revisión de informes y estudios previos	29
5.1.2	Catastro de expedientes disponibles en la DGA.....	32
5.1.3	Registro histórico de la red de control de la DGA	33
5.1.4	Sistemas Sanitarios Rurales	36
5.1.5	Resumen de la información recopilada	37

5.2	Geomorfología	42
5.3	Geología	47
5.4	Hidrología	49
5.5	Hidroestratigrafía	52
5.6	Parámetros hidráulicos (constantes elásticas del acuífero)	75
5.7	Hidrodinámica	92
5.8	Hidroquímica	97
5.9	Extracciones	105
5.10	Recarga y balance hídrico.....	108
5.10.1	Recarga lateral, por precipitación e irrigación (Rl,Rp, Ri)	109
5.10.2	Recarga subterránea lateral y salida subterránea (Q1, Q2)	110
5.10.3	Recarga desde canales (Rc).....	111
5.10.4	Entradas desde el río (F)	113
5.10.5	Extracciones subterráneas (B)	113
5.10.6	Balance hídrico.....	113
6	Pan de azúcar - Modelo Conceptual Hidrogeológico	115
6.1	Antecedentes	115
6.2	Geomorfología	116
6.3	Geología	119
6.4	Hidrología	121
6.5	Hidroestratigrafía	123
6.6	Parámetros hidráulicos	135
6.7	Hidrodinámica	144

6.8	Hidroquímica	149
6.9	Extracciones	153
6.10	Recarga y Balance hídrico	155
6.10.1	Caudales subterráneos (Q1, Q2).....	156
6.10.2	Recarga lateral, por precipitación e irrigación (Rl, Rp, Ri)	156
6.10.3	Entradas desde cursos superficiales (Rl).....	157
6.10.4	Recarga desde canales (Rc).....	158
6.10.5	Extracciones – Bombeo (B).....	158
6.10.6	Balance hídrico.....	158
6.11	Discusión	160
7	Análisis de zonas de interés de la DOH	161
7.1	Zona A.....	165
7.2	Zona B.....	166
7.3	Zona C.....	167
7.4	Zona D.....	168
8	Ubicación optimizada de perforación	169
8.1	Pozo P1.....	172
8.2	Pozo P2.....	173
8.3	Pozo P3.....	174
8.4	Pozo P4.....	175
8.5	Pozo P5.....	176
8.6	Pozo P6.....	177
8.7	Pozo P7.....	178

8.8	Pozo P8.....	179
8.9	Pozo P9.....	180
8.10	Pozo P10.....	181
8.11	Pozo P11.....	182
8.12	Pozo P12	183
8.13	Pozo P13	184
8.14	Pozo P14.....	185
8.15	Pozo P15.....	186
9	Modelo numérico	187
9.1	Dominio, geometría y discretización del modelo numérico	188
9.2	Parametrización (constantes elásticas del acuífero).....	190
9.3	Condiciones de borde y condición inicial.....	191
9.4	Extracciones	192
9.5	Niveles observados.....	192
9.6	Análisis de sensibilidad.....	193
9.7	Simulación captaciones propuestas.....	193
9.8	Resultados	194
9.8.1	Escenario N°1: Escenario base estacionario	194
9.8.2	Escenario N°2: Escenario base régimen transitorio.....	197
9.8.3	Escenario N°3: Simulación captaciones propuestas.	201
10	Conclusiones y recomendaciones	203
11	Referencias	209

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Zonas de estudios a considerar y analizar.	16
Figura 3.1. Actividades de terreno. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 3.2. Obtención de muestras en el catastro de pozos. Fuente: Elaboración Propia.	21
Figura 3.3. Registro de los descensos durante el bombeo. Fuente: Elaboración Propia.	22
Figura 3.4. Registro del descenso del nivel en el infiltrómetro de doble anillo. Fuente: Elaboración Propia.	23
Figura 3.5. Instalación del equipo Gamma Natural. Fuente: Elaboración Propia.	24
Figura 3.6. Configuración en terreno de la tomografía eléctrica. Fuente: Elaboración Propia....	25
Figura 4.1. Área de Estudio y Actividades desarrolladas. Fuente: Elaboración Propia.	27
Figura 4.2. Canales de riego Elqui Bajo – Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 5.1 Derechos de agua registrados en la DGA y tramitaciones de expedientes. Fuente: Aluvial Consultores.	33
Figura 5.2 Red de control de niveles estáticos en la cuenca. Fuente: Aluvial Consultores.....	35
Figura 5.3 Derechos de agua registrados en la DGA y tramitaciones de expedientes. Fuente: Aluvial Consultores.	36
Figura 5.4 Tipos de captaciones existentes en la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.	37
Figura 5.5 Profundidad de las captaciones existentes en la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.	38
Figura 5.6 Antecedentes con la profundidad del nivel estático. Fuente: Aluvial Consultores.....	39
Figura 5.8 Antecedentes geofísicos en la zona de estudio. Fuente: Aluvial Consultores.	40
Figura 5.9 Captaciones con ensayos de bombeo. Fuente: Aluvial Consultores.	41
Figura 5.10 Antecedentes de calidad de las aguas subterráneas. Fuente: Aluvial Consultores. .	42

Figura 5.11. Mapa geomorfológico del sector río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración Propia.	44
Figura 5.12. Perfiles topográficos Valle del río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración Propia.	46
Figura 5.13. Mapa geológico. Modificado de Sernageomin (2003) [1].	47
Figura 5.14. Cuenca y estaciones Elqui Bajo. Elaboración propia.	49
Figura 5.15. Caudales mensuales del río en Almendral y La Serena, y precipitación mensual en estación La Florida. Fuente: CR ²	50
Figura 5.16. Canales de riego Elqui Bajo – Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 5.17. Geofísica y estratigrafías en la cuenca del río Elqui. Fuente: Elaboración Propia.	54
Figura 5.18. Secciones transversales. Fuente: Elaboración Propia.	56
Figura 5.19. Perfil hidroestratigráfico A-A'. Fuente: Elaboración Propia.	58
Figura 5.20. Tomografía eléctrica ERT-1. Fuente: Elaboración Propia.	60
Figura 5.21. Tomografía eléctrica ERT-2. Fuente: Elaboración Propia.	61
Figura 5.22. Tomografía eléctrica ERT-3. Fuente: Elaboración Propia.	62
Figura 5.23. Tomografía eléctrica ERT-4. Fuente: Elaboración Propia.	62
Figura 5.24. Perfil hidroestratigráfico B-B'. Fuente: Elaboración Propia.	64
Figura 5.25. Tomografía eléctrica ERT-5. Fuente: Elaboración Propia.	65
Figura 5.26. Tomografía eléctrica ERT-6. Fuente: Elaboración Propia.	66
Figura 5.27. Tomografía eléctrica ERT-7. Fuente: Elaboración Propia.	67
Figura 5.28. Tomografía eléctrica ERT-8. Fuente: Elaboración Propia.	68
Figura 5.29. Tomografía eléctrica ERT-9. Fuente: Elaboración Propia.	69
Figura 5.30. Tomografía eléctrica ERT-10. Fuente: Elaboración Propia.	69
Figura 5.31 Perfil hidroestratigráfico C-C'. Fuente: Elaboración Propia.	71
Figura 5.32. Tomografía eléctrica ERT-11. Fuente: Elaboración Propia.	72
Figura 5.33. Tomografía eléctrica ERT-12. Fuente: Elaboración Propia.	73

Figura 5.34. Tomografía eléctrica ERT-13. Fuente: Elaboración Propia.	74
Figura 5.35. Tomografía eléctrica ERT-14. Fuente: Elaboración Propia.	74
Figura 5.36 Datos de la permeabilidad del acuífero. Fuente: Elaboración Propia.	75
Figura 5.37 Ensayo de bombeo EB-01. Fuente: Elaboración Propia.....	79
Figura 5.38 Ensayo de bombeo EB-02 Fuente: Elaboración Propia.....	80
Figura 5.39 Ensayo de bombeo EB-03. Fuente: Elaboración Propia.....	81
Figura 5.40 Ensayo de bombeo EB-04. Fuente: Elaboración Propia.....	82
Figura 5.41 Ensayo de bombeo EB-05. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 5.42 Ensayo de bombeo EB-06. Fuente: Elaboración Propia.....	84
Figura 5.43 Ensayo de bombeo EB-07. Fuente: Elaboración Propia.....	85
Figura 5.44 Ensayo de bombeo EB-08. Fuente: Elaboración Propia.....	86
Figura 5.45 Ensayo de bombeo EB-09. Fuente: Elaboración Propia.....	87
Figura 5.46 Ensayo de bombeo EB-10. Fuente: Elaboración Propia.....	88
Figura 5.47 Ensayo de bombeo EB-11. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 5.48 Ensayo de bombeo EB-12. Fuente: Elaboración Propia.....	90
Figura 5.49 Ensayo de bombeo EB-13. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Figura 5.50. Catastro de pozos entorno al Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.	92
Figura 5.51. Piezometría Cuenca Elqui Bajo, Sección Este. Elaboración propia.	95
Figura 5.52 Piezometría Cuenca Elqui Bajo, Sección Oeste. Elaboración propia.	96
Figura 5.53 antecedentes de calidad de las aguas. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 5.54 Conductividad eléctrica de las aguas subterráneas y superficiales. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 5.55 Concentraciones hidroquímicas de las aguas subterráneas del acuífero de Elqui. Fuente: Elaboración propia.....	102

Figura 5.56 Concentraciones hidroquímicas de las aguas subterráneas del acuífero de Elqui. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 5.57. Derechos de agua subterránea registrados en la DGA. Fuente: Elaboración Propia a partir de datos DGA.	107
Figura 5.58 Balance hidrogeológico del acuífero. Fuente: Elaboración Propia.....	108
Figura 5.59 Esquema de la Ley de Darcy. Fuente: Elaboración Propia.....	110
Figura 5.60 Caudales subterráneos estimados con Ley de Darcy. W: ancho de la sección, H: espesor saturado, A: área sección; K: conductividad hidráulica; i: gradiente hidráulico, Q: caudal. Fuente: Elaboración Propia.	111
Figura 5.61. Función temporal de la recarga estimada desde canales. Fuente: Elaboración Propia.....	112
Figura 6.1. Mapa Geomorfológico sector Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.	116
Figura 6.2. Perfiles topográficos Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.....	118
Figura 6.3. Geología de Pan de azúcar. Fuente: Modificado de Emparan y Pineda (2006) [2]. .	120
Figura 6.4. Hidrología cuenca Pan de Azúcar. Elaboración Propia.	122
Figura 6.5. Caudal promedio mensual en estero Culebrón y precipitación mensual en estación La Serena (Escuela Agrícola). Elaboración Propia.....	123
Figura 6.6. Unidades hidrogeológicas y antecedentes estratigráficos y geofísicos utilizados. Fuente: Elaboración Propia.....	124
Figura 6.7. Perfil Norte Sur GG'. Elaboración Propia.	126
Figura 6.8 Tomografía eléctrica ERT-16. Fuente: Elaboración Propia.	127
Figura 6.9 Tomografía eléctrica ERT-17. Fuente: Elaboración Propia.	127
Figura 6.10. Izquierda: Diagrafía Pozo INIA 1. Derecha: Diagrafía Pozo INIA 2.	130
Figura 6.11 Tomografía eléctrica ERT-15. Fuente: Elaboración Propia.	131
Figura 6.12. perfil H-H'. Elaboración Propia.	131

Figura 6.13. perfil I-I'. Elaboración Propia.	132
Figura 6.14 Tomografía eléctrica ERT-18. Fuente: Elaboración Propia.	133
Figura 6.15 Tomografía eléctrica ERT-19. Fuente: Elaboración Propia.	134
Figura 6.16 Tomografía eléctrica ERT-20. Fuente: Elaboración Propia.	134
Figura 6.17 Tomografía eléctrica ERT-20. Fuente: Elaboración Propia.	136
Figura 6.18 Ensayo de bombeo EB-14. Fuente: Elaboración Propia.....	138
Figura 6.19 Ensayo de bombeo EB-15. Fuente: Elaboración Propia.....	140
Figura 6.20 Ensayo de bombeo EB-16. Fuente: Elaboración Propia.....	141
Figura 6.21 ensayos de infiltración realizados. Fuente: Elaboración propia.	143
Figura 6.22. Catastro de pozos en sector Pan de Azúcar. Fuente: Aluvial Consultores.	144
Figura 6.23. Piezometría Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.	146
Figura 6.24 Aumento de la demanda de caudales de extracción en el acuífero de Pan de Azúcar . Fuente: derechos registrados de la DGA al 2022.	147
Figura 6.25. Análisis comparativo de los afloramientos. Izquierda año 2000, Derecha Año 2022. Fuente: Elaborado a partir de imágenes de Google Earth.	148
Figura 6.26 Conductividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia.....	150
Figura 6.27 Concentraciones hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.....	152
Figura 6.28. Derechos de agua subterránea registrados en la DGA. Fuente: Elaboración Propia a partir de datos DGA.	154
Figura 6.29 Balance hidrogeológico. Fuente: Elaboración Propia.	155
Figura 6.30 Esquema de la Ley de Darcy. Fuente: Elaboración Propia.....	156
Figura 7.1. Zonas de interés de la DOH. Fuente: Elaboración Propia.....	162
Figura 7.2. Zonas de mayores caudales de extracción actuales en torno al río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración propia.....	163

Figura 7.3. Zonas de mayores caudales de extracción actuales en el sector Pan de Azúcar.
Fuente: Elaboración propia..... 164

Figura 7.4. Zona A. Fuente: Elaboración propia..... 165

Figura 7.5. Tomografía eléctrica ERT-5. Fuente: Elaboración Propia. 166

Figura 7.6. Zona B. Fuente: Elaboración propia..... 167

Figura 7.7. Zona C. Fuente: Elaboración propia..... 168

Figura 7.8. Zona D. Fuente: Elaboración propia. 169

Figura 8.1 Mapa de la ubicación de prospecciones propuestas. Fuente: Elaboración Propia. .. 170

Figura 8.2 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P1. Fuente: Elaboración propia.172

Figura 8.3 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P2. Fuente: Elaboración propia.173

Figura 8.4 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P3. Fuente: Elaboración propia.174

Figura 8.5 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P4. Fuente: Elaboración propia.175

Figura 8.6 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P5. Fuente: Elaboración propia.176

Figura 8.7 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P6. Fuente: Elaboración propia.177

Figura 8.8 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P7. Fuente: Elaboración propia.178

Figura 8.9 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P8. Fuente: Elaboración propia.179

Figura 8.10 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P9. Fuente: Elaboración propia.
..... 180

Figura 8.11 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P10. Fuente: Elaboración propia.
..... 181

Figura 8.12 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P11. Fuente: Elaboración propia.
..... 182

Figura 8.13 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P12. Fuente: Elaboración propia.
..... 183

Figura 8.14 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P13. Fuente: Elaboración propia.	184
Figura 8.15 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P14. Fuente: Elaboración propia.	185
Figura 8.16 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P15. Fuente: Elaboración propia.	186
Figura 9.1 Dominio de modelación y malla de diferencias finitas. Fuente: Elaboración Propia.	187
Figura 9.2 Dominio de modelación y malla de diferencias finitas. Fuente: Elaboración Propia.	189
Figura 9.3 Zonificación de parametrización. Fuente: Elaboración Propia.	190
Figura 9.4 Condiciones de borde del modelo numérico. Fuente: Elaboración Propia.	192
Figura 9.5 Niveles observados. Fuente: Elaboración Propia.	193
Figura 9.6 Ajuste niveles observados y calculados estado permanente. Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 9.7 Conductividades hidráulicas calibradas en estado permanente. Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 9.8 Piezometría calculada para calibración en estado permanente. Fuente: Elaboración propia.	196
Figura 9.9. Niveles observados y simulados en el tiempo, y piezometría estimada para los años 2000 y 2022, sección oeste. Fuente: Elaboración Propia.	198
Figura 9.10. Niveles observados y simulados en el tiempo, y piezometría estimada para los años 2000 y 2022, sección este. Fuente: Elaboración Propia.	199
Figura 9.11. Caudal simulado que sale y entra por el río en el tiempo en relación a la recarga y extracciones. Fuente: Elaboración Propia.	200
Figura 9.12. Descensos calculados para los pozos de extracción P-1, P2, P3, P4 y P5 propuestos. Fuente: Elaboración propia.	202

Figura 9.13. Descensos calculados para los pozos de extracción P6, P7, P8, P9 y P10 propuestos.

Fuente: Elaboración propia..... 203

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Ensayos de bombeo realizados. Fuente: Elaboración Propia. 78

Tabla 5.2 Rango de concentraciones en la última década de los elementos mayoritarios en el acuífero. Fuente: Elaboración Propia 101

Tabla 5.3 Infiltración estimada desde canales. Fuente: Elaboración Propia..... 112

Tabla 5.4. Balance acuífero. Fuente: elaboración propia 114

Tabla 6.1. Ensayos de bombeo realizados. Fuente: Elaboración Propia. 137

Tabla 6.2 Ensayos de bombeo realizados. Fuente elaboración propia. 142

Tabla 6.3. Caudales subterráneos estimados con Ley de Darcy. W: ancho de la sección, H: espesor saturado, A: área sección; K: conductividad hidráulica; i: gradiente hidráulico, Q: caudal. 156

Tabla 6.4. Balance acuífero..... 159

Tabla 8.1 ubicaciones propuestas. Fuente: Elaboración Propia 171

Tabla 9.1. Balance hídrico calibración estado permanente. *Entradas laterales. Fuente: Elaboración propia..... 194

Tabla 9.2. Balance para distintos valores de la conductancia del río. 201

Tabla 10.1 Ubicaciones propuestas para la extracción de agua subterránea mediante pozos profundos. Fuente: Elaboración Propia..... 208

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la sequía prolongada que ha sufrido la región de Coquimbo estos últimos diez años, la región de Coquimbo, y en particular las comunas de la provincia del Elqui correspondientes a: Andacollo, Coquimbo, La Higuera, La Serena, Paihuano y Vicuña, han sido declaradas Zona de Escasez Hídrica por la Dirección General de Aguas en su Decreto MOP N°4 (a partir del 6 de enero de 2022 y hasta el 6 de julio de 2022). La cuenca está regulada por los embalses La Laguna y Puclaro, cuyas aguas se utilizan para el riego. De acuerdo con la información entregada por la Junta de Vigilancia del Río Elqui, en los últimos años de sequía, la disminución de los caudales del río Elqui tiene a los agricultores de la cuenca en una situación crítica, con caudales de reparto inferiores al 20%.

Dado lo anterior, es que la Dirección de Obras Hidráulicas se ve en el deber de ejecutar estudios y obras que permitan mitigar la situación de escasez existente, sumado a que diversas organizaciones de usuarios de agua de la provincia han presentado solicitudes al Ministerio de Obras Públicas para ejecutar estudios hidrogeológicos u obras que permitan aportar recursos hídricos a los canales que se han visto afectados por la sequía.

En dicho contexto ALUVIAL CONSULTORES ha realizado el presente estudio hidrogeológico de prospección, analizando en detalle cuatro zonas de interés predefinidas en los siguientes estudios y desarrollando un Estudio Hidrogeológico local, a nivel de detalle en las zonas descritas en ellos (Figura 1.1):

- (HIDROGESTIÓN, 2021-2022). Estudio Hidrogeológico para el Análisis Alternativas Ubicación Baterías Pozos en 2 Acuíferos de la Cuenca Río Elqui Bajo con Modelación Existente para Explotación Aguas Subterráneas en Sequía - Región de Coquimbo.
- (GCF Ingenieros para INNOVA CORFO, 2015). Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la Zona Baja de la cuenca del Río Elqui en la zona de Pan de Azúcar.

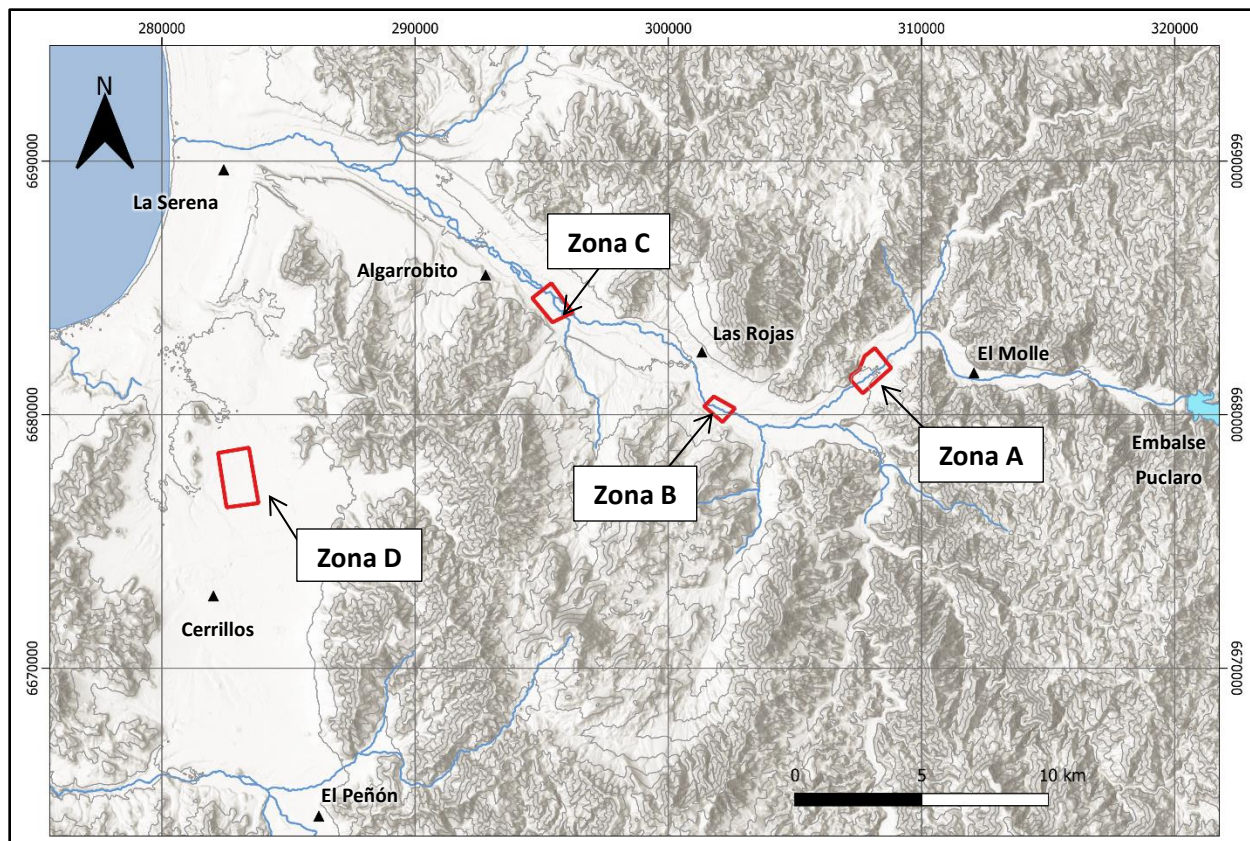


Figura 1.1. Zonas de estudios a considerar y analizar.

Dichos estudios asimismo presentan un modelo numérico de flujo, realizado a través de la J.V del Río Elqui, el cual se revisó y optó por realizar uno nuevo que considerase la información recabada en el contexto del presente proyecto.

En dicho contexto el presente trabajo analiza la viabilidad de extracción de aguas subterráneas en las cuatro áreas, tanto hidrogeológica como administrativa, y presenta un modelo conceptual hidrogeológico de los acuíferos del sector Pan de Azúcar y del río Elqui desde el embalse Puclaro hasta la línea de costa, con aportes en la definición de la estratigrafía, parámetros hidráulicos, hidrodinámica, hidroquímica y en el balance hídrico.

Asimismo, se realizó un nuevo modelo numérico de flujo del acuífero Elqui que incorpora la nueva información y constituye una herramienta que permitirá a la DOH la planificación de extracciones de agua subterránea, mediante la construcción de pozos conectados a canal, que puedan operar durante decretos de emergencia en la zona, de manera de mitigar las abruptas disminuciones de caudal producidas por la sequía.

Las actividades de terreno desarrolladas en el contexto del presente proyecto, tales como el catastro de 61 captaciones, la ejecución de 20 tomografías eléctricas, 16 de ensayos de bombeo, 8 ensayos de infiltración y 2 ensayos de gamma natural, permitieron desarrollar modelos conceptuales hidrogeológicos robustos. En el caso de la cuenca del Elqui Bajo el modelo conceptual sentó las bases para desarrollar un modelo numérico de flujo coherente, que le reproduce.

De este modo se generó una herramienta numérica, que además de validar el modelo conceptual, permite evaluar el impacto de integrar nuevos pozos en la cuenca, y su sostenibilidad.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal del Estudio es recabar antecedentes y realizar un levantamiento de la información hidrogeológica en tres sectores de la cuenca del río Elqui Bajo y un sector en Pan de Azúcar, de tal forma de efectuar una evaluación del comportamiento del acuífero a nivel local, así como de los recursos hídricos subterráneos, y, a partir de ello definir la ubicación óptima para baterías de pozos, de tal forma que permitan abastecer a los canales afectados en épocas de sequía.

En dicho contexto fundamentar la ubicación optimizada de nuevas captaciones de agua subterránea de modo sustentable y sin intervenir pozos existentes, SSRs ni derechos de extracción de agua subterránea existentes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y ALCANCES

Se considerarán los siguientes objetivos específicos y alcances:

- Recopilar la información hidrogeológica de la parte baja de la cuenca del río Elqui, existente en la DOH o bien en la DGA, analizando los antecedentes estratigráficos, hidráulicos y geofísicos.

- Catastro de niveles estáticos y dinámicos en pozos (públicos y/o privados) existentes y de derechos de agua concedidos y en trámite.
- Definir y Caracterizar geomorfológicamente la zona de estudio.
- Conocer a nivel de detalle el funcionamiento del acuífero y su interrelación con el sistema superficial; desde el punto de vista de los registros históricos, así como su proyección en el futuro.
- Determinar a nivel detalle el valor de las constantes elásticas del acuífero, su estratigrafía, hidrodinámica, hidroquímica y su balance hídrico.
- Ejecución de perfiles geofísicos, en zonas a definir, en donde sea más probable la extracción de agua, de acuerdo a los antecedentes revisados previamente.
- Analizar y discutir la idoneidad hidrogeológica de las cuatro áreas propuestas por la JJVV (2022).
- Determinar la ubicación óptima de baterías de pozos en base a los resultados desarrollados.
- Determinar si la ubicación de la batería de pozos se encuentra en BNUP o Fiscal.
- Realización de un análisis de afectación a pozos existentes con la operación de pozos proyectados, indicando posibles depresiones de niveles freáticos y su escala.
- Incorporación de la información levantada a un SIG.
- Mejora del conocimiento de la geometría del acuífero, apoyado por la ejecución de perfiles geofísicos del tipo Tomografías Eléctricas 2D ERT de alta densidad. Dicha geofísica de be apoyar a la determinación de puntos optimizados para implementar nuevos pozos.
- Resolución del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico a escala de detalle, con enfoque de prospección en zonas de viabilidad y sustentabilidad hidrogeológica. Además, se considerará ubicar pozos en zonas de Bien Nacional de Uso Público y optimizar su ubicación de acuerdo a cercanía con canales existentes.
- Cuantificar la recarga al acuífero y la relación río acuífero.
- Realizar un balance hídrico que indique la compatibilidad de implementar nuevas extracciones.
- Análisis de la conveniencia de realizar una actualización del modelo numérico realizado por la JJVV (2022), o bien construir un nuevo modelo numérico en función de los avances realizados en las actividades de terreno desarrolladas en el contexto del presente proyecto. Dicho modelo deberá permitir la toma de decisiones respecto a la implementación de nuevos pozos profundos a realizar por la DOH.

- Análisis de operación y afectación a pozos existentes con la operación de pozos proyectados, indicando posibles depresiones de niveles freáticos y su escala.

3 METODOLOGÍA

Para resolver el funcionamiento hidrogeológico de las cuencas del sector Pan de Azúcar y río Elqui, y desarrollar el modelo numérico del Elqui que permita la planificación de extracciones de aguas subterráneas de una manera sustentable, se realizó la siguiente metodología de trabajo (Figura 3.1):



Figura 3.1. Actividades de terreno. Fuente: Elaboración propia.

3.1 ANÁLISIS CRÍTICO DE ANTECEDENTES

Se realizó una búsqueda de estudios previos en bibliotecas digitales y en la base de datos interna de Aluvial Consultores y posteriormente se solicitó por ley de transparencia antecedentes que podrían ser de utilidad para el desarrollo del estudio.

Se descargó una base de datos actualizada de los registros de solicitudes de derechos de agua subterránea de la DGA, con la cual se determinaron los radios de protección de los derechos y se revisaron los expedientes digitalizados de la DGA, generando una base de datos con la información hidrogeológica presente en ellos.

En función de los derechos de agua y registros entregados por la DOH se generó una base de datos con la ubicación de los sistemas sanitario-rurales existentes en la cuenca.

Junto a lo anterior, se descargaron los antecedentes históricos de la red de control de niveles de agua subterránea, calidad química de las aguas, fluviometría y pluviometría de la DGA.

3.2 EJECUCIÓN DE LABORES DE TERRENO

En función del análisis de los antecedentes y en consideración de su distribución en torno a la cuenca del río Elqui y sector Pan de Azúcar, se realizó:

- Catastro actualizado de 61 captaciones distribuidas en el área de estudio.
- 16 ensayos de bombeo, para determinar parámetros hidráulicos del sistema acuífero.
- 8 ensayos de infiltración, para determinar la tasa de infiltración de los suelos.
- 2 diagráfias de pozo del tipo Gamma Natural.
- 20 tomografías eléctricas, para determinar la geometría del acuífero y como apoyo para definir la ubicación optimizada de los futuros pozos de extracción. 15 de ellas se realizaron en la cuenca del río Elqui Bajo y 5 en Pan de Azúcar.

Los registros fotografías de los trabajos realizados se presentan en el Anexo A del presente informe.

En el sector de Elqui Bajo y con previa autorización del inspector fiscal, se reemplazaron dos de las veinte tomografías eléctricas por tres perfiles geofísicos ERT transversales al acuífero los cuales permitieron caracterizar transversalmente la geometría del sistema.

3.2.1 CATASTRO DE CAPTACIONES EXISTENTES

Con previa autorización de los propietarios de cada captación se realizó la siguiente metodología en cada punto de control:

- Se registró las coordenadas y elevación de la captación mediante un GPS de alta precisión.

- Registro de las dimensiones de la captación (profundidad del pozo, altura del brocal y diámetro de la captación).
- Registro de la profundidad del nivel estático y/o dinámico, según el caso.
- Se registró el caudal de extracción de la captación, mediante caudalímetro o aforo volumétrico.
- Toma de muestra de agua para registro de los parámetros fisicoquímicos, tales como, pH, conductividad eléctrica y temperatura.

Todos los resultados obtenidos fueron digitalizados en planillas editables de Excel presentes en el Anexo B.



Figura 3.2. Obtención de muestras en el catastro de pozos. Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2 PRUEBAS DE BOMBEO

Nuevamente, con la autorización previa de los dueños de cada captación se realizó la siguiente metodología en cada punto de ensayo:

- Realización de ensayos de bombeo a caudal constante, de duración comprendida entre 7 y 20 horas, condicionado por la propia operación de cada pozo.
- Registro de la recuperación.
- El registro de niveles se realizó mediante sondas de presión y paralelamente registros manuales con pozómetro.
- Aforos mediante método volumétrico o caudalímetro.

- Interpretación de los parámetros hidráulicos mediante métodos numéricos, utilizando la interfaz de VISUAL MODFLOW. Se desarrollaron modelos de escala de detalle para cada ensayo, considerando la geometría del acuífero y las condiciones de borde necesarias para representar las condiciones a la cual fue desarrollado.

Todos los resultados obtenidos fueron digitalizados en planillas editables de Excel presentes en el Anexo C.



Figura 3.3. Registro de los descensos durante el bombeo. Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

Para realizar los ensayos de infiltración se realizó la siguiente metodología de terreno:

- Ensayos de infiltración de doble anillo, en sitios representativos de la infiltración superficial por lluvia y riego, y también de infiltración del río por inundación.
- En puntos previamente definidos, se emplazó el infiltrómetro en una superficie representativa del medio, la cual es nivelada y se verifica que no existan fugas entre el interior del anillo y el medio.
- Posteriormente, ambos anillos se rellenan con agua representativa, sin presencia de finos y se registra la evolución en el tiempo, de la tasa de infiltración del agua contenida en el anillo interior (de menor diámetro). Se debe evitar flujos entre los cilindros, pérdidas laterales y diferencias de nivel entre el cilindro interior y exterior.

- El registro del descenso se registra hasta alcanzar una tasa de infiltración constante en el tiempo, la cual es representativa de la permeabilidad vertical saturada.

Todos los resultados obtenidos fueron digitalizados en planillas editables de Excel presentes en el Anexo D.



Figura 3.4. Registro del descenso del nivel en el infiltrómetro de doble anillo. Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4 GAMMA NATURAL

Técnica geofísica que permite medir las emisiones naturales de rayos gamma que son emitidas por las unidades sedimentarias que componen el perfil estratigráfico del pozo.



Figura 3.5. Instalación del equipo Gamma Natural. Fuente: Elaboración Propia.

Para la medición, se debe instalar en primer lugar, la sonda de medición al ordenador mediante USB. En el ordenador se utiliza el software SRP que permite visualizar la radiación gamma captada por la sonda.

Posterior a la instalación, se desciende la sonda de medición por el interior del pozo y se comienza a registrar la radiación natural de los sedimentos por cada metro de perforación.

Todos los resultados obtenidos fueron digitalizados en planillas editables de Excel presentes en el Anexo E.

3.2.5 TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS

Técnica geofísica de corriente continua que mide la resistividad eléctrica del subsuelo a partir de inyección de corriente y medición de voltaje en los electrodos puestos en superficie.

La metodología de las actividades de terreno se resume en el siguiente listado:

- Disposición del cableado y estacado de electrodos de acero inoxidable que son dispuestos cada 10 m a lo largo de la traza definida.
- Conexión del equipo de adquisición de datos.
- Testeo de la resistividad de contacto de las conexiones a tierra de cada electrodo.

- Inicio de la medición de corriente y diferencias de voltaje a lo largo del perfil geofísico mediante el arreglo Wenner-Schlumberger previamente definido acorde a las características del subsuelo.
- Retiro del cableado de electrodos y equipo de adquisición de datos.
- Trabajo de gabinete, descarga de datos hacia la computadora para la posterior interpretación del perfil.



Figura 3.6. Configuración en terreno de la tomografía eléctrica. Fuente: Elaboración Propia.

En el sector de Elqui Bajo y con previa autorización del inspector fiscal, se reemplazaron dos de las tomografías eléctricas por tres perfiles transversales al acuífero que permitieron caracterizar transversalmente el sistema acuífero.

Los datos duros de las tomografías eléctricas realizadas se presentan en el Anexo F del presente informe.

3.3 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL

En consideración de los antecedentes recopilados y en función de los datos obtenidos en terreno se determina la geometría del acuífero, las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, la hidrodinámica del sistema, la hidroquímica de las aguas y se resuelve el balance hídrico del sistema subterráneo y superficial.

En función del modelo conceptual y el apoyo de los resultados de las tomografías eléctricas, se define la ubicación optimizada de perforación para una extracción sustentable mediante pozos profundos.

3.4 DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO Y SIMULACIONES

En función del modelo conceptual se desarrolla un modelo numérico de Flujo en diferencias finitas utilizando el código VISUAL MODFLOW, generando un escenario Base (EB), que no contemple las nuevas extracciones.

Considerando el escenario base y en función de la ubicación optimizada de perforación propuesta, se simulan los efectos que generarán las nuevas extracciones propuestas, y se evalúa la sustentabilidad de la extracción en el tiempo.

4 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se emplaza en la cuarta región de coquimbo y se subdivide en dos zonas independientes en el análisis , denominadas como sector Elqui Bajo y sector Pan de Azúcar (Figura 4.1).

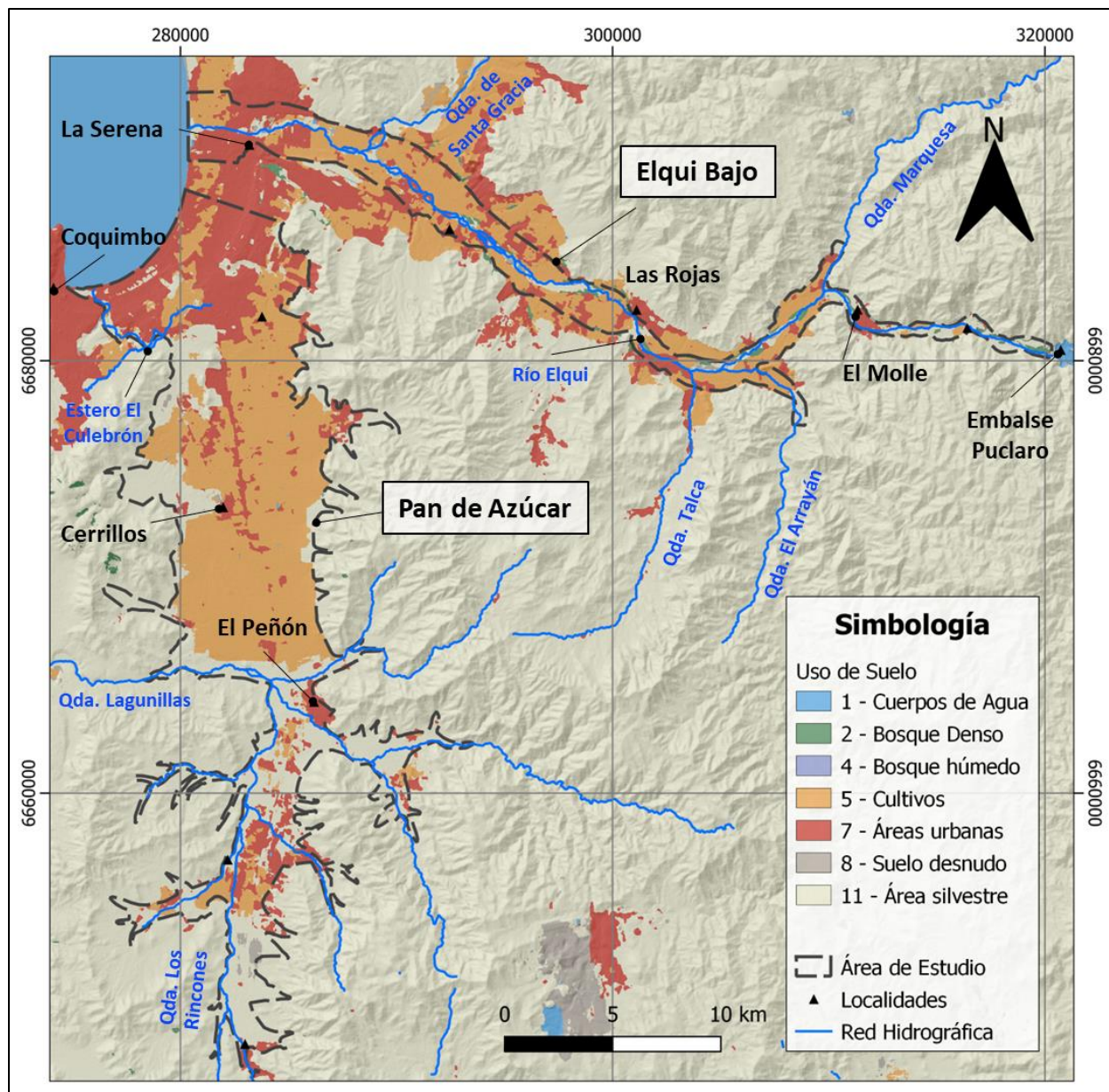


Figura 4.1. Área de Estudio y Actividades desarrolladas. Fuente: Elaboración Propia.

La zona de estudio Elqui Bajo se ubica en torno al río Elqui entre el embalse Puclaro por el este y la línea de costa por el oeste.

La zona de estudio de Pan de Azúcar comprende una franja con orientación norte – sur, limitada por el sur por la cuesta Las Cardas y por el norte por el Estero El Culebrón en la ciudad de Coquimbo.

De acuerdo con el mapa global derivado del satélite ESA Sentinel-2 (Figura 4.1), en las zonas de estudio Elqui Bajo y Pan de Azúcar, se desarrollan principalmente actividades agrícolas, cuya

demanda de agua es suplida principalmente por los cursos de agua superficial que son distribuidos por la cuenca mediante canales provenientes del río Elqui. (Figura 4.2).

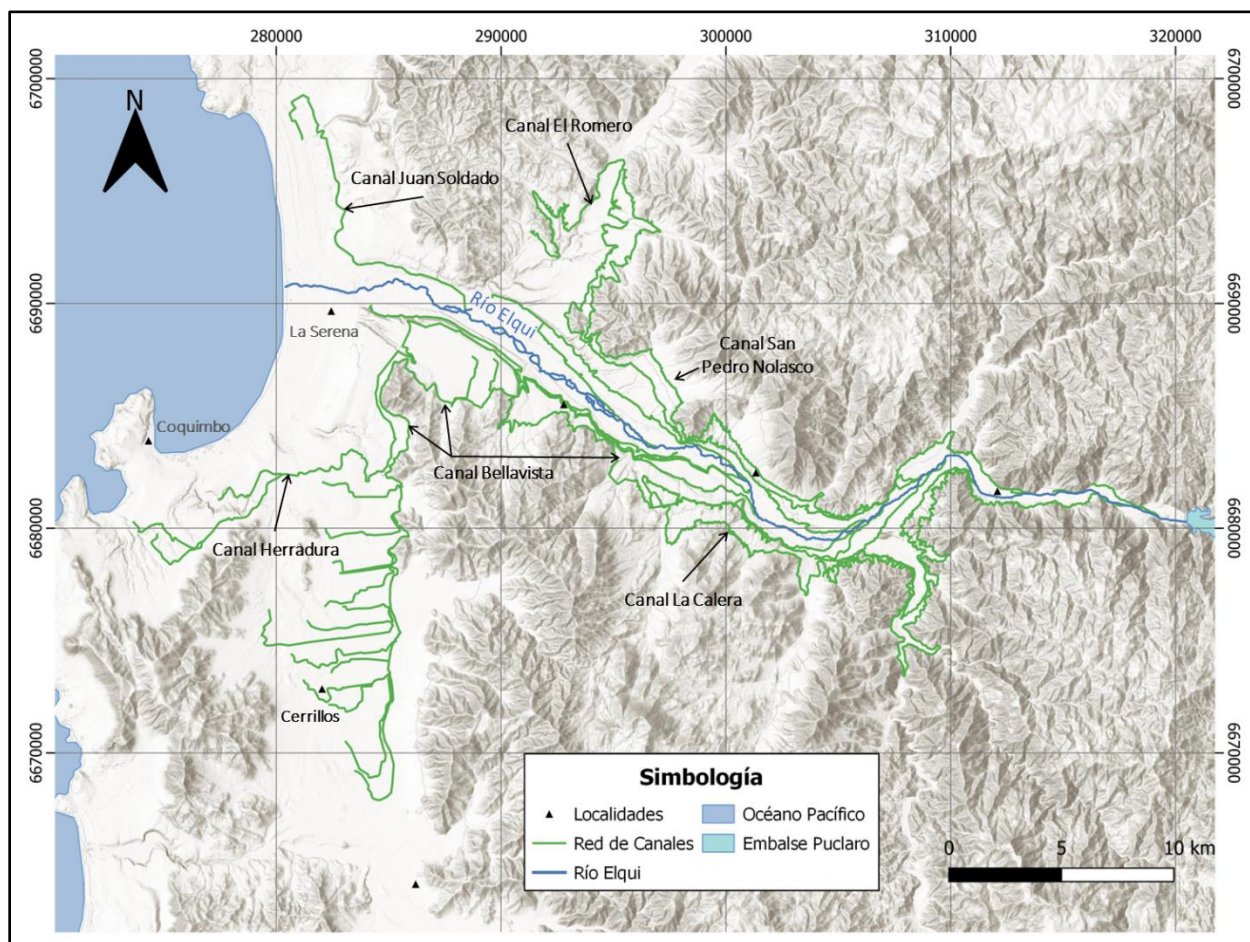


Figura 4.2. Canales de riego Elqui Bajo – Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.

Dentro del área de estudio, las localidades de La Serena y Coquimbo corresponden a zonas urbanas, cuyos asentamientos se desarrollan principalmente en el sector costero.

Al interior del Elqui Bajo, también se encuentran localidades que desarrollan actividades vitivinícolas, con importante producción de uva pisquera y turismo asociado a las viñas (ODEPA, 2018).

Limitando los bordes de las zonas de estudio, la mayor parte del territorio se identifica como área silvestre de baja vegetación, compuesto por matorral bajo y vegetación anual. No se cuenta con antecedentes que indiquen la actividad ganadera de la zona.

La escala de estudio del modelo conceptual y numérico a desarrollar es regional de 1:100,000 mientras que la escala de estudio del análisis de prospección es del orden de 1:5,000.

5 ELQUI BAJO - MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

5.1 ANTECEDENTES

Dentro de la cuenca del Río Elqui se realizó una revisión exhaustiva de los antecedentes disponibles asociados tanto a informes y estudios previos como al registro de expedientes disponibles de derechos de agua y de la red de control de pozos de la DGA.

5.1.1 REVISIÓN DE INFORMES Y ESTUDIOS PREVIOS

En la cuenca del Río Elqui, se revisaron un total de 20 informes y documentos previos, los cuales se indican en la Tabla 5.1 y son considerados para la realización de los siguientes capítulos.

Tabla 5.1 Informes y estudios previos revisados. Fuente: Elaboración propia.

N°	Nombre	Año	Autor
1	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS ALTERNATIVAS UBICACIÓN BATERÍAS POZOS EN 2 ACUÍFEROS DE LA CUENCA RÍO ELQUI BAJO CON MODELACIÓN EXISTENTE PARA EXPLOTACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SEQUÍA	2022	HIDROGESTIÓN
2	PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL EN ACUÍFEROS DE ELQUI BIP 40014348-0	2021	UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
3	ESTUDIO GEOFÍSICO	2021	UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
4	PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DE ELQUI	2020	UTP HIDRICA CONSULTORES SPA Y RUBIO CARTES Y MEZA INGENIEROS CONSULTORES LTDA
5	LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA EN EL VALLE DE PAN DE AZÚCAR, REGIÓN DE COQUIMBO	2019	GEODATOS SAIC
6	INFORMACIÓN REGIONAL 2018	2018	ODEPA
7	DIAGNÓSTICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS DE LA II Y IV REGIÓN	2017	SUEZ MEDIOAMBIENTE CHILE SA
8	DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO	2017	DGA
9	ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO EN LA ZONA BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI Y EN LA ZONA DE PAN DE AZÚCAR	2015	GCF INGENIEROS
10	DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, REGIÓN DE COQUIMBO	2013	CONIC-BF
11	ANÁLISIS DE EMBALSE SUBTERRÁNEO: APLICACIÓN EN ACUÍFERO SUBYACENTE AL RÍO ELQUI, IV REGIÓN DE COQUIMBO	2009	CHRISTIAN FERNANDO ROMERO FIGUEROA

12	DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DE LA HOYA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ELQUI	2007	UNIVERSIDAD DE LA SERENA
13	EVALUACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN MÁXIMA SUSTENTABLE DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL ELQUI	2006	DGA
14	APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE USO DEL AGUA ESTUDIO DE CASO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO	2006	CAZALAC
15	DIAGNÓSTICO Y CLASIFICACIÓN DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGÚN OBJETIVOS DE CALIDAD	2004	CADE IDEPE
16	EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI IVª REGIÓN	2003	DGA
17	MAPA GEOLÓGICO - LA SERENA - LA HIGUERA	2000	SERNAGEOMIN
18	ANEXOS - ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA	1987	ALAMOS Y PERALTA
19	INVESTIGACIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS EN LA IV REGIÓN	1978	DGA
20	PLAN REGULADOR INTERCOMUNAL PROVINCIA DEL ELQUI	-	MINVU

Los informes y documentos revisados han servido como base para la definición de la geología característica (SERNAGEOMIN, 2000, Romero, 2009), la definición de la geometría (GCF, 2015, GEODATOS, 2019, Hidrogestión, 2022) y propiedades del acuífero (DGA 2003, GCF, 2015, DGA, 2017, Hidrogestión 2022), y la caracterización de los sectores cultivados y métodos de riego, información que proviene principalmente de CONIC-BF, 2013, PROMMRA, 2017.

La geofísica existente (Romero, 2009, GCF, 2015, GEODATOS, 2019, UCDN, 2021, Hidrogestión, 2022) corresponde a los principales antecedentes considerados en el presente estudio, la cual es recopilada, considerada y actualizada además por Hidrogestión, 2022.

Para la caracterización hidrodinámica del acuífero se ha considerado el análisis de niveles de agua subterráneas en pozos obtenidos de estudios (DGA 1978, Alamos y Peralta, 1987, DGA 2003, DGA, 2017), los niveles informados en expedientes de derechos de agua registrados en la DGA, y los registros históricos de la red de control de niveles de la DGA.

Por otro lado, para evaluar la hidrología se ha considerado la información actualizada de variables meteorológicas y de caudal obtenida de las plataformas de exploración climática del CR2 (CR2, 2022), la cual comprende los registros de estaciones DGA.

El “Estudio Hidrogeológico para el análisis alternativas ubicación baterías pozos en 2 acuíferos de la cuenca Río Elqui bajo con modelación existente para explotación aguas subterráneas en

sequía”, Hidrogestión, 2022, se considera como base para la realización del presente estudio, dado que en este se considera una recopilación de todos los estudios previos.

Dicho estudio considera la bibliografía previa existente en la cuenca, destacando la información geofísica de tipo gravimetría y transiente electromagnético (TEM) (GCF, 2015, GEODATOS, 2019). Dicha información y caracterización del basamento fue actualizada en el presente estudio a partir de una revisión exhaustiva de los perfiles TEM y de estratigrafías obtenidas desde expedientes de derechos de agua, junto con los resultados obtenidos de la nueva geofísica de tipo tomografía de resistividad eléctrica (ERT) desarrollados para el presente estudio. Así se desarrolla finalmente una nueva interpolación del basamento y definición de espesores sedimentarios.

De igual forma, destaca la información relacionada con los derechos de agua superficial asociados a los canales de riego, tipos de cultivo y eficiencias de riego en la cuenca, la cual ha sido considerada en el presente estudio para estimar la recarga por riego y desde canales.

Por otro lado, la información de parámetros hidráulicos presentada en Hidrogestión, 2022, ha sido considerada y actualizada con los resultados de las pruebas de bombeo realizadas para el presente estudio, considerando luego para el modelo numérico, una zonificación equivalente de la conductividad, con una conductividad hidráulica equivalente en la vertical en función de la profundidad característica de los pozos con información.

Las zonas propuestas por Hidrogestión, 2022, identificadas como de interés para la extracción de agua subterránea han sido consideradas para la ubicación de los nuevos perfiles ERT realizados, y el posterior análisis de idoneidad para ubicar captaciones.

Con el objetivo de considerar la nueva información levantada en el presente estudio, enfocando los análisis en la extracción mediante captaciones profundas, y la disponibilidad de agua en el río, se desarrolla un nuevo modelo numérico, considerando los antecedentes de estudios previos, y realizando una estimación del balance hídrico consistente con los resultados modelados numéricamente.

5.1.2 EXPEDIENTES DISPONIBLES EN LA DGA

Se realizó una revisión de los expedientes disponibles en la DGA, en la cual se consideraron los derechos registrados en la cuenca y también se incluyeron los registros de tramitaciones de expedientes asociados a solicitudes de derechos concedidos, pendientes, informados con sentencia e Informados sin sentencia (Figura 5.1).

De acuerdo con estos antecedentes, actualmente existen en torno a 11.000 puntos de captación que se encuentran registrados en la DGA y que han sido considerados en este informe para determinar los radios de protección y determinar la disponibilidad especial para las futuras perforaciones.

En esta revisión de expedientes de la DGA, también se obtuvo información estratigráfica de pozos, profundidad de las capacitaciones y antecedentes hidráulicos e hidrodinámicos que complementan la información para la resolución del modelo conceptual de la cuenca.

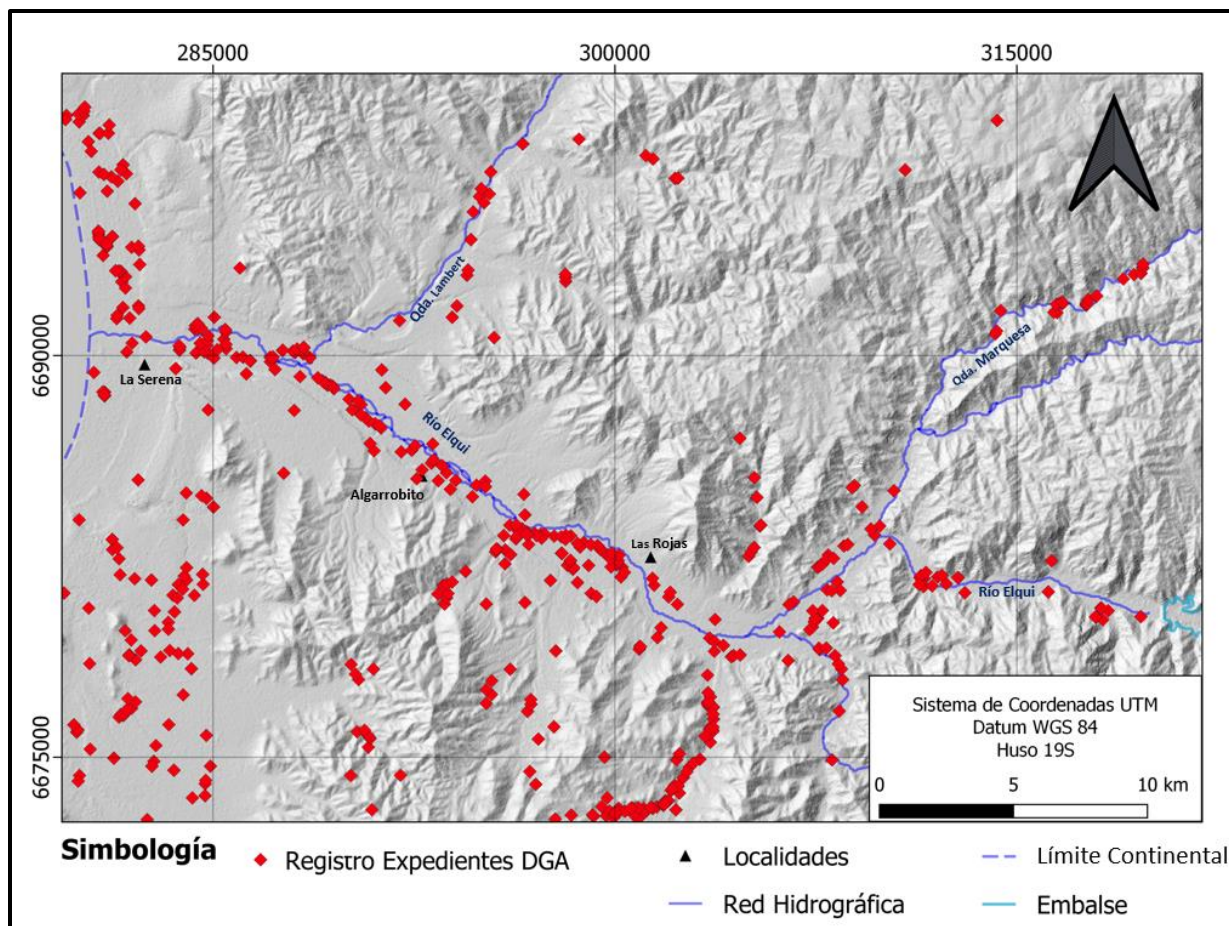


Figura 5.1 Derechos de agua registrados en la DGA y tramitaciones de expedientes. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.3 REGISTRO HISTÓRICO DE LA RED DE CONTROL DE LA DGA

En la zona de estudio, la DGA cuenta con 21 estaciones de control de medición de la profundidad del agua subterránea (Tabla 5.2). De las cuales se obtuvieron los registros de la profundidad del nivel estático desde el 2000 hasta la fecha del presente informe (Figura 5.2 y Figura 5.3), los cuales han sido utilizados para la caracterización hidrodinámica de la cuenca, para el análisis de la evolución histórica de los niveles de agua subterránea y como puntos de observación para la calibración del modelo numérico desarrollado.

En la Figura 5.3 se presentan algunas de las gráficas realizadas para el análisis de la evolución temporal de los niveles.

Tabla 5.2 Estaciones de control de la DGA. Fuente: Aluvial Consultores

Código Interno	Estación de control DGA
EM-1	EL MOLLE
ER-1	EL ROSARIO
ENDESA S-E -PA	ENDESA S-E PAN DE AZUCAR
P- 114 VN	PARCELA 114 VEGAS NORTE
NP- 121 VN	NORIA PARCELA 121 VEGAS NORTE
P- 117 VN	PARCELA 117 VEGAS NORTE
P- 122 VN	PARCELA 122 VEGAS NORTE
P- 123 VN	PARCELA 123 VEGA NORTE
P- 164 VN	PARCELA 164 VEGAS NORTE
P- N 1 SR	PARCELA N 1 SAN RAMON
P.N -2 SR	PARCELA N 2 SAN RAMON
PEI-01	PUEBLO EL ISLON
PLR-01	PUEBLO LAS ROJAS
QT-01	QUEBRADA TALCA
P. PP C - 12	P. PUNTA DE PIEDRA C - 12
A.P. P C - 17	A.P. PIEDRA C - 17
APP C - 3	A.P. PIEDRA C - 3
A-01	ALFALFARES
A-01	ALMENDRAL
AS- SA	AS. SANTA AMALIA
A- SF	ASENTAMIENTO SANTA FILOMENA
HSE- P.A.	HIJUELA SANTA ELENA P.A.
AVB A - 2	ASENTAMIENTO VIDA BARRIALES A - 2
NV-01	NUEVA VIDA
ES- 1	EL SAUCE 1
LM-01	LO MARTINEZ
SC-01	SANTA CARMEN
ES- 3	EL SAUCE 3
ES-2	EL SAUCE 2
SC-2	SANTA CARMEN 2

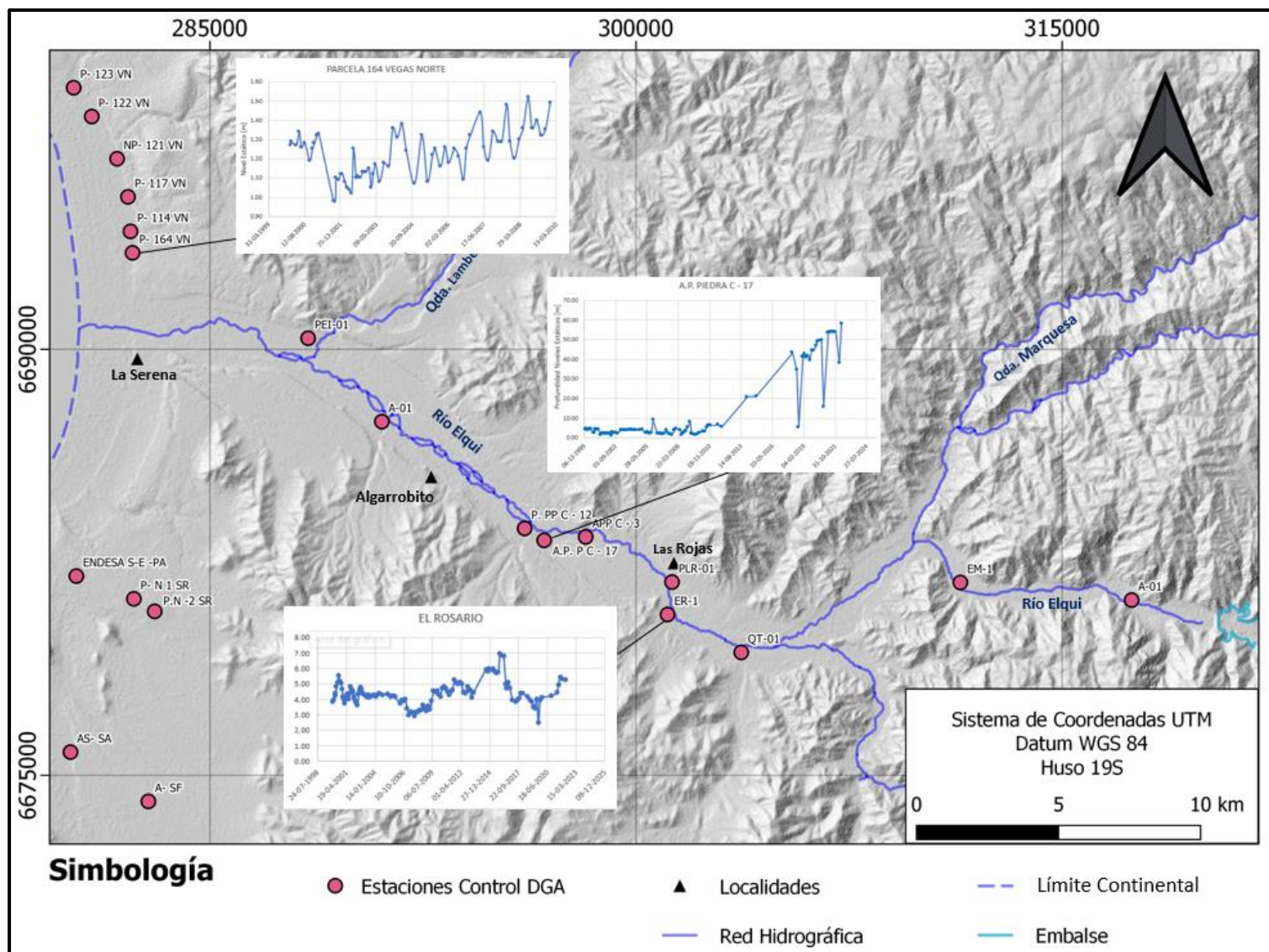


Figura 5.2 Red de control de niveles estáticos en la cuenca. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.4 SISTEMAS SANITARIOS RURALES

En función de los derechos de agua y registros entregados por la DOH, se ha determinado la ubicación de los sistemas sanitarios rurales existentes en la cuenca del Río Elqui y se ha generado polígonos en torno a cada punto de 1000 m de radio. Con lo cuales se determina la disponibilidad espacial para las futuras captaciones de emergencia, considerando cada pozo APR debe estar alejado a más de 1000 m de nuevas captaciones para evitar su afección.

Se debe tener en consideración que los registros no necesariamente consideran el punto de captación, por lo cual previo a la ejecución de una perforación se debe validar la distancia de las captaciones a los sistemas sanitarios rurales mas cercanos.

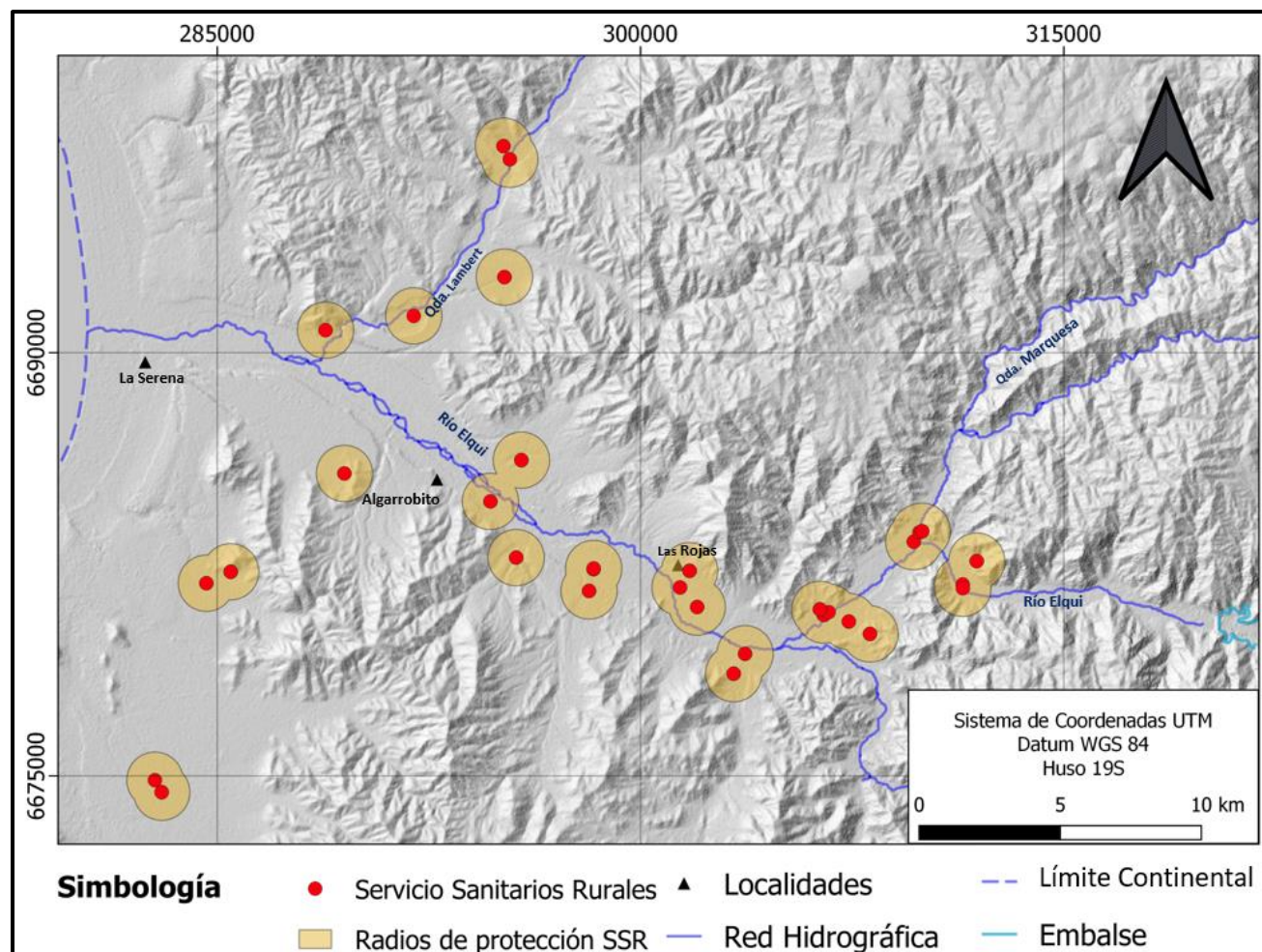


Figura 5.3 Derechos de agua registrados en la DGA y tramitaciones de expedientes. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.5 RESUMEN DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

En función de la revisión de informes y estudios previos, de la revisión de expedientes digitalizados en la DGA, el registro histórico de la red de control de la DGA y de los antecedentes de SSR, se ha recopilado la siguiente información hidrogeológica que ha sido utilizada para la resolución del modelo conceptual y para el análisis y ubicación optimizada de los nuevos pozos de emergencia.

5.1.5.1 Tipo de captación

Desde el embalse Puclaro hasta la localidad de La Serena las captaciones de agua subterránea son principalmente de tipo pozo profundo y noria, estas últimas en menor proporción que las captaciones profundas.

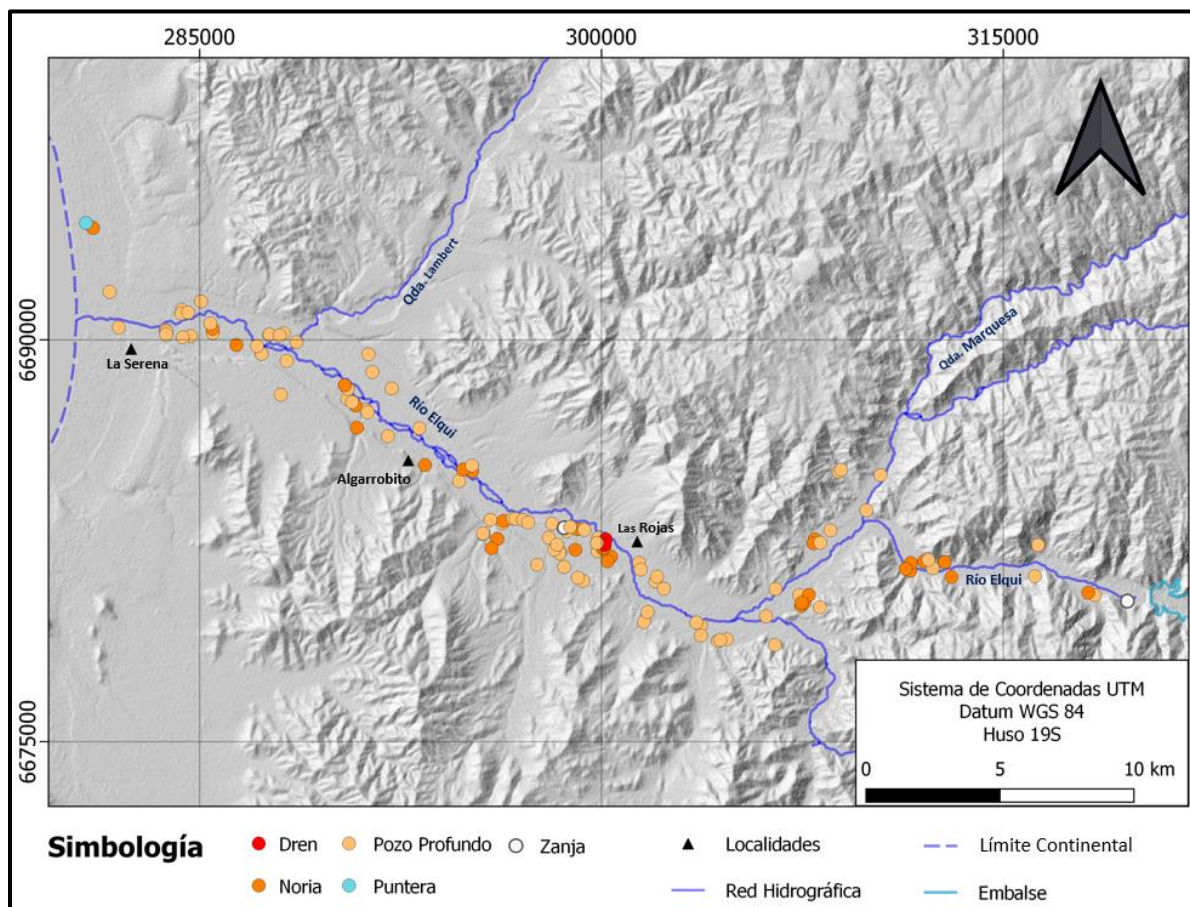


Figura 5.4 Tipos de captaciones existentes en la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.

Dentro de las captaciones revisadas, tres de ellas corresponden a obras de captación de agua subsuperficial, las cuales se encuentran al oeste de la localidad de Las Rojas.

5.1.5.2 Profundidad de los pozos

De acuerdo con los antecedentes, existe una mayor densidad de pozos profundos desde Las Rojas hasta La Serena, con profundidades que superan los 50 m.

Aguas arriba de las Rojas y hasta el embalse las captaciones son de profundidades inferiores a los 50 m, lo cual podría estar relacionado con los niveles piezométricos del acuífero que se encuentran a menores profundidades hacia este sector.

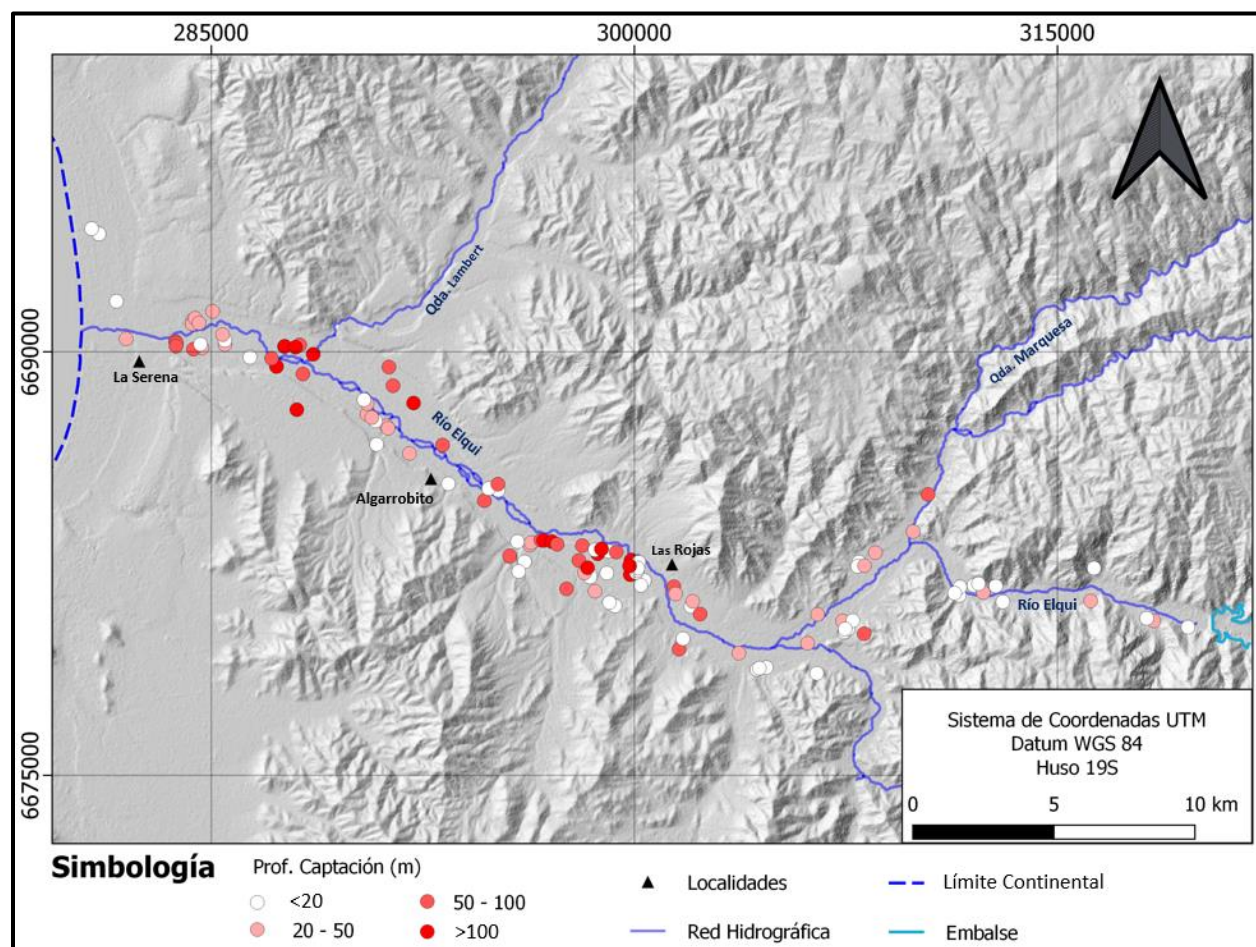


Figura 5.5 Profundidad de las captaciones existentes en la Cuenca del Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.5.3 Profundidad del nivel estático

De acuerdo con la información recopilada de expedientes, los registros del nivel estático indican una profundidad del agua, menor a los 10 m, profundidad validada en el catastro de pozos realizado (Figura 5.6).

Algunas de las captaciones indican la presencia de agua a profundidades sobre los 10m, lo cual podría estar relacionado a variaciones topográficas y/o a la medición de niveles dinámicos producto del bombeo en el mismo pozo o de captaciones aledañas.

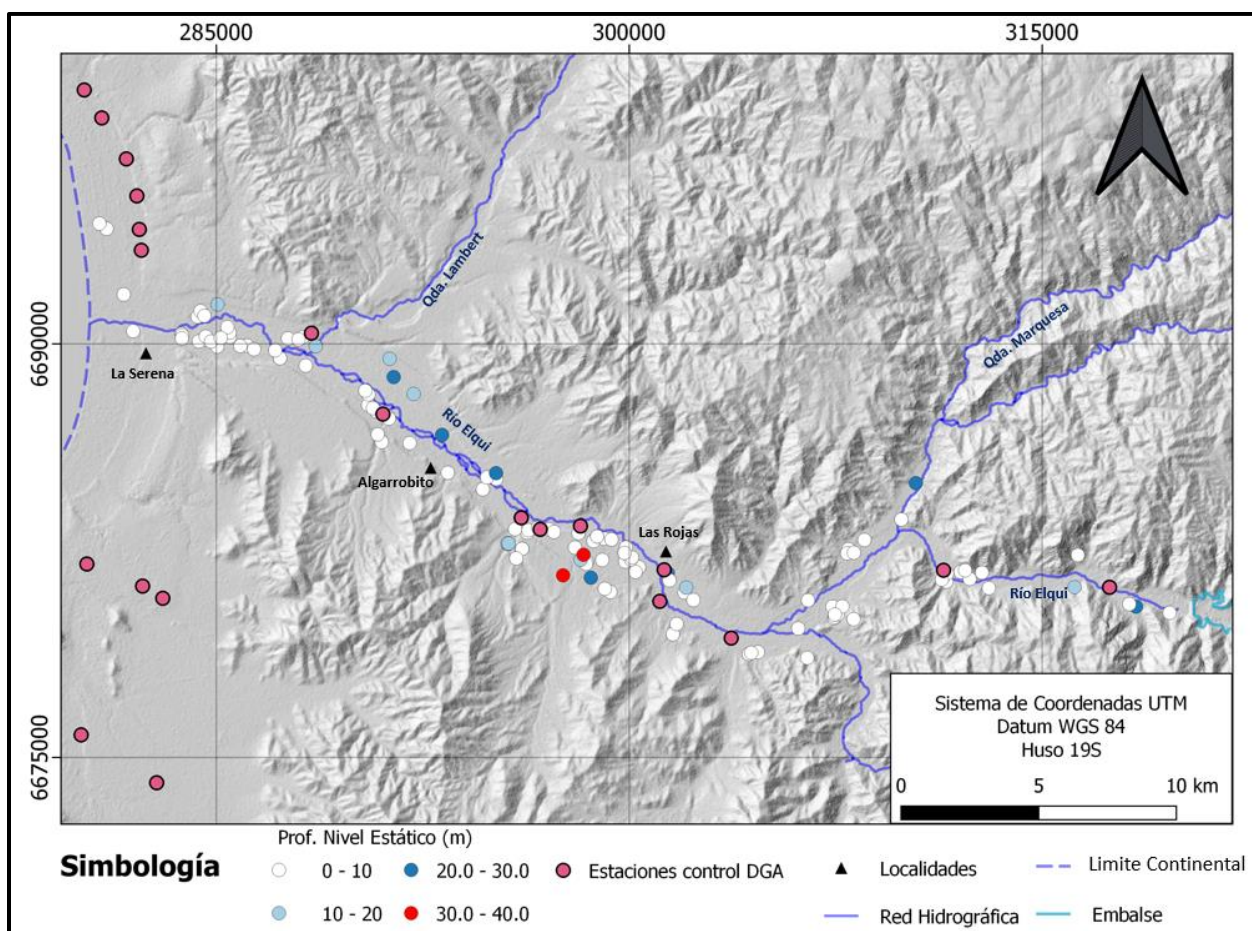


Figura 5.6 Antecedentes con la profundidad del nivel estático. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.5.4 Geofísica y estratigrafía

De acuerdo con la revisión de informes en la cuenca del Río Elqui existen 26 columnas estratigráficas que están distribuidas entre el embalse Puclaro y La Serena.

Los antecedentes geofísicos recopilados son del tipo Transiente electromagnético, gravimetría, sismoelectrónica y tomografía eléctrica (Figura 5.7).

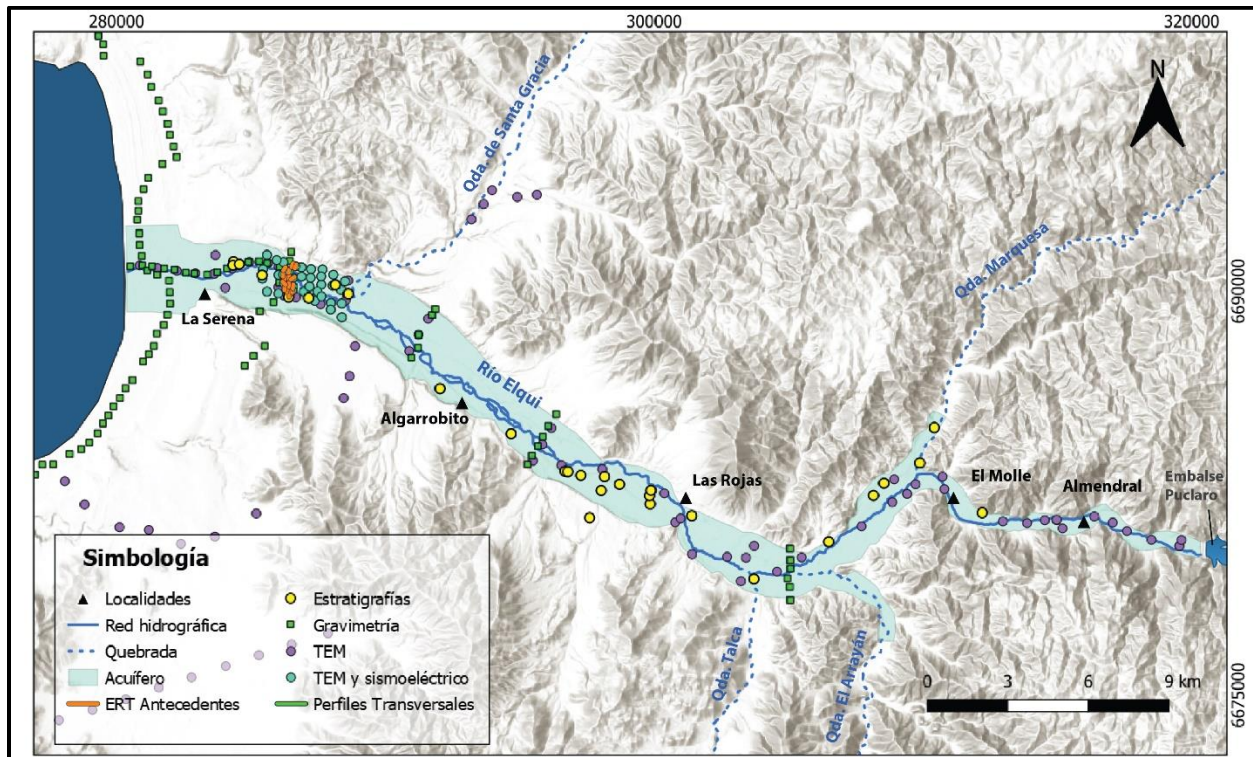


Figura 5.7 Antecedentes geofísicos en la zona de estudio. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.5.5 Parámetros hidráulicos

En función de los antecedentes y expedientes de la DGA, se han recopilado más de 200 datos con la información de las constantes elásticas que caracterizarían el sistema acuífero los cuales han sido calculados de ensayos de bombeo que habían sido efectuados en norias y pozos profundos (Figura 5.8).

Estos antecedentes son utilizados para caracterizar las constantes elásticas del acuífero y el comportamiento hidráulico del acuífero.

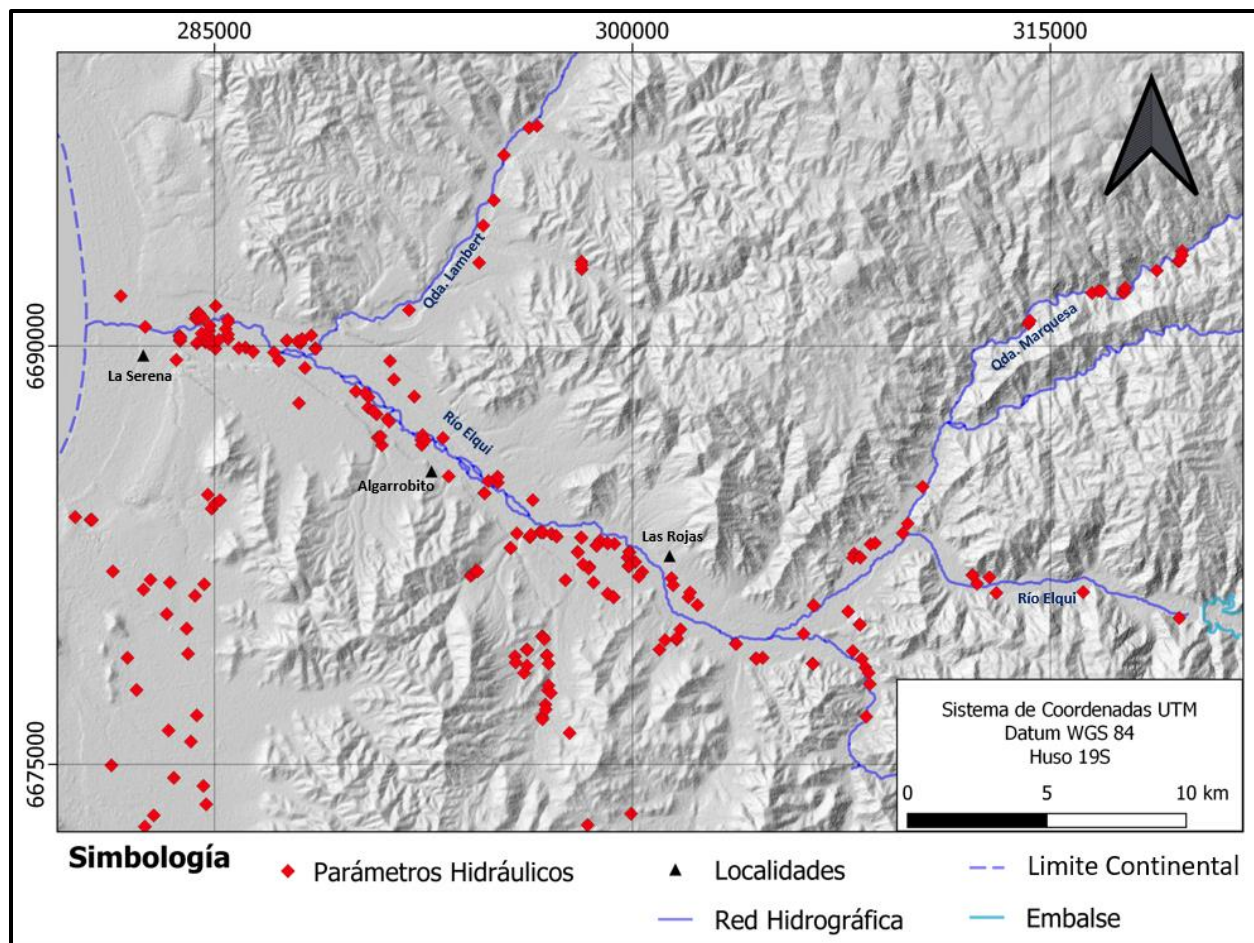


Figura 5.8 Captaciones con ensayos de bombeo. Fuente: Aluvial Consultores.

5.1.5.6 Calidad de las aguas subterráneas

Los antecedentes de calidad de las aguas subterránea corresponden a datos fisicoquímicos y a registros con la concentración de los elementos mayoritarios, entre los años 1994 y 2021. (Figura 5.9).

Estos antecedentes se encuentran distribuidos desde el embalse Puclaro hasta la serena, y con el Catastro de pozos realizado en el presente estudio se ha completado la información para la caracterización hidroquímica del sistema.

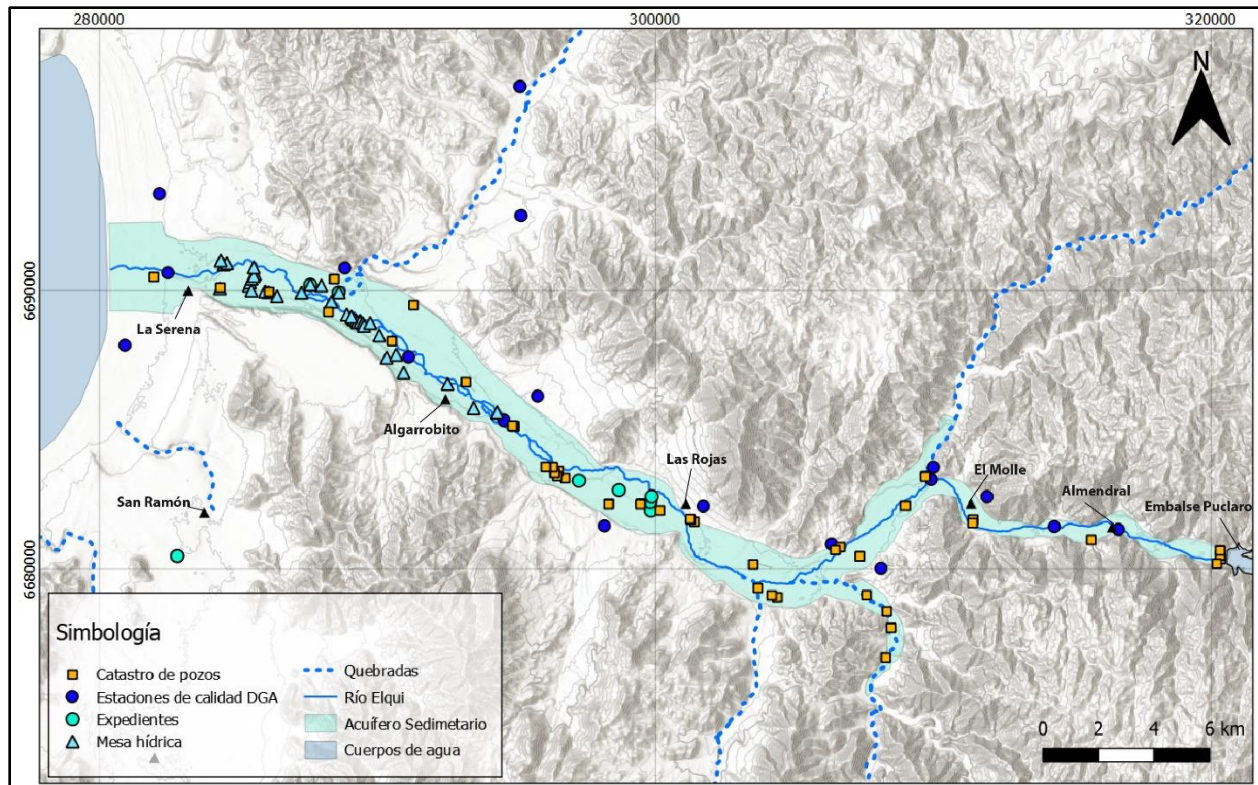


Figura 5.9 Antecedentes de calidad de las aguas subterráneas. Fuente: Aluvial Consultores.

5.2 GEOMORFOLOGÍA

La cuenca del río Elqui se conforma de una serie de elementos fisiográficos de gran predominancia, las unidades macrogeomorfológicas principales están conformados por la Cordillera Andina, Cordones Transversales, y la Cordillera de la Costa (Figura 5.10).

En particular, la cuenca del Elqui Bajo, se emplaza entre dos unidades geomorfológicas predominantes, los Cordones Transversales y Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional.

Los cordones transversales se caracterizan por poseer un relieve montañoso, con valles segmentados transversalmente, y cambios de relieves suavizados. Como producto del paroxismo tectónico, se generan piedemontes que delimitan los márgenes de los valles fluviales. El agua que escurre en los Cordones Transversales por la red de drenaje hasta alcanzar la red fluvial forma parte fundamental en la labranza de estas montañas y el valle en general.

El río Elqui es la principal red fluvial de la región de estudio, se sitúa en la unidad geomorfológica Llanos de sedimentación fluvial o aluvional, la que alberga el sistema acuífero del río Elqui. Esta

red fluvial genera sistemas de terrazas aluviales, caracterizadas por un conjunto de sistemas escalonados en las zonas cercanas a la desembocadura.

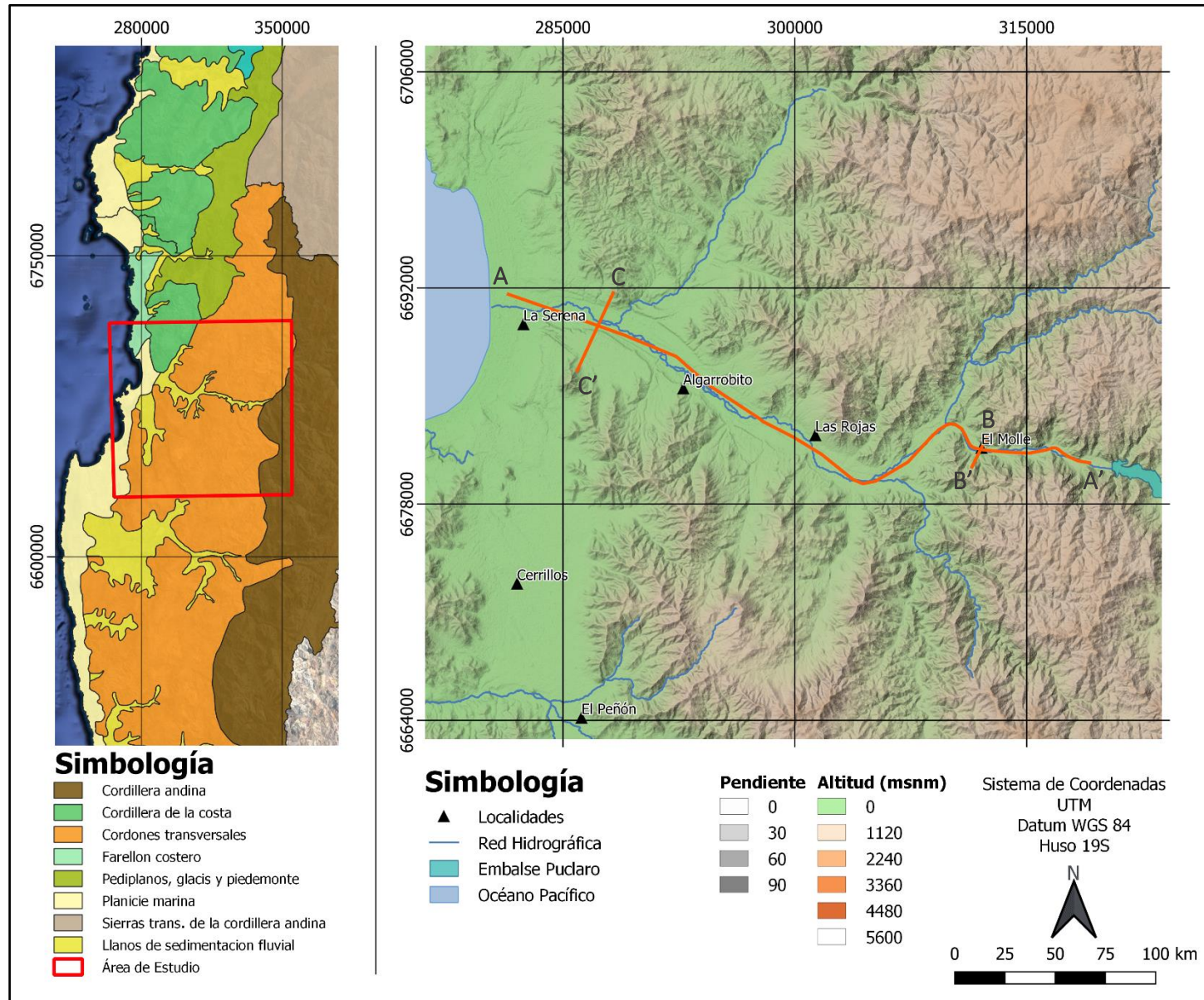


Figura 5.10. Mapa geomorfológico del sector río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración Propia.

El río Elqui se orienta en dirección sureste – noroeste con alturas máximas de 1120 m.s.n.m. en torno al sector de Montegrande y bajos topográficos en los llanos de sedimentación fluvial hacia el suroeste, donde la escorrentía drena hacia el mar.

El área de estudio, desde el sector de El Molle hasta su desembocadura en el mar, posee una longitud aproximada de 45 km con una pendiente media de 1.7% sin variaciones predominantes.

Se caracteriza por ser meandriforme asociado a cursos de agua medio-bajo, con un cambio en la dirección de flujo en el sector de La Marquesa, lo que podría atribuirse a efectos de sistemas estructurales en la región.

El perfil A-A', longitudinal al río Elqui desde el embalse Puclaro aguas arriba, hasta el mar aguas abajo, muestra una pendiente suave y constante a lo largo del trazado de río lo que genera bajos gradientes hidráulicos y por consiguiente la generación aguas abajo de depósitos de baja energía como las terrazas fluviales observadas en el perfil C-C'.

En el sector de El Molle, aguas arriba del perfil A-A', el cauce presenta del orden de 700 metros de ancho (Perfil B-B'), mientras que aguas abajo en el sector de la desembocadura (Perfil C-C'), el ancho medio asciende a 4 kilómetros.

Dada la gran cantidad de aportes de la red de drenaje, el río Elqui debiera presentar una condición de ensanchamiento lo cual se corrobora con lo observado en el párrafo anterior y con la existencia de terrazas fluviales observables aguas abajo de la cuenca. Este rasgo se evidencia en el sector de la desembocadura (Perfil C-C') donde se aprecia un sistema escalonado de varias decenas de metros (Figura 5.11).

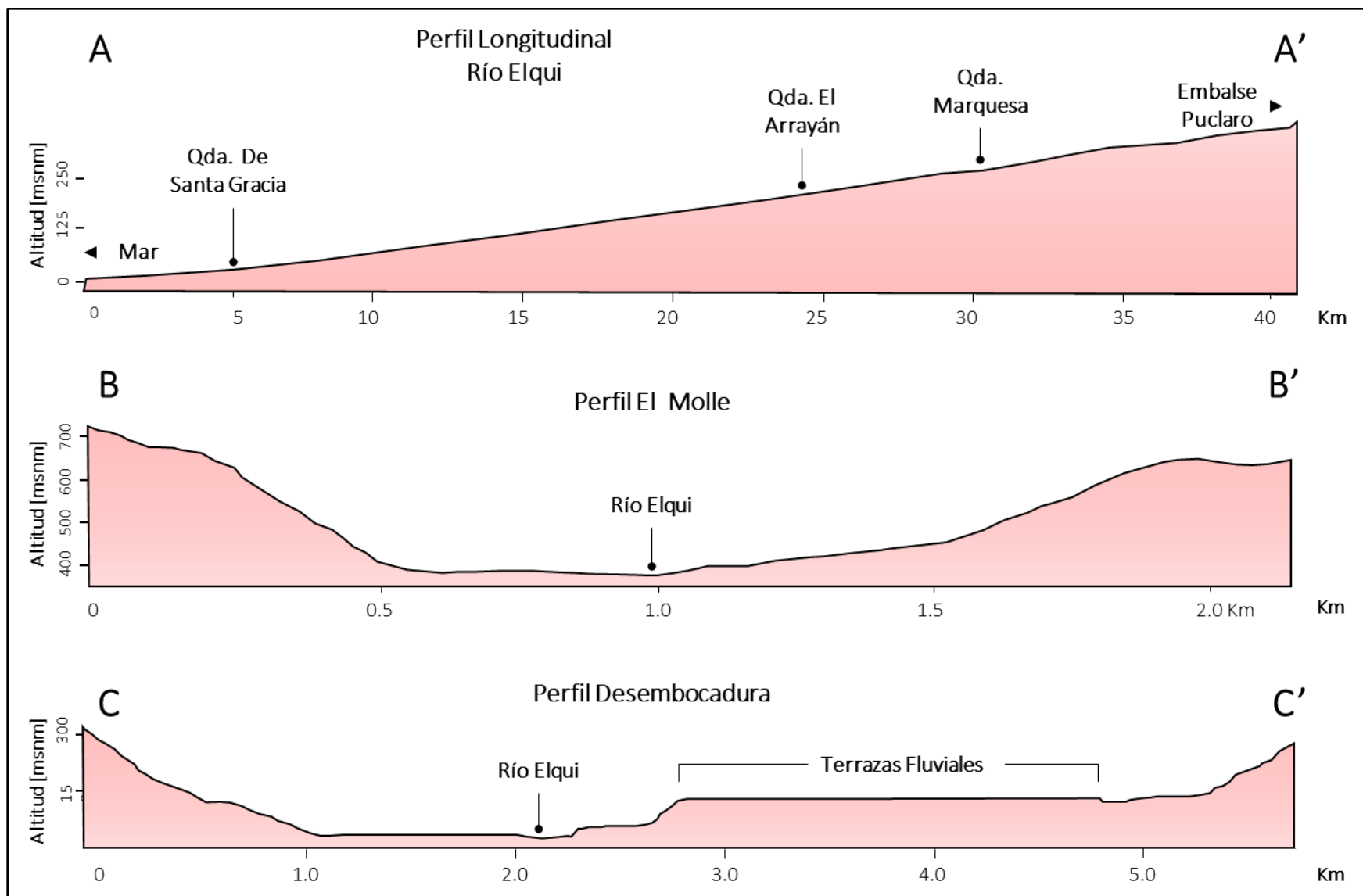


Figura 5.11. Perfiles topográficos Valle del río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración Propia.

5.3 GEOLOGÍA

La geología de la cuenca del río Elqui Bajo, está conformada por formaciones rocosas sedimentarias continentales y marinas de edades neógenas y cretácicas y por formaciones rocosas volcánicas y volcano – clásticas, intruídas principalmente por monzodioritas cuarcíferas y por monzodioritas y dioritas (Figura 5.12).

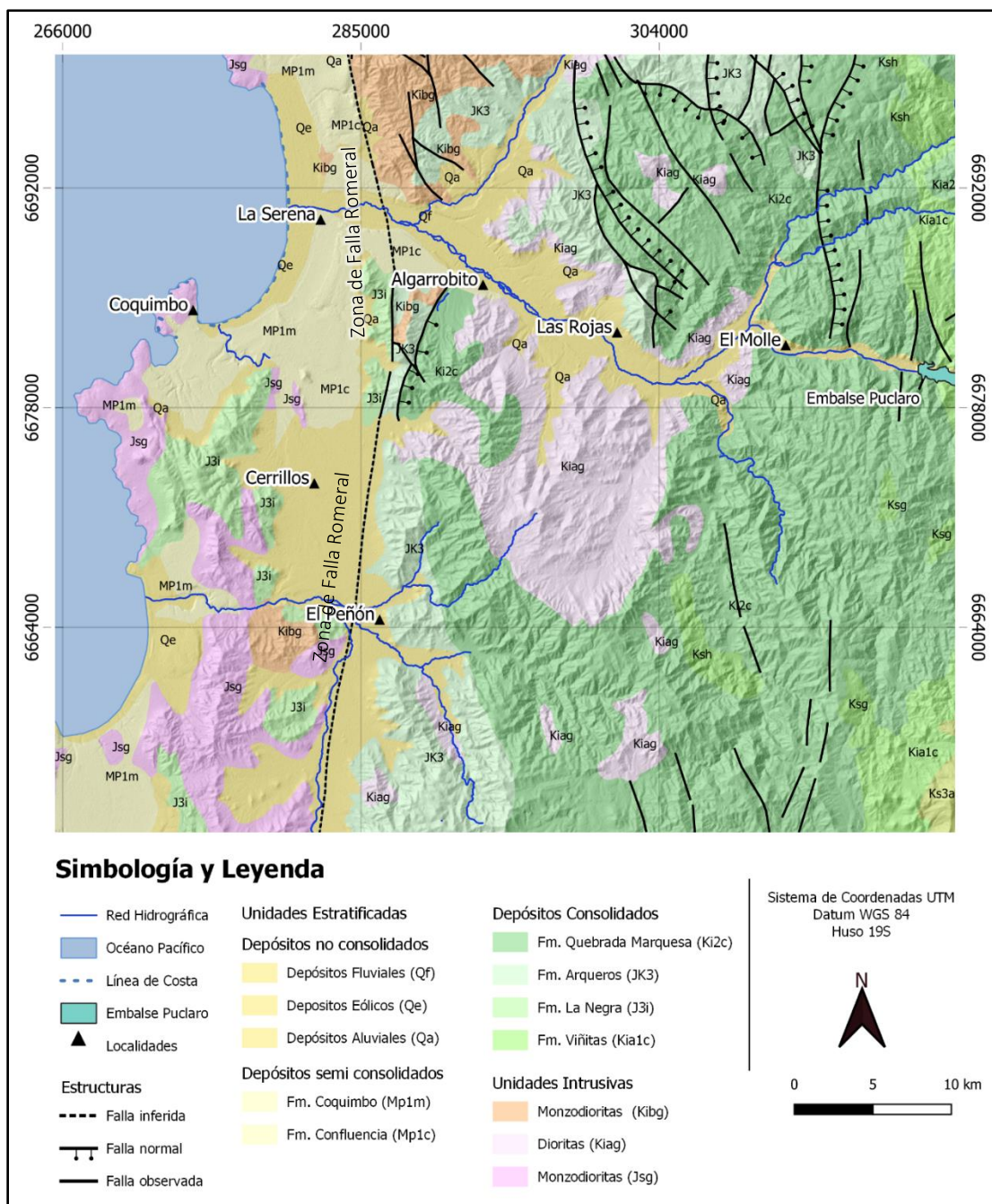


Figura 5.12. Mapa geológico. Modificado de Sernageomin (2003) [1].

Las formaciones que constituyen la cuenca del Elqui Bajo, componen el relieve actual de los cordones transversales montañosos, y son sobreyacidas por depósitos no consolidados del tipo fluvial, aluvial, y eólico, de edades cenozoicas (Qa, Qe y Qf), los cuales rellenan los valles y quebradas por la acción del agua superficial que escurre por las redes de drenajes y alimenta la red fluvial principal del río Elqui. Los cauces se encuentran constituidos por depósitos no consolidados tales como depósitos fluviales, terrazas subactuales y llanuras de inundación, configurando un registro estratigráfico complejo, característico de ambientes sedimentarios fluviales meándricos.

El basamento de la cuenca del río Elqui está constituido por el este por depósitos consolidados de la Fm. Quebrada Marquesa, secuencia volcánica sedimentaria principalmente continental de edad cretácico inferior. Por el centro, el basamento está representado por intrusivos dioríticos de edad cretácica inferior. Hacia el oeste el relleno sedimentario sobreyace a los depósitos semi – consolidados de las formaciones Confluencia y Coquimbo, secuencias continentales y marinas respectivamente, que forman terrazas en sus afloramientos al oeste de la cuenca, sin embargo, se encuentran subyaciendo a depósitos más recientes aguas arriba del río Elqui.

En cuanto a los sistemas estructurales desarrollados en la cuenca, se debe recalcar la presencia de la Zona de Falla Romeral (ZFR), estructura regional cercana a la línea de costa que atraviesa en sentido norte – sur a la cuenca del río Elqui. La ZFR separa dos dominios estructurales: Por la costa, se ubica el Dominio Costero en el cual se presentan hasta cinco niveles de terrazas de abrasión marina, desarrollados mayormente en la Formación Coquimbo. Dos de estas terrazas presentan un buen desarrollo de escarpes de hasta 12 m. Sendas terrazas se ubican a los 5 – 7 m.s.n.m. y 90 – 110 m.s.n.m respectivamente. La actividad de la ZFR estaría directamente relacionada al alzamiento y erosión de las formas aterrazadas en las formaciones Coquimbo y Confluencia, generando estructuras escalonadas en el basamento (Emparan y Pineda, 2000).

5.4 HIDROLOGÍA

La cuenca del río Elqui bajo, con aproximadamente 2870 km² (Figura 5.13), corresponde a la cuenca aportante al río Elqui desde inmediatamente aguas abajo del embalse Puclaro hasta su desembocadura en La Serena. Las subcuencas mayores, con áreas de aproximadamente 735, 561 y 1094 km² corresponden a las de la quebrada La Marquesa, El Arrayán y Santa Gracia respectivamente.

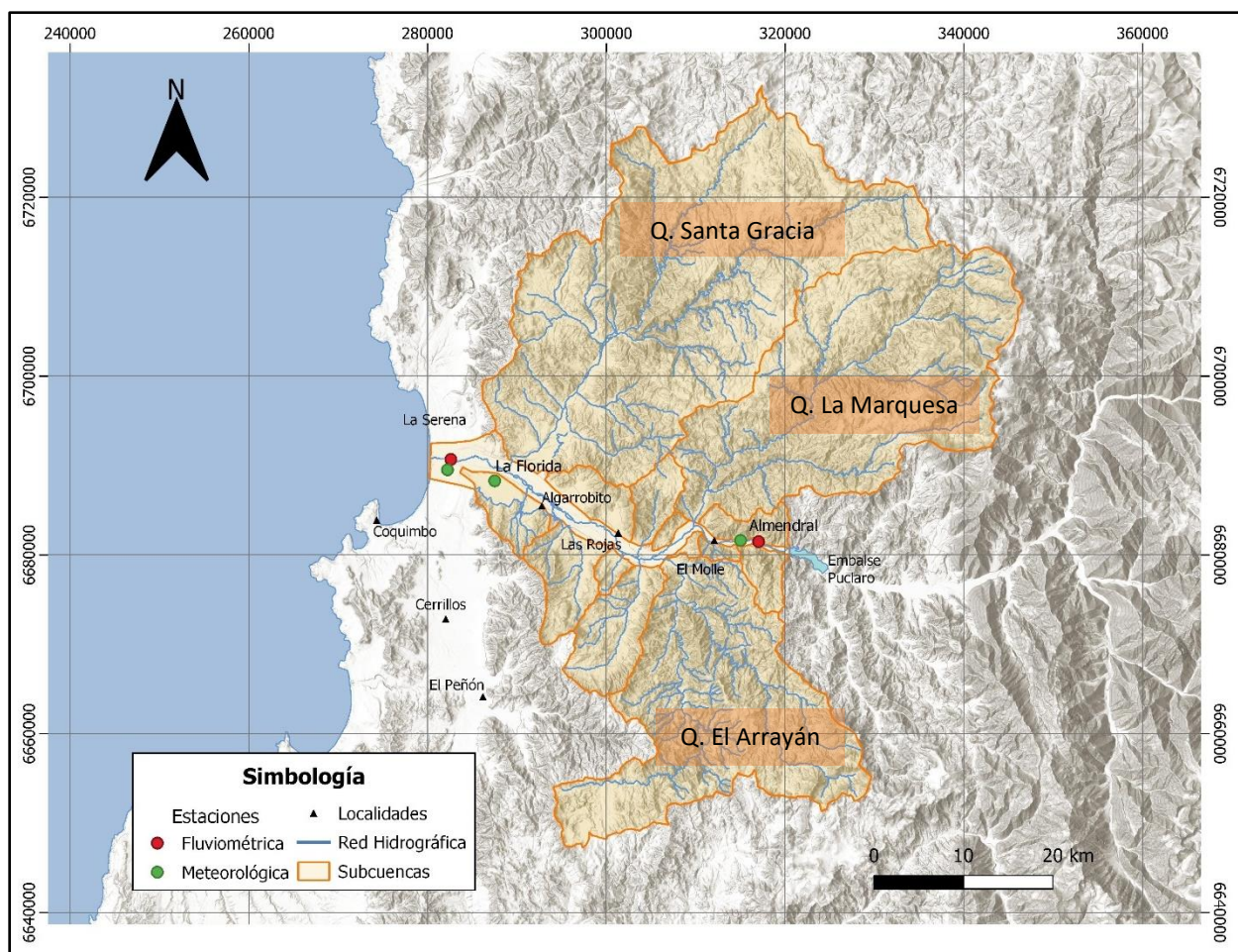


Figura 5.13. Cuenca y estaciones Elqui Bajo. Elaboración propia.

Las precipitaciones y caudales (Figura 5.14) se han obtenido de las plataformas de exploración climáticas del CR2 (CR2, 2022) (Anexo G), donde se entregan los registros en estaciones DGA y otros pronósticos meteorológicos. Los valores promedio indicados consideran solo los días con registro. Se registra una precipitación media en torno a los 80 mm al año en las estaciones ubicadas en la cuenca (Figura 5.13, Figura 5.14) (CR², 2022), con un promedio de 78.5 mm en

estación La Florida entre los años 1990 y 2022. El total anual se concentra en los meses de otoño e invierno, en eventos de pocos días de duración.

Los valores de precipitaciones registrados en la estación La Florida (Anexo G), son los utilizados en el balance de agua subterránea del presente estudio y con los cuales se determina la recarga por lluvia.

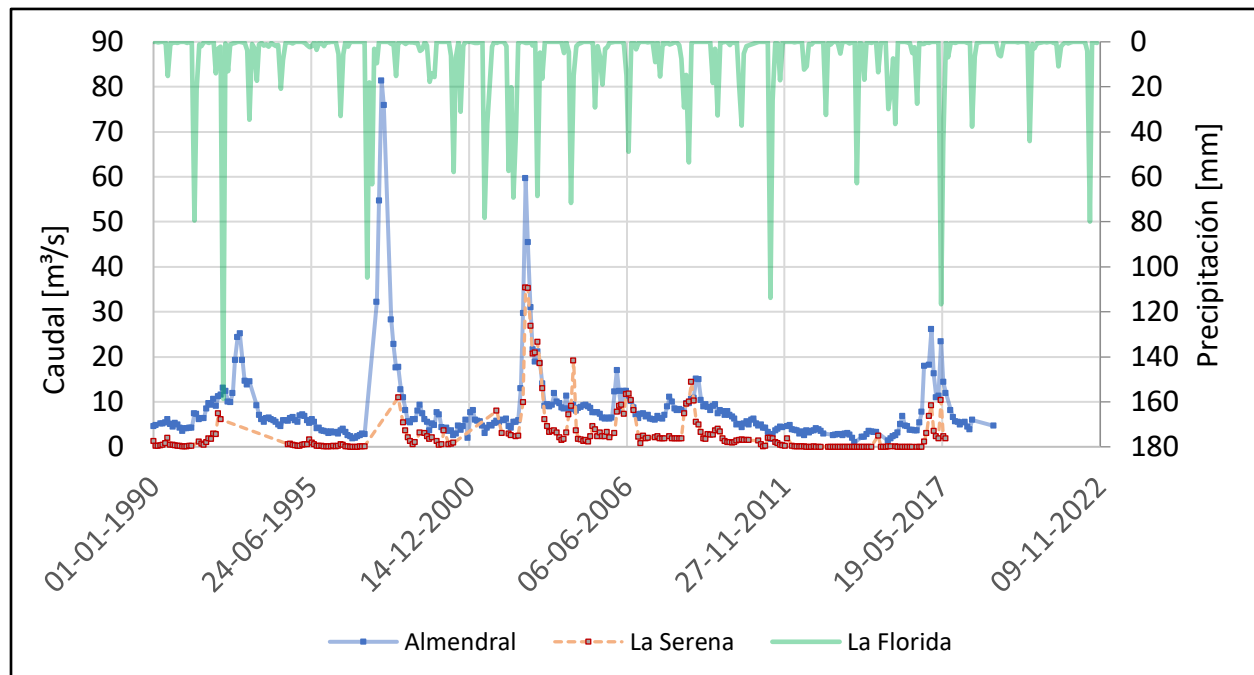


Figura 5.14. Caudales mensuales del río en Almendral y La Serena, y precipitación mensual en estación La Florida. Fuente: CR².

Según el centro de ciencia del clima y la resiliencia (CR², 2022), la evapotranspiración potencial anual supera los 950 mm, con valores mensuales máximos de 130 mm en verano y mínimos de hasta 30 mm en invierno

El río Elqui presenta un régimen controlado por los embalses, los cuales afectan la distribución del volumen en el tiempo. Así, el caudal en la parte baja de la cuenca se encuentra regulado por el embalse Puclaro desde el año 1999. Se estima un caudal anual medio histórico en Almendral, a partir de los datos mensuales, en torno a los 9 m³/s, sin embargo, la mayor cantidad del tiempo el caudal se encuentra en torno a los 4 m³/s, y algunas crecidas extremas elevan la estadística (CR², 2022).

Con aproximadamente 11 m³/s de derechos de agua superficial, el agua del río se va distribuyendo hacia aguas abajo por los canales de riego durante todo el año (Figura 5.15), los cuales en su mayoría se encuentran sin revestir. De esta forma el agua que no está en el río se encuentra así distribuida en los canales, los cuales recargan el acuífero. Esta recarga es considerada en el balance hídrico desarrollado luego en el presente informe.

Los caudales pasantes en el río en Almendral y la información de derechos en canales de riego, es utilizada en el balance subterráneo para determinar la disponibilidad y estimar la infiltración desde canales. De acuerdo a la Junta de Vigilancia, existen pérdidas en torno al 30 % por infiltración y actualmente los canales funcionan en torno al 20 % de sus derechos de agua.

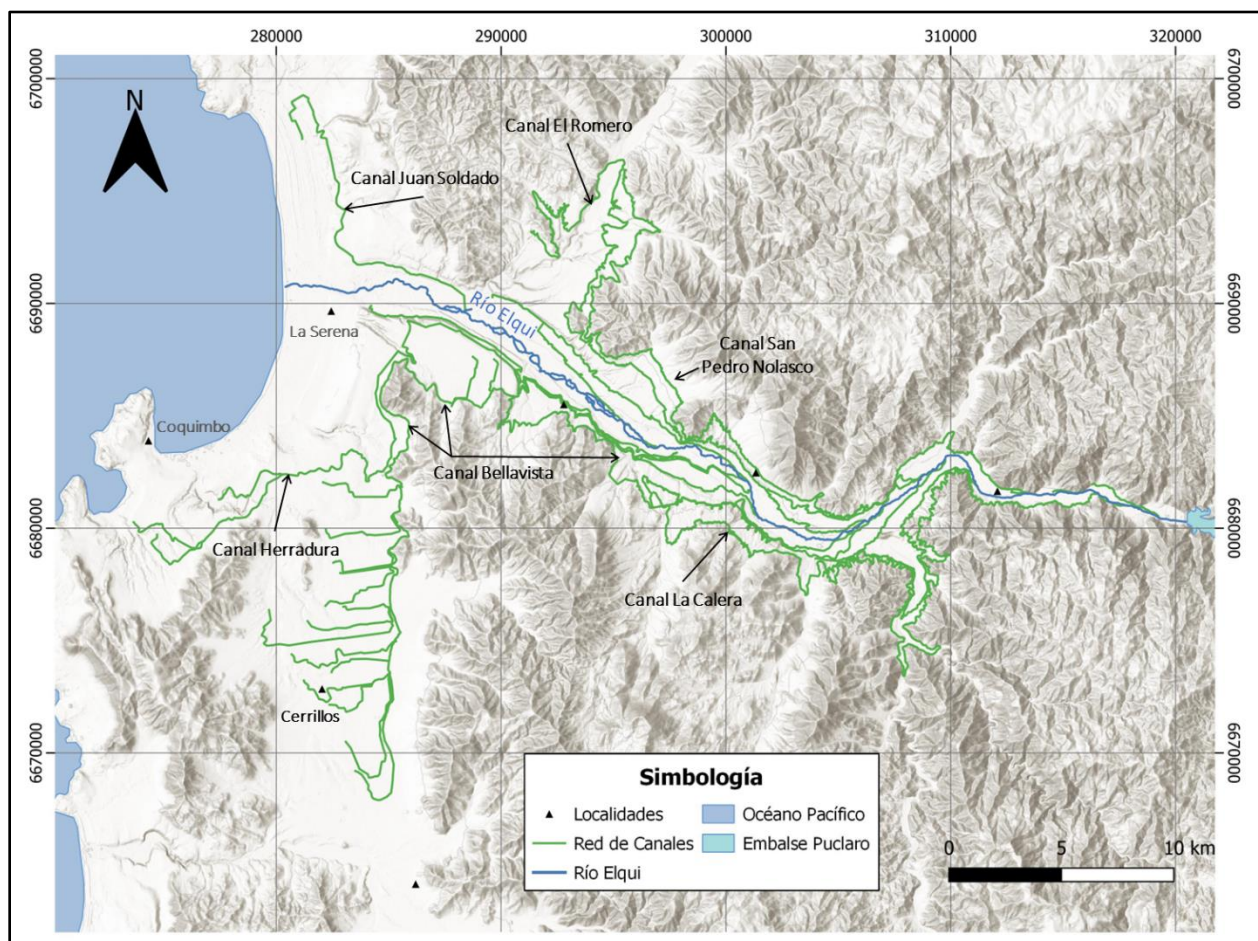


Figura 5.15. Canales de riego Elqui Bajo – Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.

Existe trasvase de agua a través de canales hacia la cuenca de Pan de Azúcar para riego, y para abastecer parte del consumo de agua potable de La Serena y Coquimbo. Del orden de 1500 l/s

pasarían por el canal Bellavista hacia la cuenca Pan de Azúcar, mientras que otros 1000 l/s de derecho pertenecientes a Aguas del Valle salen hacia La Serena.

El río Elqui en La Serena (Figura 5.14) presenta un caudal medio del orden de 2.8 m³/s, observándose valores que tienden a cero para el año 2013, y se mantienen bajos hasta el año 2016 (CR², 2022).

Dada la condición de caudales en el río y la persistencia de los canales de regadío, en condiciones naturales el agua subterránea se presenta relativamente somera en torno al cauce, existiendo, de acuerdo a la variación estacional y temporada de riego, un continuo y variable intercambio de agua entre el acuífero y el río, controlada por la topografía, permeabilidad, cambio en la sección del acuífero. Así, la precipitación, el río, los canales y excedentes de riego aportan agua al acuífero. Esta recarga luego aporta al flujo base del río. Los descensos producidos por las extracciones aumentan la infiltración del río al acuífero.

5.5 HIDROESTRATIGRAFÍA

El sistema acuífero de la cuenca del río Elqui fluye por el relleno sedimentario permeable que sobreyace a un basamento heterogéneo y mayoritariamente impermeable.

Este relleno sedimentario se ha conformado debido a la meteorización, erosión y depositación de fragmentos del basamento, que se han depositado en bajos topográficos, por la acción de cursos de agua superficiales, por la acción marina hacia el oeste y por aportes sedimentarios laterales debido a la erosión de los bordes de la cuenca.

El relleno sedimentario de la cuenca está conformado por depósitos fluviales y/o aluviales de distinta consolidación y permeabilidad existiendo una preferencia de los flujos de agua subterránea por los rellenos aluviales recientes y de menor grado de consolidación, en el cual se presentan actualmente la mayor cantidad de captaciones de agua subterránea.

Los rellenos sedimentarios más antiguos, de mayor grado de consolidación y menor permeabilidad se expresan geomorfológicamente en los bordes de la cuenca, como antiguas terrazas aluviales de entre 20-40 m de profundidad que están compuestas por sedimentos

semiconsolidados y que a la fecha son explotadas localmente por pozos profundos de muy bajo rendimiento.

Para la caracterización del sistema acuífero y determinar su profundidad, se ha considerado la información geofísica y estratigráfica de antecedentes (2019, Geodatos) más la información de resistividad obtenida de las tomografías eléctricas realizadas en el presente estudio (Figura 5.16).

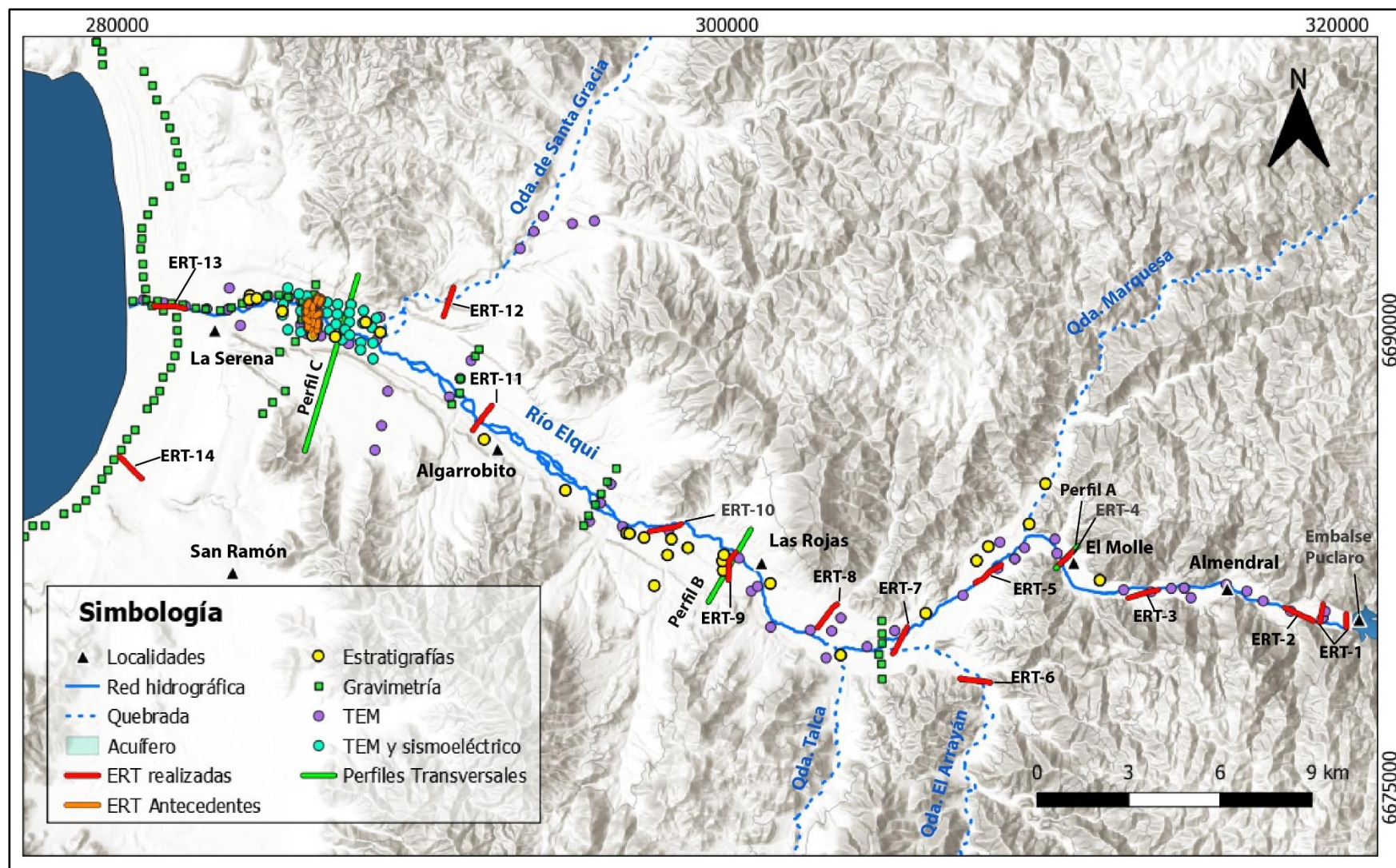


Figura 5.16. Geofísica y estratigrafías en la cuenca del río Elqui. Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los antecedentes estratigráficos, el sistema acuífero del río Elqui está compuesto por gravas y arenas con un porcentaje de arcilla variable (10-50%) con intercalaciones lenticulares y locales de limo y/o arcillas gravo arenosas, de hasta 10 m de espesor.

Desde el embalse Puclaro a la desembocadura del río, el sistema se caracteriza por una sola capa (Figura 5.17), que dada su heterogeneidad granulométrica y permeabilidad diferencial en la horizontal y vertical, presenta confinamientos locales.

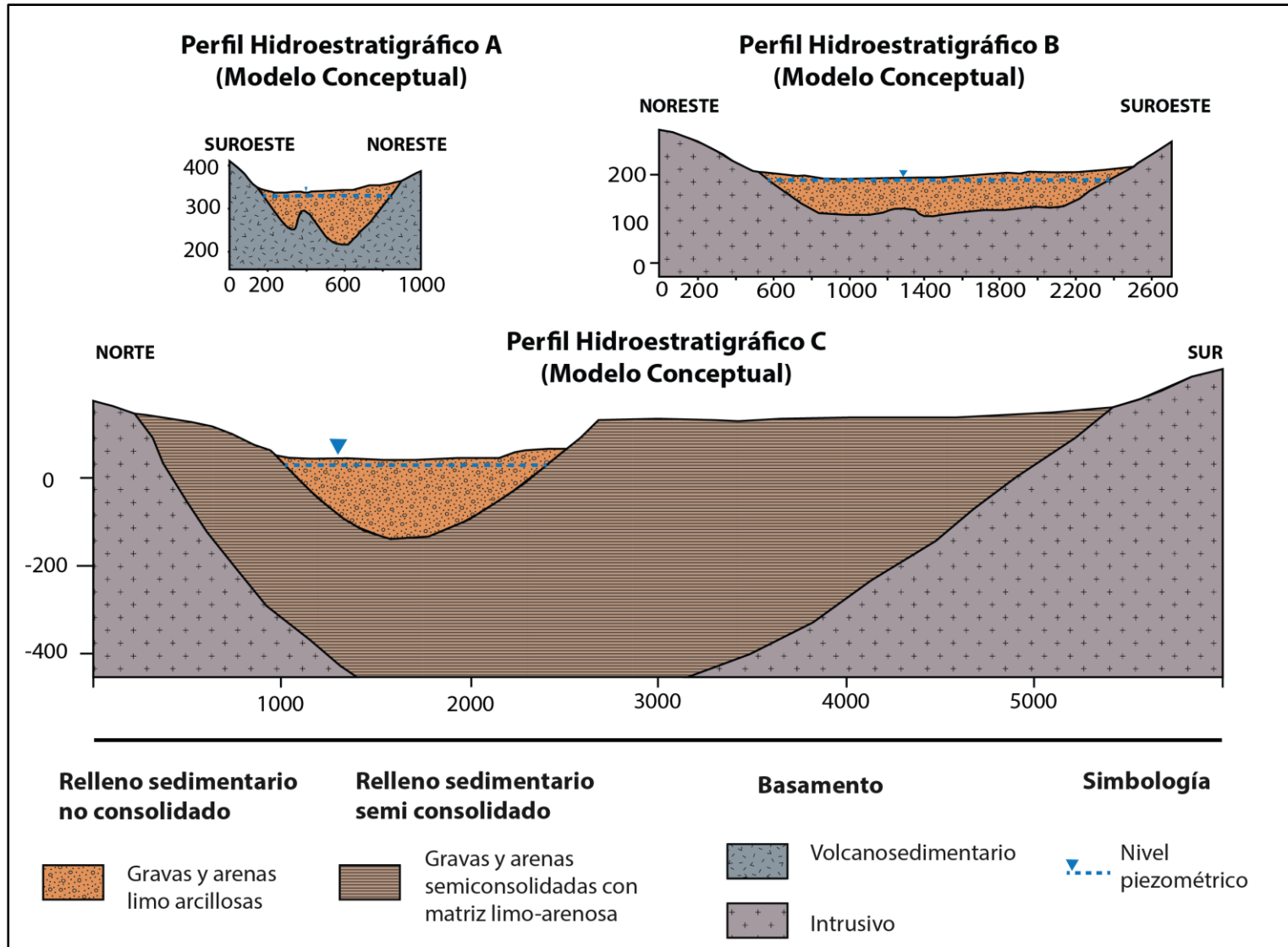


Figura 5.17. Secciones transversales. Fuente: Elaboración Propia.

Este sistema acuífero, presenta un espesor del orden de 110 metros, desde el embalse Puclaro hasta la quebrada de Santa Gracia, lugar en el cual se identifica una profundización de la base del acuífero alcanzando profundidades del orden de los 200 m.

La sección del sistema acuífero aumenta desde este hacia oeste, presentando una sección de 45.000 m² en el perfil A-A', ubicado al oeste de los Molles, de 110.000 m² en el perfil B-B', al sureste de Las Rojas y de 150.000 m² en el perfil C-C', ubicado al este de la Serena antes de la desembocadura del sistema en el Mar.

Sección	Ubicación	Sección [m ²]
Perfil A-A'	Al oeste de El Molle	45.000
Perfil B-B'	Al sureste de Las Rojas	110.000
Perfil C-C'	Al este de La Serena	150.000

Este aumento de la sección estaría asociado a un aumento del ancho del sistema acuífero, producto de aportes sedimentarios de quebradas y afluentes laterales del río, que aumentan su ancho de 800 m aguas abajo del embalse Puclaro, hasta los 1800 en la confluencia del río Elqui con la quebrada Santa Gracia.

Cabe destacar que la sección determinada corresponde al área del sistema acuífero albergado en los rellenos aluviales recientes y en los cuales se prevé realizar las futuras extracciones.

Desde el embalse Puclaro hasta la quebrada de La Marquesa (Figura 5.18) la base del sistema acuífero, se caracteriza por presentar un paleorelieve en forma de "v", con profundidades del orden de 120 m.

Las resistividades de los estratos son del orden de 30 a 110 Ohm-m lo cual se correlacionaría, según las estratigrafías de pozo consultadas, con horizontes de gravas y arenas con un bajo contenido de arcillas.

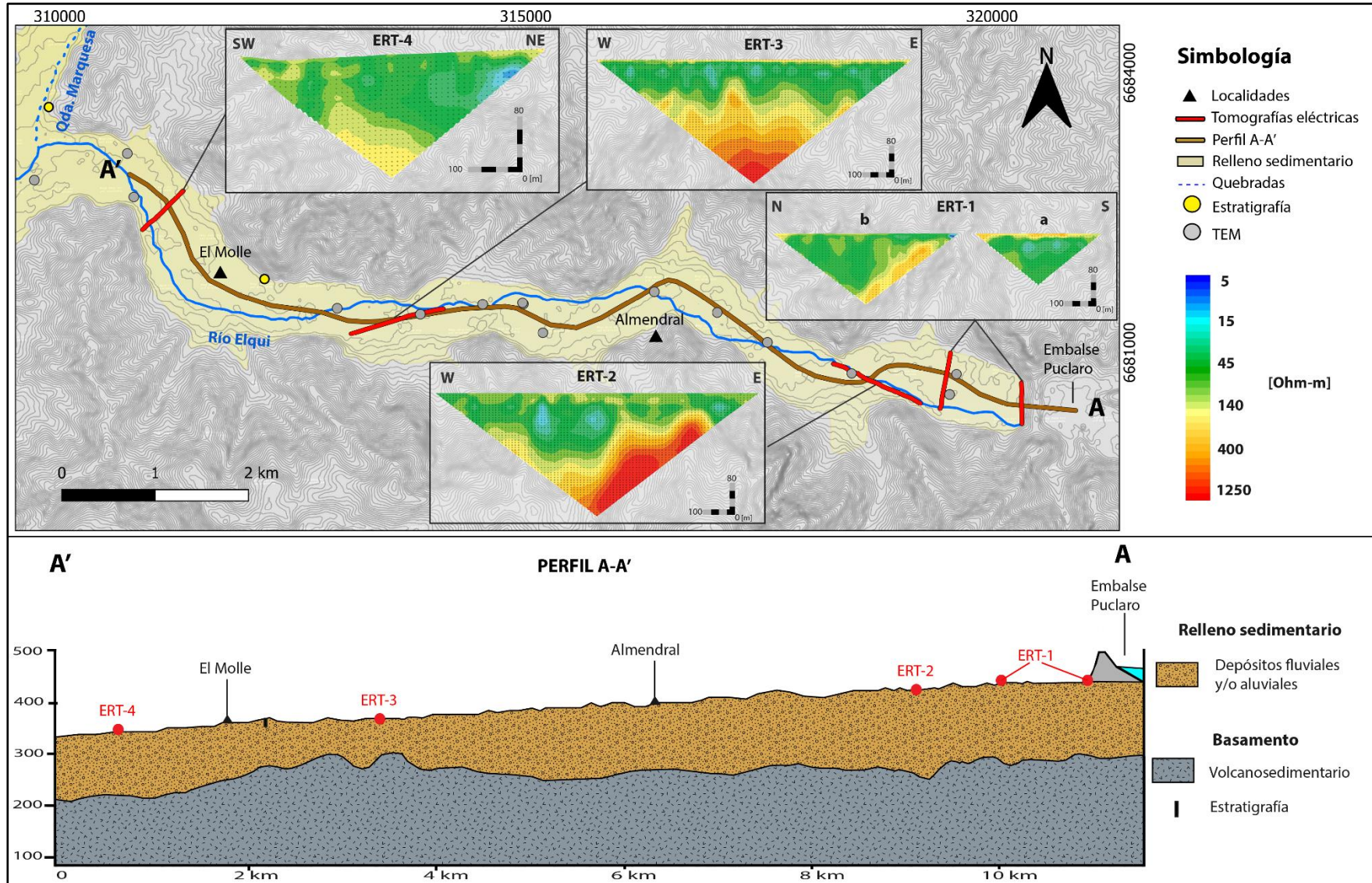


Figura 5.18. Perfil hidroestratigráfico A-A'. Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados resistivos de las tomografías eléctricas, en el borde oriental y limitando con el muro de contención del embalse, se identifica en la ERT-1a que el relleno sedimentario presenta un espesor del orden de los 110 m de profundidad.

De acuerdo con los resultados resistivos de las tomografías eléctricas, en el borde oriental y limitando con el muro de contención del embalse, se identifica en la ERT-1a (Figura 5.19) que el relleno sedimentario presenta un espesor del orden de los 110 m de profundidad.

El muro de contención del embalse se ve reflejado en el techo de la tomografía eléctrica, como una capa de resistividades del orden de 300 ohm-m, que sobreyace a los dominios resistivos de tonalidades verdes a celestes, a través de los cuales fluiría el acuífero del Elqui.

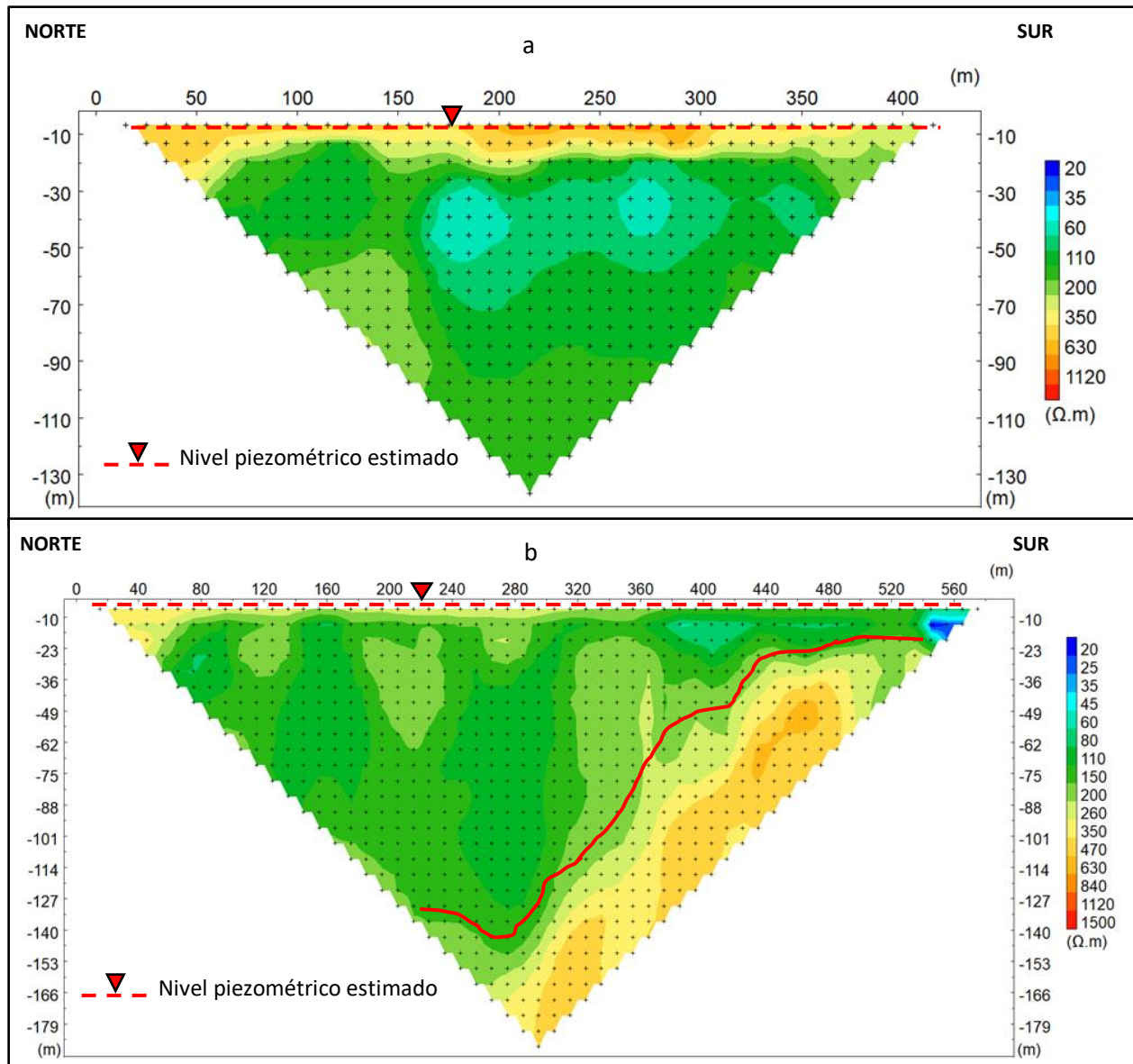


Figura 5.19. Tomografía eléctrica ERT-1. Fuente: Elaboración Propia.

Hacia el oeste, el acuífero continúa por los dominios resistivos de tonalidades verdes a celestes que presentan continuidad hacia la tomografía eléctrica ERT-1b (Figura 5.19) y ERT-2 (Figura 5.20), y alcanzan una profundidad del orden de 130 metros.

Al sur de ambas tomografías, se identifica un peraltamiento del basamento que es consistente con los afloramientos de roca que limitan el acuífero por ese flanco, exhibiendo la geometría en forma de “v” que caracteriza al sistema en este tramo.

Dado los resultados resistivos, se identifica una zona de interés hidrogeológico para la explotación de agua subterránea emplazada entre los 350 y 500 metros del perfil ERT-2, zona de mayor profundidad del acuífero y en la cual se tienen resistividades del orden de 30 Ohm-m, asociadas a dominios de mayor permeabilidad.

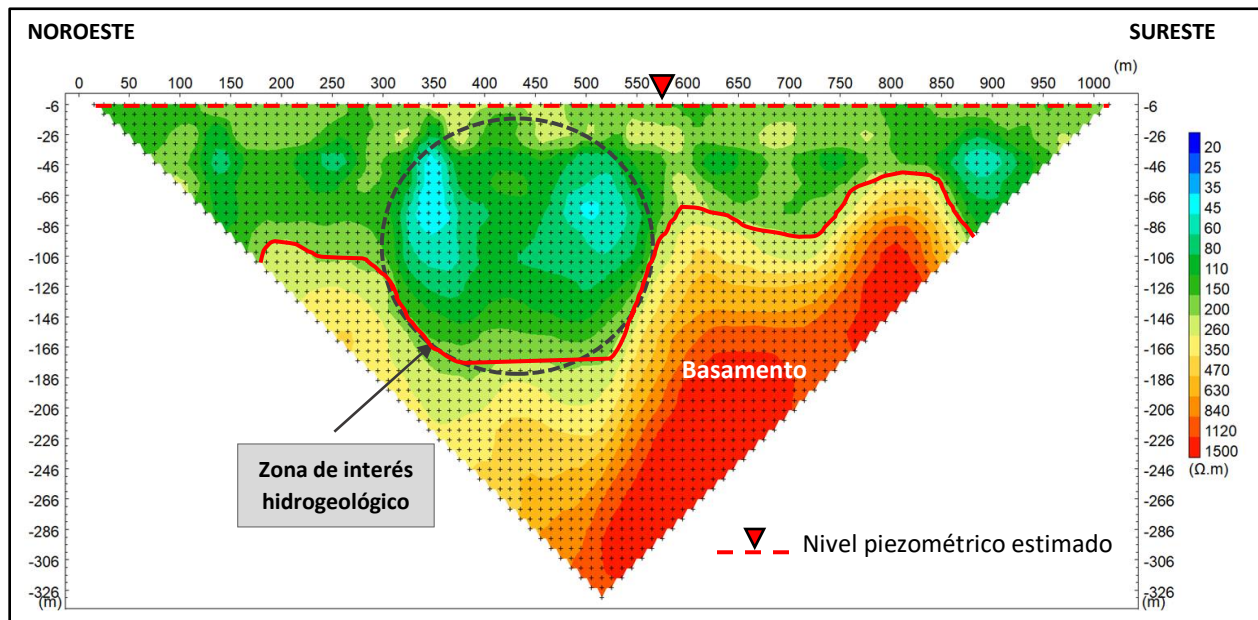


Figura 5.20. Tomografía eléctrica ERT-2. Fuente: Elaboración Propia.

Cinco kilómetros aguas abajo del embalse Puclaro, se realizó la tomografía eléctrica ERT-3, en la cual se identifica una continuidad de los dominios resistivos asociados al acuífero, con espesores entre 100 y 120 metros.

En esta tomografía se identifica la presencia de dominios en tonalidad celeste concéntricos, de menor resistividad que ponen de manifiesto la heterogeneidad del sistema, el cual se ha formado por la acción fluvial y/o aluvial generando paleocanales y unidades lenticulares de menor permeabilidad.

El basamento se presenta con resistividades por sobre los 150 Ohm-m y se identifica sano bajo los 200 m de profundidad.

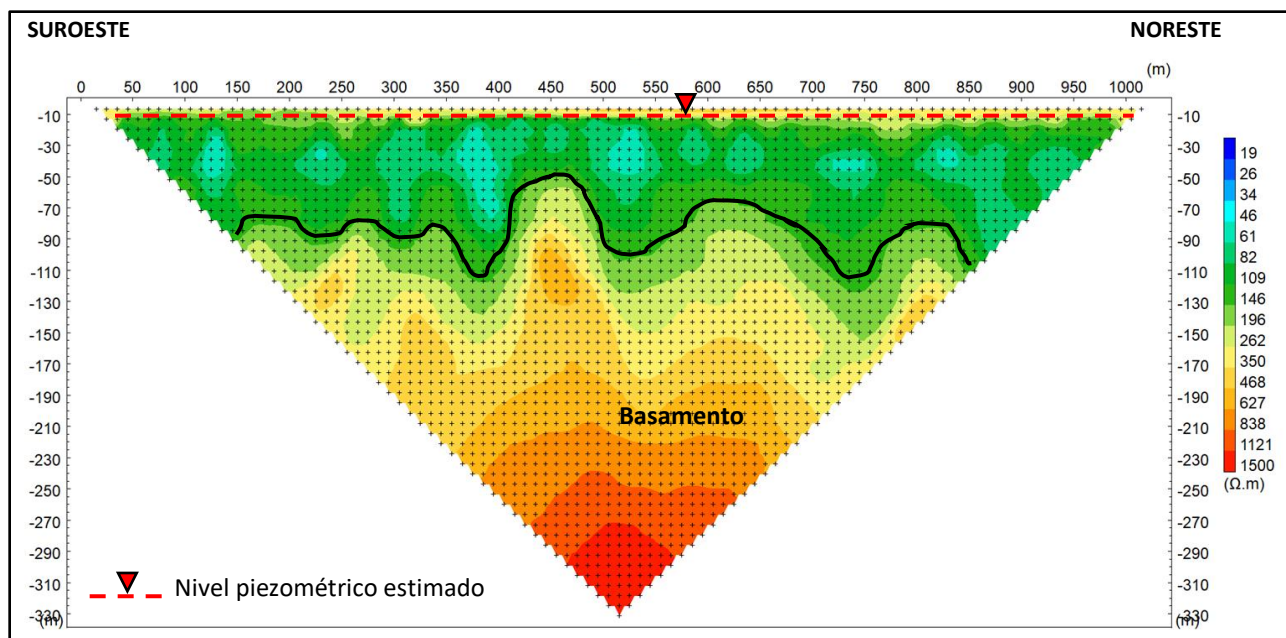


Figura 5.21. Tomografía eléctrica ERT-3. Fuente: Elaboración Propia.

Hacia la localidad de El Molle, el sistema acuífero continúa fluyendo dentro de la misma unidad, la cual se encajona hacia el noreste, producto de la existencia de un basamento somero identificado al suroeste de la tomografía eléctrica ERT-4.

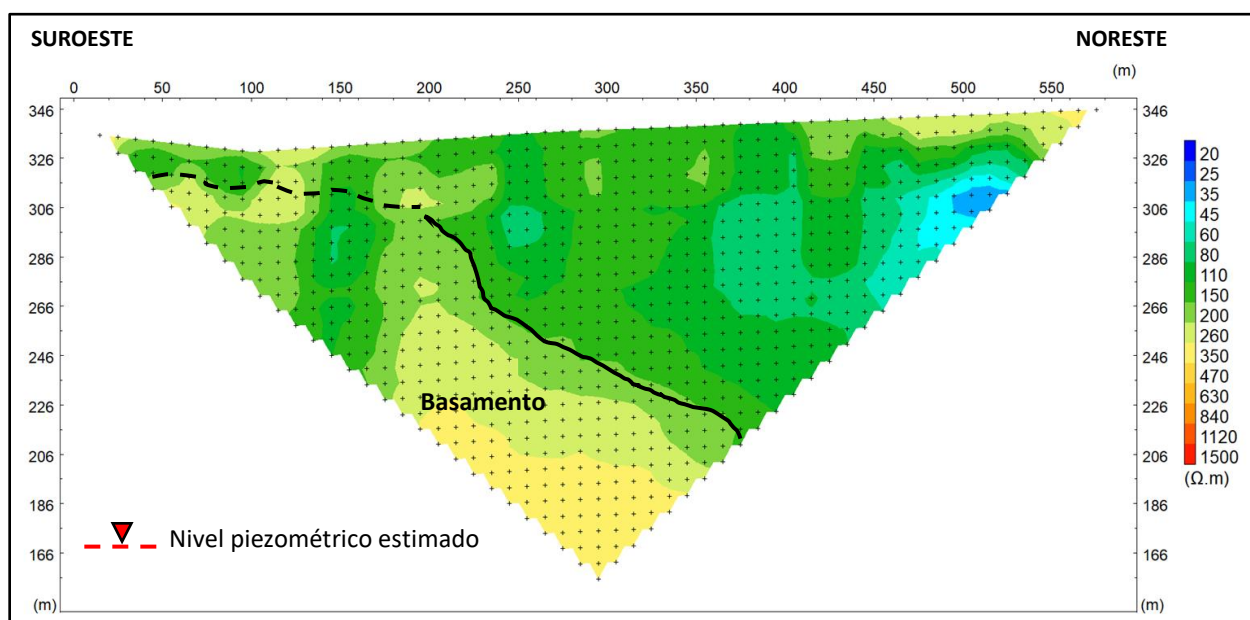


Figura 5.22. Tomografía eléctrica ERT-4. Fuente: Elaboración Propia.

Aguas abajo de la quebrada La Marquesa, en el sistema aparecen dominios de menor resistividad que podrían ser asociados a capas lenticulares locales de menor permeabilidad compuestas por

gravas y/o arenas con una mayor proporción de limos y arcillas, que también han sido identificadas en columnas estratigráficas. Aguas abajo de la quebrada La Marquesa, en el sistema aparecen dominios de menor resistividad (Figura 5.23) que podrían ser asociados a capas lenticulares locales de menor permeabilidad compuestas por gravas y/o arenas con una mayor proporción de limos y arcillas, que también han sido identificadas en columnas estratigráficas.

De acuerdo con la geología, aguas abajo de la quebrada la Marquesa, existen mayores aportes sedimentarios laterales, que geomorfológicamente se expresan en superficie como abanicos aluviales, los cuales se interdigitan con los depósitos fluviales actuales del río Elqui.

Estos depósitos laterales se han conformado por la acción de cursos de agua superficiales esporádicos generados en periodos de precipitación, que a su vez han sido erosionados por el río Elqui generando terrazas, las cuales estarían representadas por dominios de baja resistividad asociados a secuencias de mayor proporción de sedimentos finos, como se observó en la tomografía ERT-8 (Figura 5.27).

Junto a lo anterior y considerando que en el catastro de captaciones efectuado en el presente estudio, se registraron profundidades del agua menores a 5 m.b.n.t, se interpreta que hacia el techo de cada tomografía, existe una mayor resistividad de los sedimentos que se asociaría a una baja proporción de sedimentos finos y a una mayor permeabilidad subsuperficial.

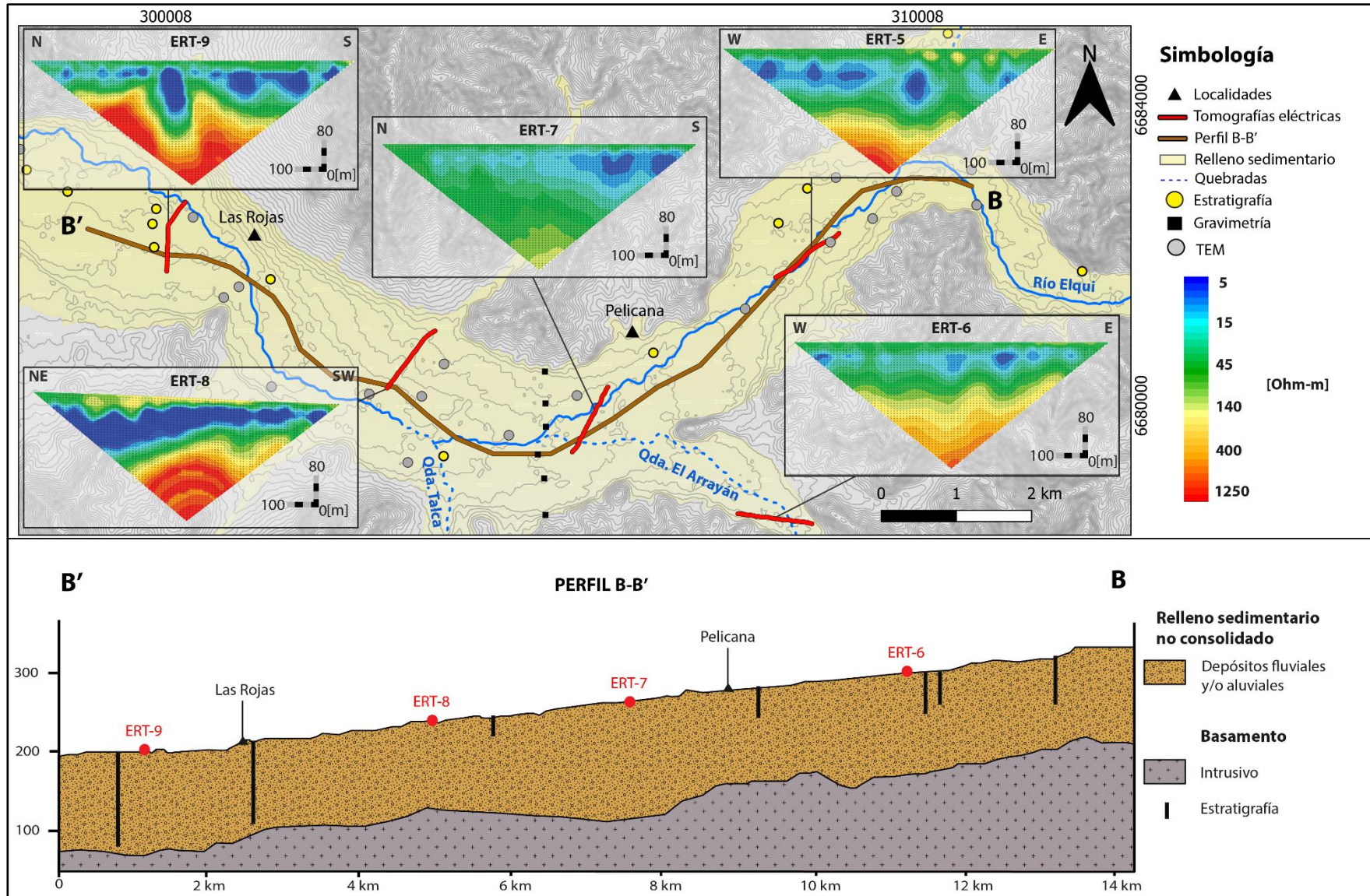


Figura 5.23. Perfil hidroestratigráfico B-B'. Fuente: Elaboración Propia.

En la ERT-5 (Figura 5.24), ubicada aguas abajo de la quebrada La Marquesa, se identifica la unidad superior con resistividades del orden de 100 Ohm-m. Entre los 600 y 900 m de este mismo perfil, se identifica un mayor espesor de la unidad superior, con la presencia de dominios de mayor resistividad que podrían ser asociados a paleocanales de mayor permeabilidad.

La unidad hidrogeológica inferior, se presenta con resistividades más bajas que la superior por una mayor proporción de sedimentos de grano fino en la matriz de las gravas y arenas que caracterizan el sistema acuífero.

Las zonas de mayor potencial para la extracción de agua subterráneas se ubicarían en tonalidades verde – celeste, donde se identifica una discontinuidad de las tonalidades azules (< 20 Ohm-m).

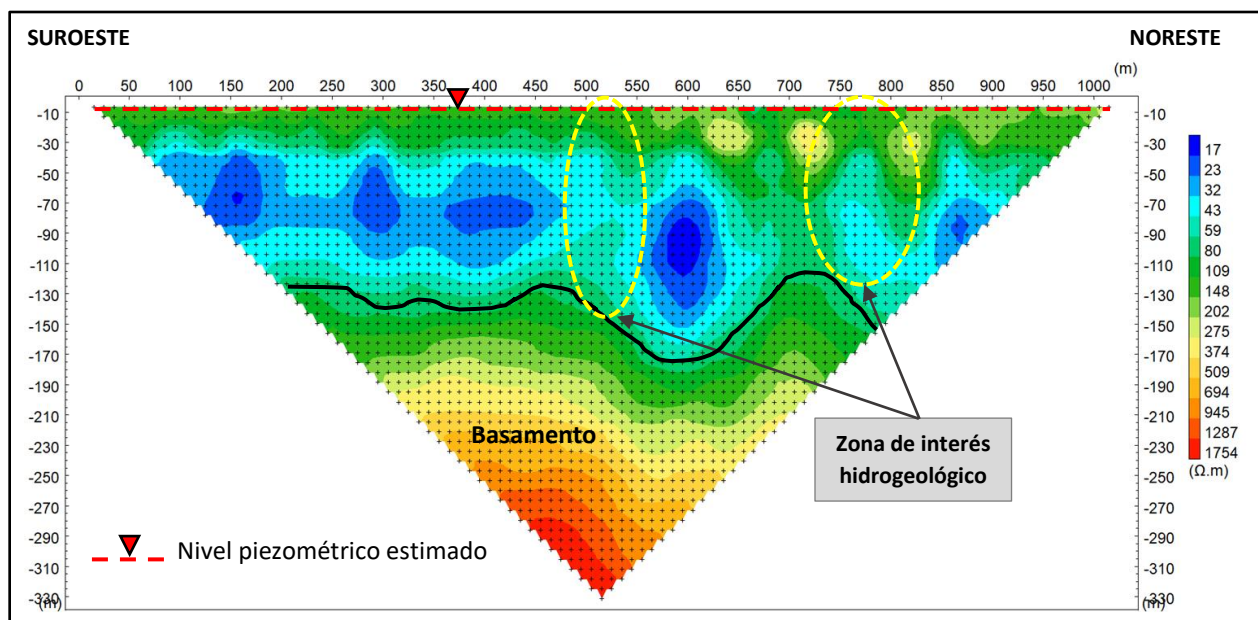


Figura 5.24. Tomografía eléctrica ERT-5. Fuente: Elaboración Propia.

La tomografía eléctrica ERT-6 (Figura 5.25) se realizó sobre el relleno sedimentario de la quebrada secundaria El Arrayán, en la cual se identifica un relleno del orden de 100 m de profundidad, que dado los dominios resistivos, correspondería a gravas y arenas con una proporción de limos y arcillas variable según la información estratigráfica existente.

Se estima que las mayores proporciones de materiales finos se presentarían en los dominios resistivos de tonalidades azules y los cuales deberían evitarse en una perforación. Las resistividades del orden de 60 Ohm-m existentes entre los 300 y 450 del inicio de la tomografía,

corresponderían a la zona de mayor factibilidad hidrogeológica en el perfil y de interés a evaluar en futuras prospecciones.

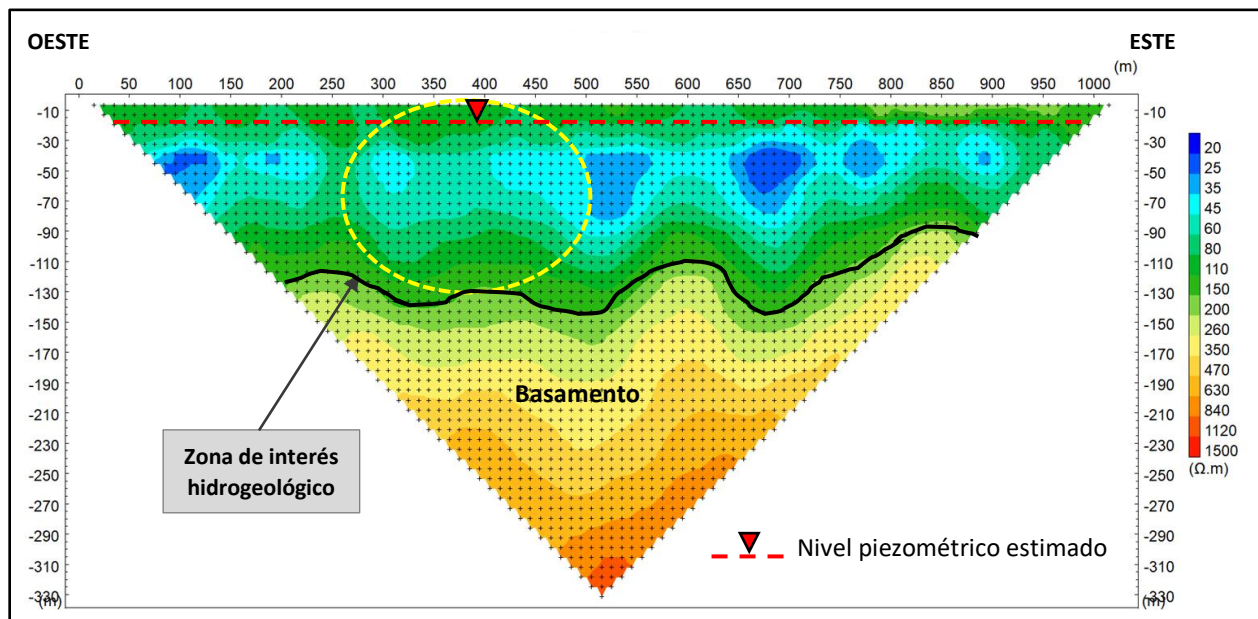


Figura 5.25. Tomografía eléctrica ERT-6. Fuente: Elaboración Propia.

En la confluencia de la quebrada El Arrayán con el río Elqui, se realizó la tomografía eléctrica ERT-7 (Figura 5.26), en la cual se identifica una continuidad del sistema acuífero, pero con dominios resistivos menores a 30 Ohm-m que podrían indicar una menor permeabilidad del sistema.

El basamento en esta tomografía se interpreta asociado a las capas de resistividades superiores a los 120 Ohm-m y se emplaza a los 140 m de profundidad en el centro del valle y disminuye hasta los 90 m de profundidad hacia el noreste del perfil.

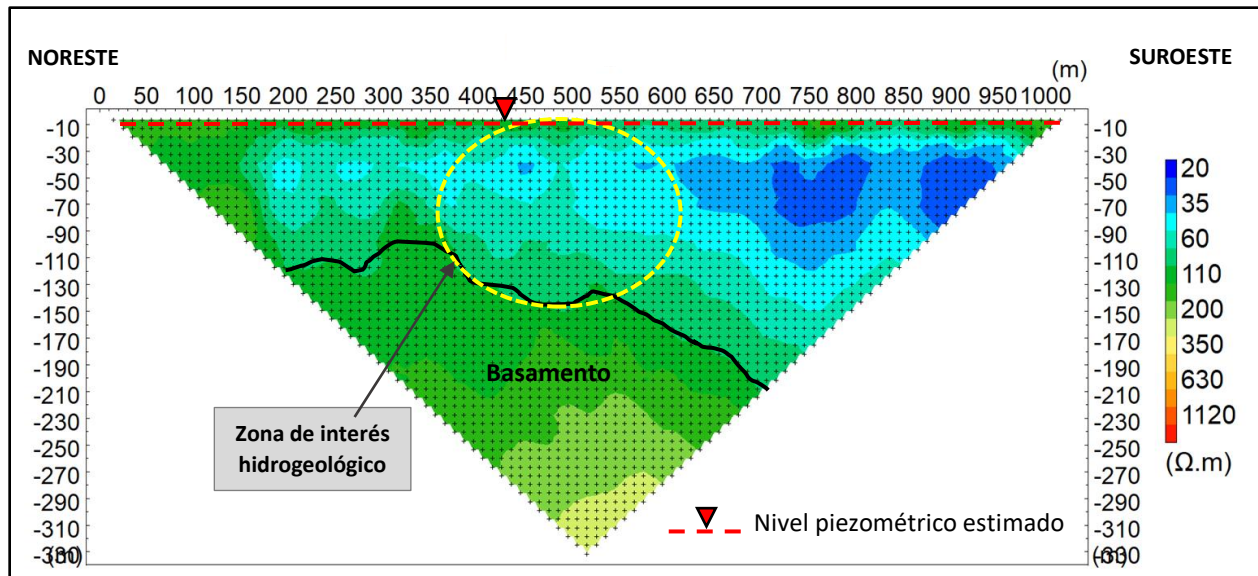


Figura 5.26. Tomografía eléctrica ERT-7. Fuente: Elaboración Propia.

La tomografía ERT- 9 (Figura 5.27) se realizó sobre uno de los abanicos aluviales que conforman el relleno sedimentario. En esta se identifica la presencia de un dominio continuo de bajas resistividades que se correlaciona a secuencias estratigráficas con una mayor proporción de materiales finos y una consecuente menor permeabilidad, sugiriendo que los bordes del relleno sedimentario corresponden a zonas porosas de menor permeabilidad.

El basamento bajo el trazado ERT-8 se identifica sano y con resistividades por sobre los 130 Ohm-m.

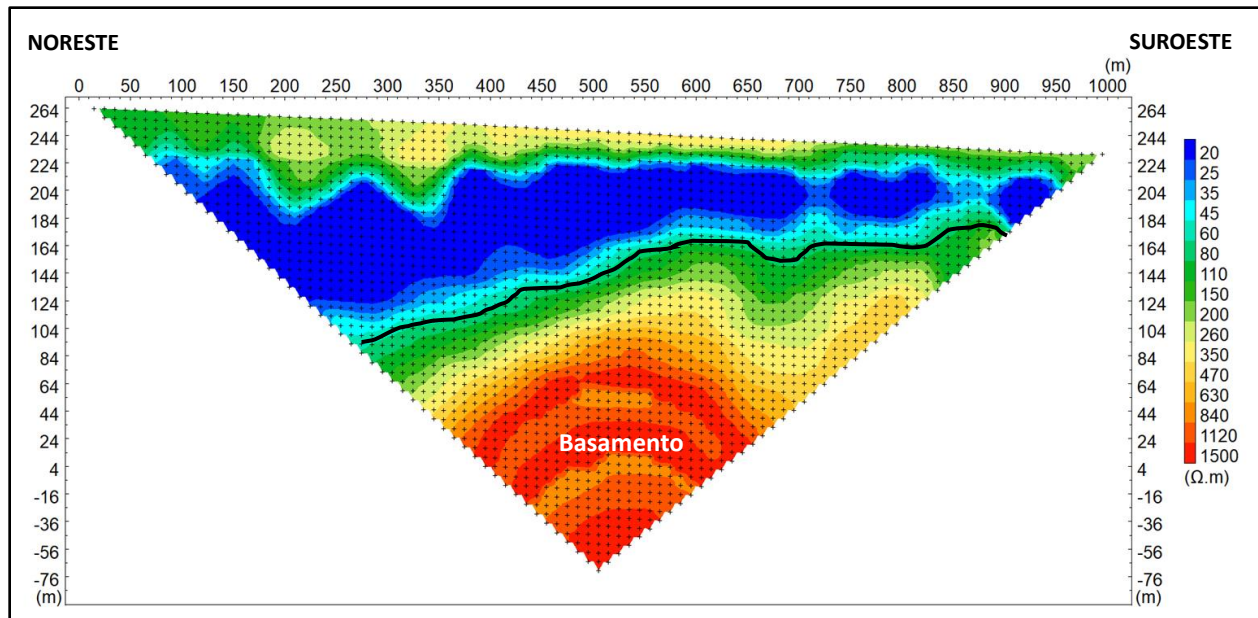


Figura 5.27. Tomografía eléctrica ERT-8. Fuente: Elaboración Propia.

Al oeste de la localidad de Las Rojas y en función de los resultados de la ERT-9 (Figura 5.28), el sistema acuífero mantiene la misma composición hidroestratigráfica, con dominios resistivos entre 20 y 100 Ohm-m, en donde las resistividades inferiores 30 ohm-m se correlacionan a secuencias lenticulares de menor permeabilidad y mayor contenido de limo y/o arcillas.

Las resistividades mayores a 30 Ohm-m corresponderían a materiales gruesos de mayor permeabilidad y mejor potencial para la extracción de agua subterránea.

La anomalía resistiva presente a los 420 m del inicio de la tomografía podría deberse a la presencia de un tranque de acumulación de aguas, cuyas posibles infiltraciones y cercanía al trazado generan una anomalía en el perfil resistivo posiblemente no correlacionable a la existencia de un basamento profundo.

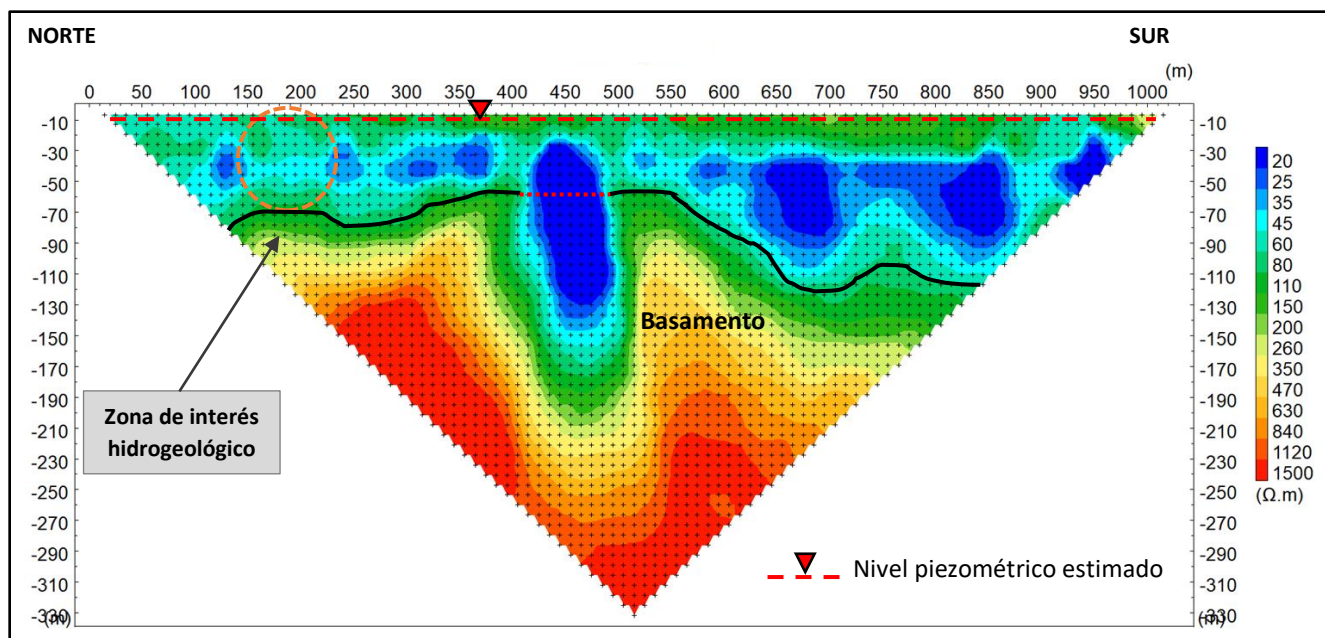


Figura 5.28. Tomografía eléctrica ERT-9. Fuente: Elaboración Propia.

Hacia el norte del perfil ERT-9, se identifica un aumento de la resistividad de las capas sedimentarias y un menor espesor de estas, el cual sigue disminuyendo en la tomografía eléctrica ERT-10, donde el espesor del relleno sedimentario alcanza los 50 m de profundidad (Figura 5.29).

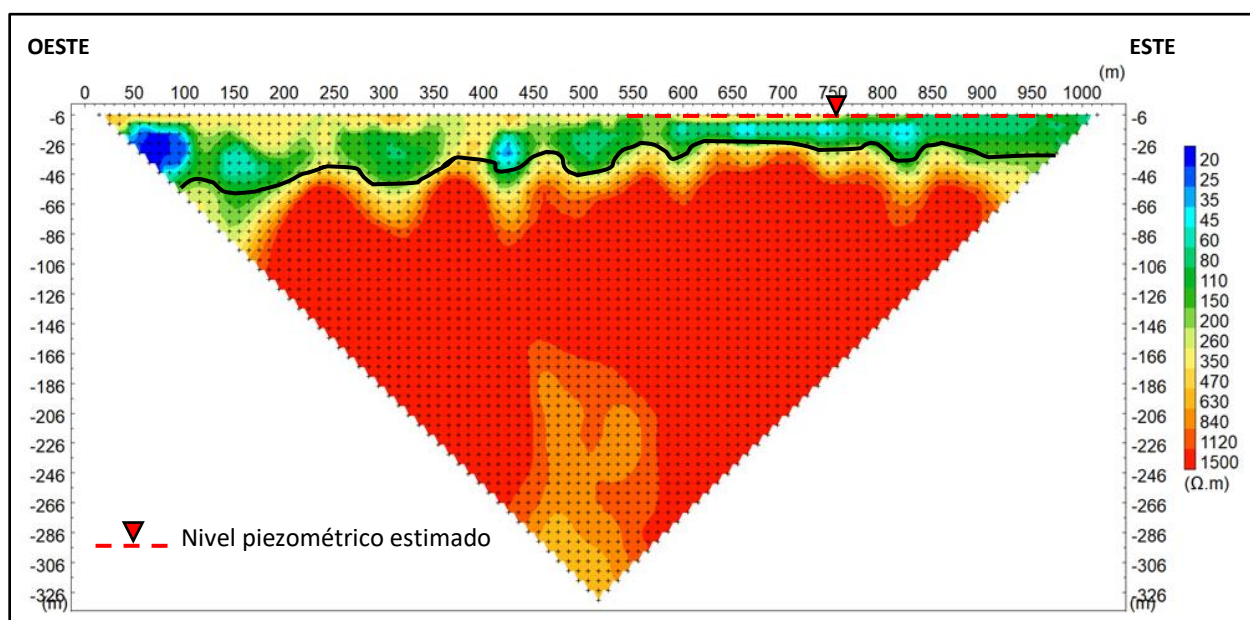


Figura 5.29. Tomografía eléctrica ERT-10. Fuente: Elaboración Propia.

Entre Algarrobito y La Serena, el acuífero se profundiza frente a la quebrada Santa Gracia, lugar en el cual se ha identificado, en TEM y estratigrafías, un basamento en torno a los 200 m de profundidad.

En la línea de costa, de acuerdo a las ERT 14 y ERT 15, se interpreta una continuidad composicional del acuífero respecto a aguas arriba y se estima una profundidad de la base del orden de 120 m. La unidad que subyace al acuífero se correlacionaría con unidades más antiguas y de similar composición, pero de mayor cementación y compactación. Se debe tener en consideración que en la costa la conductividad eléctrica del agua subterránea es mayor, por esta razón los resultados resistivos de las tomografías cercanas a la costa son menores (Figura 5.30).

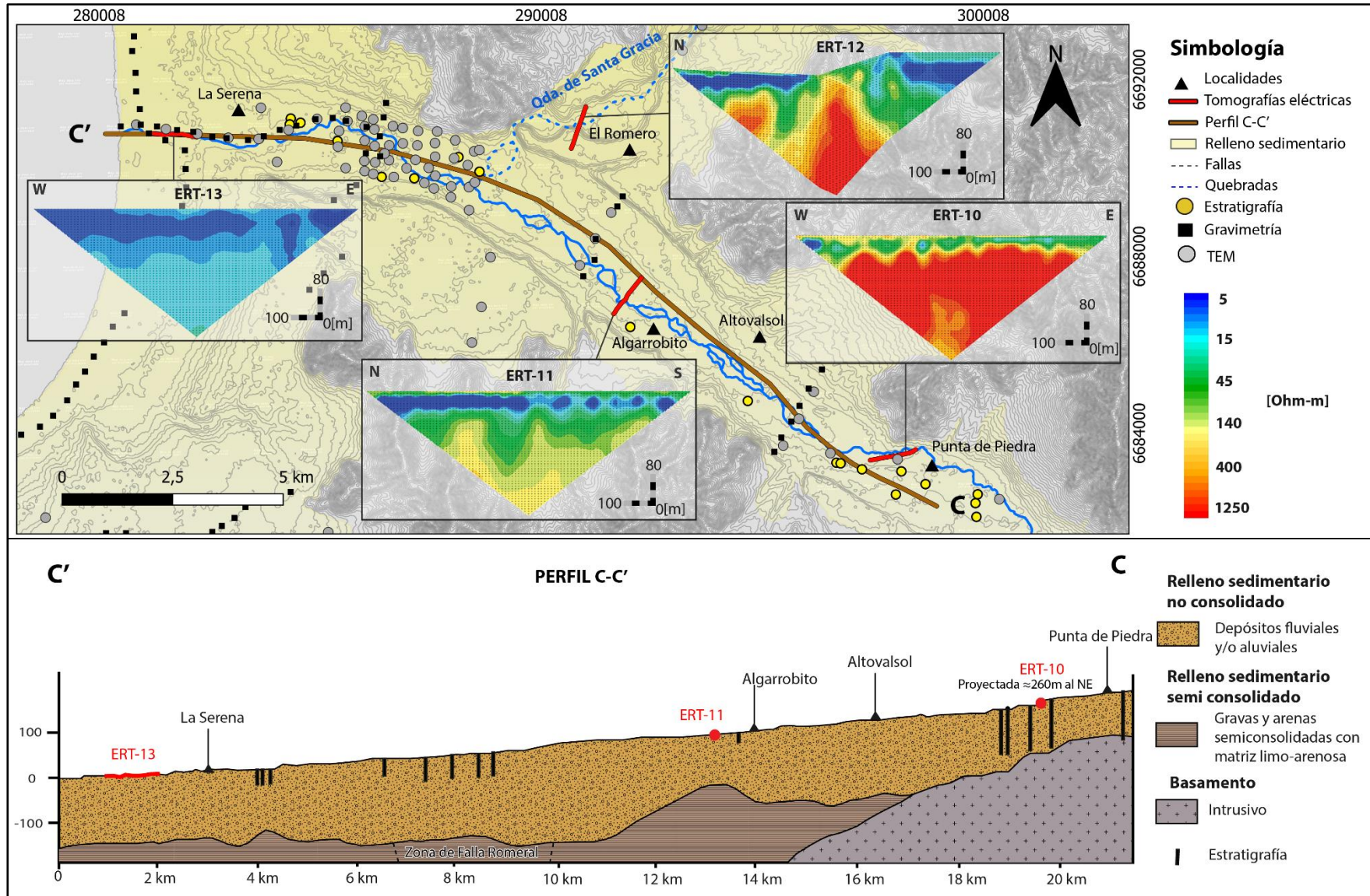


Figura 5.30 Perfil hidroestratigráfico C-C'. Fuente: Elaboración Propia.

Según los resultados de la ERT-11 (Figura 5.31), el sistema acuífero en torno a Algarrobito, tiene 100 m de espesor y presentaría una similar composición estratigráfica que la observada hacia aguas arriba con heterogeneidades locales tanto en la vertical como en la horizontal.

Bajo los 100 m de profundidad, se identifica la presencia de dominios de resistividades del orden de 200 a 300 Ohm-m que, de acuerdo con la geología y geocronología de la depositación, corresponderían a secuencias sedimentarias continentales antiguas de la Formación Confluencia, que afloran en los bordes de la cuenca y que presentan una mayor consolidación.

En esta secuencia sedimentaria antigua, podrían existir aportes de agua, considerando bajas transmisividades.

Para la extracción de agua subterránea, en el perfil ERT-11, las zonas de discontinuidad de los dominios resistivos azules (<20 Ohm-m), visualizados en tonos verde – celeste, con resistividades del orden de 60 Ohm-m, corresponderían a zonas de interés hidrogeológico.

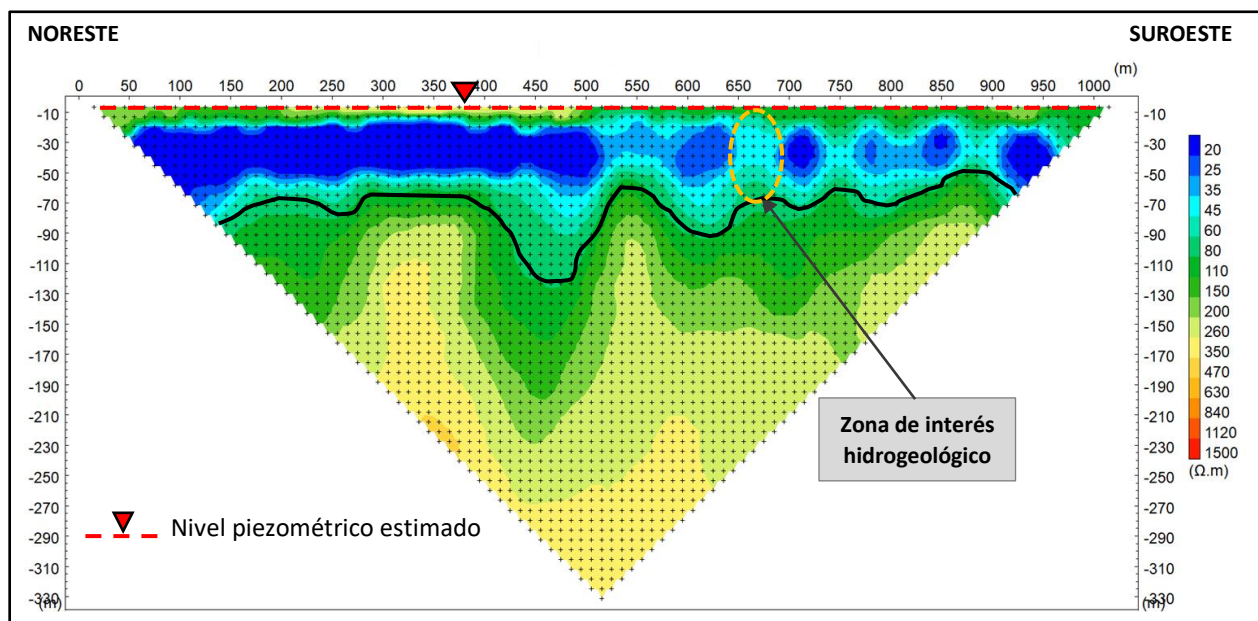


Figura 5.31. Tomografía eléctrica ERT-11. Fuente: Elaboración Propia.

En la salida del sistema subterráneo de la subcuenca de la quebrada Santa Gracia se realizó la tomografía eléctrica ERT-12 (Figura 5.32), la cual interceptó el relleno sedimentario actual, por el noreste y terrazas fluviales antiguas por el suroeste.

De esta se puede identificar que ambas unidades geomorfológicas estarían compuestas por similares litologías, presentando un espesor del orden de 50 m para los rellenos actuales y de 120 m para las terrazas más antiguas, emplazando el fondo del sistema a la misma cota.

A los 350 m del inicio del perfil ERT-12 se identifica un dominio resistivo subvertical que se proyecta hasta los 120 m de profundidad y que podría corresponder a una zona fracturada y/o alterada de la base del acuífero, de interés hidrogeológico para la explotación de agua subterránea. A los 350 m del inicio del perfil ERT-12 se identifica un dominio resistivo subvertical que se proyecta hasta los 120 m de profundidad y que podría corresponder a una zona fracturada y/o alterada de la base del acuífero, de interés hidrogeológico para la explotación de agua subterránea.

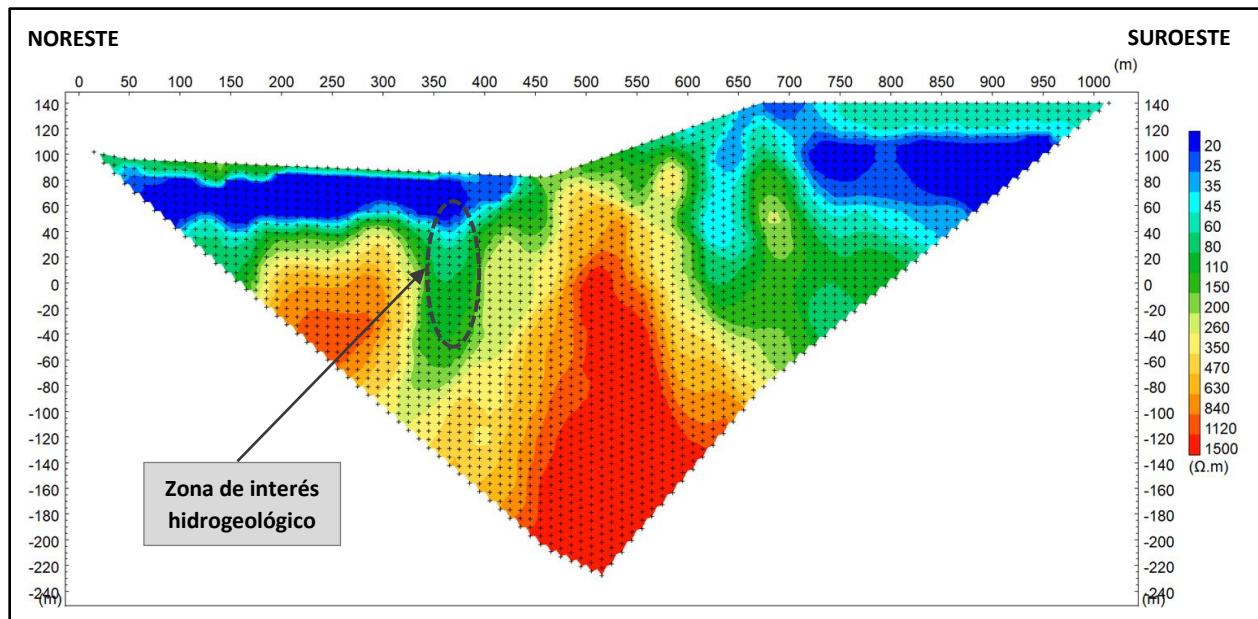


Figura 5.32. Tomografía eléctrica ERT-12. Fuente: Elaboración Propia.

Las bajas resistividades obtenidas en las tomografías eléctricas ERT-13 (Figura 5.33) y ERT-14 (Figura 5.34), y ERT-14, se deben a la presencia de aguas subterránea de mayor conductividad eléctrica que disminuyen la resistividad equivalente del medio.

De acuerdo con la Ley de Archie y tomando como supuestos una continuidad estratigráfica hacia la costa, lo cual se observó en todo el sistema acuífero, se estima que los valores resistivos superiores a 30 Ohm-m corresponderían a la base del acuífero, que se correlacionaría con

secuencias estratigráficas más antiguas y de similar composición, pero de mayor cementación y/o compactación.

Sobre esta tomografía eléctrica no se recomienda efectuar perforación para la explotación de agua subterránea, ya que presentaría una mayor salinidad y una calidad fuera de las normas de agua potable (NCh409) y de riego (NCh1333)

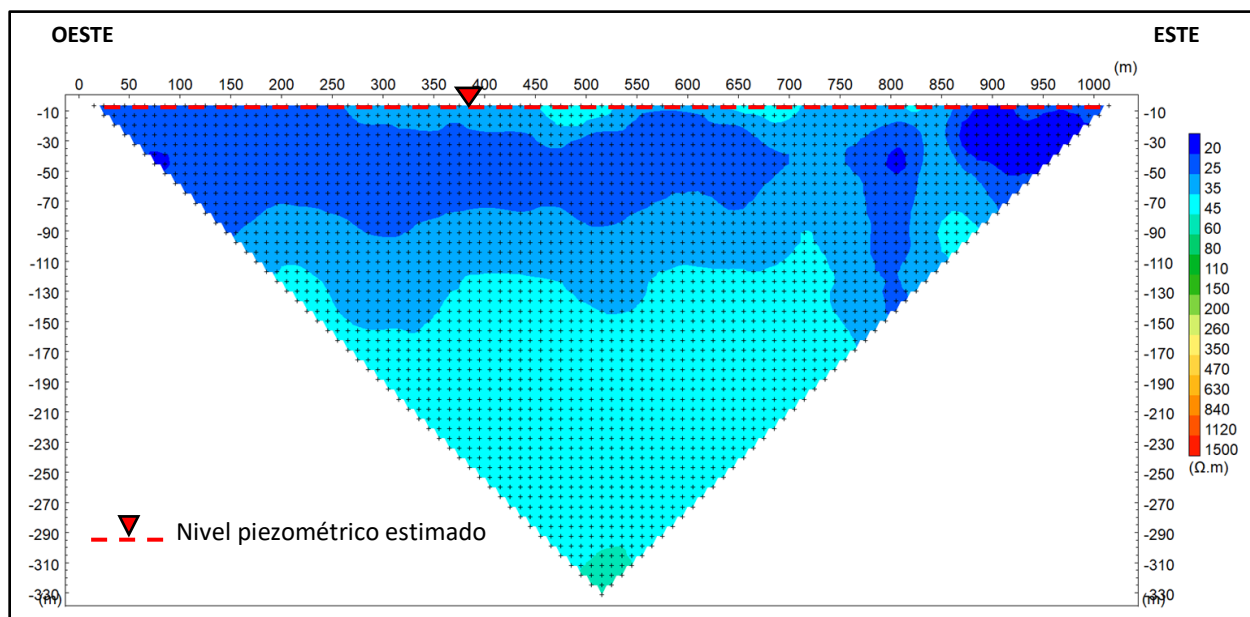


Figura 5.33. Tomografía eléctrica ERT-13. Fuente: Elaboración Propia.

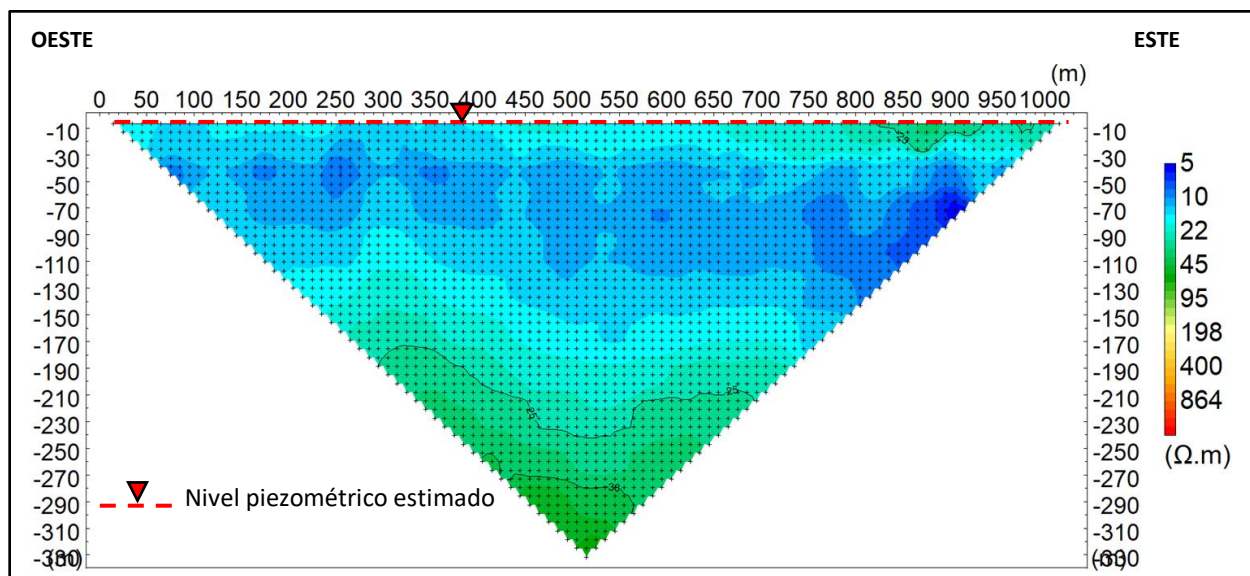


Figura 5.34. Tomografía eléctrica ERT-14. Fuente: Elaboración Propia.

5.6 PARÁMETROS HIDRÁULICOS (CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO)

Para caracterizar los parámetros hidráulicos del sistema acuífero de Elqui, se han utilizado los resultados de 80 ensayos de bombeo, los cuales se obtuvieron de la revisión de expedientes digitalizados de la DGA, de la bibliografía y de los 13 ensayos de bombeo de códigos EB realizados entre el embalse Puclaro y La Serena en el contexto del presente estudio (Figura 5.35).

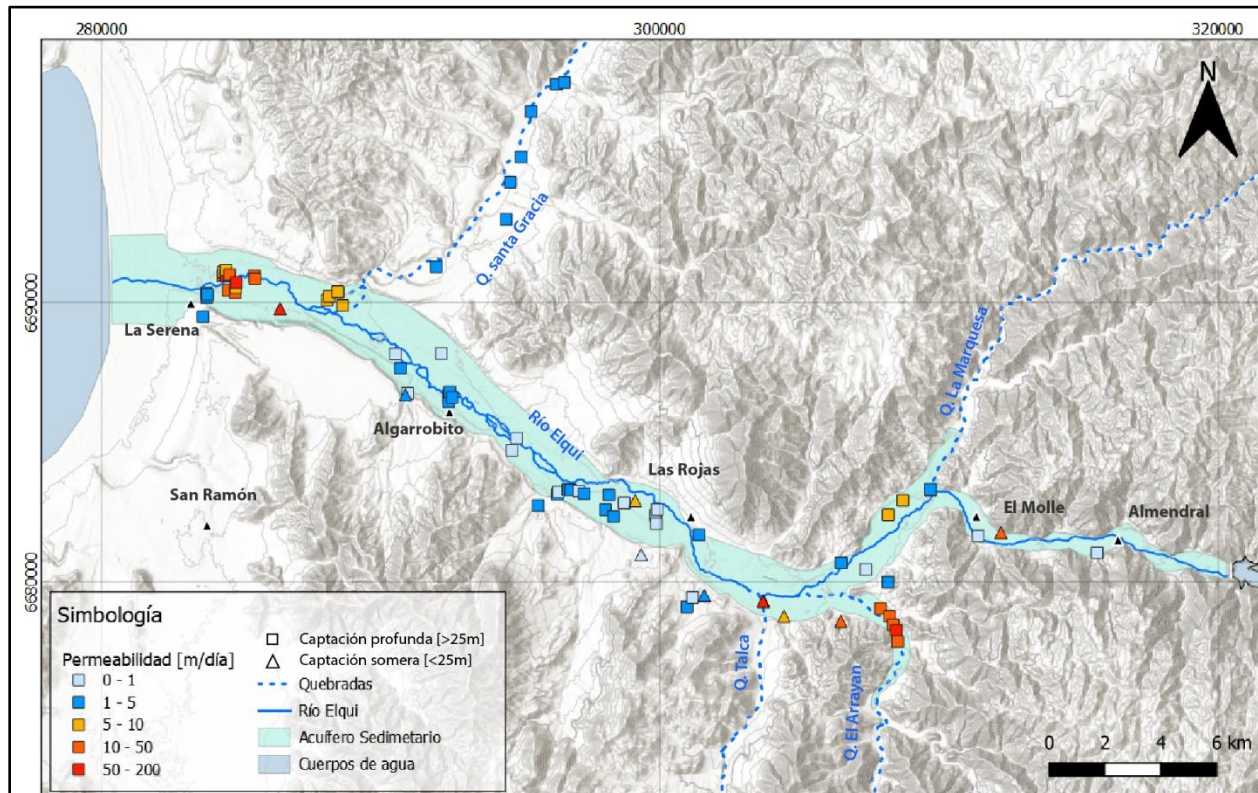


Figura 5.35 Datos de la permeabilidad del acuífero. Fuente: Elaboración Propia.

Considerando las captaciones profundas, desde el embalse Puclaro hasta la quebrada La Marquesa, los ensayos de bombeo indican que la permeabilidad del acuífero en profundidad es menor a 1 m/día, mientras que en superficie, las permeabilidades del sistema son mayores y rondan los 30 m/día.

Aguas abajo de la quebrada La Marquesa y hasta la localidad de Algarrobito, se desprende de los ensayos de bombeo de captaciones profundas, que existe una heterogeneidad en las permeabilidades del sistema, la cual oscila entre 0-1 m/día, 1-5 m/día y 5-10 m/día.

Estas diferencias en la permeabilidad son características de los sistemas acuíferos fluviales, los cuales presentan una heterogeneidad estratigráfica, al estar conformado por depósitos de llanuras de inundación lenticulares de menor permeabilidad (0-1 m/día) que se interdigitan con los depósitos centrales y de mayor energía del río (1-10 m/día) y con los depósitos laterales de la cuenca (1-10 m/día).

Dadas estas heterogeneidades del sistema, que se han observado en los resultados resistivos de las tomografías eléctricas, en estratigrafías y en los ensayos de bombeo, se considera una permeabilidad equivalente del sistema, del orden de 1-5 m/día, entre la quebrada La Marquesa y Santa Gracia.

Cabe mencionar que esta simplificación del funcionamiento del sistema se realiza con la base de que el presente estudio tiene como finalidad, contar con una herramienta de gestión de carácter regional para la planificación de futuras extracciones mediante pozos profundos.

De los mismos antecedentes se identifica que las quebradas aledañas, tales como El Algarrobal y Talca presentan una permeabilidad del orden de 10-50 m/día, por lo cual es de esperar que en las desembocaduras de estas con el sistema acuífero de Elqui, exista un aumento de esta permeabilidad equivalente.

Localmente se identifica aguas abajo de la quebrada de La Marquesa y en una de las terrazas aluviales del sistema, una zona al noreste del río Elqui, de permeabilidades del orden de 5-10 m/día.

En la quebrada Santa Gracia se identifica una mayor homogeneidad en las permeabilidades, las cuales se encuentran entre 1-5 m/día.

Desde el sur de la quebrada Santa Gracia hasta la costa, las permeabilidades del sistema acuífero aumentan y se emplazan por sobre los 5 m/día alcanzando incluso los 100 m/día en algunos puntos de control. Lo anterior podría estar relacionado a la mejor selección de los sedimentos de la costa.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento los pozos profundos presentan un carácter confinado con un coeficiente de almacenamiento comprendido entre $1E^{-4}$ y $1E^{-3}$ y las norias un funcionamiento libre con una porosidad eficaz del orden de 0.2 a 0.35.

Cabe destacar que las permeabilidades y coeficientes de almacenamientos de los pozos profundos, son los antecedentes que caracterizan el comportamiento hidráulico de las futuras captaciones y las cuales se considerarán en el modelo numérico de flujo para caracterizar el paquete sedimentario en las siguientes zonas:

- Entre embalse Puclaro y Qda La Marquesa: 0.65 m/d.
- Entre Qda La Marquesa y Altovalsol: 3 - 5 m/d.
- Entre Santa Gracia y el mar: 10 – 15 m/d.
- Tramos terminales de las quebradas La Marquesa, El Algarrobal y Talca: 5-20 m/día

Se considera un coeficiente de almacenamiento específico característico de $1 \text{ e-}5$.

5.6.1.1 Pruebas de bombeo

Las características y resultados de las pruebas de bombeo realizadas se resumen en la Tabla 5.3. Las pruebas se interpretaron mediante modelación numérica, para lo cual se realizaron modelos a escala local en diferencias finitas en VISUAL MODFLOW, para cada uno de ellos.

Los modelos se realizaron centrados en cada captación, refinados con celdas de $1 \times 1 \text{ m}$ en la zona de bombeo, aumentando el tamaño de celdas al alejarse de esta. En la vertical se consideraron 2 capas, una desde la superficie hasta la profundidad del pozo, desde donde se realiza la extracción, y otra subyacente de igual permeabilidad y que se extiende hasta el basamento, definido de acuerdo con el modelo conceptual del basamento desarrollado.

Se consideraron condiciones de no flujo en los contactos laterales con la roca, considerados como límites del acuífero, y condiciones de nivel fijo por aguas arriba y aguas abajo del relleno aluvial, dispuestas lo suficientemente alejadas del punto de extracción para descartar efectos de contorno.

Tabla 5.3. Ensayos de bombeo realizados. Fuente: Elaboración Propia.

Ensayo	Ubicación	Coordenadas UTM		Tipo	Caudal (L/s)	Prof. NE (m)	Prof. ND (m)	Sy [-]	K [m/d]	Ss [1/m]
		Este	Norte							
EB-1	Almendral	315668	6681056	Pozo Profundo	0.17	21.8	22.27		0.65	1.09E-05
EB-2	El Molle	311401	6681662	Pozo Profundo	5.9	1.89	19.19		0.5	1.67E-06
EB-3	La Marquesa	309690	6683330	Pozo Profundo	20.8	8.46	21.9		3	1.43E-06
EB-4	Pelicana	307377	6680463	Pozo Profundo	3.76	4.6	20.77		0.38	1.00E-04
EB-5	Pelicana	306488	6680694	Pozo Profundo	3	1.25	9.97		5	5.46E-06
EB-6	Las Rojas	303697	6679324	Pozo Profundo	7.7	2.7	2.875	0.27	185	
EB-7	Las Rojas	303534	6680176	Noria	10	0.56	1.1	0.35	300	
EB-8	Las Rojas	301414	6681708	Pozo Profundo	11	1.38	9		2.5	6.00E-07
EB-9	Punta de Piedra	298340	6682354	Pozo Profundo	10	3.48	28		1.05	1.00E-05
EB-10	Altovalsol	294870	6685149	Pozo Profundo	15	3.1	30.91		0.72	3.00E-06
EB-11	Monardez	292164	6688185	Pozo Profundo	5.6	5.5	32.19		0.5	1.50E-05
EB-12	Monardez	290530	6688167	Pozo Profundo	1.2	7.24	12.47		0.42	8.00E-07
EB-13	Islón	288456	6690396	Pozo Profundo	2.9	30.35	31.55		8.95	5.00E-03

PRUEBA DE BOMBEO EB-1

El pozo correspondiente a un particular presenta una profundidad de 46.00 m. El nivel estático se midió a 21.80 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 0.17 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 0.47 m (Figura 5.36).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.65 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **1.09E-05**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

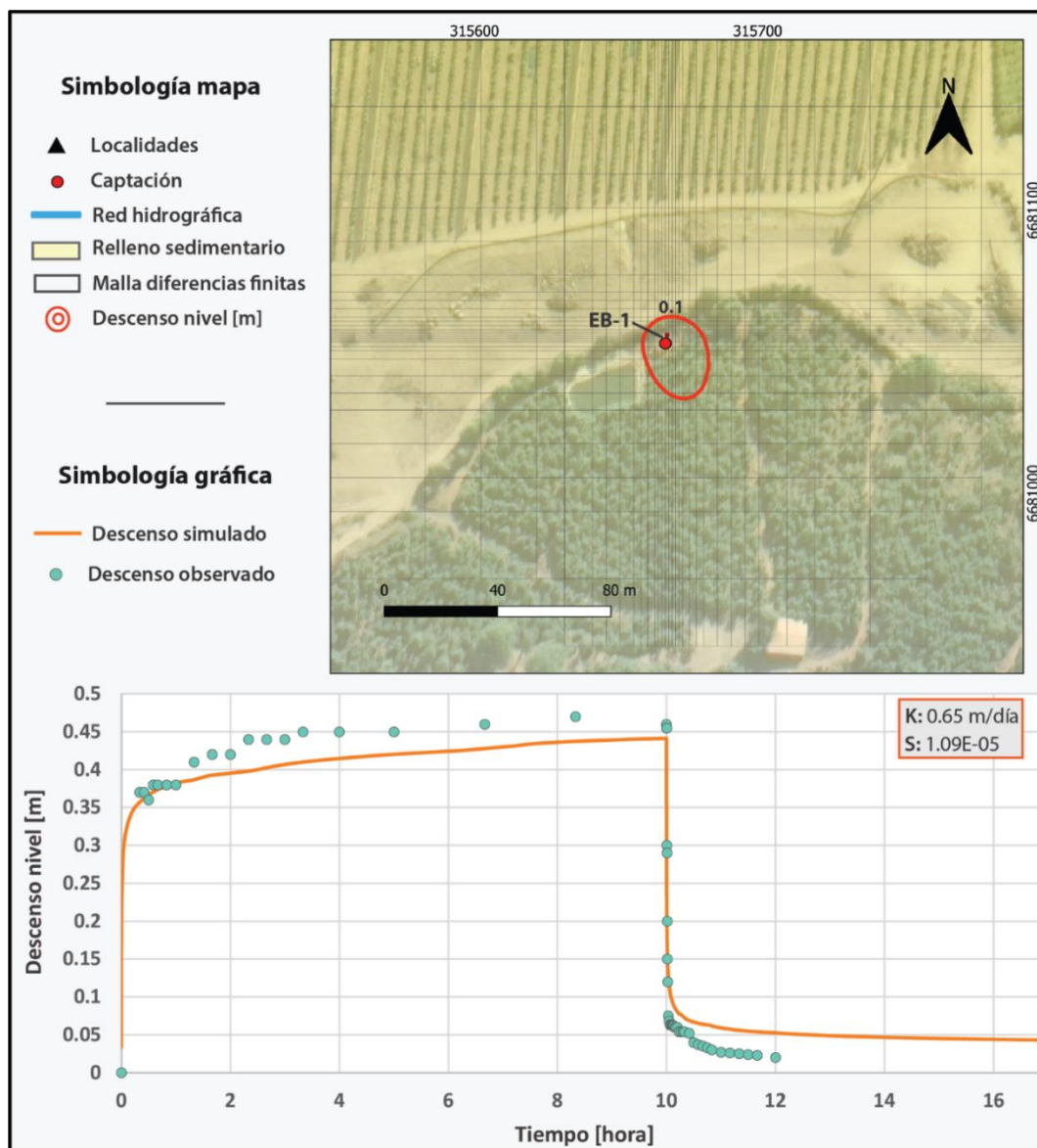


Figura 5.36 Ensayo de bombeo EB-01. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-2

El pozo profundo N°2 correspondiente al APR El Molle, presenta una profundidad de 60.00 m. El nivel estático se midió a 1.89 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 5.90 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 17.30 m (Figura 5.37).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.5 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **1.67E-06**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

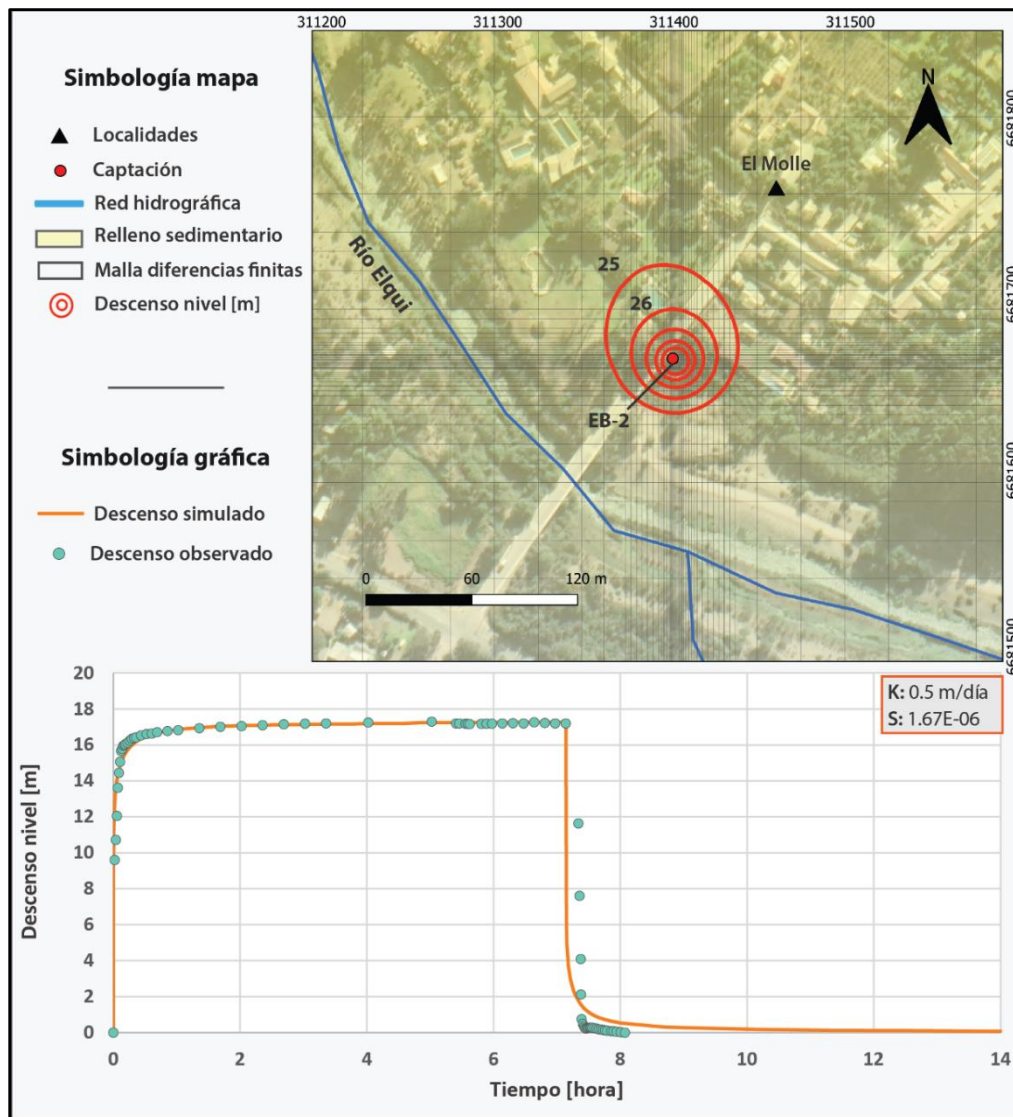


Figura 5.37 Ensayo de bombeo EB-02 Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-3

El pozo profundo correspondiente al APR Las Marquesas, presenta una profundidad de 70.00 m. El nivel estático se midió a 8.46 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 20.80 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 13.44 m (Figura 5.38).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **3 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **1.43E-06**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

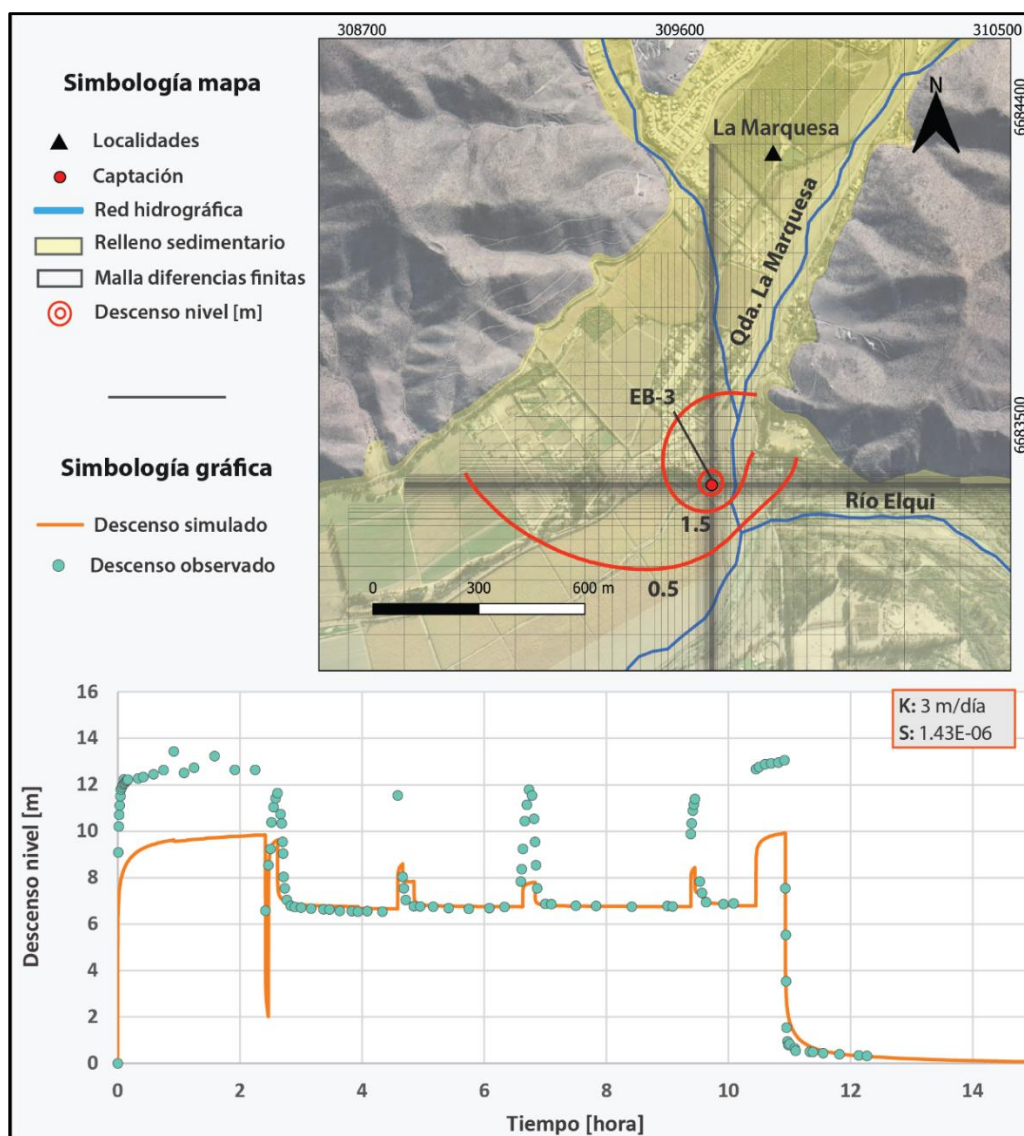


Figura 5.38 Ensayo de bombeo EB-03. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-4

El pozo profundo correspondiente al APR La Calera, presenta una profundidad de 50.00 m. El nivel estático se midió a 4.60 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 3.76 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 16.17 m (Figura 5.39).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.38 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **1.00E-04**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

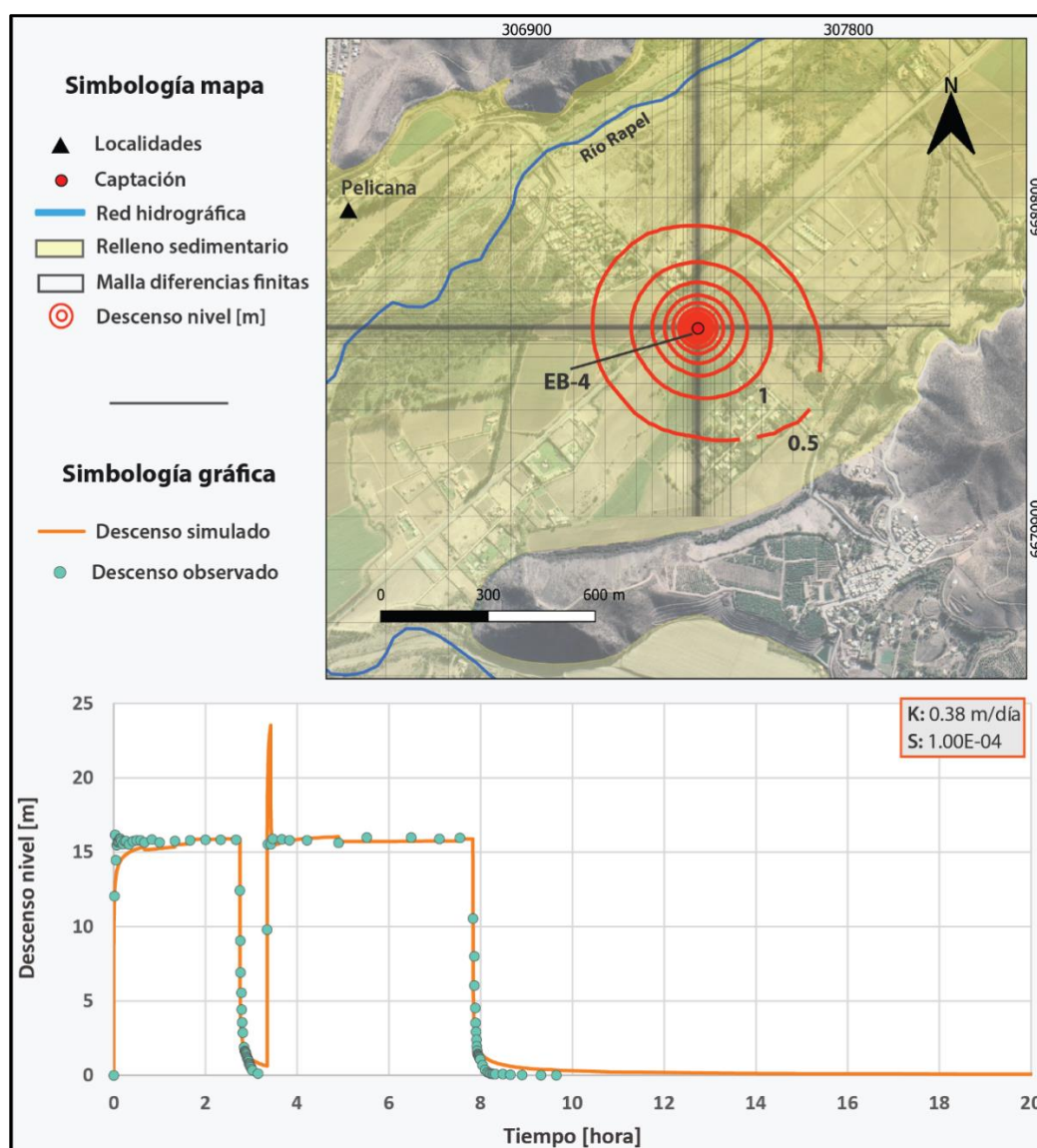


Figura 5.39 Ensayo de bombeo EB-04. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-5

El pozo profundo correspondiente al APR La Pelicana, presenta una profundidad de 18.30 m. El nivel estático se midió a 1.25 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 3.00 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 3.00 m (Figura 5.40).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **5 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **5.46E⁻⁰⁶**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

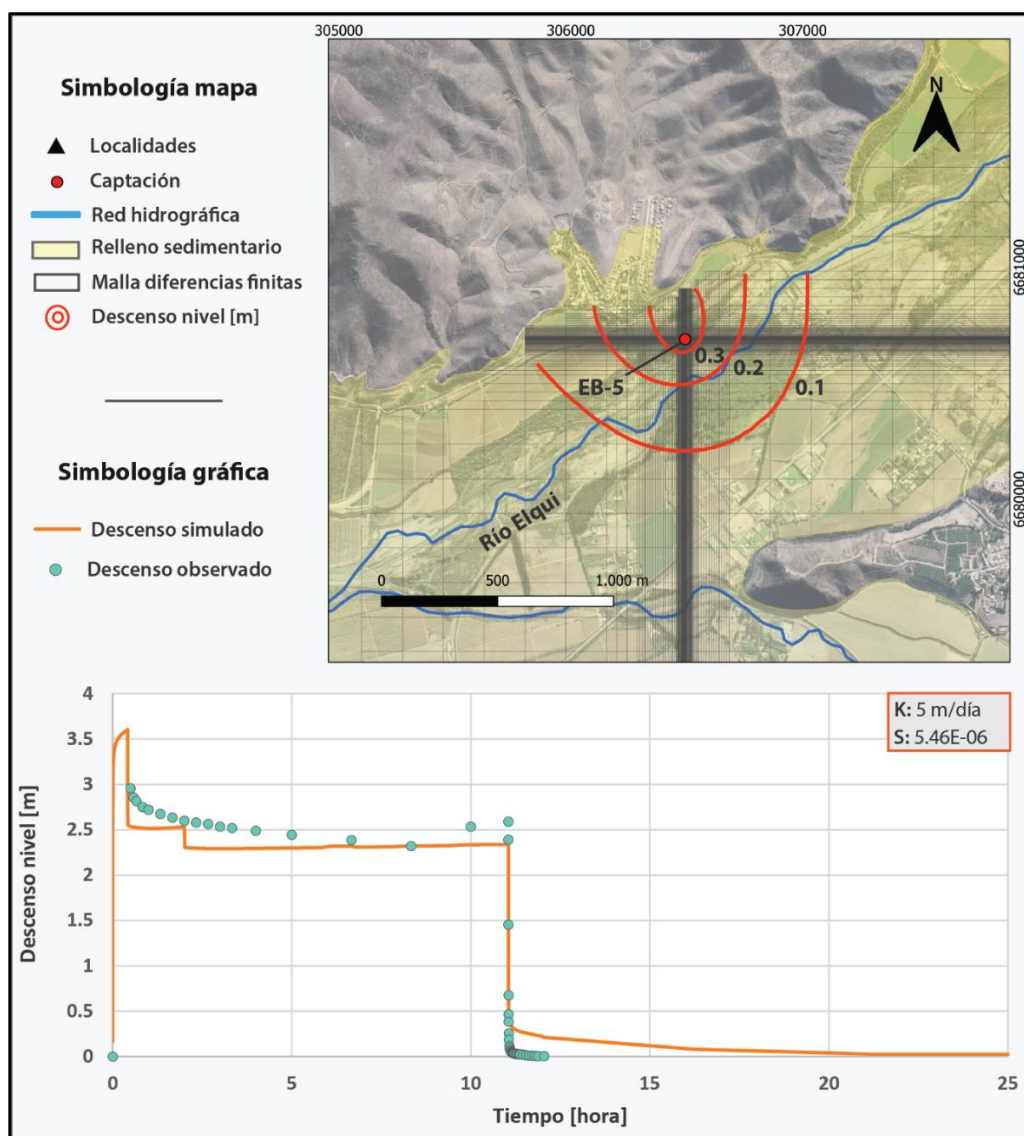


Figura 5.40 Ensayo de bombeo EB-05. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-6

El pozo profundo correspondiente al APR Quebrada de Talca, presenta una profundidad de 22.00 m. El nivel estático se midió a 2.70 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 7.70 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 0.22 m (Figura 5.41).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **185 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **0.27**, que indica que el acuífero se encontraría localmente libre.

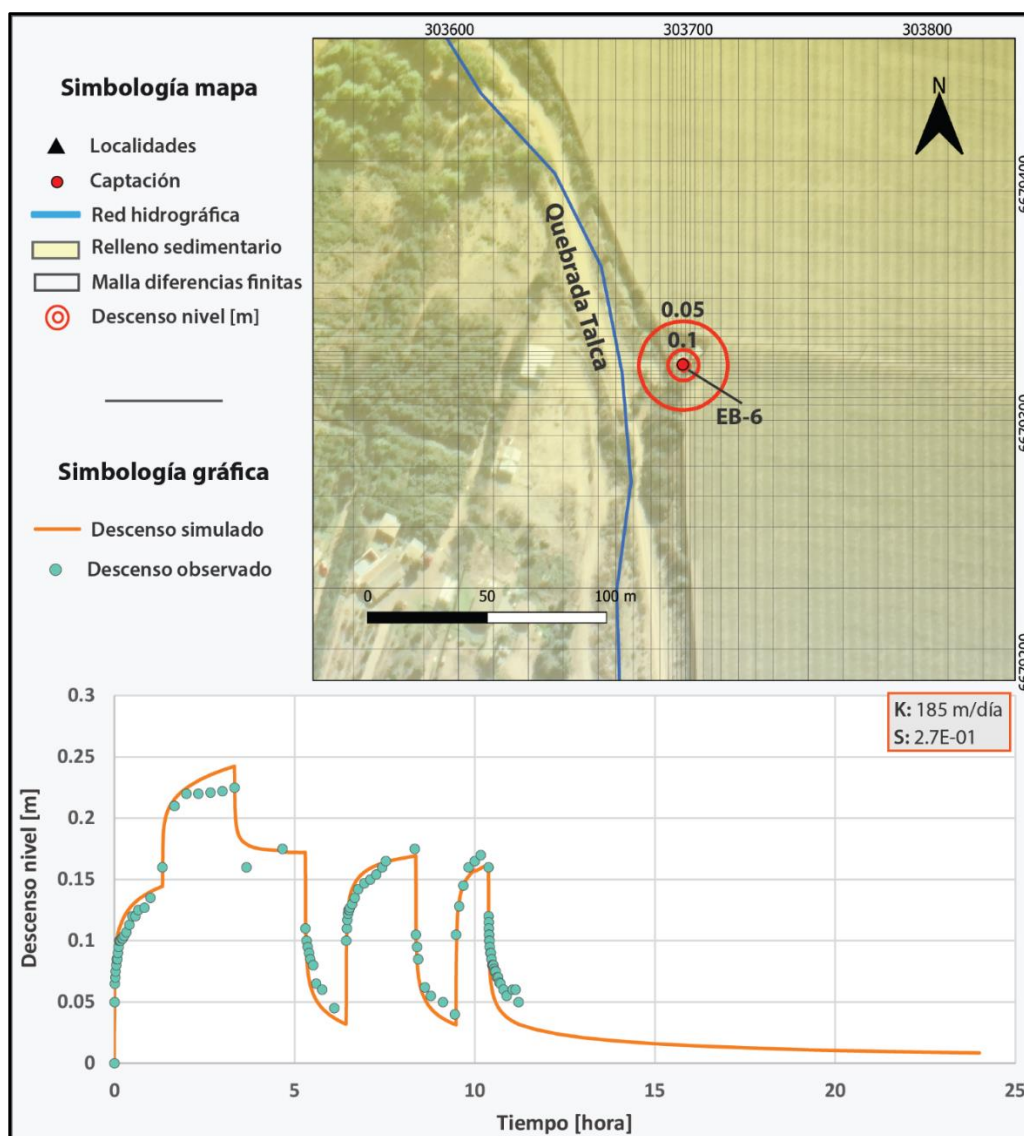


Figura 5.41 Ensayo de bombeo EB-06. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-7

La noria correspondiente a un particular presenta una profundidad de 7.16 m. El nivel estático se midió a 0.56 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 10.40 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 0.62 m (Figura 5.42).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **300 m/d**, y un coeficiente de almacenamiento de **0.35**, que indica que el acuífero se encontraría localmente libre. Adicionalmente cabe mencionar que la zona estudiada se encuentra particularmente en una zona de alta permeabilidad limitada en extensión por materiales de baja permeabilidad.

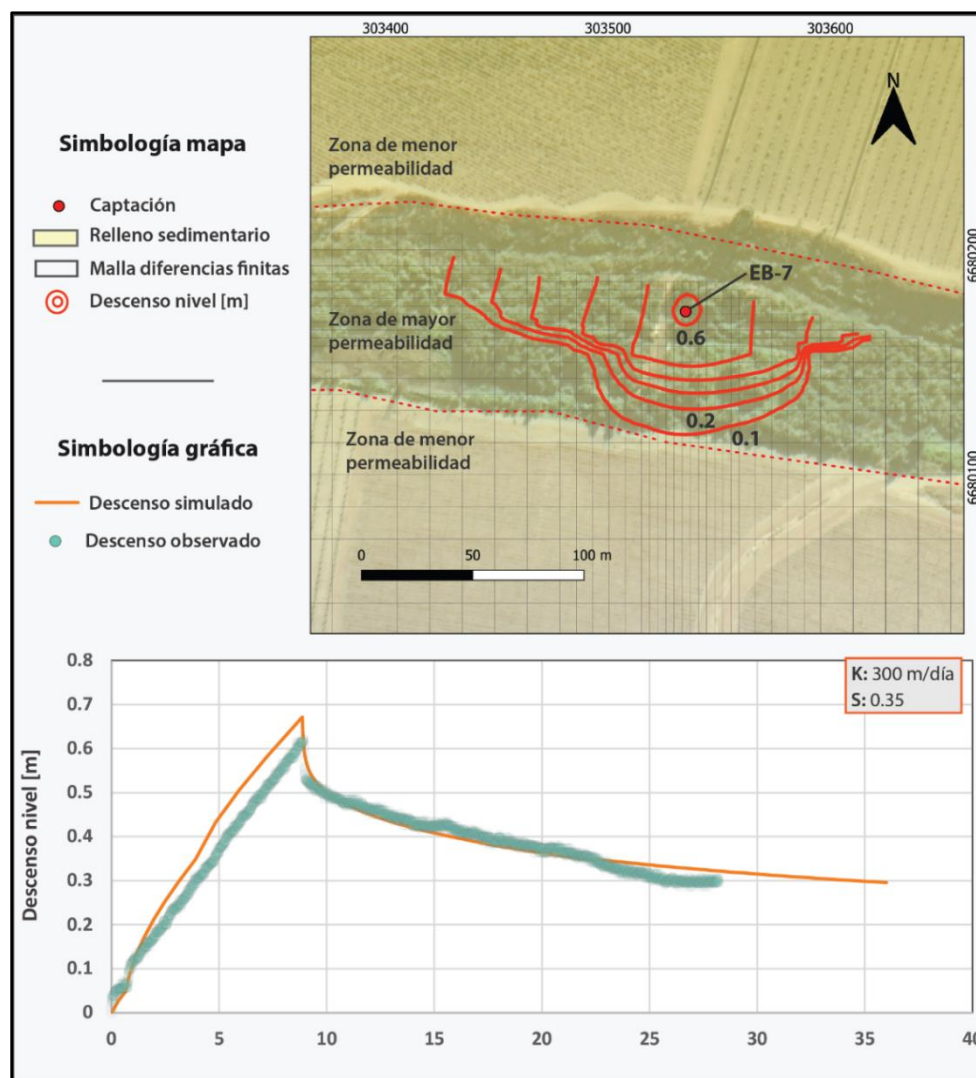


Figura 5.42 Ensayo de bombeo EB-07. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-8

El pozo profundo correspondiente al APR Las Rojas, presenta una profundidad de 100.00 m. El nivel estático se midió a 1.38 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 11.00 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 7.80 m (Figura 5.43).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **2.5 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **6.00E-07**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

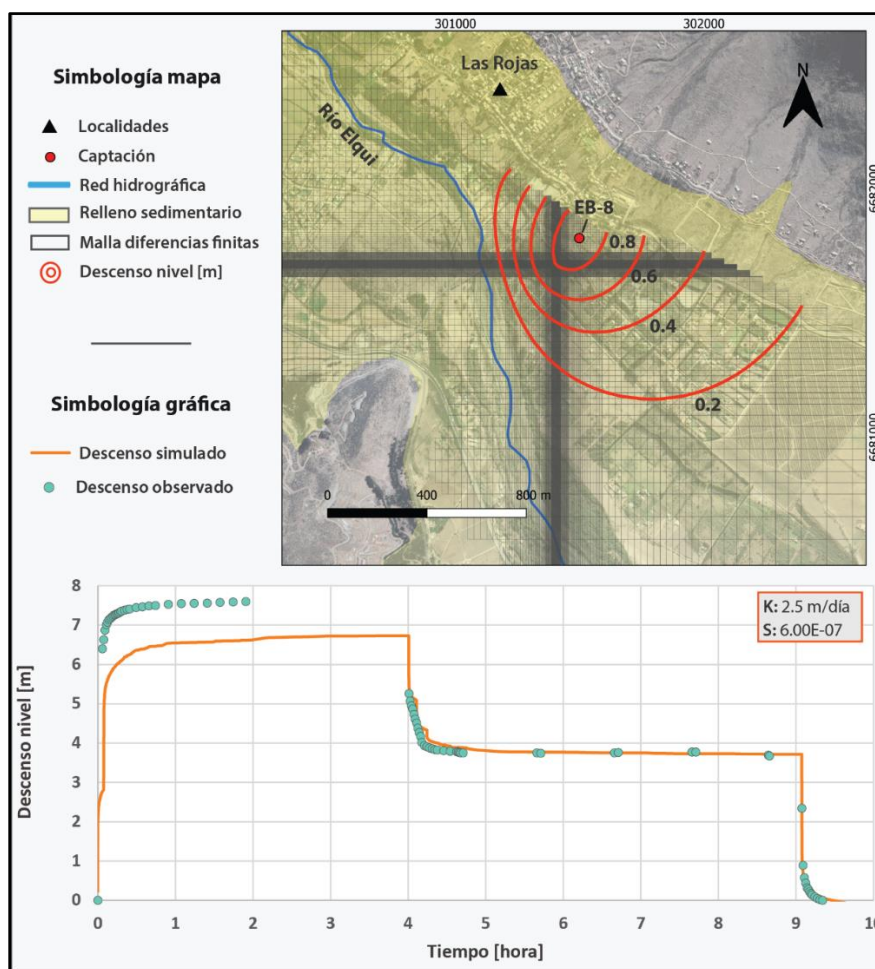


Figura 5.43 Ensayo de bombeo EB-08. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-9

El pozo profundo correspondiente al APR Gabriela Mistral, presenta una profundidad de 42.00 m. El nivel estático se midió a 3.48 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 10.00 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 18.49 m (Figura 5.44).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **1.05 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **1.00E-05**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

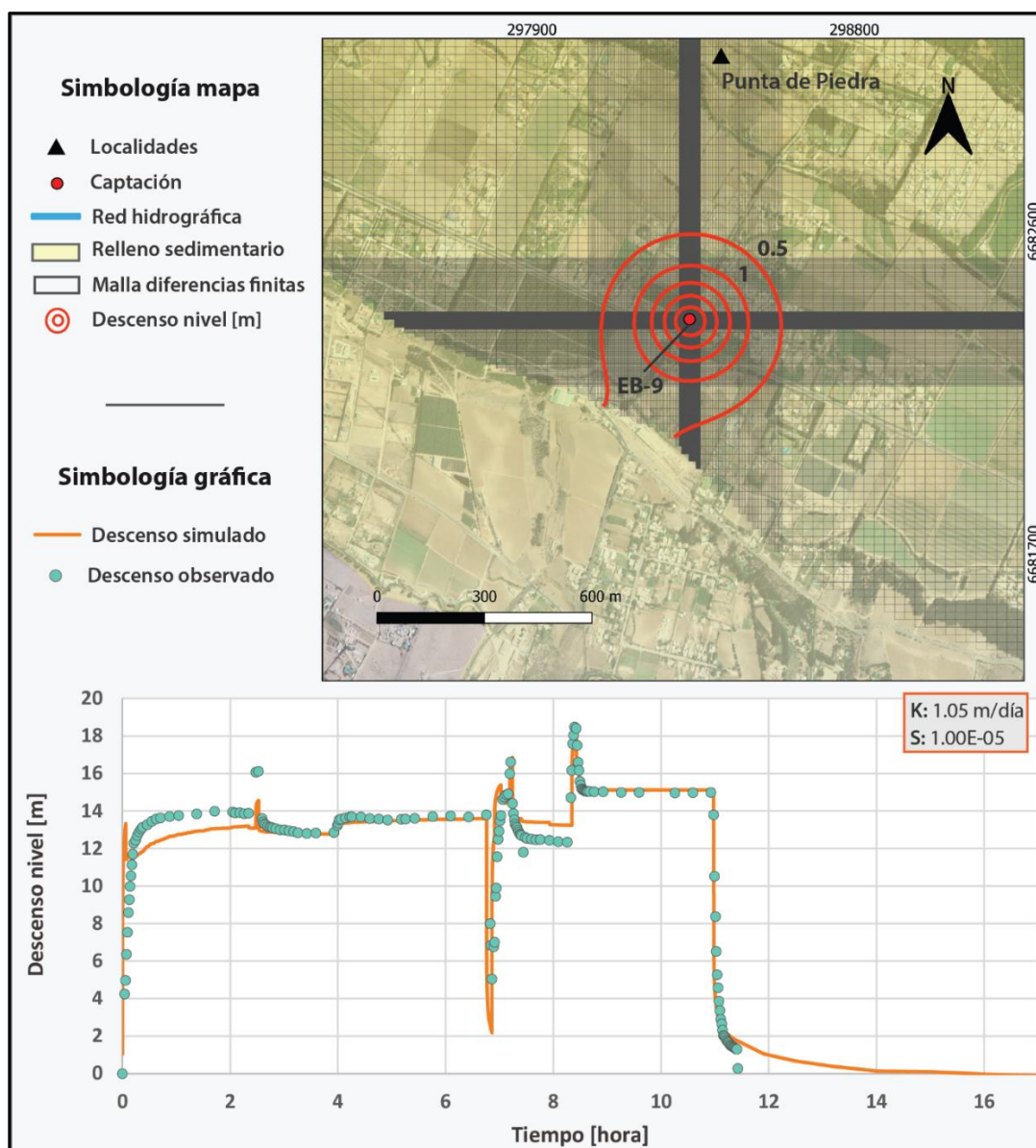


Figura 5.44 Ensayo de bombeo EB-09. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-10

El pozo profundo correspondiente al APR Coquimbito – Altovalsol, presenta una profundidad de 70.00 m. El nivel estático se midió a 3.10 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 15.00 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 28 m (Figura 5.45).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.72 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **3.00E-06**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

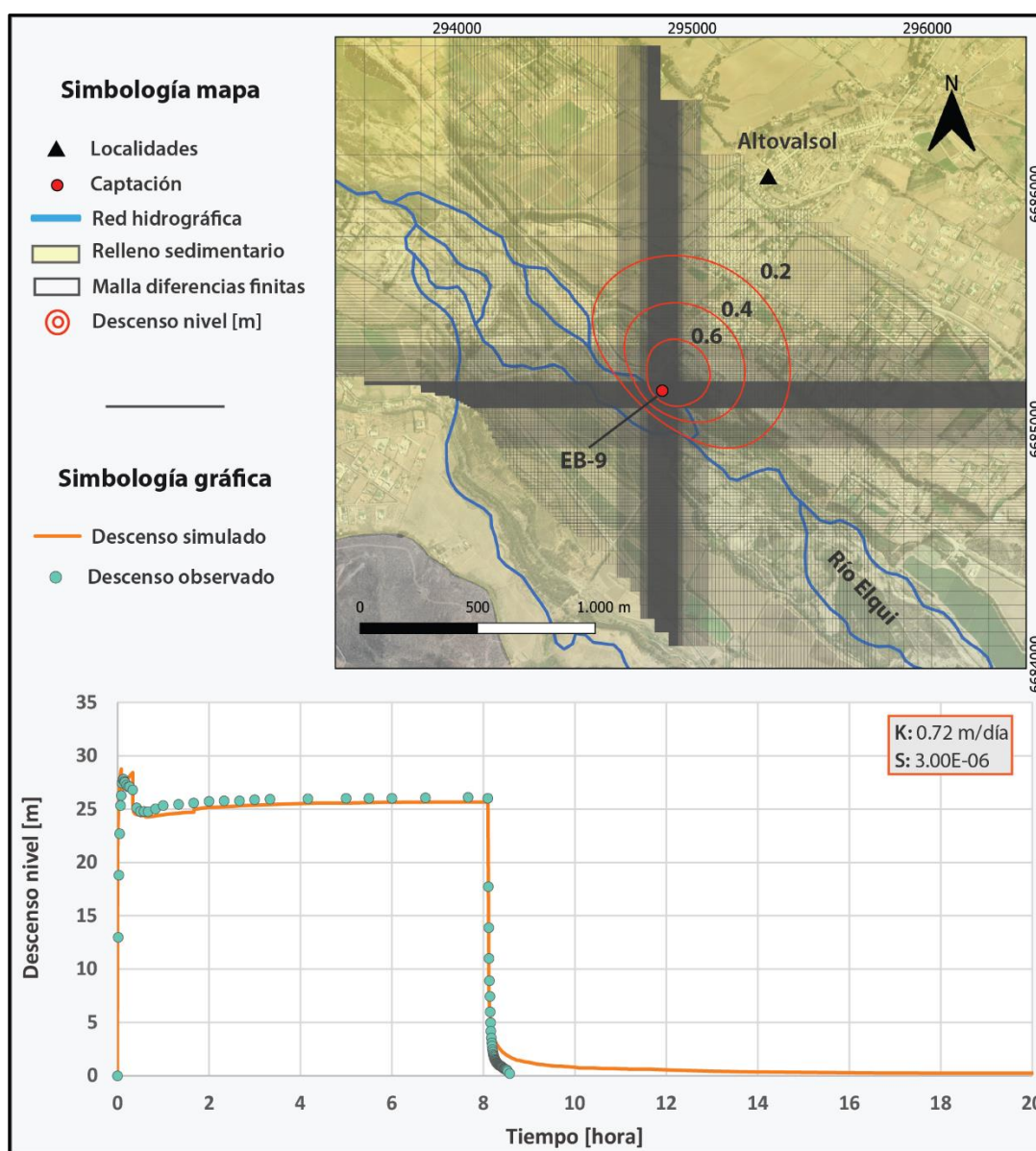


Figura 5.45 Ensayo de bombeo EB-10. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-11

El pozo profundo correspondiente a un particular presenta una profundidad de 72 m. El nivel estático se midió a 20.34 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 5.60 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 11.85 m (Figura 5.46).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.5 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **$1E^{-05}$** , que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

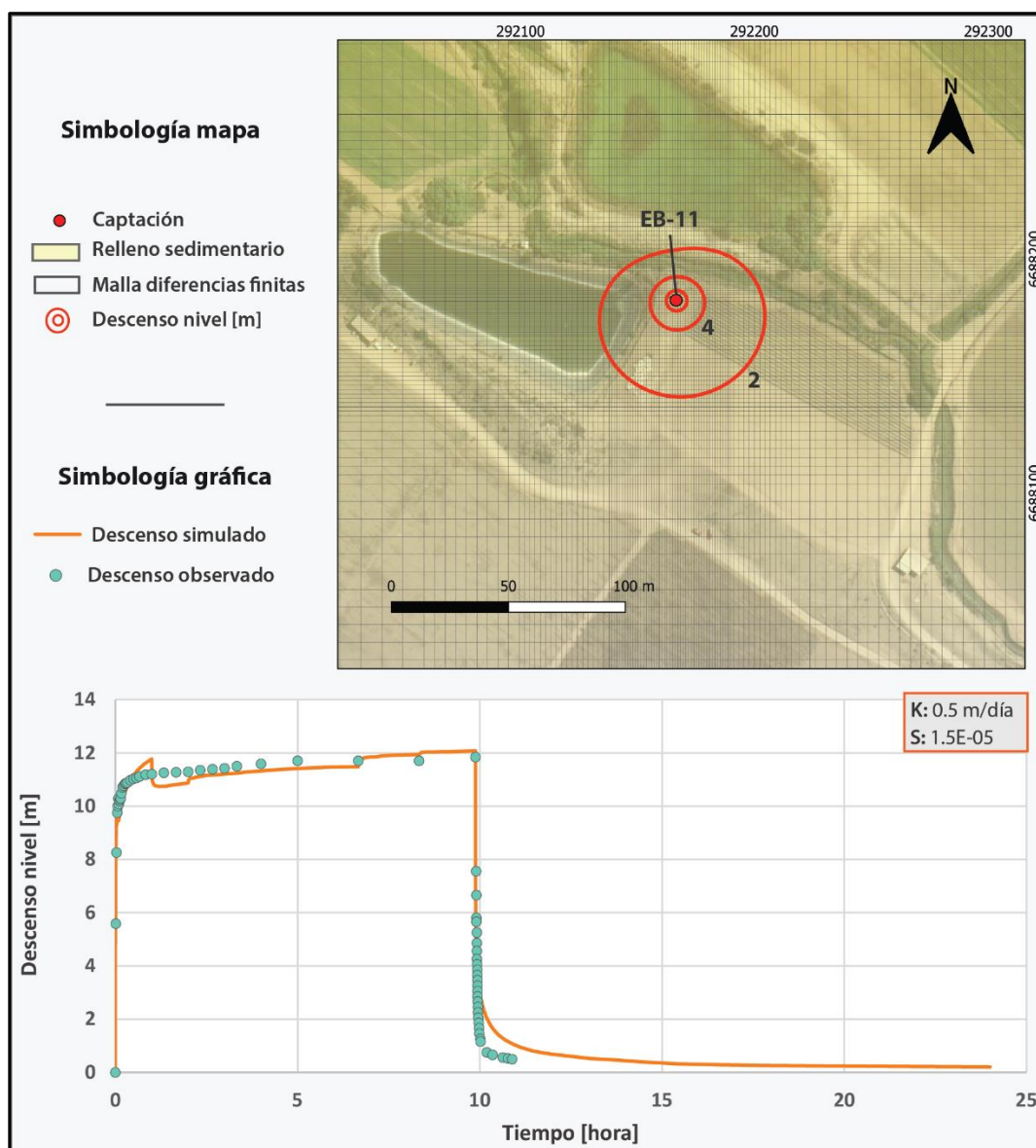


Figura 5.46 Ensayo de bombeo EB-11. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-12

El pozo profundo correspondiente a un particular presenta una profundidad de 41.00 m. El nivel estático se midió a 7.24 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 1.20 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 5.23 m (Figura 5.47).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **0.42 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **8.00E⁻⁰⁷**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

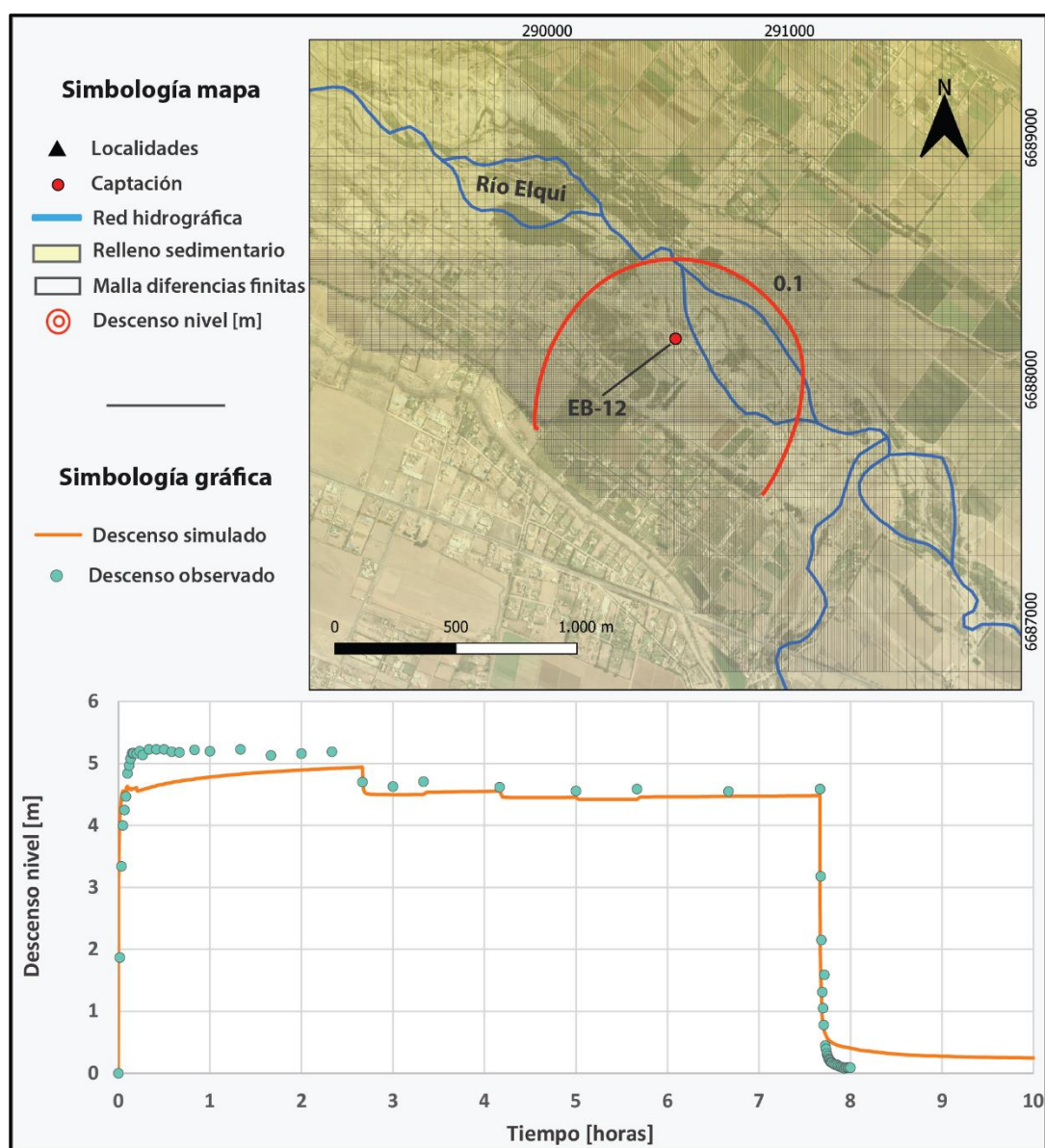


Figura 5.47 Ensayo de bombeo EB-12. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-13

El pozo profundo correspondiente al APR Islón, presenta una profundidad de 50.00 m. El nivel estático se midió a 30.35 m de profundidad. Se realizaron bombeos con un caudal de 2.90 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 1.20 m (Figura 5.48).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **8.95 m/d** y un coeficiente de almacenamiento de **5.00E⁻⁰³**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

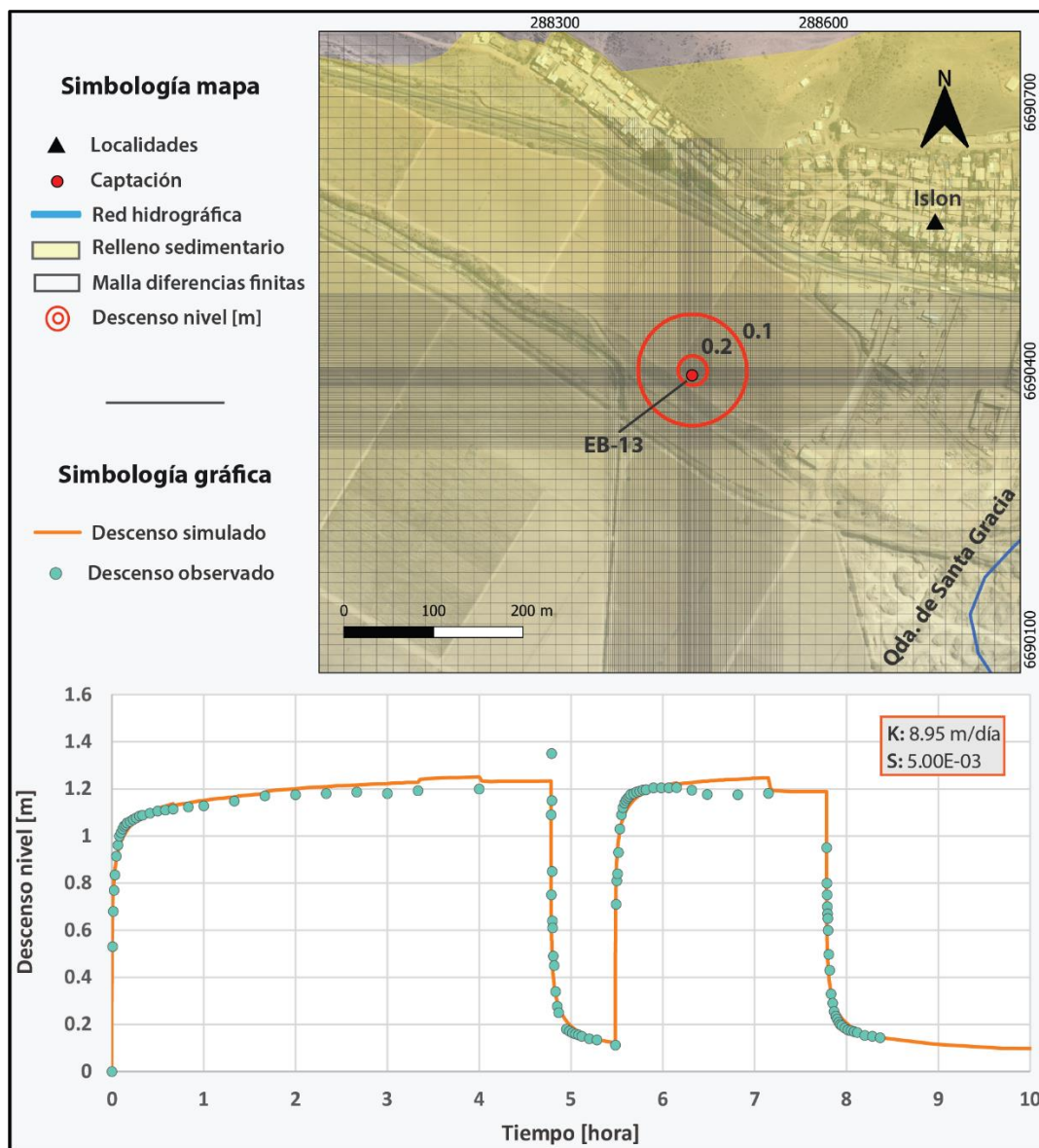


Figura 5.48 Ensayo de bombeo EB-13. Fuente: Elaboración Propia.

5.7 HIDRODINÁMICA

Con la finalidad de actualizar los antecedentes piezométricos, de calidad y los caudales de extracción de las captaciones de la cuenca, se realizó un catastro de 46 captaciones aguas abajo del embalse Puclaro en la cuenca del río Elqui Bajo (Figura 5.49). Los registros del catastro de pozos se presentan en la Tabla 5.4.

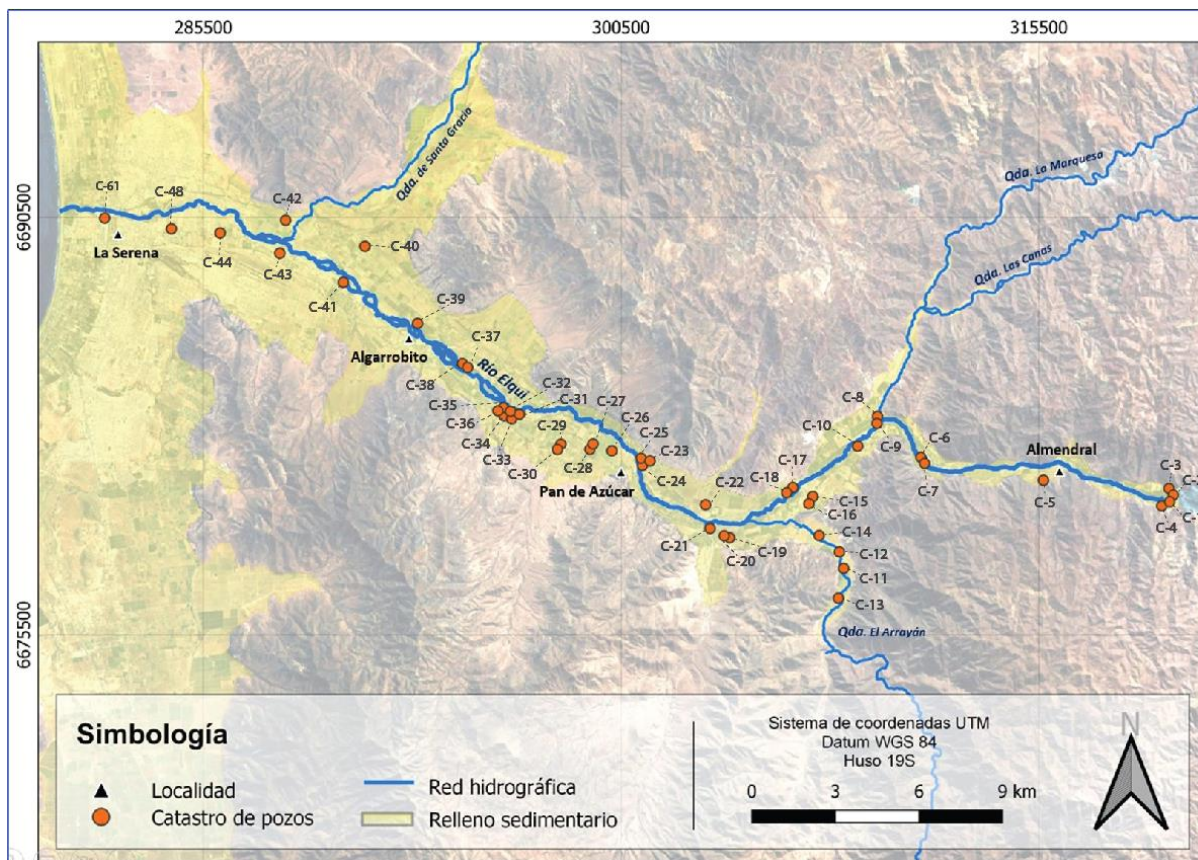


Figura 5.49. Catastro de pozos entorno al Río Elqui. Fuente: Aluvial Consultores.

Tabla 5.4 Registro del catastro de pozos realizado. Fuente. Aluvial Consultores.

Código	Coordenadas UTM		Elevación (m.s.n.m)	Tipo captación	Brocal (m)	Prof. Pozo (m)	Prof. NE (m)	Prof. ND (m)	Q (L/s)	CE (us/cm)	pH	T° (°C)
	Este	Norte										
C1	320319	6680368	439	Pozo profundo	0.5	20.4	4.7	-	-	716	6.8	16.1
C2	320310	6680500	440	Pozo profundo	0.4	21.5	4.4	-	-	723	6.8	15.9
C3	320307	6680676	444	Pozo profundo	0.4	19.5	5.4	-	-	-	-	-
C4	320190	6680202	445	Pozo profundo	0.3	-	4.8	-	-	-	-	-
C5	315668	6681056	394	Pozo	0.4	46.0	-	27.4	0.8	2200	6.6	13.7
C6	311415	6681786	329	Pozo profundo	0.2	45.0	-	3.8	10.3	783	6.8	16.6
C7	311401	6681662	324	Pozo profundo	0.7	60.0	2.7	-	-	814	6.7	15.0
C8	309709	6683351	335	Pozo Profundo	1.3	40.0	9.7	-	-	-	-	-
C9	309690	6683330	335	Pozo Profundo	0.8	70.0	7.8	19.5	20.0	804	6.4	16.3
C10	308999	6682283	313	Calicata	-	2.3	2.0	-	-	704	6.8	14.9
C11	308493	6677892	268	Pozo profundo	0.5	35.2	16.3	-	-	842	6.5	16.4
C12	308343	6678484	270	Pozo Profundo	0.8	33.0	-	-	6.9	925	6.5	16.2
C13	308306	6676820	277	Pozo profundo	-	36.0	-	-	3.0	1058	6.5	16.5
C14	307612	6679071	258	Pozo profundo	-	13.1	-	-	-	-	-	-
C15	307377	6680463	226	Pozo profundo	0.5	50.0	-	20.1	3.6	1441	6.8	13.4
C16	307371	6680465	269	Pozo profundo	0.6	100.0	5.9	-	-	-	-	-
C17	306670	6680798	285	Pozo profundo	0.4	23.4	2.9	-	3.5	686	6.5	15.0
C18	306488	6680694	283	Pozo profundo	1.1	18.3	-	2.6	5.7	803	6.4	15.8
C19	304402	6678992	268	Dren	-	1.9	1.9	-	-	1168	6.7	15.3
C20	304204	6679060	263	Dren	0.5	1.9	1.9	-	-	1099	6.7	17.2
C21	303697	6679324	249	Pozo profundo	0.2	22.0	-	2.8	7.9	1121	7.1	18.0
C22	303534	6680176	182	Noria	-	7.2	0.4	-	-	1095	6.8	12.1
C23	301414	6681708	205	Pozo profundo	0.6	100.0	-	5.9	6.4	915	6.4	15.8
C24	301280	6681786	206	Pozo Profundo	0.4	80.0	-	-	-	-	-	-
C25	301264	6681805	206	Pozo profundo	0.7	24.5	3.6	-	-	790	6.5	16.0
C26	300174	6682113	172	Noria	0.6	11.9	6.8	-	-	1140	6.8	13.5
C27	299496	6682364	181	Noria	0.4	17.3	5.5	-	-	1445	6.7	14.7
C28	299474	6682337	164	Noria	0.5	18.4	5.9	-	-	968	6.7	14.5
C29	298340	6682354	181	Pozo profundo	0.9	42.0	-	17.6	7.7	1078	6.7	14.7
C30	298332	6682338	187	Pozo profundo	0.5	36.0	8.2	-	-	-	-	-
C31	296767	6683278	157	Pozo profundo	0.4	-	-	53.6	10.6	984	6.5	18.0
C32	296531	6683531	154	Pozo profundo	0.7	-	-	60.2	9.6	831	6.5	18.0
C33	296474	6683355	150	Pozo profundo	-	78.0	-	-	13.2	887	6.6	17.9
C34	296388	6683455	129	Pozo Profundo	0.7	78.0	-	70.9	25.0	894	6.7	17.5
C35	296316	6683677	142	Pozo profundo	0.8	-	-	31.3	42.0	865	6.7	18.5
C36	296072	6683683	160	Pozo profundo	0.5	-	-	63.5	10.7	-	-	-
C37	294930	6685127	101	Pozo profundo	0.6	64.0	-	-	10.1	1024	6.4	17.3
C38	294870	6685149	100	Pozo profundo	0.9	70.0	3.2	-	32.3	1021	6.4	17.1
C39	293196	6686691	117	Pozo profundo	0.3	72.0	3.5	-	-	1132	6.7	17.7
C40	291305	6689458	108	Pozo profundo	0.5	49.2	18.4	-	6.2	-	-	-
C41	290530	6688167	77	Pozo profundo	0.3	41.0	-	7.1	1.4	938	6.7	15.4
C42	288456	6690396	39	Pozo Profundo	835.0	50.0	-	31.4	-	1430	6.5	16.1
C43	288246	6689213	44	Pozo profundo	0.3	30.0	12.2	-	-	725	7.1	15.1
C44	286107	6689937	28	Pozo profundo	0.5	60.0	-	21.1	5.7	1010	6.7	13.6
C48	284356	6690088	11	Pozo profundo	-	60.0	-	-	8.8	2250	6.7	13.6
C61	281961	6690475	9	Pozo profundo	0.6	39.4	1.4	-	-	1362	6.8	17.1

A partir de la información levantada en el catastro de pozos realizado, los niveles consultados en la red de monitoreo de la DGA, los datos obtenidos de la mesa hídrica, el nivel freático en afloramientos de agua subterránea y el nivel freático inferido desde algunas de las tomografías eléctricas, se caracteriza la piezometría del sistema acuífero del Elqui.

El agua subterránea en la cuenca presenta flujos orientados en el mismo sentido y dirección de la escorrentía superficial del cauce principal, es decir de este a oeste, con gradientes hidráulicos en torno al 1 %.

De acuerdo a los datos obtenidos del catastro de pozos, en la sección este del acuífero Elqui Bajo (Figura 5.50), la profundidad registrada del nivel freático se encuentra en general a menos de 6 metros de la superficie, presentándose relativamente estables, se observan variaciones máximas del orden de 2 m.

Hacia el oeste, con profundidades en los pozos de la red de control que alcanzan los 10 m para los pozos alejados del río, se observan disminuciones más importantes de niveles en los últimos años, comenzando en torno al año 2012, alcanzando descensos de hasta 20 -40 m. Esta baja de niveles estaría asociada a las mayores extracciones constituidas en la parte oeste del acuífero, junto a los años secos consecutivos del periodo 2010 – 2014.

El río puede considerarse principalmente ganador en su condición natural. Los descensos por bombeo aumentarían la capacidad de recibir infiltración desde el río, a la vez que producirían una disminución de los afloramientos del acuífero a este. Los descensos en la parte terminal del acuífero, donde se incorpora la quebrada Santa Gracia, dan lugar a pérdidas del río por tramos en algunas fechas, el cual escurriría como flujo subsuperficial a través del relleno somero de mayor permeabilidad.

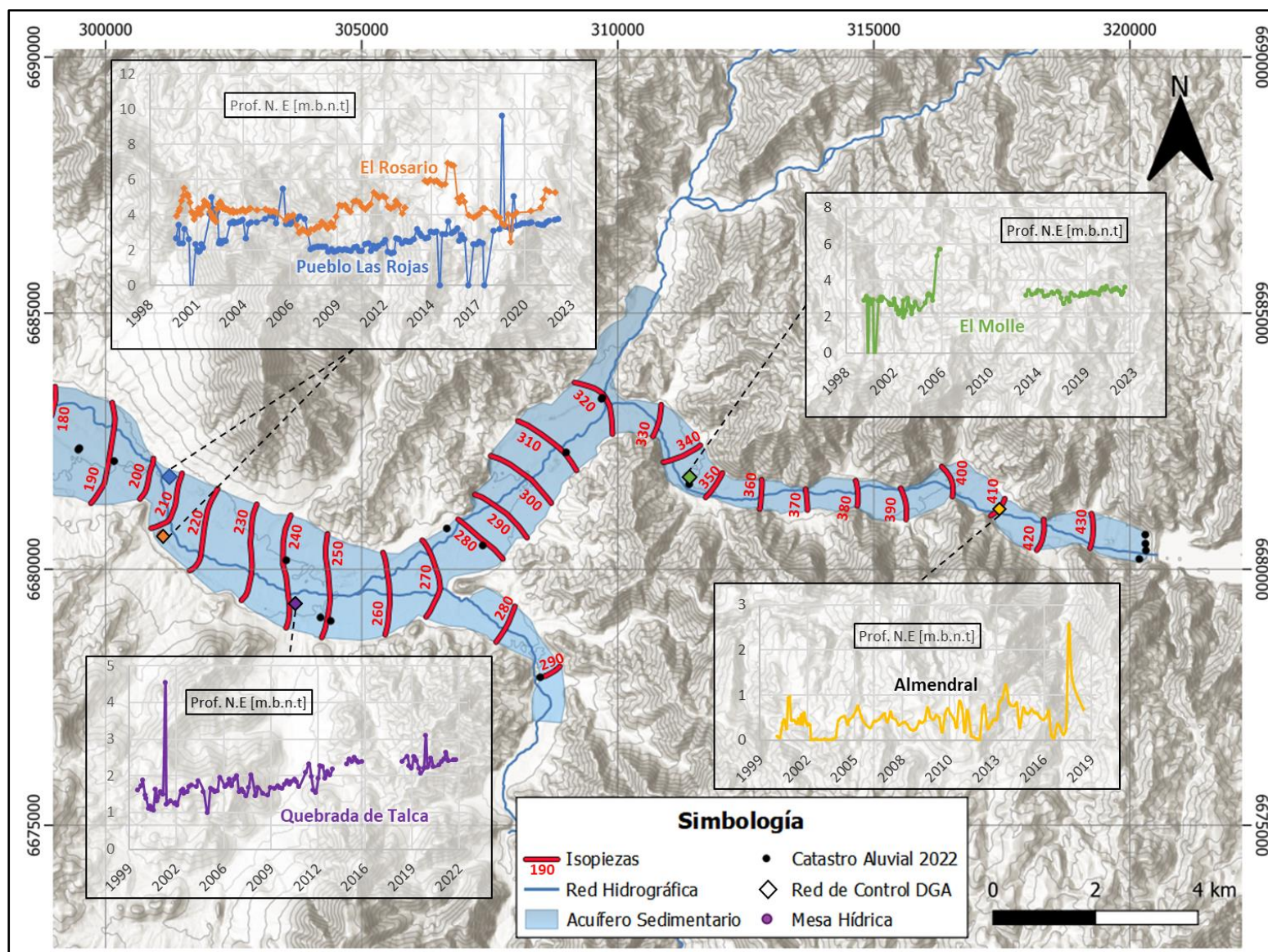


Figura 5.50. Piezometría Cuenca Elqui Bajo, Sección Este. Elaboración propia.

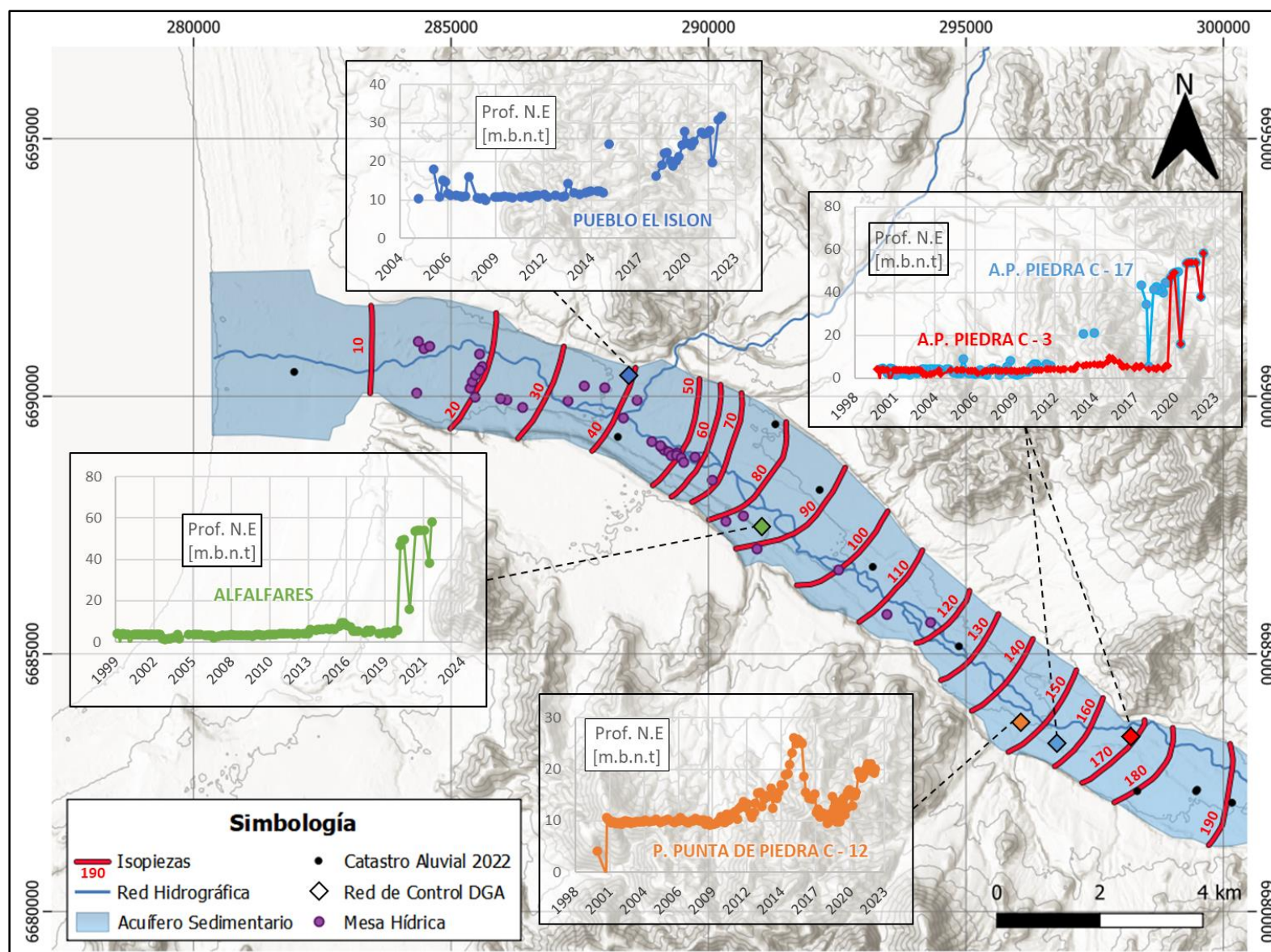


Figura 5.51 Piezometría Cuenca Elqui Bajo, Sección Oeste. Elaboración propia.

5.8 HIDROQUÍMICA

Para el análisis hidroquímico de las aguas del sistema acuífero, se han utilizado los antecedentes hidroquímico a partir del año 2010 de la red de control de la DGA, antecedentes de expedientes de la DGA, red de monitoreo hidroquímica de la Mesa Hídrica y la información hidroquímica medida in situ en el catastro de pozos de julio de 2022 del presente estudio.

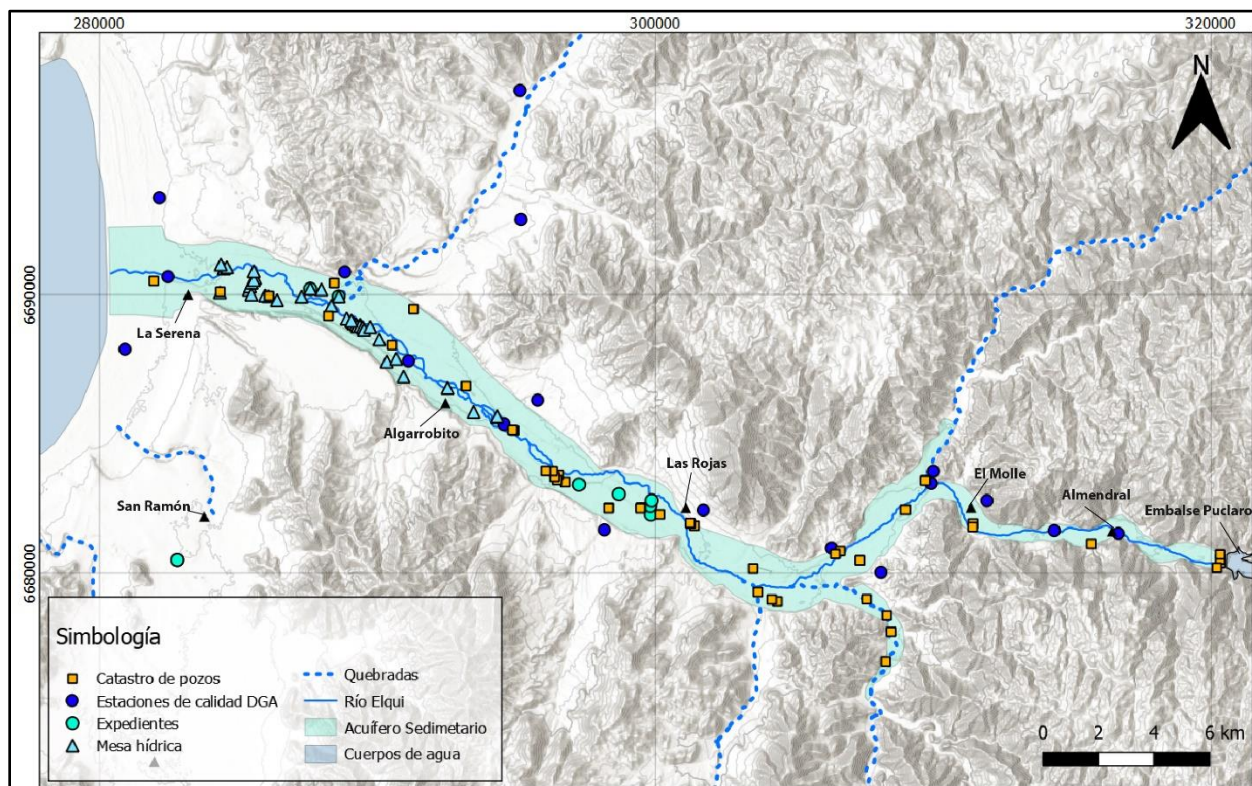


Figura 5.52 antecedentes de calidad de las aguas. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la red de control de la DGA, Las aguas superficiales en la entrada del río Elqui presentan una conductividad eléctrica (CE) de 730 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en estación Río Elqui en Almendral y aumenta hacia la costa hasta alcanzar una CE del orden de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la estación Río Elqui en La Serena.

En cuanto a las aguas subterráneas, desde el embalse Puclaro hasta la quebrada del Arrayán existe una conductividad del orden de 550-900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con conductividades puntuales por sobre 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en torno a la localidad del Almendral y Aguas arriba de la quebrada El Arrayán, las

cuales podrían estar asociados a los efectos locales del riego y/o a las recargas laterales del sistema acuífero

Según las captaciones existentes en los valles y en las desembocaduras de las Quebradas La Marquesa, el Arrayán y Talca, las aguas subterráneas presentan una conductividad eléctrica por sobre los 900 uS/cm, que es mayor que la medida en el sistema acuífero del Elqui.

Dado lo anterior, las principales recargas laterales podrían aumentar la conductividad eléctrica del agua del acuífero hacia el oeste.

En efecto, Aguas abajo de la Quebrada de Talca y antes de los aportes de agua subterránea de la quebrada Santa Gracia, las aguas del sistema acuífero presentan una conductividad eléctrica entre 900-1250 uS/cm.

En este mismo tramo de análisis y localmente al sur y 4 km al oeste de las Rojas, algunas captaciones presentan una conductividad menor a los 900 uS/cm. Esta disminución local en la conductividad eléctrica se genera en captaciones que se encuentran aledañas al lecho del Río Elqui y que podrían estar recibiendo un mayor aporte de aguas del río, dado que los descensos generados por el bombeo emplazan los niveles dinámicos entre los 60-70 m de profundidad.

Se debe tener en cuenta que la información fisicoquímica de las aguas del Río Elqui más cercana, es la de la estación Río Elqui en Almendral. Por lo cual, se recomienda, realizar un registro de parámetros fisicoquímicos de las aguas del río para analizar su evolución hidroquímica y validar si la disminución en la CE de las captaciones cercanas al río podría estar relacionado a la relación río acuífero.

Desde el oeste de Algarrobito hasta la desembocadura del río Elqui con el mar, la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas aumenta por sobre los 1250 us/cm, lo cual podría estar relacionado a aportes de la quebrada Santa Gracia, que tiene conductividades por sobre 1250 uS/cm, según un antecedente ubicado en las terrazas fluviales de esta quebrada. Este aumento en la conductividad también podría estar relacionado a una posible intrusión marina.

De acuerdo con los antecedentes históricos y del catastro realizado (Figura), desde el año 2012 hasta el 2022 las conductividades eléctricas, tanto aguas arriba como aguas abajo del sistema, se

han mantenido en los mismos ordenes de magnitud, sugiriendo que la hidroquímica regional del sistema se ha mantenido similar en los últimos 10 años.

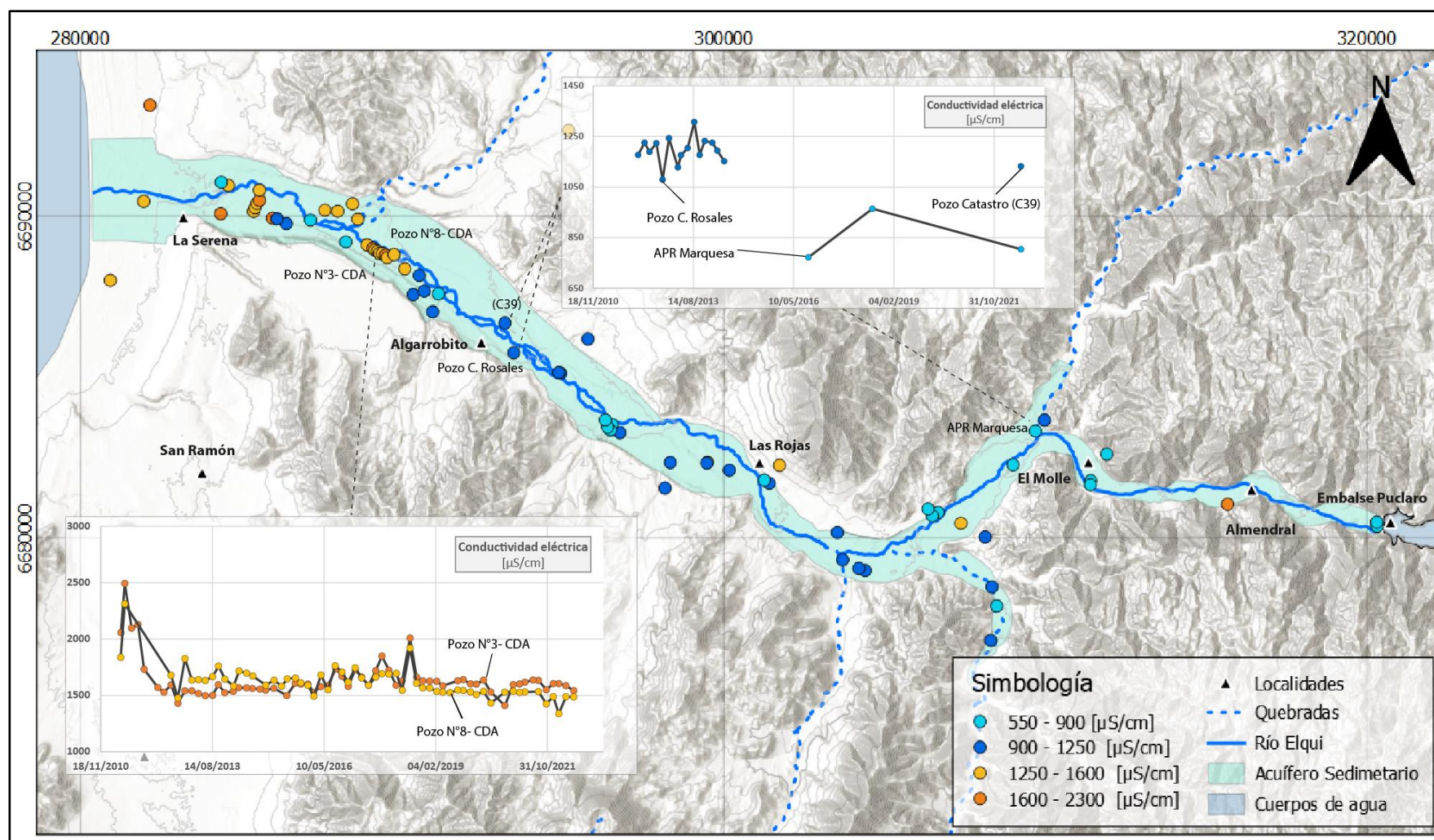


Figura 5.53 Conductividad eléctrica de las aguas subterráneas y superficiales. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento constante de la conductividad eléctrica durante los últimos 10 años, también se observa en los elementos mayoritarios, los cuales se han mantenido en los rangos presentados en la Tabla 5.5

Tabla 5.5 Rango de concentraciones en la última década de los elementos mayoritarios en el acuífero. Fuente: Elaboración Propia

Código	Bicarbonato	Sulfato	Cloruro	Nitrato	Sodio	Potasio	calcio	Magnesio
El Molle	150-200	190-220	15-35	5-35	40-55	2-5	90-130	10-20
Este de Algarrobito	300-400	270-340	50-120	5-20	60-150	3-5	100-180	25-40
Frente a la Quebrada santa Gracia	250-400	250-350	100-200	20-60	90-180	4-11	120-240	25-50

Dado que la calidad de las aguas se ha mantenido regionalmente constante en los últimos 10 años, se ha realizado la caracterización espacial hidroquímica con los antecedentes desde el año 2011 hasta el 2022.

De acuerdo con estos, las aguas subterráneas son del tipo sulfatadas cálcicas y aumenta su concentración hacia la costa.

Desde el embalse Puclaro hasta la quebrada el Arrayán, existe una baja concentración relativa de cloruro (30 mg/l) y sodio (50 mg/l), el cual aumenta hacia el oeste, alcanzando al sur de la Quebrada Santa Gracia, concentraciones del orden de 120 y 150 mg/l respectivamente (Figura).

Entre la quebrada Arrayán y la costa las aguas subterráneas son de similar composición, pero con un aumento en la salinidad de estas.

En la costa, los pozos graficados en rojo presentan las máximas concentraciones de iones y cationes mayoritarios y proporcionalmente una mayor concentración de cloruros, que bordea los 270 mg/l.

Lo anterior podría estar asociado a una posible intrusión marina, la cual afectaría en mayor proporción a estos pozos por posibles vías preferenciales del agua subterránea dada la heterogeneidad que caracteriza el sistema acuífero.

De los antecedentes considerados, existen 4 captaciones cuyas concentraciones se escapan de las tendencias del sistema, presentando las siguientes características:

- El pozo H1 en comparación a las aguas que caracterizan el sector oeste del Elqui Bajo, presenta una mayor concentración de cloruros.
- El pozo H2 las aguas son del tipo cloruradas sódicas y presenta una menor concentración de calcio y sulfato y una elevada concentración de sodio en comparación a las aguas del acuífero, esto podría estar asociado a la cercanía a la costa y las posibles afecciones de una intrusión marina.
- El pozo H3 las aguas son del tipo cloruradas sódicas y presentan una baja concentración de calcio y de sulfato, pero elevada concentración de cloruros en comparación a las muestras características del acuífero.
- El pozo H4 las aguas presentan una mayor concentración de sodio y una baja concentración de calcio y de sulfatos.

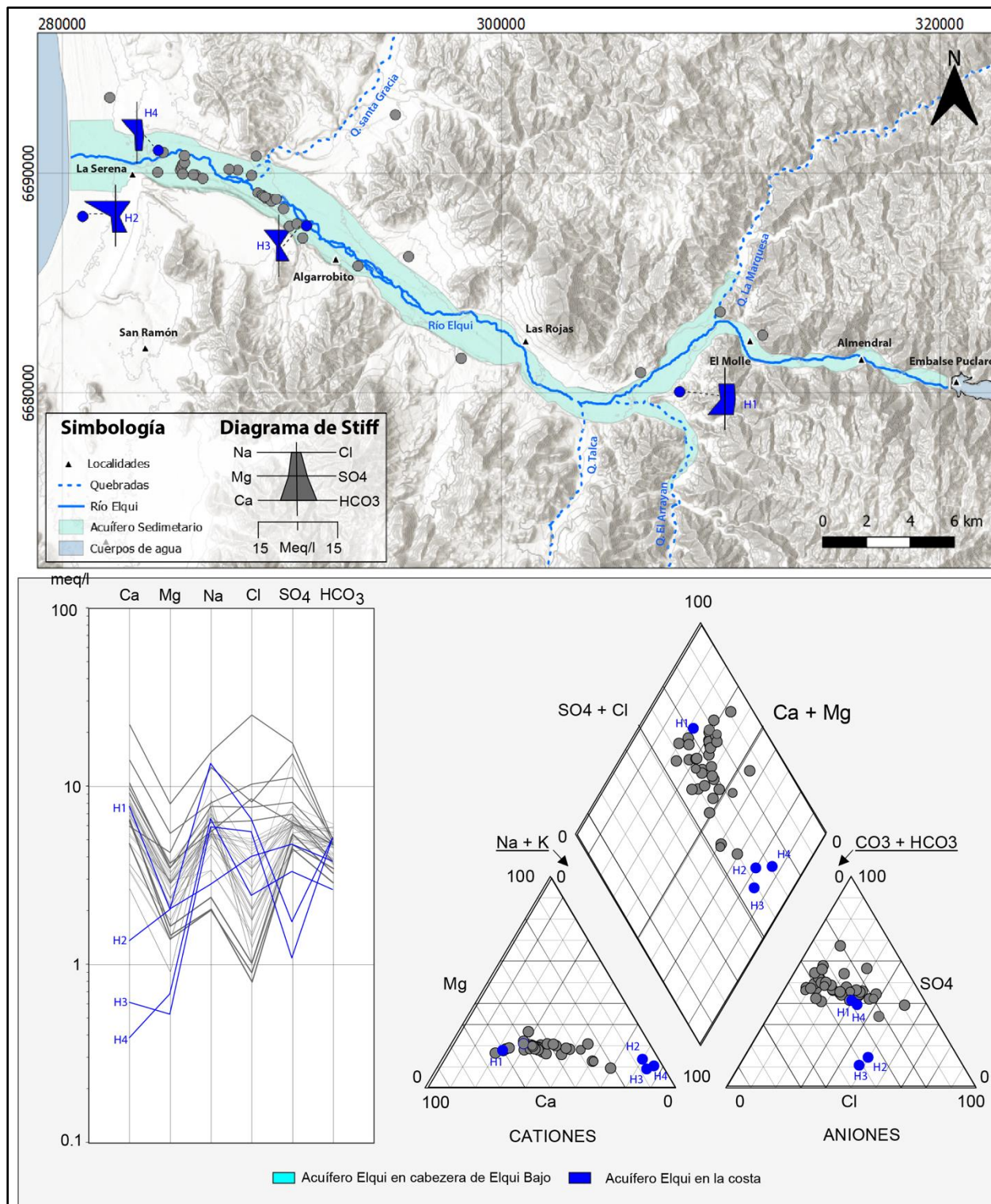


Figura 5.55 Concentraciones hidroquímicas de las aguas subterráneas del acuífero de Elqui.
Fuente: Elaboración propia.

5.9 EXTRACCIONES

En la cuenca del río Elqui bajo se declara un total de 11 m³/s de derechos de agua superficial que extraen los distintos canales. Este monto supera por más del doble al caudal promedio que lleva el río en los últimos años. Por esto, actualmente se estima que los canales operan a aproximadamente a un 20 % de los derechos que poseen. Solo el canal Essco de Aguas del Valle y el canal Casuto presentan un 100 % de revestimiento.

Derechos de agua canales. Fuente: HDG, 2020.

CANAL	Q derecho [l/s]
Bellavista	3883
La Calera	734
Titón	175
Hinojal	294
Saturno	323
Essco (Aguas del Valle)	1099
Algarrobito-Quilacán-Aracena	177
Culcatán	168
Herradura	931
Pampa alfalfares	377
Pampa Algarrobito	97
Pampa Pampa	108
Casuto	26
Marquesa Molle	67
Marquesa Albarnez	48
Marqueza Marqueza	254
San Pedro Nolasco	816
Cutún y Rojas	373
El Romero	1127
Altovalsol	385
Coquimbito	399

Se presenta un aumento continuo a partir del año 1997 de los derechos de agua subterránea aprobados en el acuífero en estudio (Figura 5.56), pasando a ser del orden de 500 l/s antes de año 1995, a aproximadamente 4500 l/s el año 2020. Se estima a partir del registro de derechos de la DGA que del orden de 1500 l/s corresponden a derechos para riego, 2000 l/s a uso de agua potable, sanitario, doméstico, y el resto minería y declarados de otro uso.

Los caudales reales de extracción y factor de uso de los derechos se desconocen, al igual que la cantidad de derechos que no se encuentran regularizados. Se estima que la extracción real es menor que los derechos concedidos, siendo los derechos de riego utilizados temporalmente y mayor medida durante años secos para suplir la falta de agua superficial, mientras que las extracciones de agua potable operan en ciclos horarios llenando estanques según la demanda. Se supone para el presente estudio un factor de uso del 25%.

En caso de existir extracciones prolongadas en torno al río, se presentaría una alta interferencia con este, pudiendo llegar al 90 % o más.

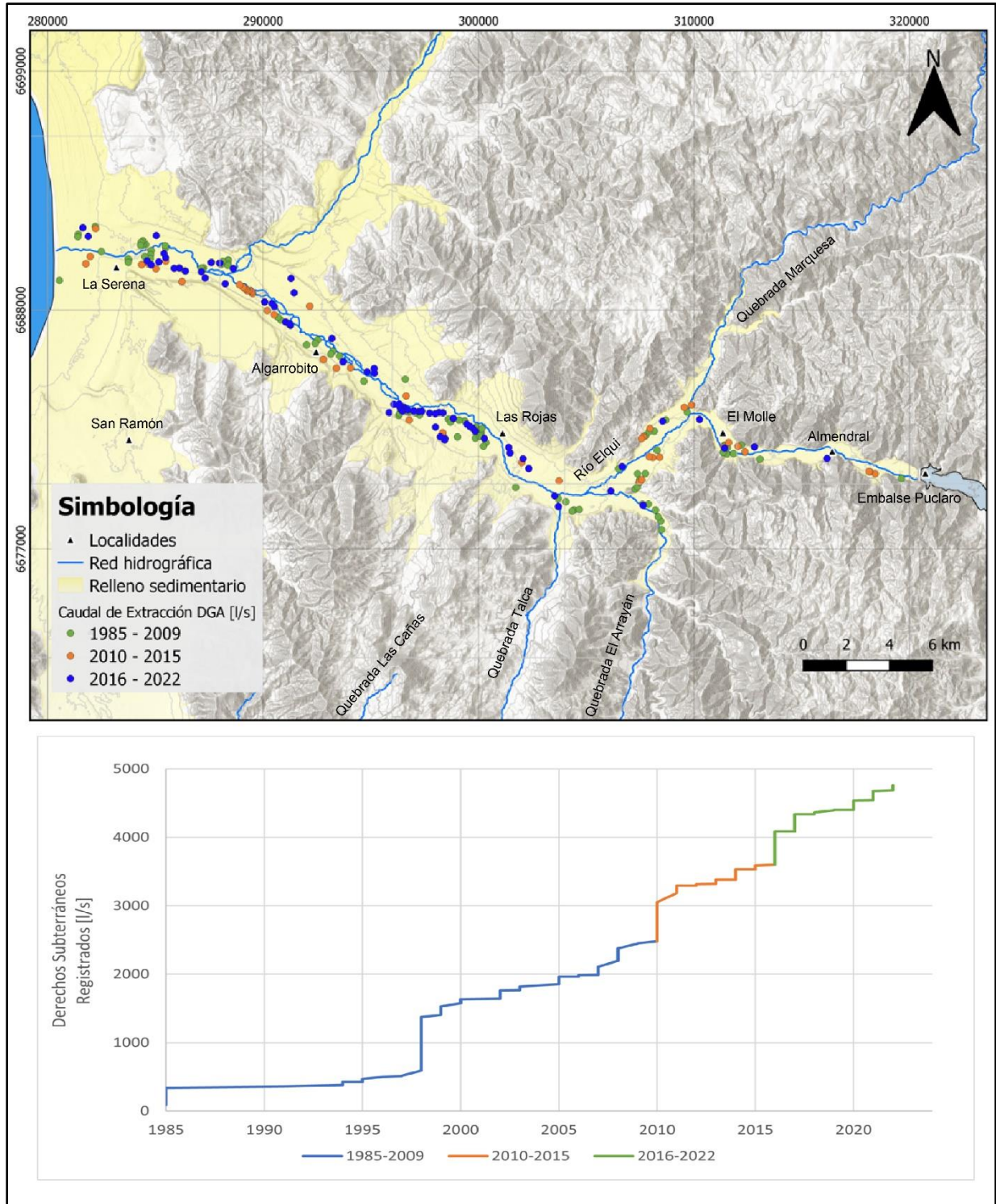


Figura 5.56. Derechos de agua subterránea registrados en la DGA. Fuente: Elaboración Propia a partir de datos DGA.

5.10 RECARGA Y BALANCE HÍDRICO

Para la estimación del balance hídrico se cuantificaron las diversas componentes de entradas y salidas del río y del acuífero (Tabla 5.7 Y Figura 5.57), cuyas variables se definen a continuación y son consideradas en el modelo numérico.

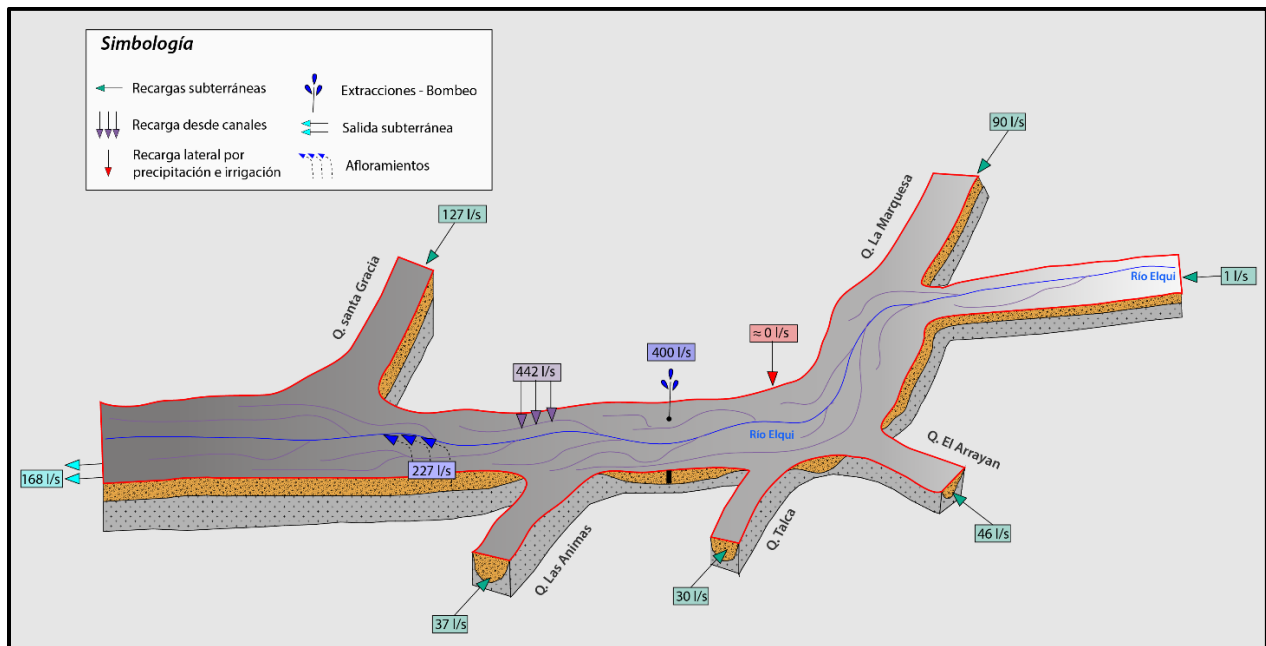


Figura 5.57 Balance hidrogeológico del acuífero. Fuente: Elaboración Propia.

Entradas al dominio subterráneo se considera:

- La recarga por precipitación y excedentes de riego.
- Los caudales subterráneos entrantes desde subcuencas y lateralmente desde rellenos coluviales
- La infiltración desde canales
- Entradas desde el río

Salidas del dominio subterráneo:

- Los caudales subterráneos salientes del acuífero hacia el río y al mar
- Extracciones

La demanda evapotranspirativa corresponde a una salida del dominio subsuperficial, que limita la recarga por infiltraciones de riego y precipitación. Parte del agua que ingresa por infiltración al dominio subsuperficial permanecerá retenida en la zona no saturada del suelo.

5.10.1 RECARGA LATERAL, POR PRECIPITACIÓN E IRRIGACIÓN (RL, RP, RI)

Para estimar la recarga por precipitación y riego se ha realizado un balance en el suelo mensual por medio del código Easy-Bal (desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea - Departamento de Ingeniería del Terreno, UPC), el cual se basa en el método de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración potencial a partir de la serie media mensual de temperatura.

En zonas con riego se ha sumado a la precipitación el excedente de la. Considerando eficiencias de riego del 85 y 60 % para cultivos de ciclo corto y persistente respectivamente (HDG, 2022) se estima la tendencia temporal de la irrigación promedio a partir de la función temporal de la evapotranspiración real característica, que puede considerarse en torno a 1 mm/día promedio cuando no hay precipitación durante los meses de septiembre a marzo de acuerdo a estimaciones globales de evaporación desde el suelo, superficie y transpiración (cada 8 días, 500 m de resolución) (Zhang, 2018, 2019).

Para la aplicación del método de Thornthwaite para el cálculo del balance se ha considerado la temperatura media mensual y precipitación en estación La Florida (CR2, 2022), estimándose la recarga resultante por precipitación y riego despreciable. El registro de precipitaciones se encuentra completo para el periodo analizado.

5.10.2 RECARGA SUBTERRÁNEA LATERAL Y SALIDA SUBTERRÁNEA (Q1, Q2)

Las entradas y salidas subterráneas del sistema acuífero del Río Elqui se presentan en la Figura 5.58.

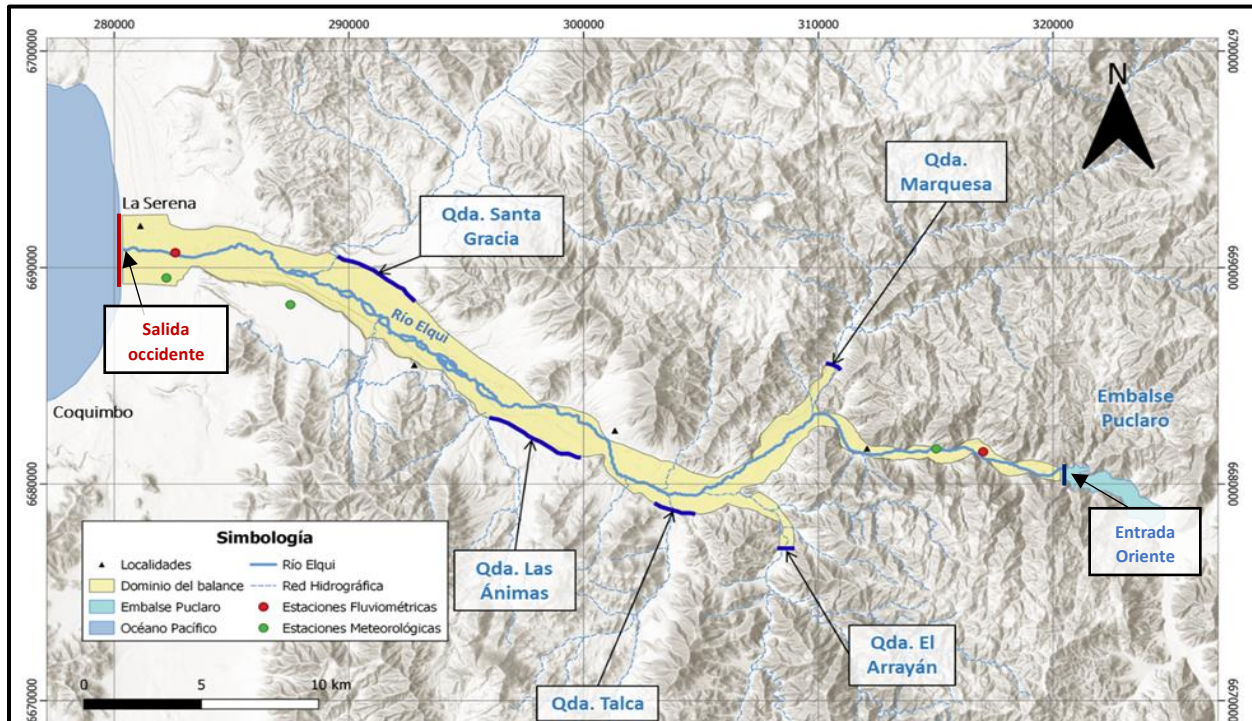
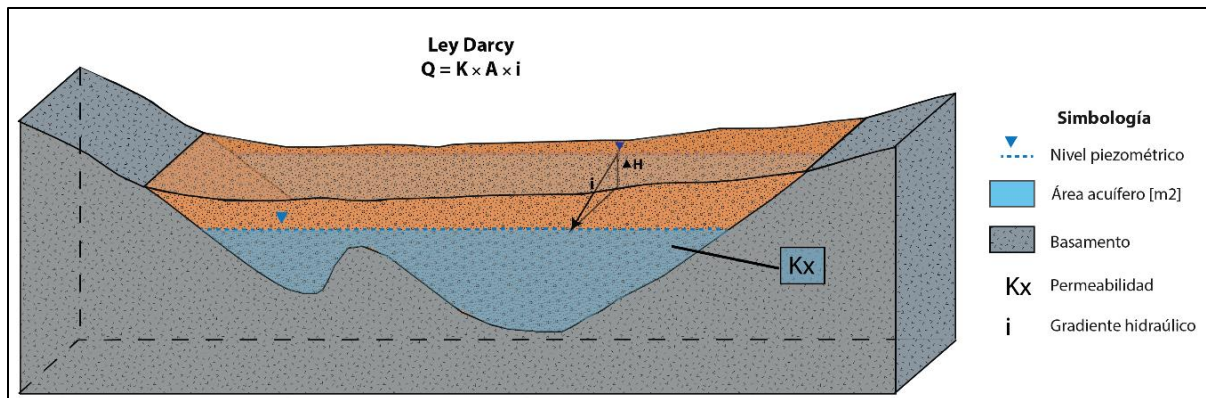


Figura 5.58 Esquema de la Ley de Darcy. Fuente: Elaboración Propia.

Si bien estas entradas podrían ser consideradas como parte de la recarga lateral, se han cuantificado individualmente como caudales subterráneos de entrada y salida del acuífero. Estos caudales de entrada y salida se han estimado mediante la ecuación de la ley de Darcy (Figura 5.58) en torno a 329 l/s y 168 l/s respectivamente, considerando como área a la geometría desarrollada en el modelo conceptual, la profundidad de niveles en pozos, para determinar el espesor saturado y el gradiente hidráulico, y una conductividad hidráulica acorde a los parámetros hidráulicos representativos conceptualizados.



Parámetro	Entrada oriente	La Marquesa	De Santa Gracia	Talca	El Arrayán	Las Ánimas	Salida occidente
W [m]	580	470	2500	400	350	3000	3090
H [m]	100	75	140	38	22	40	150
A [m²]	29000	17625	175000	7600	3850	120000	463500
K [m/d]	0.65	25	3	17	85	0.8	10
i [m/m]	0.010	0.018	0.021	0.020	0.012	0.033	0.003
Q [l/s]	2.2	90.1	126.6	29.9	45.5	37.0	167.6

Figura 5.59 Caudales subterráneos estimados con Ley de Darcy. W: ancho de la sección, H: espesor saturado, A: área sección; K: conductividad hidráulica; i: gradiente hidráulico, Q: caudal. Fuente: Elaboración Propia.

5.10.3 RECARGA DESDE CANALES (Rc)

Los canales de riego se operan llevando agua permanentemente. A partir de la serie de caudales anuales del río en Almendral (CR2, 2022) y los volúmenes medios de extracción del canal Bellavista para los años 2012 -2022 entregados por la Junta de Vigilancia, se puede asumir proporcionalmente para el resto de los canales la magnitud de su caudal en función del derecho de agua que poseen. Luego, en los tramos de canales que se desarrollan sobre el acuífero, y considerando pérdidas del 30% en canales sin revestir, de acuerdo a lo señalado por la Junta de Vigilancia, se puede estimar el orden de magnitud de la infiltración anual desde canales y una función temporal de recarga (Tabla 5.6, Figura 5.60), con un promedio de 442 l/s.

Tabla 5.6 Infiltración estimada desde canales. Fuente: Elaboración Propia.

Infiltración estimada desde canales [l/s]	
2000	413
2001	290
2002	669
2003	964
2004	479
2005	390
2006	548
2007	379
2008	537
2009	453
2010	300
2011	425
2012	390
2013	322
2014	264
2015	270
2016	382
2017	631
2018	583
2019	379
2020	305
2021	350

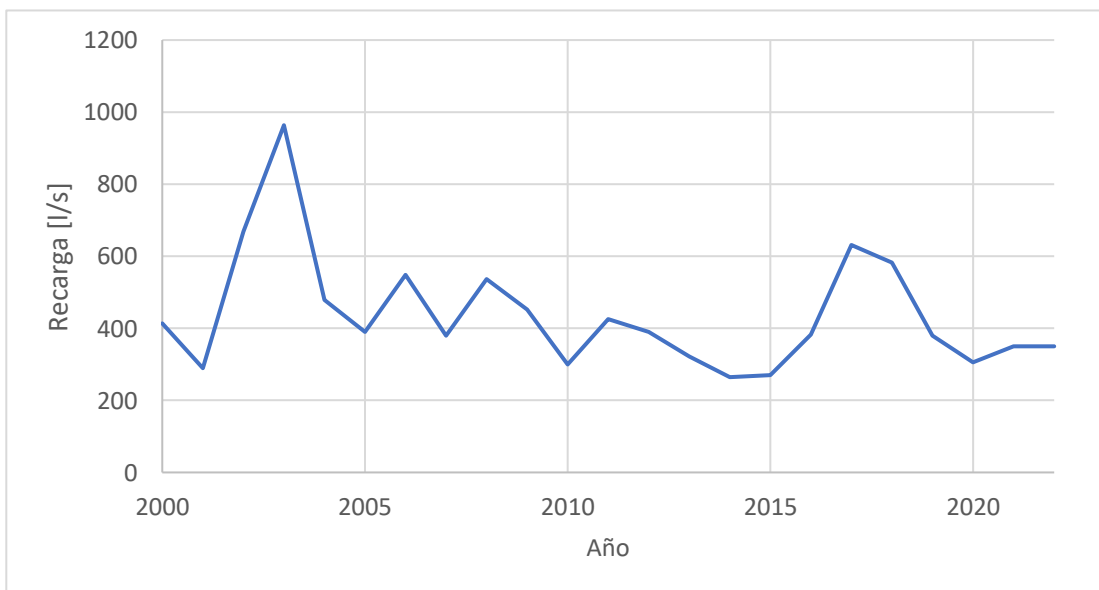


Figura 5.60. Función temporal de la recarga estimada desde canales. Fuente: Elaboración Propia.

5.10.4 ENTRADAS DESDE EL RÍO (F)

De acuerdo a la profundidad de niveles en el acuífero existirá un intercambio de agua con el río. En caso que los niveles freáticos se presenten sobre el nivel del río en una sección del acuífero, el río se comportará como ganador, mientras que, si los niveles freáticos se ubican bajo la cota del río, el río infiltrará recargando el acuífero.

El intercambio neto, según el cierre del balance en condiciones permanentes, se puede estimar en 200 l/s, intercambio que se evalúa posteriormente en el modelo numérico de flujo.

Este intercambio entre el río y el acuífero es factible teniendo en cuenta la disponibilidad de agua en el río Elqui en Almendral, con caudales medios entre 4-9 m³/s.

5.10.5 EXTRACCIONES SUBTERRÁNEAS (B)

Para estimar las extracciones desde captaciones subterráneas se ha supuesto un factor de uso del 25% de los derechos de agua registrados en la DGA hasta el año 2020.

Así se considera un caudal de 400 l/s para la estimación del balance en condiciones permanentes. Para efectos del análisis transiente, en el modelo se considera la incorporación de bombeos de acuerdo a la fecha de la resolución de cada derecho.

5.10.6 BALANCE HÍDRICO

Considerando como volumen de control al relleno sedimentario que se desarrolla entre el embalse Puclaro y la desembocadura, correspondiente al acuífero principal en estudio (97 km² aproximadamente), suponiendo un régimen permanente (una variación nula del almacenamiento), se estableció un balance subterráneo, con un intercambio de flujo a través del río (, Tabla 5.7):

Entradas – Salidas = Variación en el almacenamiento

$$(Q1+R+I_r) - (Q2+B+Er) = (Q1+R) - (Q2+ B) - F = DS$$

Considerando un estado permanente, DS = 0

$$(Q1+R) - (Q2 + B) = F$$

Q1: Caudales subterráneos de entrada al dominio subterráneo (Qda. La Marquesa, El Arrayán, Qda. de Talca, 4, 5, y Santa Gracia)

Q2: Caudales subterráneos de salida desde el dominio subterráneo (en la costa en La Serena)

RI: Recarga lateral

Rp: Recarga por precipitación

Ri: Recarga por irrigación

Rc: Recarga desde canales

R: Recarga, $R = Rp+Ri+Rc+RI = Rs+RI$

B: Salida por bombeos

F: Intercambio de flujo superficial-subterráneo, $F = \text{Exfiltración río} - \text{Infiltración río} = Er - Ir$

DS: Variación en el almacenamiento

Los caudales

Tabla 5.7. Balance acuífero. Fuente: elaboración propia.

Entradas [l/s]	
Q1	329
RI	0
Rp + Ri	0
Rc	442
Total	771
Salidas [l/s]	
B	400
Q2	168
F	203
Total	771

Esta aproximación entrega un orden de magnitud de las variables involucradas. Se debe considerar que en la realidad el sistema se presenta en un estado transitorio durante el año, variando así los flujos durante este y los almacenamientos en el tiempo, lo cual se evaluará mediante el modelo numérico presentado más adelante.

6 PAN DE AZÚCAR - MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

6.1 ANTECEDENTES

El modelo conceptual desarrollado consideró la revisión de 17 informes y estudios previos, los registros disponibles en expedientes de pozos con derechos de agua, estaciones meteorológicas (DGA, CR2, 2022), la red de control de niveles en pozos de la DGA, y topografía e imágenes satelitales, antecedentes presentados y analizadas en los siguientes capítulos.

Tabla 6.1 Informes y estudios previos revisados. Fuente: Elaboración propia.

N°	Nombre	Año	Autor
1	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA EL ANÁLISIS ALTERNATIVAS UBICACIÓN BATERÍAS POZOS EN 2 ACUÍFEROS DE LA CUENCA RÍO ELQUI BAJO CON MODELACIÓN EXISTENTE PARA EXPLOTACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SEQUÍA	2022	HIDROGESTIÓN
2	PILOTO DE RECARGA ARTIFICIAL EN ACUÍFEROS DE ELQUI BIP 40014348-0	2021	UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE
3	ESTUDIO GEOFÍSICO	2021	UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE
4	SEGUIMIENTO DEL PERFIL SALINO DEL ACUÍFERO EL CULEBRÓN EN TIEMPO REAL	2019	INIA
5	LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA EN EL VALLE DE PAN DE AZÚCAR, REGIÓN DE COQUIMBO	2019	GEODATOS SAIC
6	INFORMACIÓN REGIONAL 2018	2018	ODEPA
7	DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN DE COQUIMBO	2017	DGA
8	ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO EN LA ZONA BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO ELQUI Y EN LA ZONA DE PAN DE AZÚCAR	2015	GCF INGENIEROS
9	DIAGNÓSTICO PLAN MAESTRO PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, REGIÓN DE COQUIMBO	2013	CONIC-BF
10	APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE USO DEL AGUA ESTUDIO DE CASO EN LA REGIÓN DE COQUIMBO	2006	CAZALAC
11	APLICACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO VALLE PAN DE AZÚCAR	2004	DGA
12	DECLARACIÓN ÁREA DE RESTRICCIÓN DEL SECTOR HIDROGEOLÓGICO CULEBRÓN-LAGUNILLAS	2003	DGA
13	MAPA GEOLÓGICO - LA SERENA - LA HIGUERA	2000	SERNAGEOMIN
14	ESTUDIO Y MODELO HIDROGEOLÓGICO VALLE PAN DE AZÚCAR	1998	AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.
15	ANEXOS - ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE MEDICIÓN DE NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA	1987	ALAMOS Y PERALTA
16	ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA PAN DE AZÚCAR	1979	UNIVERSIDAD TECNCA DEL ESTADO
17	INVESTIGACIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS EN LA IV REGIÓN	1978	DGA

6.2 GEOMORFOLOGÍA

La cuenca de Pan de azúcar se orienta en dirección sureste – noroeste con elevaciones máximas del orden de 300 msnm en el margen sureste de la cuenca, y bajos topográficos en los llanos de sedimentación fluvial del orden de 150 metros de altitud, donde se emplaza el acuífero Pan de Azúcar.

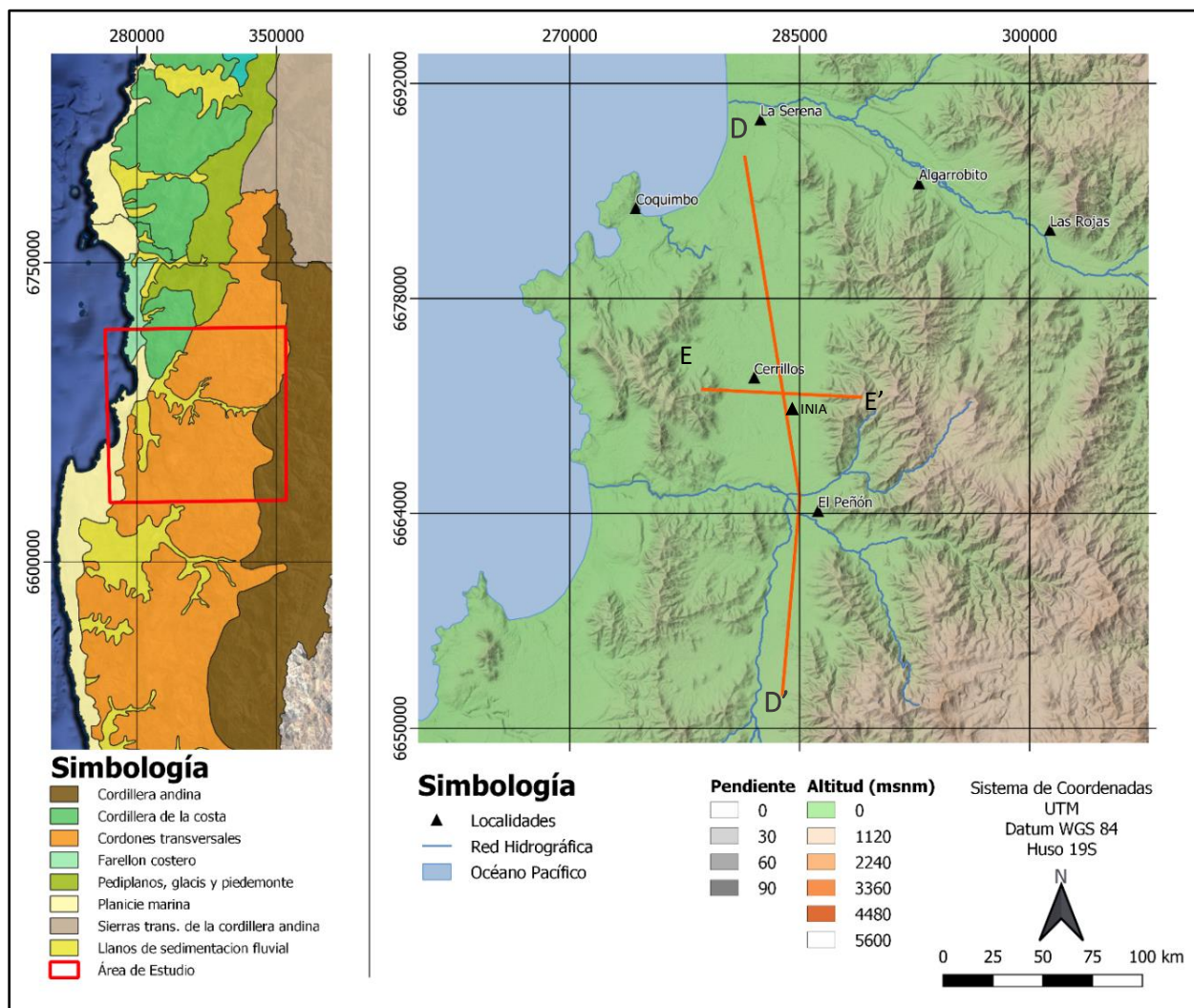


Figura 6.1. Mapa Geomorfológico sector Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.

El área de estudio tiene una longitud sureste – noroeste de 35 km (Figura 6.1, Perfil DD'), donde se logran identificar dos dominios relacionados a la pendiente topográfica (Figura 6.2, Perfil DD'). Por una parte, el sector sur, desde la cuesta las Cardas hasta la quebrada Lagunillas exhibe una pendiente mayor, con una media de 1.3%, mientras que el sector norte, desde la quebrada

Lagunillas hasta la terraza marina, presenta una pendiente menor al 0.1%. Esta última zona, en efecto, presenta importante actividad agrícola, donde destaca la instalación del centro de investigaciones agrícolas INIA.

En particular, en el Perfil E-E' se puede observar que la extensión lateral de la cuenca en el sector norte es constante del orden de 6 km (Figura 6.2), en comparación con el sector sur, donde la mayor presencia de quebradas altera el relieve y se ve reducido el ancho de la cuenca.

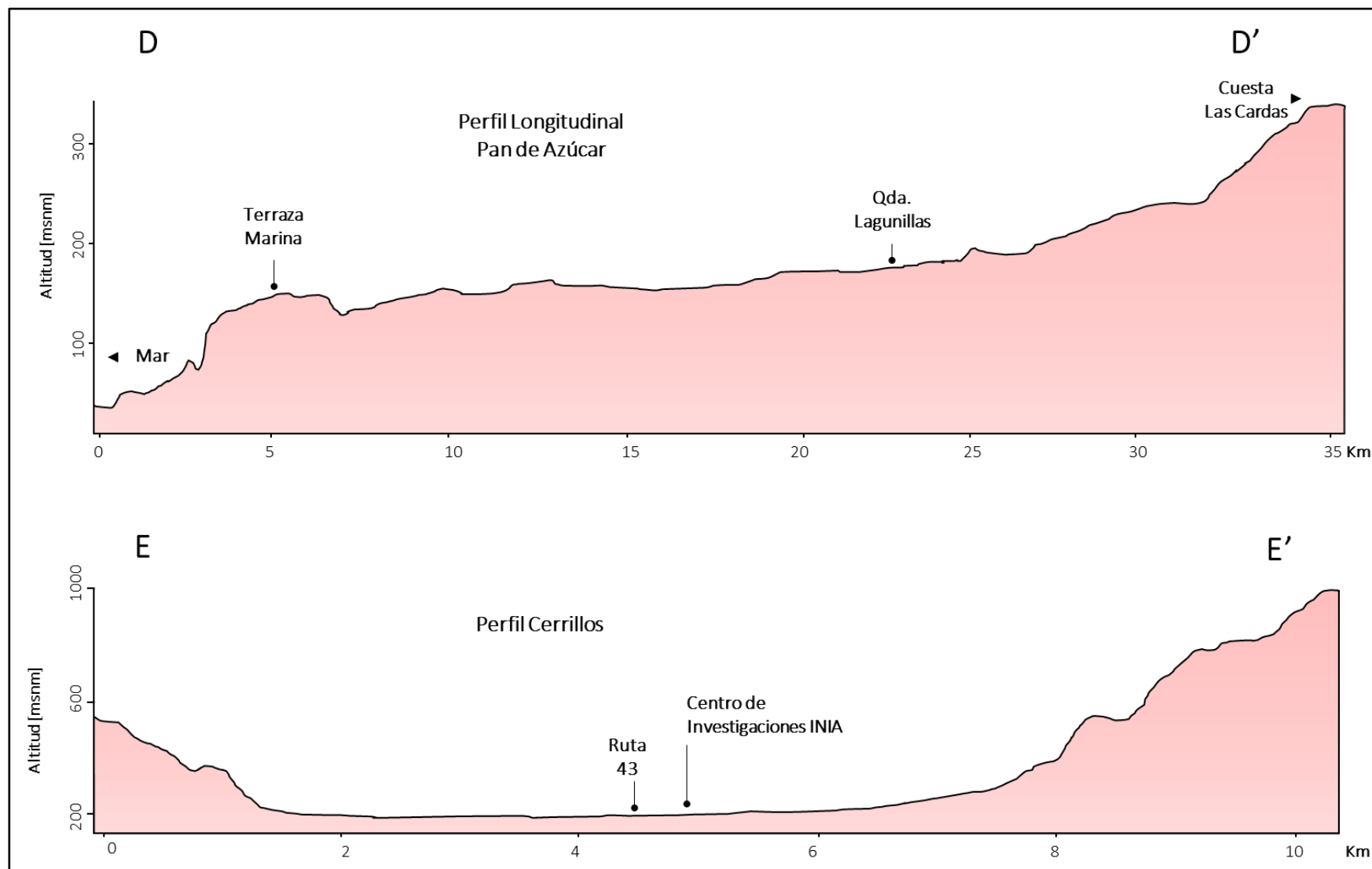


Figura 6.2. Perfiles topográficos Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.

6.3 GEOLOGÍA

La geología del sector Pan de Azúcar, está conformada por formaciones rocosas sedimentarias continentales y marinas de edades neógenas y cretácicas y por formaciones rocosas volcánicas y volcánico – clásticas, intruídas principalmente por monzodioritas cuarcíferas, monzodioritas y dioritas (Figura).

Las formaciones rocosas que constituyen Pan de azúcar componen el relieve actual de los cordones transversales montañosos, y son sobreyacidas por areniscas finas de la Fm. Coquimbo y por los depósitos poco consolidados de la Formación Confluencia.

Las unidades no consolidadas del tipo fluvial, aluvial, y eólico, de edades cenozoicas (Qa, Qe y Qf), se disponen en las laderas que encajonan el sector de pan de azúcar y en las quebradas que son rellenadas por los cursos de agua superficial esporádicos en periodos de precipitación.

Estructuralmente, la Zona de Falla Romeral (ZFR) atraviesa en sentido norte – sur a la zona de Pan de Azúcar y la actividad de la ZFR estaría directamente relacionada al alzamiento y erosión de las formas aterrazadas en las formaciones Coquimbo y Confluencia, generando estructuras escalonadas en el basamento (Emparan y Pineda, 2000).

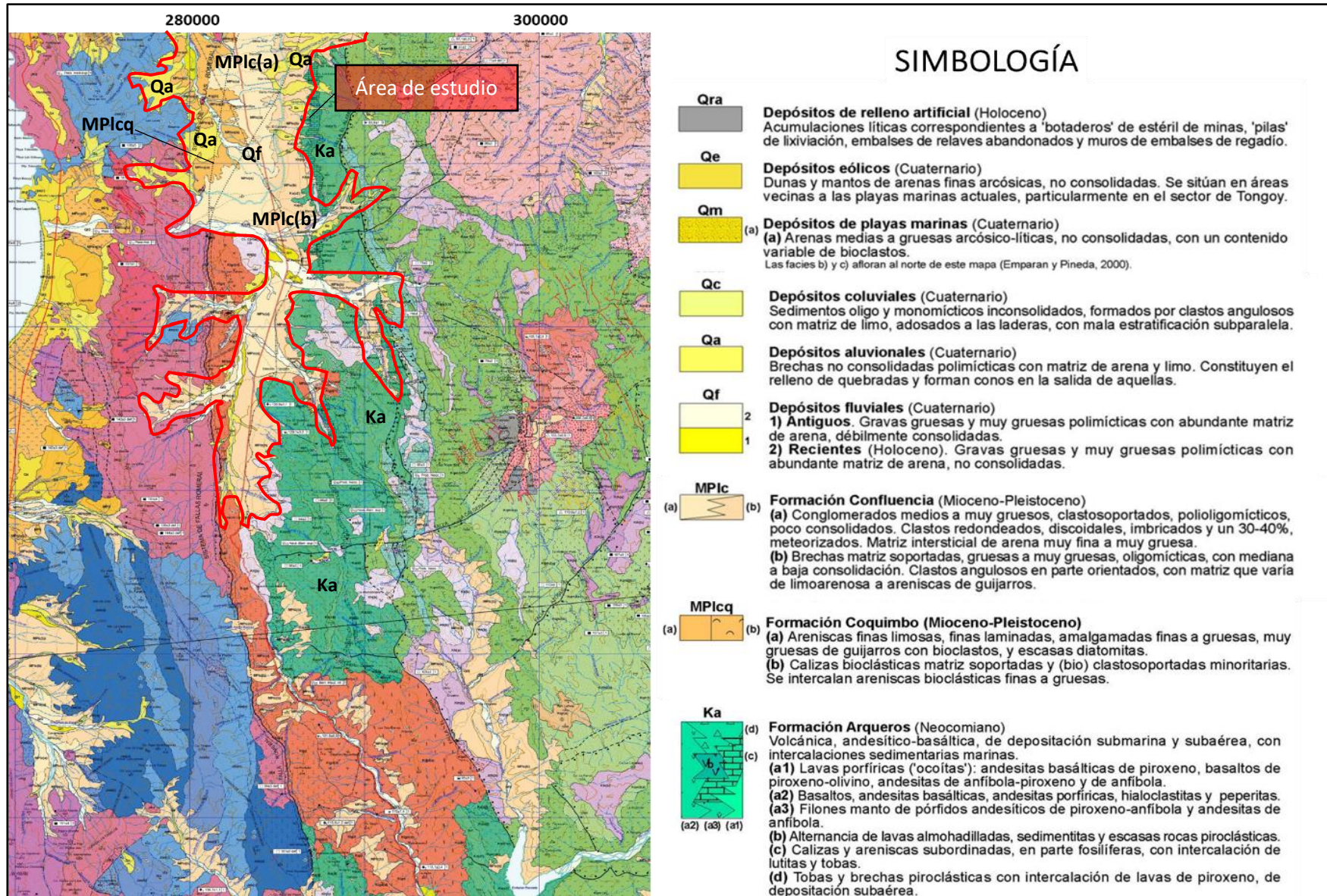


Figura 6.3. Geología de Pan de azúcar. Fuente: Modificado de Emparan y Pineda (2006) [2].

6.4 HIDROLOGÍA

La cuenca del estero Culebrón, donde se ubica principalmente el acuífero Pan de Azúcar, tiene una extensión aproximada de 205 km², de la cual aproximadamente un 42% corresponde a relleno sedimentario, y donde se desarrolla la actividad agrícola característica de la cuenca. Por el sur, la cuenca del estero Lagunillas presenta un área tres veces mayor, con un área aproximada de 592 km², con un 12 % asociado a relleno sedimentario de mediana y baja pendiente.

La precipitación media anual se estima en el orden de 90 mm (CR², 2022). El total anual se concentra en los meses de otoño e invierno, en eventos de pocos días de duración. La evapotranspiración potencial anual supera los 900 mm, sin embargo, dado que el total de la precipitación se reparte en algunos eventos de precipitación, superan así a la evapotranspiración potencial diaria. El agua que ingresa a la cuenca corresponde a las precipitaciones y el trasvase desde el río Elqui a través del canal Bellavista, para el cual se indican caudales de entre 1000 y 2000 l/s. La salida de agua superficial ocurre por el estero Culebrón, en el cual se registra un caudal medio en torno a los 300 l/s hasta el año 2012, momento en el cual se registra nulo hasta la actualidad en la estación Culebrón en Sifón.

El régimen de la red de drenaje es de tipo pluvial, con escorrentía eventual en eventos mayores de precipitación en las quebradas. Actualmente no se registran salidas superficiales de la cuenca.

Los derechos de agua otorgados alcanzan los actualmente los 4500 l/s, siendo su mayoría para abastecer riego.

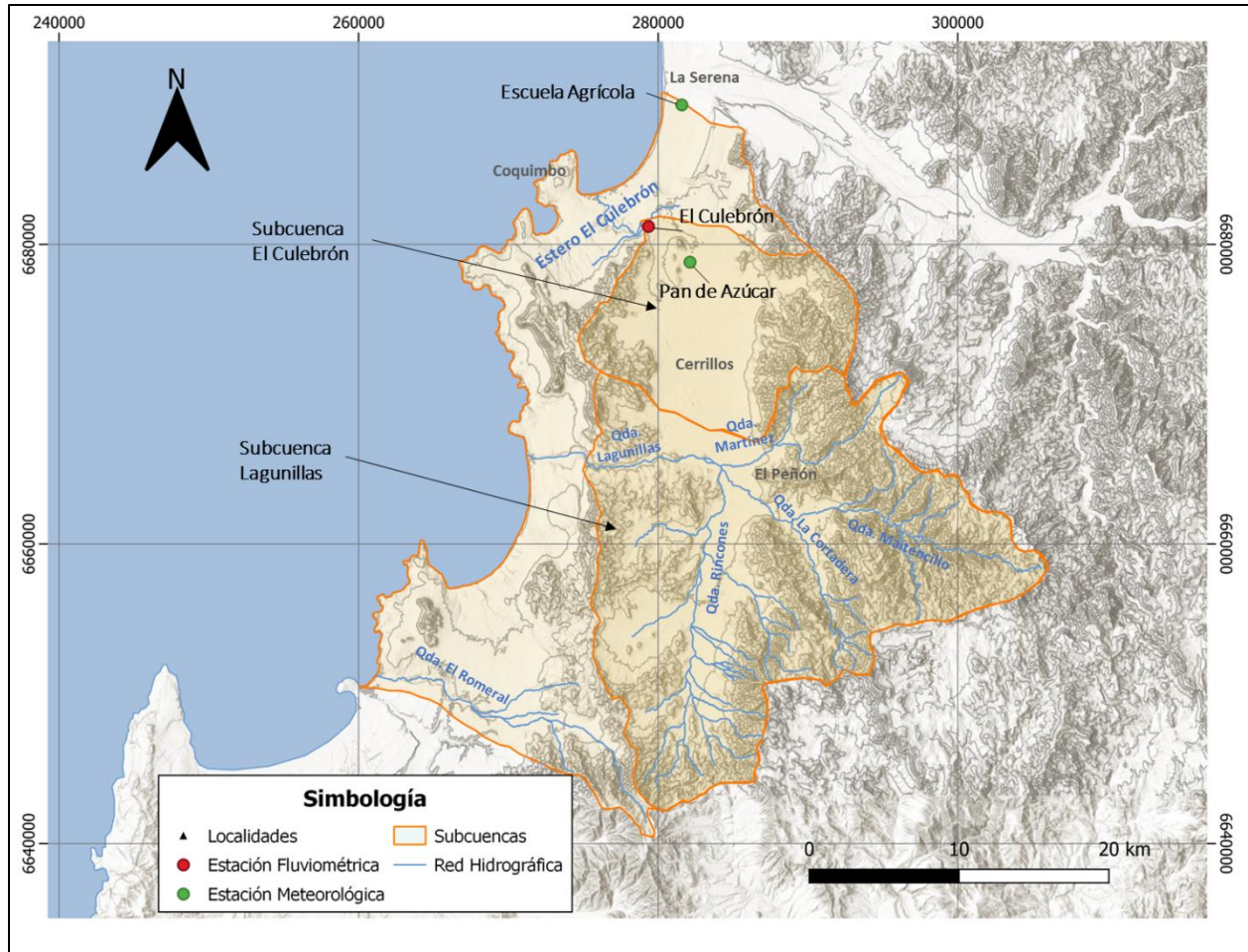


Figura 6.4. Hidrología cuenca Pan de Azúcar. Elaboración Propia.

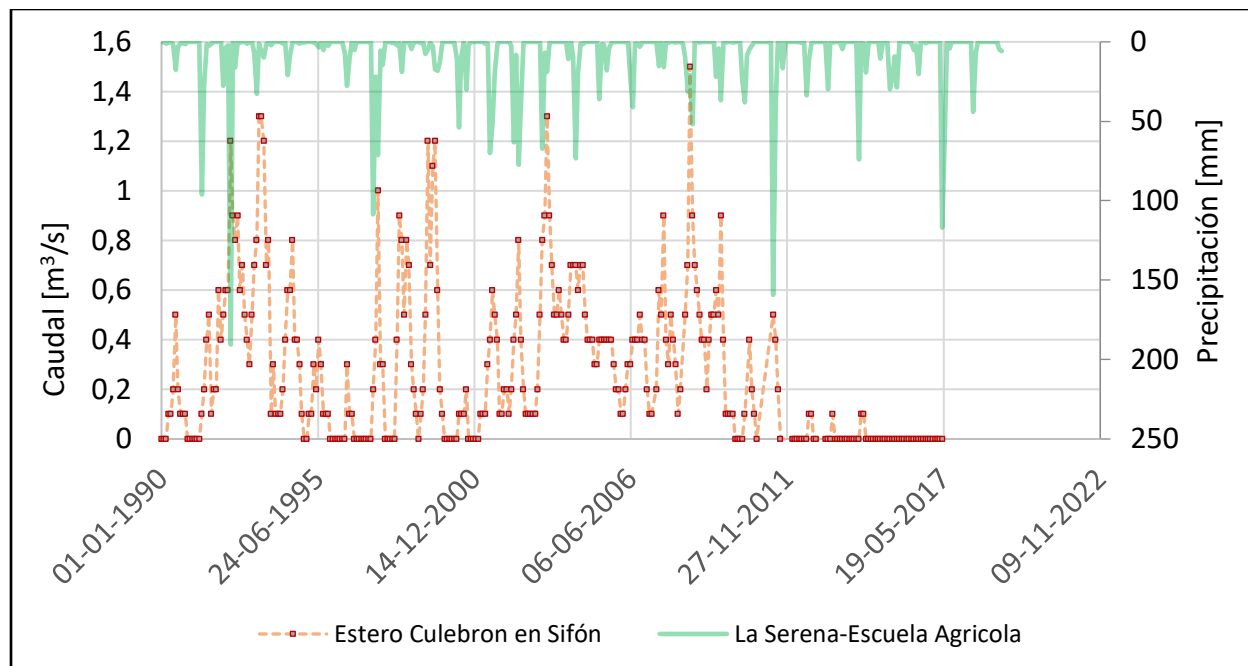


Figura 6.5. Caudal promedio mensual en estero Culebrón y precipitación mensual en estación La Serena (Escuela Agrícola). Elaboración Propia.

6.5 HIDROESTRATIGRAFÍA

El acuífero de Pan de Azúcar estaría emplazado en la unidad geológica Formación La Confluencia (Figura 6.6), siendo su base rocas intrusivas y rocas sedimentarias de la Fm. Arqueros. El acuífero se extiende desde la localidad de Las Cardas hasta el sur de la localidad de San Ramón y en la cual los niveles estáticos se han medido entre 30-70 m de profundidad. Sobre esta unidad geológica es en la cual se encuentran la mayoría de las captaciones, las cuales en general son de profundidades de entre 70 y 170 m.

De acuerdo a Emparan y Pineda (2006), la Fm. La Confluencia está compuesta por conglomerados medios a gruesos en una matriz intersticial de arena muy fina a gruesa, poco consolidados, con intercalaciones de arcillas y limos arenosos del orden de 5-15 m de espesor. Similares estratos arcillo a limo – arenosos se han descrito en pozos profundos de hasta 120 m de profundidad, corroborando la información bibliográfica.

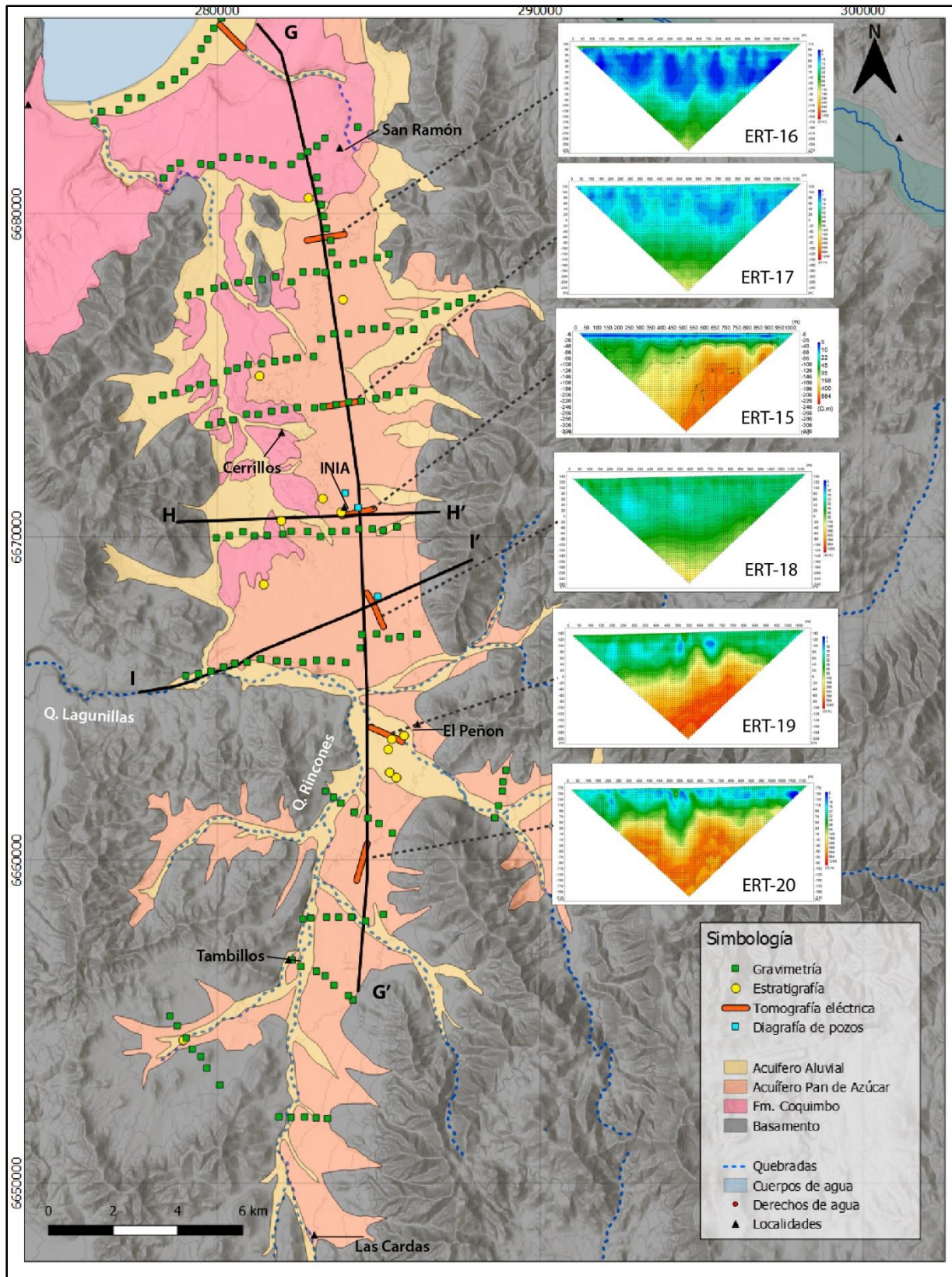


Figura 6.6. Unidades hidrogeológicas y antecedentes estratigráficos y geofísicos utilizados.
 Fuente: Elaboración Propia.

Esta unidad de acuerdo a la geocronología de la depositación, estaría dispuesta de forma interdigitada con estratos consolidados de muy baja permeabilidad de la Fm. Coquimbo, de origen marino compuesta principalmente por areniscas finas y calizas bioclásticas. Ambas formaciones sobreyacen a la Fm. Arqueros de origen volcánico sub-aéreo y sub-marino. El miembro que está en contacto con la Fm. Confluencia y Fm. Coquimbo, estaría conformado por areniscas y calizas fosilíferas. Por el oeste afloran intrusivos del Cretácico Inferior que intruyen a la Fm. Arqueros.

La Fm. Coquimbo se dispone sobre la Fm. Arqueros y aflora en superficie al oeste y al norte de la unidad acuífera de Pan de Azúcar, generando una barrera hidráulica que limitaría el sistema por el norte a la altura de la localidad de San Ramón. La Fm. Coquimbo está conformada principalmente por areniscas finas, las cuales se describen en el mapa geológico y en expedientes estratigráficos de pozo.

La baja permeabilidad de esta unidad estaría dada por la cementación de los sedimentos, y podría presentar una permeabilidad secundaria que permitiría el flujo hacia el norte. Lo anterior explicaría el bajo número de captaciones profundas presentes en las áreas donde aflora la Fm. Coquimbo.

Sobre el acuífero de Pan de Azúcar y los estratos de la Fm. Coquimbo, se desarrolla un acuífero superior, asociado a depósitos aluviales y coluviales no consolidados actuales, dispuesto preferencialmente en los bajos topográficos de los cursos esporádicos de agua superficial que ocurren en periodos de precipitación. Se observa en función del catastro de pozos, que el nivel estático en este sistema se ubicaría entre 2-10 m de profundidad.

Este acuífero superior se subdivide a su vez en dos sistemas, uno de ellos del sector noroeste se desarrolla al oeste de Cerrillos y se drena por el norte por la Quebrada el Culebrón, mientras que el segundo de mayor extensión se desarrolla al sur de El Peñón y drenaría sus aguas al oeste por la Quebrada Lagunillas.

Dicho sistema somero, recargaría al sistema acuífero inferior de Pan de Azúcar.

Para caracterizar el sistema acuífero, se ha utilizado la información geofísica de 246 gravimetrías, 76 TEM y 14 columnas estratigráficas de antecedentes, más 6 tomografías eléctricas y 2 diagragfias de pozo del tipo gamma natural realizados en el presente estudio (Figura 6.6).

De acuerdo con estos antecedentes, se ha identificado que el basamento presenta resistividades superiores a los 70 Ohm-m y que el acuífero de pan de azúcar presenta resistividades entre 5 y 60 Ohm-m. Resistividades consistentes con las interpretaciones geofísicas TEM de estudios anteriores.

Del análisis geológico, estratigráfico y geofísico, se ha determinado la geometría del sistema acuífero de Pan de Azúcar y se representa en los perfiles G-G', H-H' e I-I'.

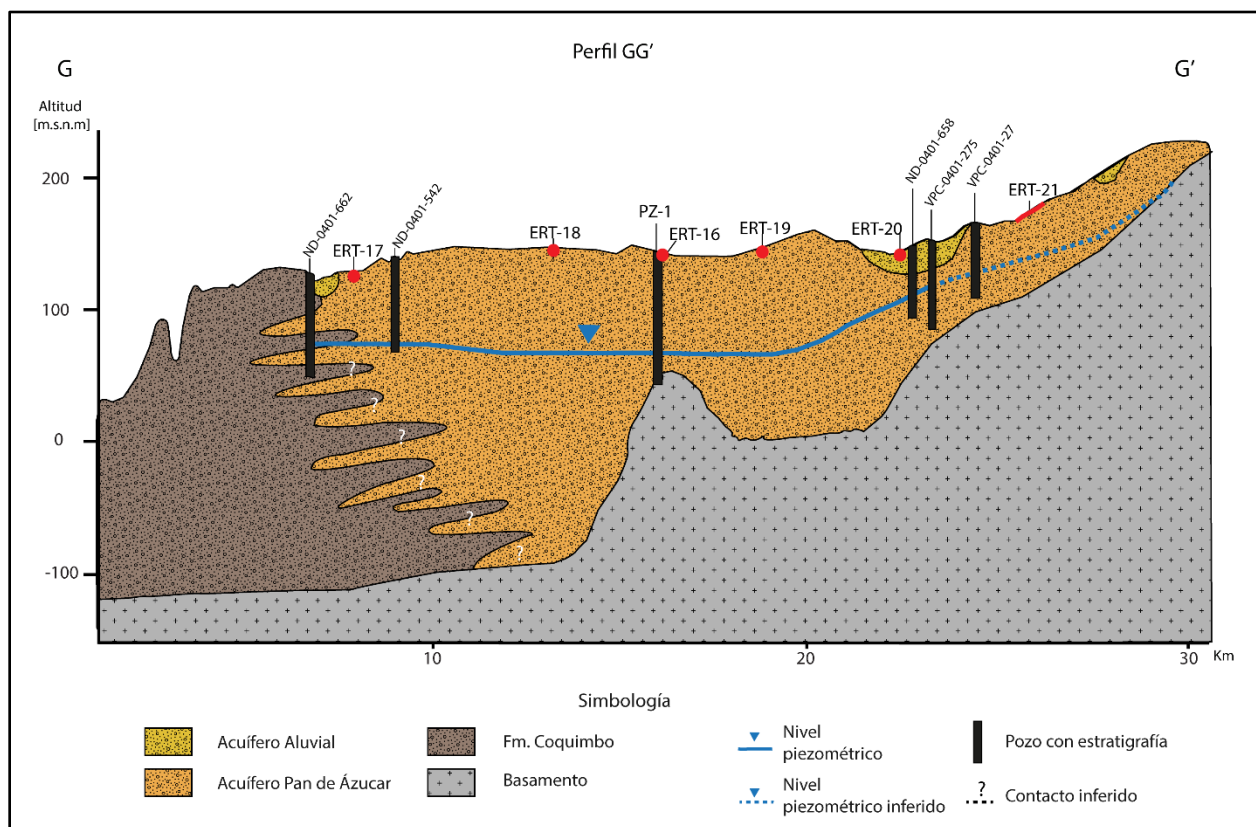


Figura 6.7. Perfil Norte Sur GG'. Elaboración Propia.

Entre las localidades de San Ramón y Cerrillos se ha identificado tanto en las tomografías ERT-16, ERT-17 como en TEM, un basamento emplazado entre 200 y 250 m de profundidad.

Además de las Tomografías ERT-16 y ERT-17 se identifica la presencia de dominios de menor resistividad hacia el norte, que podrían correlacionarse a una mayor presencia de estratos

arcillosos de menor conductividad hidráulica, y explicarían los menores rendimientos de los pozos profundos en esta misma dirección.

Cabe mencionar que los dominios de baja resistividad identificados por encima de la cota del nivel estático, podrían corresponder a sedimentos subsaturados por frentes de infiltración provenientes de la red de canales de regadío.

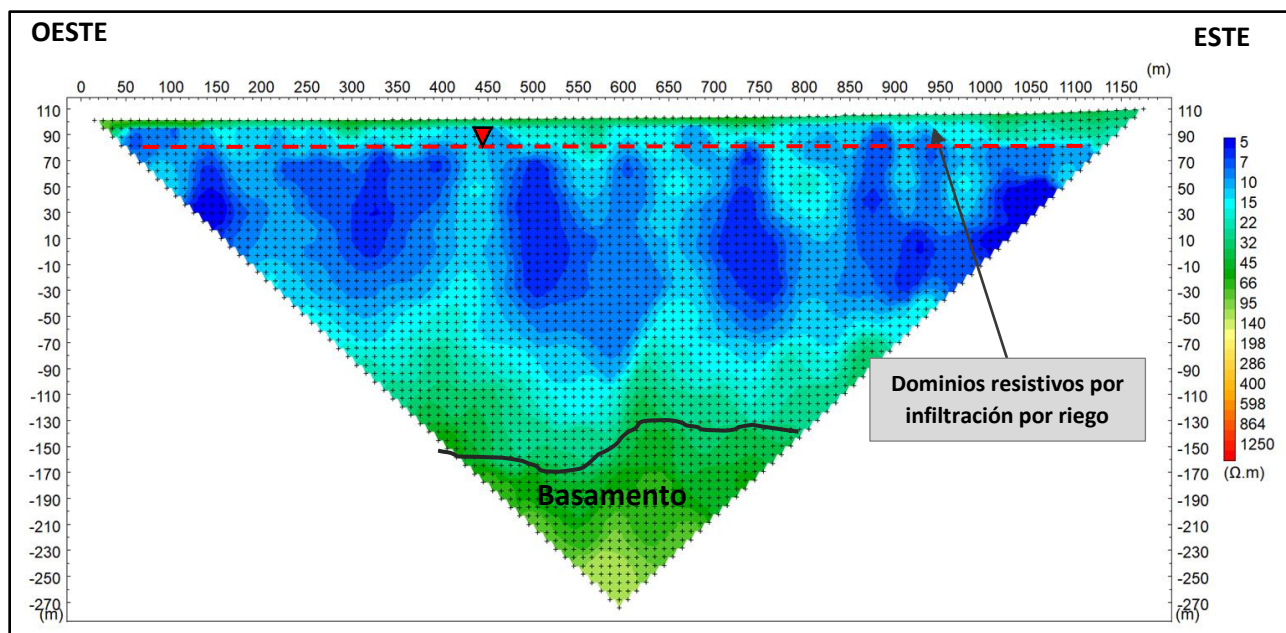


Figura 6.8 Tomografía eléctrica ERT-16. Fuente: Elaboración Propia.

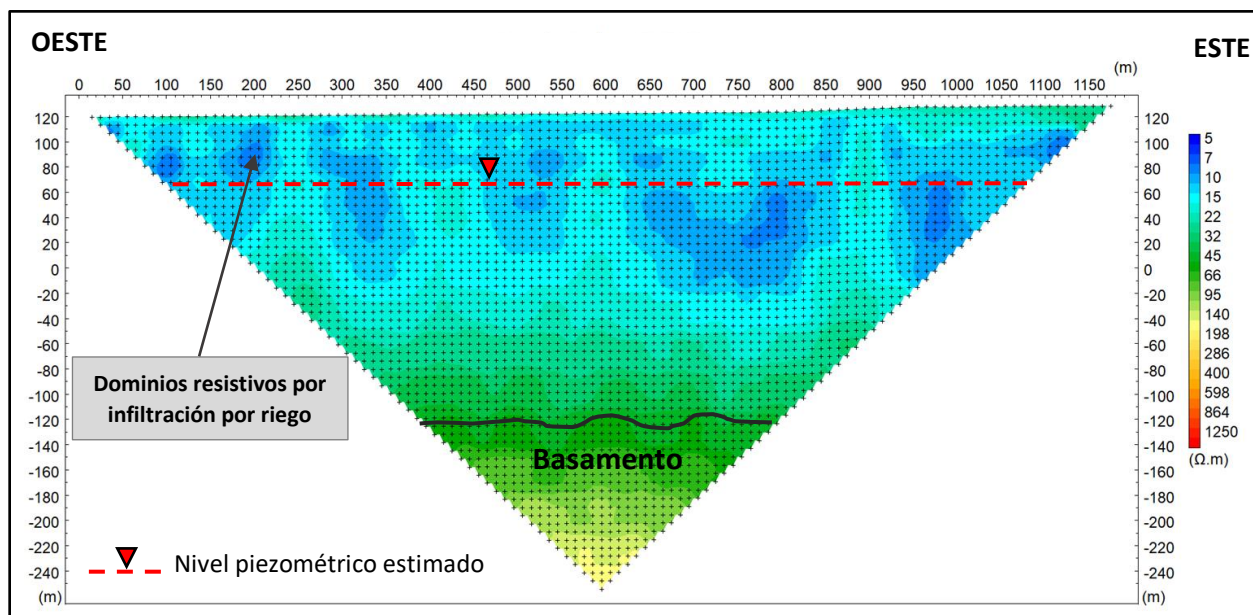


Figura 6.9 Tomografía eléctrica ERT-17. Fuente: Elaboración Propia.

Cabe destacar que no se ha identificado en las tomografías ni en las columnas estratigráficas un estrato arcilloso que pueda ser interpretada como una unidad continua en esta extensión, por lo cual el sistema acuífero de pan de azúcar se interpreta en profundidad como una unidad sedimentaria gravo arenosa heterogénea con intercalaciones arcillosas que aumentan hacia el norte.

Junto a lo anterior y según la geocronología de depositación de los estratos, el acuífero de Pan de Azúcar se interdigita con la Fm. Coquimbo, considerándose un contacto concordante entre ambas. El contacto no se ha podido identificar claramente en las columnas estratigráficas dado que ambas unidades geológicas son de similar composición pero de diferente grado de cementación, antecedente diferencial que no se presenta en las columnas estratigráficas.

A la altura del centro de investigación INIA, se ha identificado en la tomografía ERT-15 y en la estratigrafía del pozo PZ-01, la presencia de un basamento a menor profundidad. En el pozo PZ-01, el basamento se describe a 90 m de profundidad. Además, se describe una estratigrafía heterogénea, con predominancia de arcillas entre los 0 y 35 m, y arenas y gravas entre los 35 y 90 m, donde se identifica roca fracturada de composición granítica. Hacia el este, sobre la tomografía ERT-15, se identifica el basamento a 40 m de profundidad (Figura 6.11).

Las diagráfías de pozo fueron realizadas en los pozos INIA 1 e INIA 2 y se han analizado de manera independiente y relativa al mismo pozo, dado que, los diámetros de los pozos son diferentes entre sí.

La diagráfía de pozo INIA 1 (Figura 6.10) muestra entre los 10 y 20 m de profundidad un estrato con una exposición de rayos gamma de 80 CPS que es mayor que en el resto del perfil y que podría estar asociado a un nivel de mayor contenido de arcillas. Este nivel se correlaciona a lo observado en la tomografía ERT-15 en tonos azulados en los primeros 15 m (Figura 6.11), y niveles arcillosos descritos en la estratigrafía del pozo PZ-01.

Entre los 20 y 65 m del pozo INIA 1 la exposición medida disminuye a 65-70 CPS, pudiendo ser correlacionado a los niveles arenosos y/o gravosos descritos en el pozo PZ-01 a profundidades similares. A partir de los 65 m se observa un descenso en la exposición hasta los 50 CPS, lo cual

puede estar relacionado a la presencia del basamento somero observado en la tomografía ERT-15 (Figura 6.11).

En el pozo INIA 2 se identificaron niveles de exposición relativos altos entre los 45 y 65 m que pueden ser correlacionados a mayores contenidos de arcillas, sin embargo, dada la distancia con el pozo INIA 1 (17 m), y el hecho que se presentan estos niveles con un desfase en la vertical, no es directo correlacionar ambos estratos altos en arcilla, sino más bien, es posible que exista un acuñaamiento de las unidades.

Lo anterior refuerza el concepto de una estratigrafía heterogénea en la cuenca de Pan de Azúcar. Además, se identifica el basamento en la diagráfía INIA 2 alrededor de los 65 m, el cual se presenta fracturado y posiblemente con relleno arcilloso en las fracturas de la roca, al igual que lo descrito en la estratigrafía del Pozo PZ e identificado en la tomografía ERT-15.

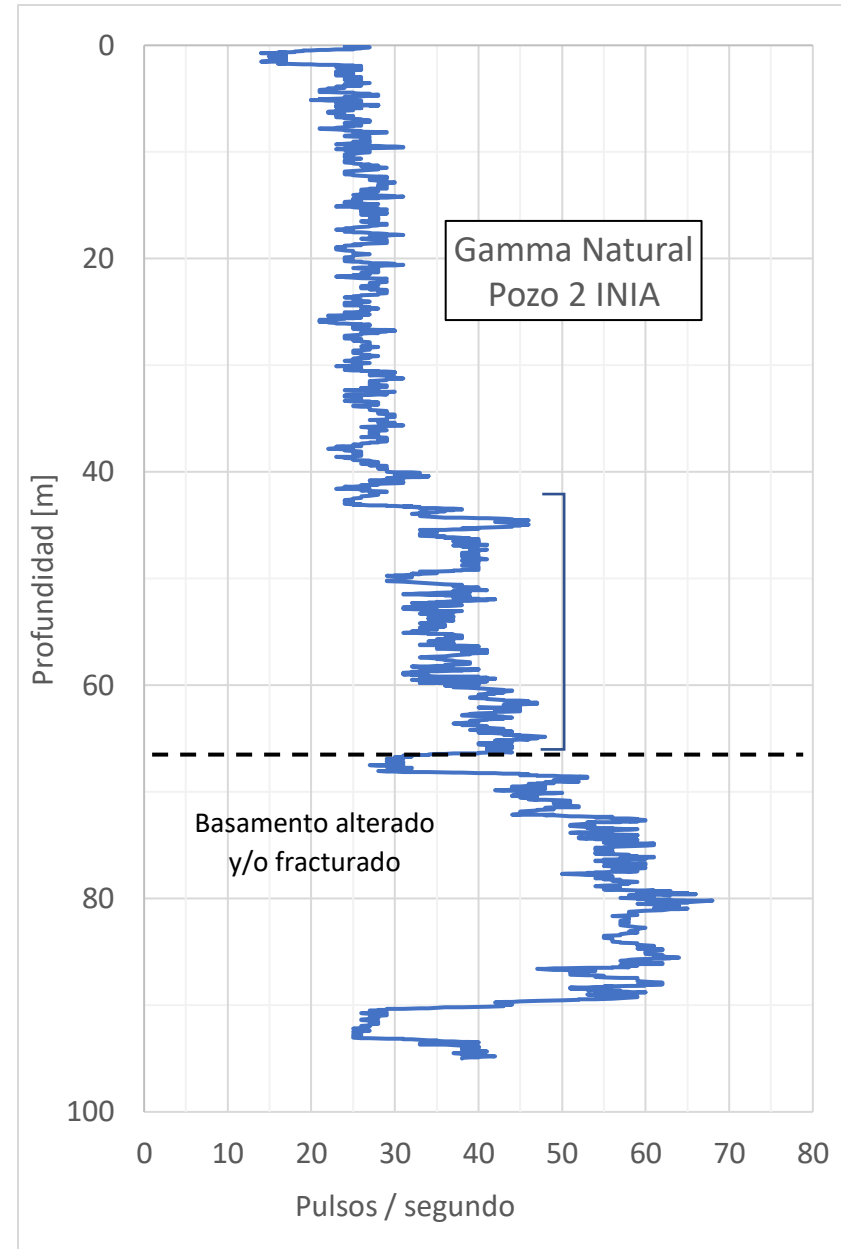
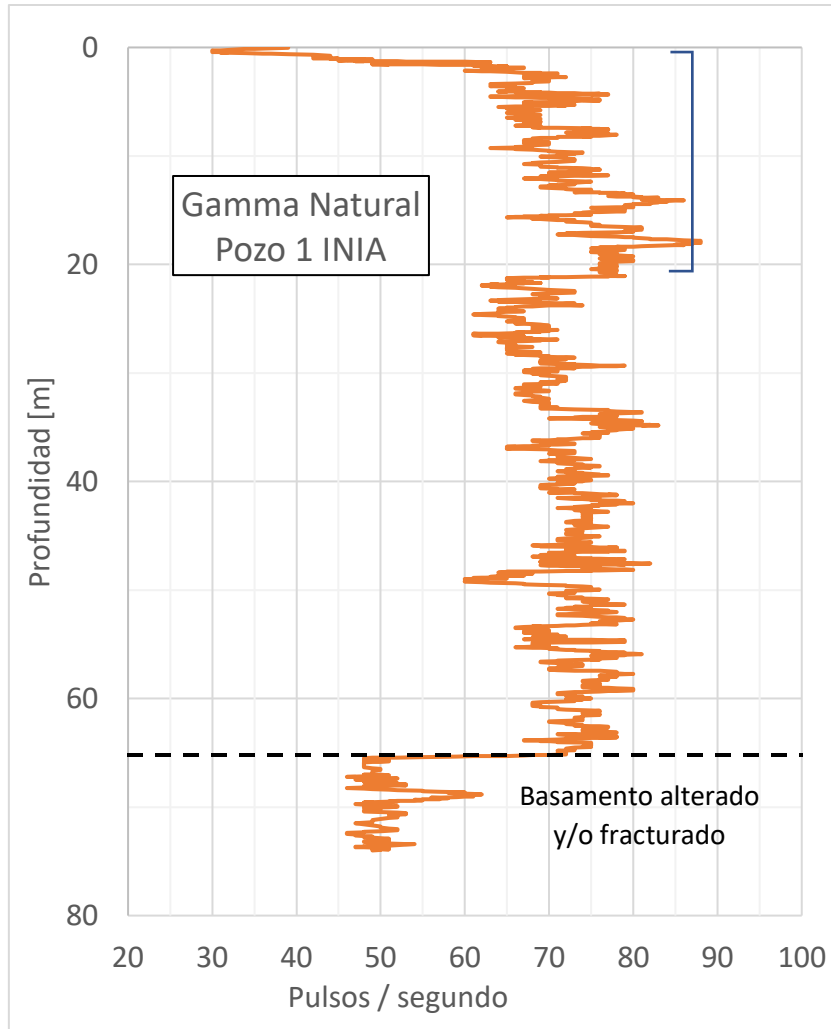


Figura 6.10. Izquierda: Diagrafía Pozo INIA 1. Derecha: Diagrafía Pozo INIA 2.

Este basamento somero se presentaría solo al este de la cuenca, dado que hacia el oeste, la información estratigráfica del pozo con expediente VPC-0401-223, indicaría una profundidad en torno a los 170 m (Figura 6.12).

Se debe tener con consideración que, hacia el oeste, afloran las areniscas de la Fm. Coquimbo, las cuales presentarían una baja permeabilidad primaria por la cementación.

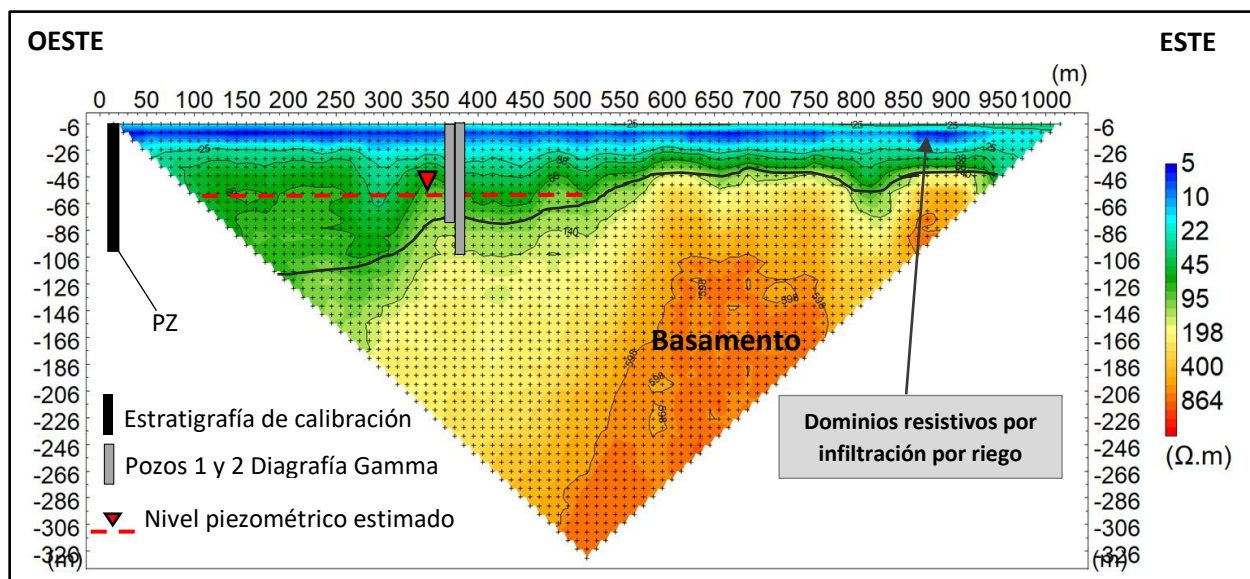


Figura 6.11 Tomografía eléctrica ERT-15. Fuente: Elaboración Propia.

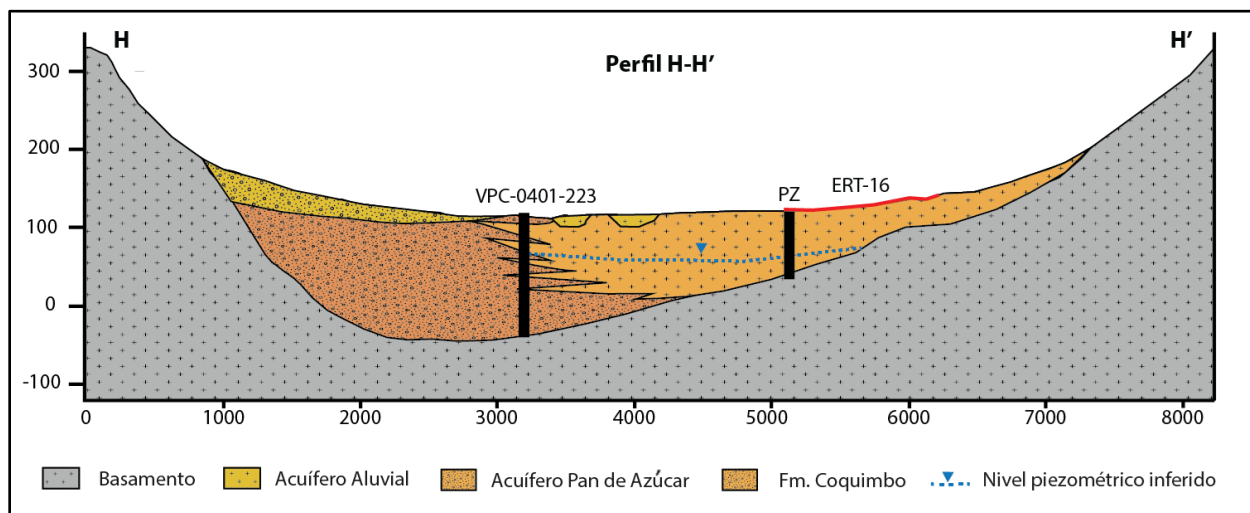


Figura 6.12. perfil H-H'. Elaboración Propia.

Hacia el sur del INIA y hasta la localidad de El Peñón, se identifica en la tomografía eléctrica ERT-18 y diversos TEM de antecedentes, un basamento profundo y en torno a los 250 m de profundidad (Figura 6.13).

Dada la geología se infiere que hacia el oeste por la quebrada Lagunillas, tanto el sistema acuífero superior como el inferior disminuyen su espesor (Figura 6.13).

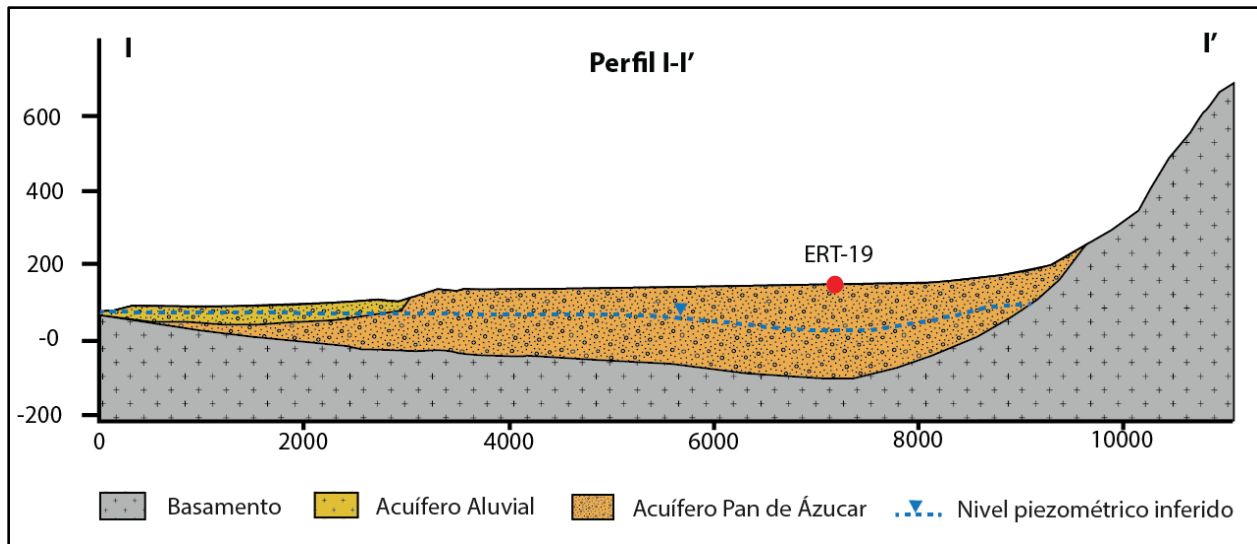


Figura 6.13. perfil I-I'. Elaboración Propia.

En este sector, en la ERT-18, el acuífero de Pan de Azúcar presenta mayores resistividades (15-60 Ohm-m) a las identificadas al norte en las ERT-17 y ERT-17 (5-60 ohm-m), lo cual podría indicar una mayor presencia de sedimentos gruesos, que es consistente con los mayores caudales y las mayores permeabilidades interpretadas en este sector en los ensayos de bombeo.

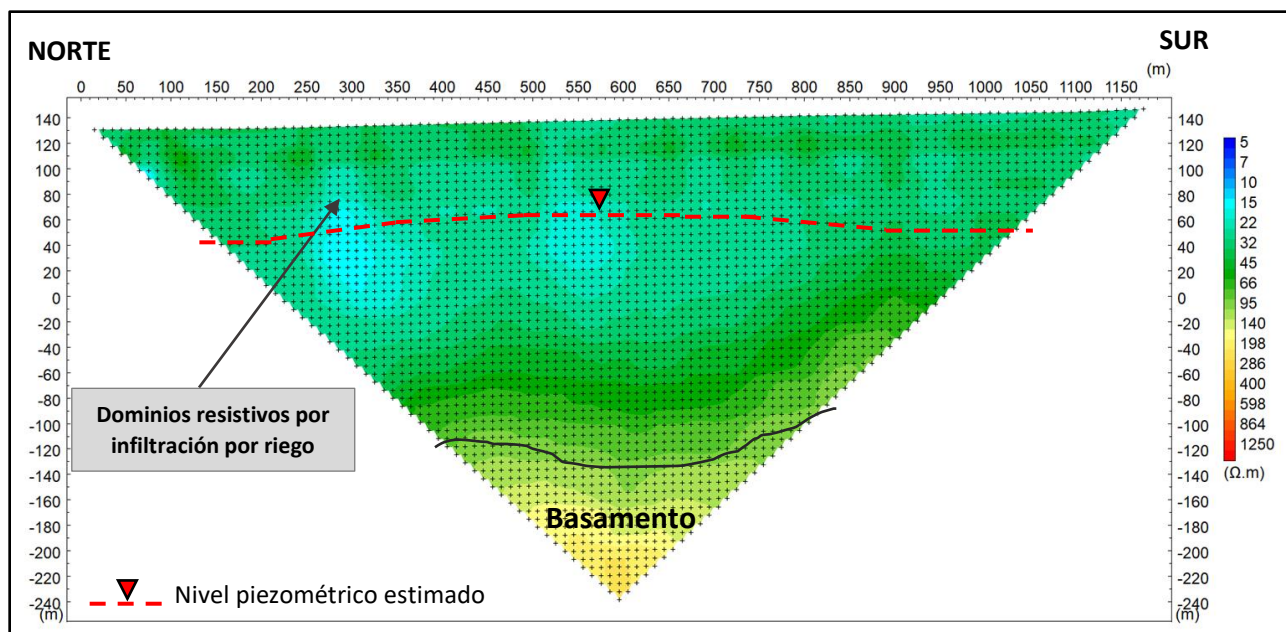


Figura 6.14 Tomografía eléctrica ERT-18. Fuente: Elaboración Propia.

Al sur de la quebrada Lagunillas y al oeste de la localidad de El Peñón, el basamento se identifica en la ERT-19 entre los 80-110 m de profundidad y disminuye hacia el sur alcanzando profundidades de 70 m en la ERT-20.

Los dominios resistivos sobre el basamento, identificados en la ERT-19 y ERT-20, son del mismo orden que los observados hacia el norte en el resto de las tomografías eléctricas, lo cual indica una continuidad estratigráfica de la unidad acuífera de Pan de azúcar.

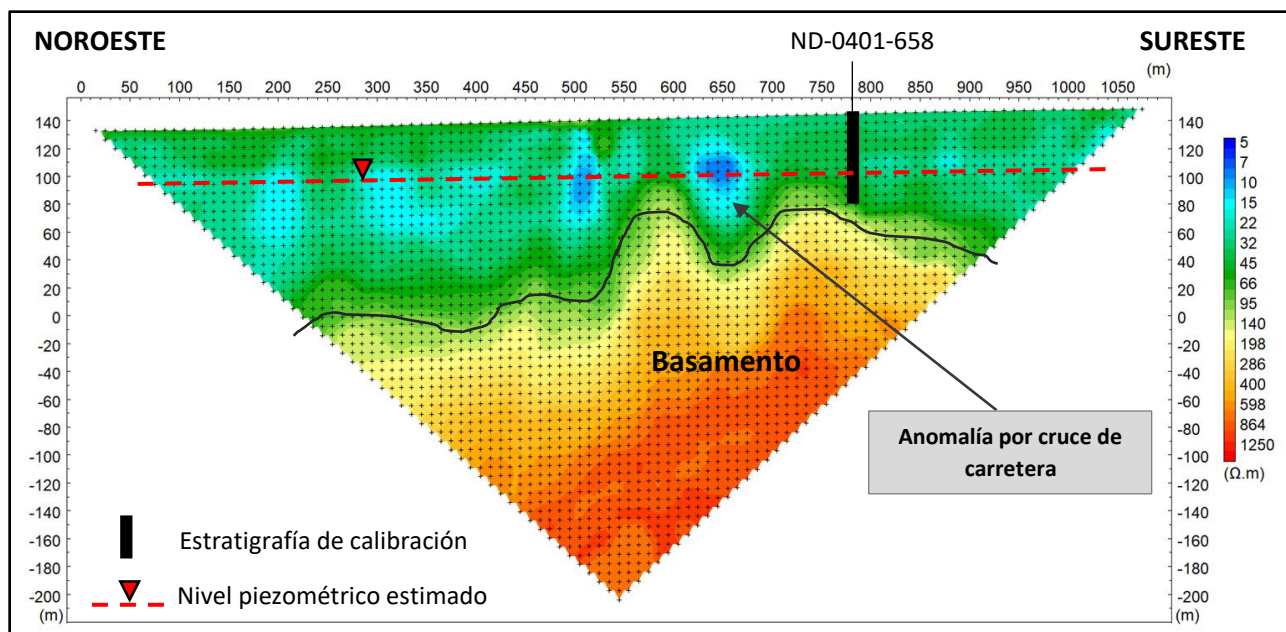


Figura 6.15 Tomografía eléctrica ERT-19. Fuente: Elaboración Propia.

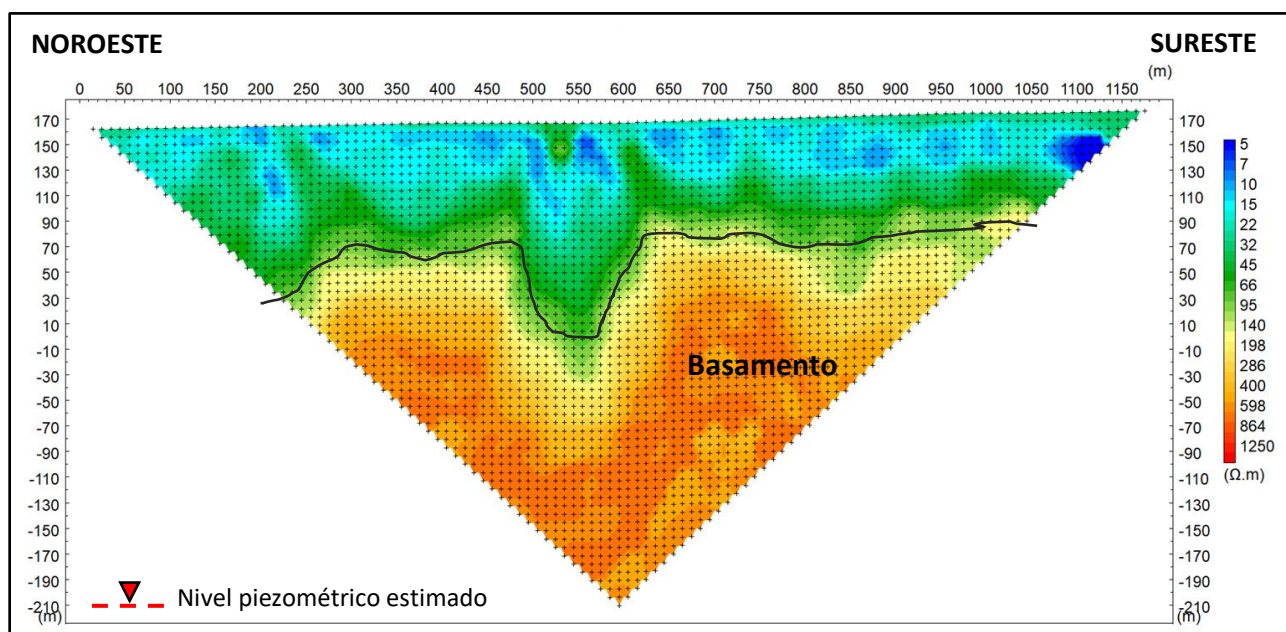


Figura 6.16 Tomografía eléctrica ERT-20. Fuente: Elaboración Propia.

6.6 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Para la caracterización hidráulica del sistema acuífero se han utilizado antecedentes bibliográficos de ensayos de bombeo (GCF, 2015) y se realizaron 3 ensayos de bombeo adicionales para caracterizar las zonas de mayores caudales de extracción de la cuenca.

De acuerdo con estos antecedentes, desde San Ramon hasta el INIA, el acuífero de pan de azúcar tiene permeabilidades de entre 1-15 m/día.

Entre el INIA y la quebrada Lagunillas, las permeabilidades son mayores y del orden de 5-40 m/día, coherente con los mayores caudales de extracción catastrados y así como los otorgados por la DOH.

Hacia el sur de la quebrada Lagunillas, el acuífero profundo presenta permeabilidades menores, del orden de 1 m/día.

En cuanto a la capacidad infiltración del suelo, se determinó mediante ensayos de infiltración de doble anillos, una capacidad de infiltración de entre 2 a 8 m/día, en lechos del río y del orden de 1 m/día en suelos agrícolas.

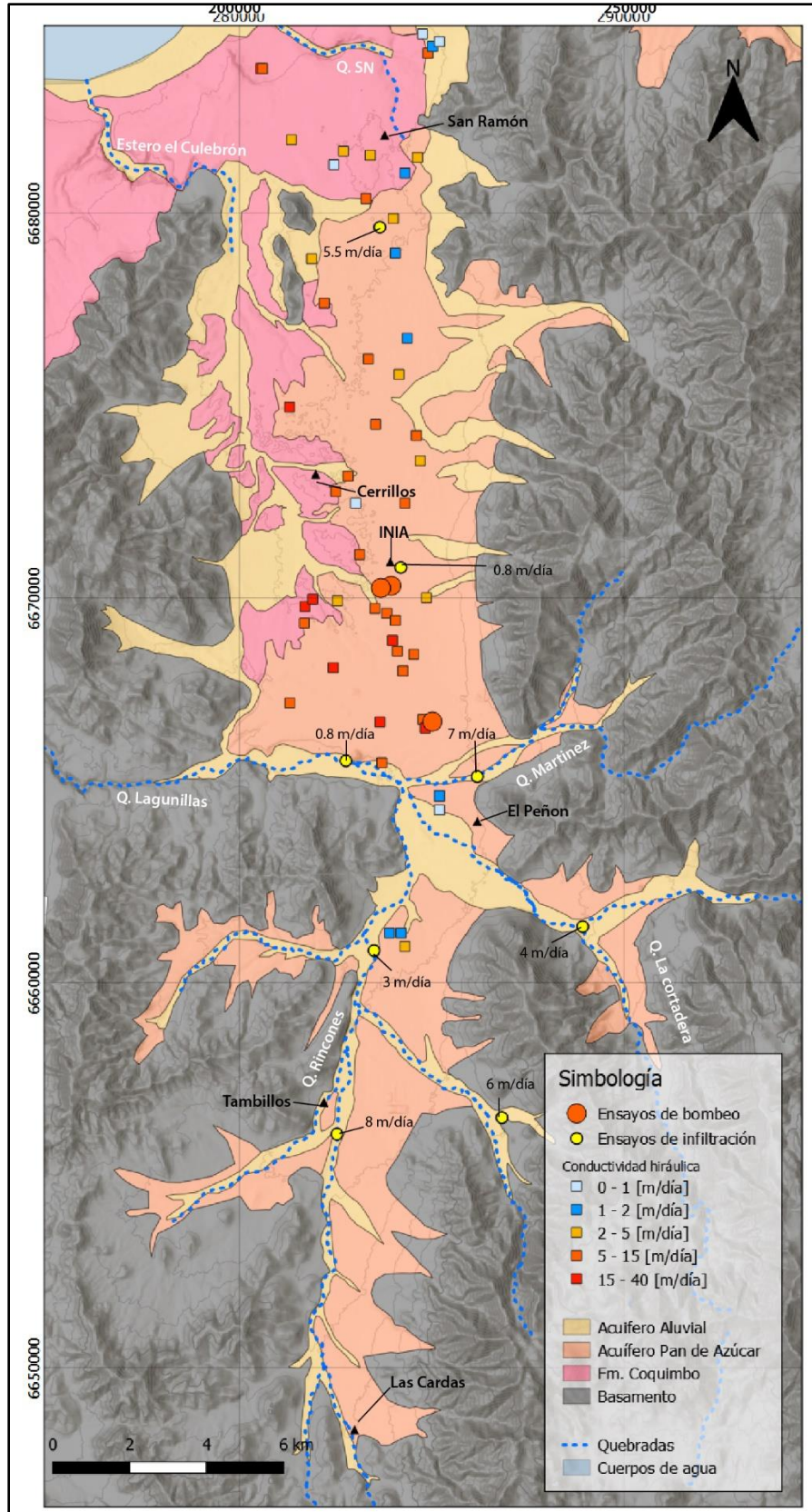


Figura 6.17 Tomografía eléctrica ERT-20. Fuente: Elaboración Propia.

6.6.1.1 Pruebas De bombeo

Las características y resultados de las pruebas de bombeo realizadas en el contexto del Proyecto se resumen en la Tabla 5.3. Las pruebas se interpretaron mediante modelación numérica, para lo cual se realizaron modelos a escala local en diferencias finitas en VISUAL MODFLOW, para cada uno de ellos.

Los modelos se realizaron centrado en cada captación, refinado con celdas de 1 x 1 m en la zona de bombeo, aumentando el tamaño de celdas al alejarse de esta. En la vertical se consideraron 2 capas, una desde la superficie hasta la profundidad del pozo, desde donde se realiza la extracción, y otra subyacente de igual permeabilidad y que se extiende hasta el basamento, definido de acuerdo con el modelo conceptual desarrollado del basamento.

Se consideraron condiciones de no flujo en los contactos laterales con la roca, considerados como límites del acuífero, y condiciones de nivel fijo por aguas arriba y aguas abajo del relleno aluvial, dispuestas lo suficientemente alejadas del punto de extracción para descartar efectos de contorno.

Tabla 6.2. Ensayos de bombeo realizados. Fuente: Elaboración Propia.

Ensayo	Ubicación	Coordenadas UTM		Tipo	Caudal (L/s)	Prof. NE (m)	Prof. ND (m)	K [m/d]	Ss [1/m]
		Este	Norte						
EB-14	Pan de Azúcar	285013	6666796	Pozo Profundo	12.95	92.24	107.63	4	1.00E-06
EB-15	Pan de Azúcar	283937	6670323	Pozo Profundo	37	62.1	85.28	8	1.00E-06
EB-16	Pan de Azúcar	283678	6670264	Pozo Profundo	38	60.47	85.39	8	1.00E-06

PRUEBA DE BOMBEO EB-14

El ensayo se realizó en un pozo profundo, correspondiente a un particular, de 120 m de profundidad. El nivel estático se midió a 92.24 m de profundidad. Se realizó un bombeo con un caudal de 12.9 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 15.63 m (Figura 6.18).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **4 m/d** y un coeficiente de almacenamiento específico de **1.00E-06**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

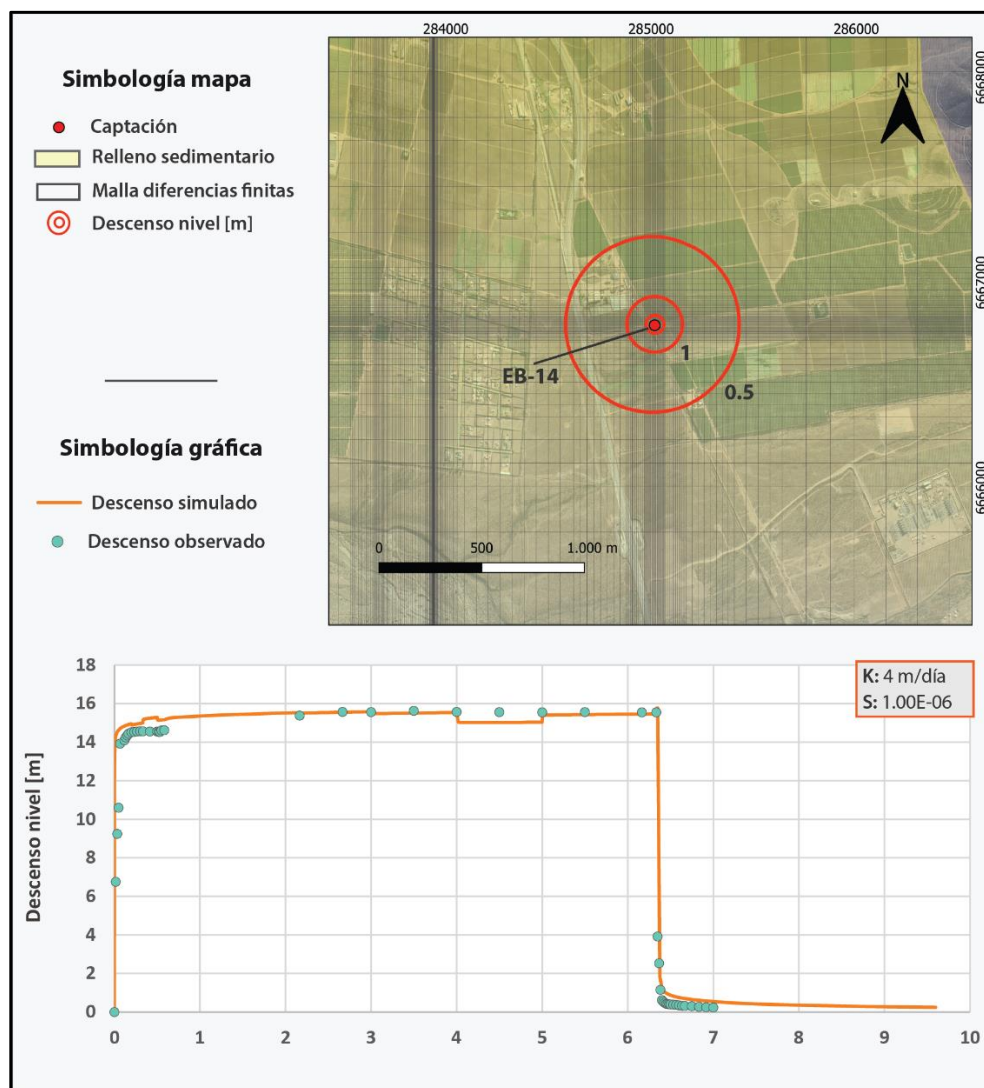


Figura 6.18 Ensayo de bombeo EB-14. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-15

El pozo profundo correspondiente a un particular presenta una profundidad de 100 m. El nivel estático se midió a 62.10 m de profundidad. Se realizó bombeo con un caudal de 37 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 23.24 m (Figura 6.19).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **8 m/d** y un coeficiente de almacenamiento específico de **1.00E⁻⁰⁶**, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

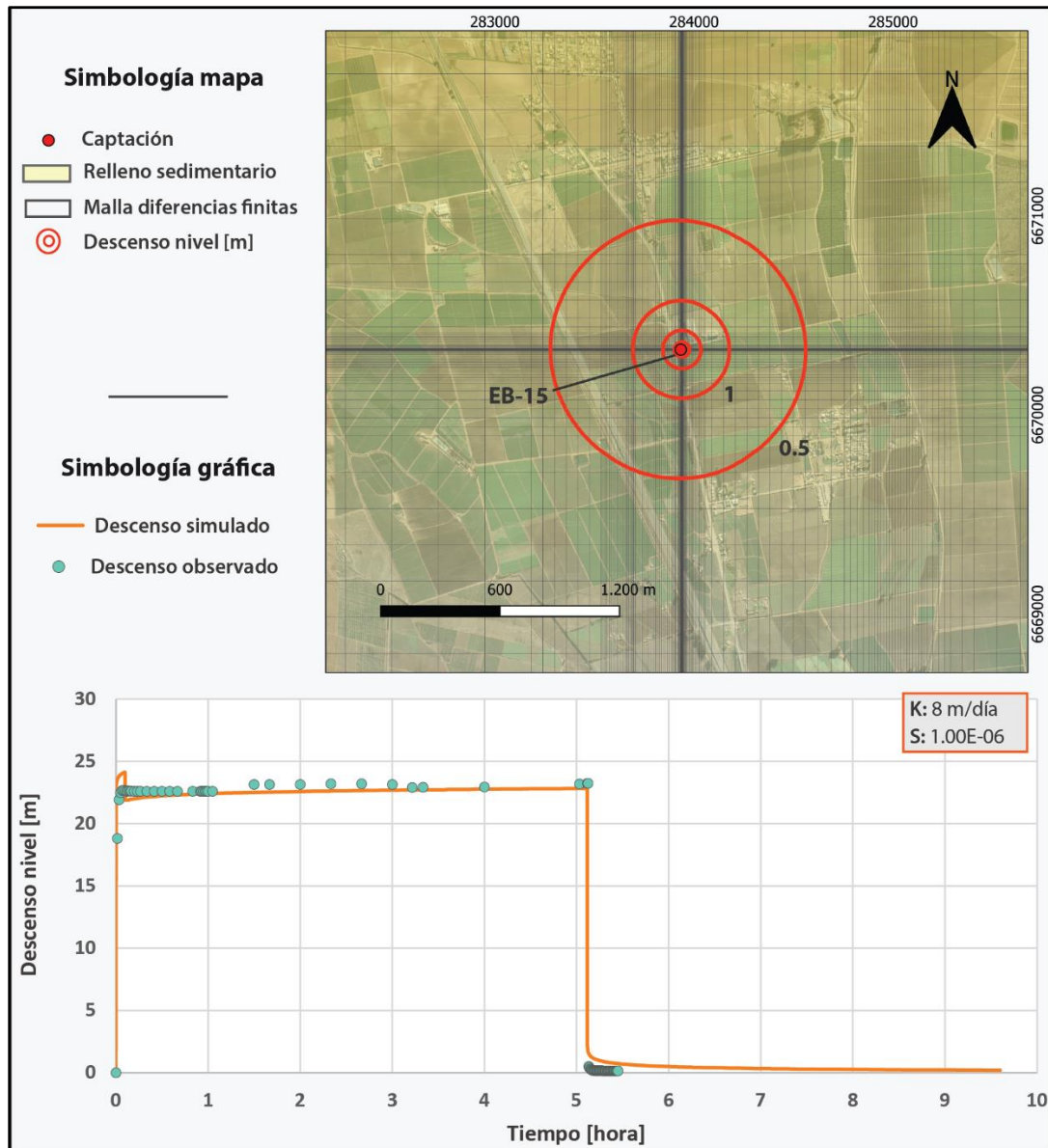


Figura 6.19 Ensayo de bombeo EB-15. Fuente: Elaboración Propia.

PRUEBA DE BOMBEO EB-16

El pozo profundo correspondiente a un particular presenta una profundidad de 100 m. El nivel estático se midió a 60.47 m de profundidad. Se realizó un bombeo con un caudal de 40 l/s, alcanzándose un descenso máximo de 25.00 m (Figura 6.20).

La interpretación numérica de la prueba permitió la estimación de los parámetros hidráulicos, ajustándose una conductividad hidráulica de **8 m/d** y un coeficiente de almacenamiento

especifico de $1.00E-06$, que indica que el acuífero se encontraría localmente en condiciones confinadas.

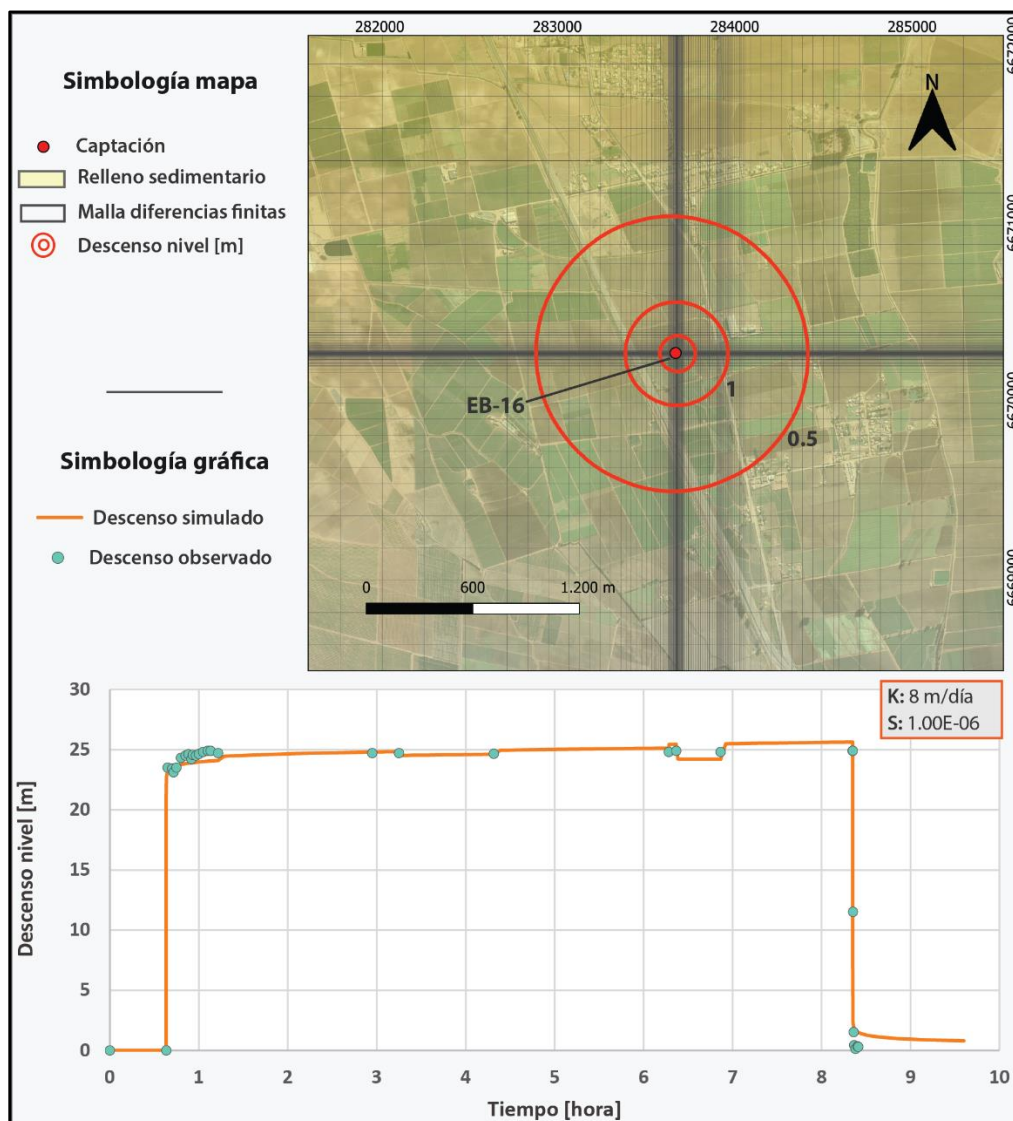


Figura 6.20 Ensayo de bombeo EB-16. Fuente: Elaboración Propia.

6.6.1.2 Ensayos de infiltración

Con el objetivo de cuantificar la permeabilidad vertical condicionante de la recarga superficial de lluvia y riego, se realizaron ocho ensayos de infiltración en suelos representativos de las capas superficiales.

Estos ensayos se realizaron hasta estabilizar la tasa de infiltración (Figura 6.21), que corresponden a la conductividad hidráulica saturada del suelo, considerando una infiltración estrictamente vertical y que el perfil de suelo es profundo y uniforme en el lugar del ensayo.

La conductividad hidráulica vertical del suelo calculada mediante este método es de entre 2 a 8 m/día, en lechos del río y del orden de 1 m/día en suelos agrícolas.

Tabla 6.3 Ensayos de bombeo realizados. Fuente elaboración propia.

Ensayo	Ubicación	Coordenadas UTM		Tasa de infiltración [m/día]	Tipo de suelo
		ESTE	NORTE		
E1	Tambillos	282532	6656090	8	Lecho de río
E2	Tambillo	286823	6656517	6	Lecho de río
E3	Quebrada Los Rincones	283495	6660861	2.2	Lecho de río
E4	El Manzano	288926	6661483	4	Lecho de río
E5	Quebrada Martínez	286184	6665360	7	Lecho de río
E6	Quebrada Lagunillas	282766	6665770	0.8	Lecho de río
E7	Cerrillos	284194	6670796	0.8	Agrícola
E8	Cerrillos	283649	6679642	5.5	Agrícola

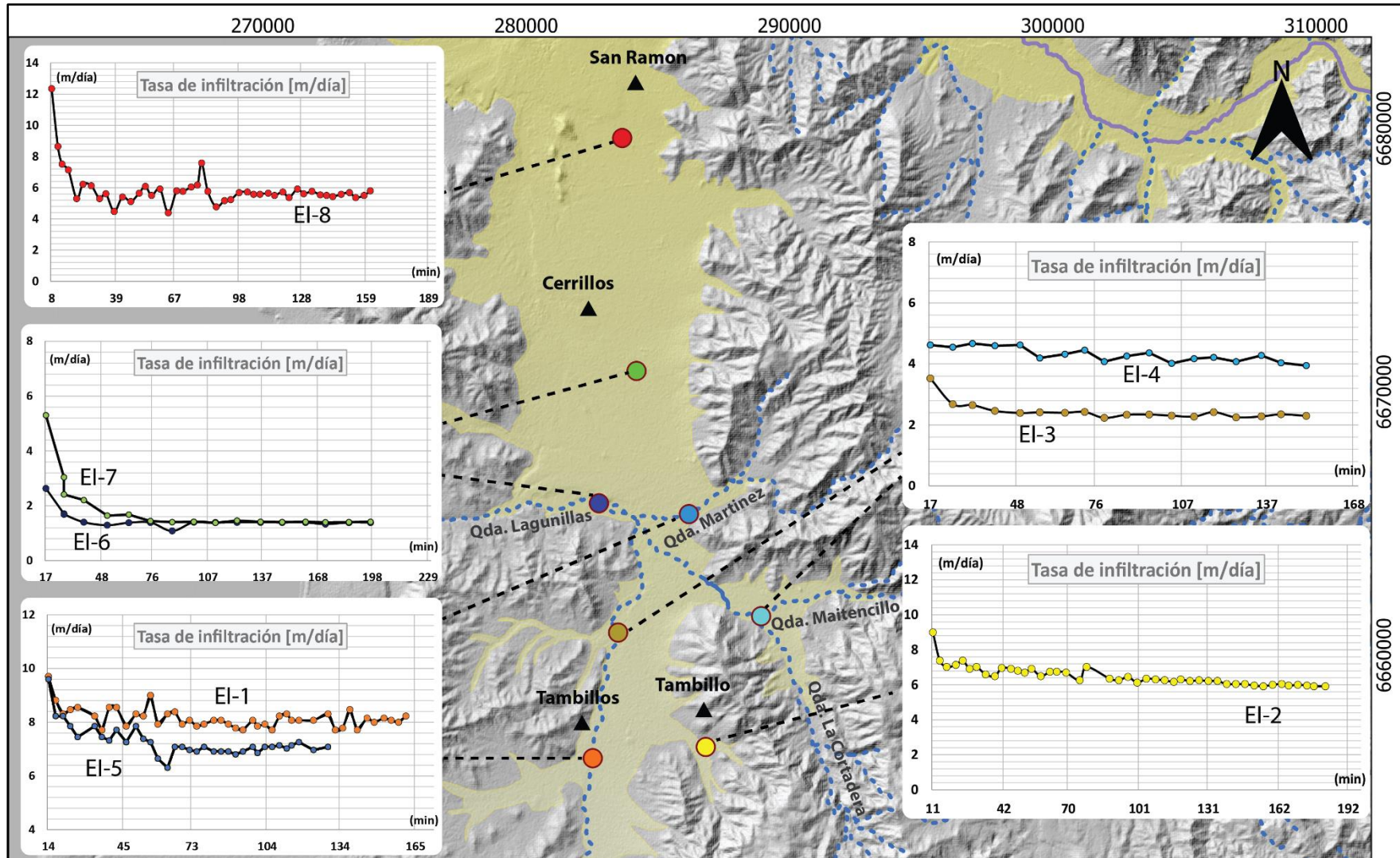


Figura 6.21 ensayos de infiltración realizados. Fuente: Elaboración propia.

6.7 HIDRODINÁMICA

Con la finalidad de actualizar los antecedentes piezométricos, de calidad y los caudales de extracción de las captaciones de la cuenca, se realizó un catastro de 15 captaciones en el sector de Pan de Azúcar (Figura 6.22). Los registros del catastro de pozos se presentan en la Tabla 5.4.

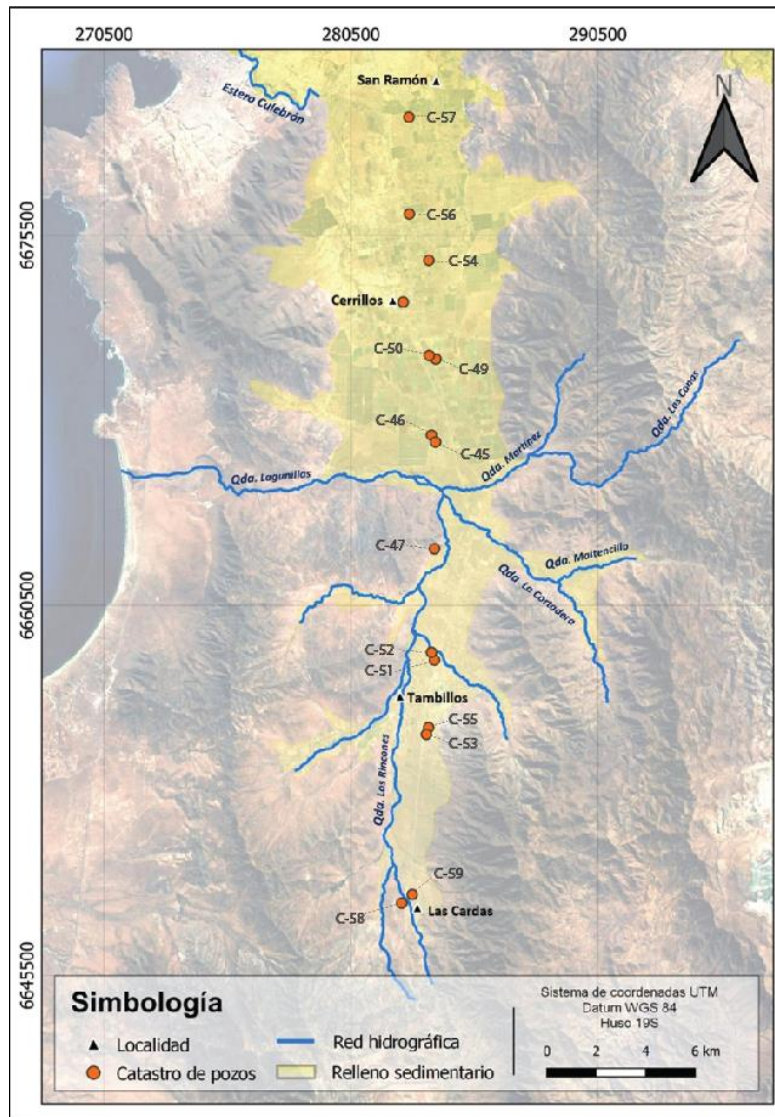


Figura 6.22. Catastro de pozos en sector Pan de Azúcar. Fuente: Aluvial Consultores.

Tabla 6.4 Registro del catastro de pozos realizado. Fuente. Aluvial Consultores.

Código	Coordenadas UTM		Elevación (m.s.n.m)	Tipo captación	Brocal (m)	Prof. Pozo (m)	Prof. NE (m)	Prof. ND (m)	Q (L/s)	CE (us/cm)	pH	T° (°C)
	Este	Norte										
C45	285013	6666796	149	Pozo profundo	0.5	-	-	106.8	13.0	-	-	-
C46	284684	6666948	153	Pozo	-	-	-	-	26.4	-	-	-
C47	284362	6662931	159	Pozo	0.2	13.0	1.8	-	-	560	6.9	19.1
C49	284208	6670756	120	Pozo	0.5	> 100.0	65.4	-	-	-	-	-
C50	284201	6670742	115	Pozo	0.6	74.1	65.4	-	-	2030	7.5	18.8
C51	284042	6658499	202	Noria	0.3	38.3	37.2	-	-	-	-	-
C52	283972	6658533	201	Pozo profundo	0.4	98.0	-	-	0.5	835	6.9	19.2
C53	283684	6655515	169	Pozo profundo	0.5	-	40.6	-	-	-	-	-
C54	283655	6674493	112	Pozo profundo	0.4	> 57.0	57.6	-	-	-	-	-
C55	283647	6655560	168	Pozo profundo	0.3	-	-	61.8	0.1	1437	7.2	19.4
C56	282864	6676371	73	Pozo profundo	0.8	67.0	46.9	-	26.5	1633	6.8	18.1
C57	282847	6680297	58	Pozo profundo	0.3	120.0	35.2	-	9.0	1349	6.8	14.9
C58	282797	6648469	323	Noria	-	15.7	15.1	-	-	1568	6.9	16.8
C59	282797	6648472	323	Pozo profundo	0.2	30.0	15.3	-	-	1466	6.8	17.5
C60	282549	6672671	121	Pozo	0.3	-	53.5	-	-	1508	6.9	18.4

Para caracterizar la hidrodinámica del sistema, se ha utilizado la información de 12 pozos de la red de control de niveles de la DGA y de los 15 pozos catastrados en el sector de Pan de Azúcar .

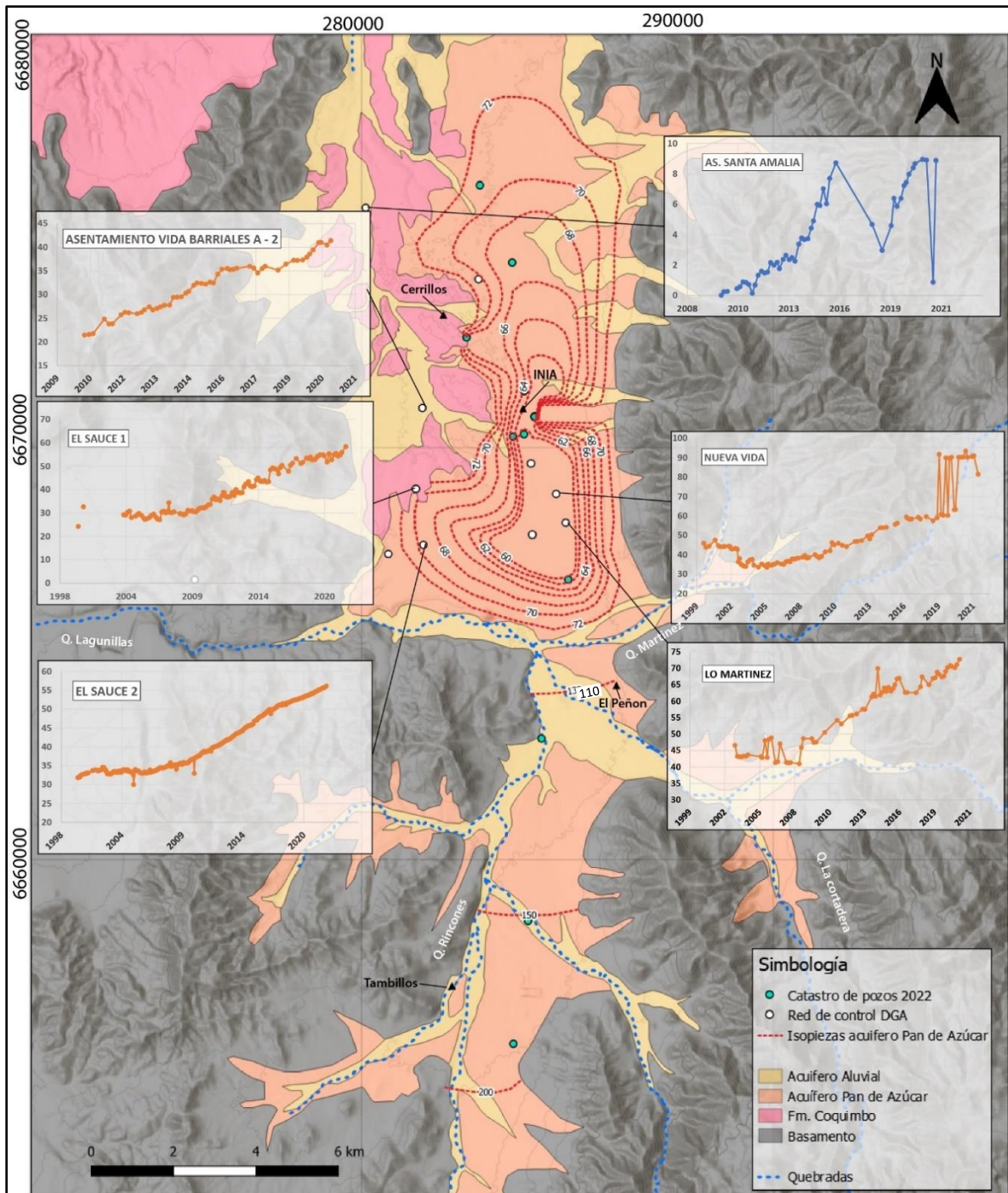


Figura 6.23. Piezometría Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración Propia.

Actualmente, las aguas subterráneas de Pan de Azúcar fluyen hacia los sectores en donde se encuentra una mayor concentración de pozos de bombeo.

Desde el norte del acuífero Pan de azúcar, las aguas subterráneas fluyen desde San Ramon hasta el sur de la parcela del INIA, con un bajo gradiente hidráulico de 0.072%, mientras que por el sur,

las aguas del acuífero fluyen desde la localidad de Las Cardas hacia el Peñón, con un gradiente hidráulico mayor de entre un 0.3 a 0.8 %.

De acuerdo con los registros históricos de las profundidades del nivel estático de la red de control de la DGA ubicados en el acuífero de Pan de Azúcar, desde el 2000 al 2022, habría ocurrido un descenso del nivel del acuífero de entre 20 a 30 m, con registro máximo en la estación Lo Martínez.

Estos antecedentes se presentan al sur del INIA y estarían relacionados principalmente a la extracción del sistema acuífero, dado que estos se correlacionan con el aumento de la demanda de caudales de extracción según el registro de expedientes aprobados por la DGA.

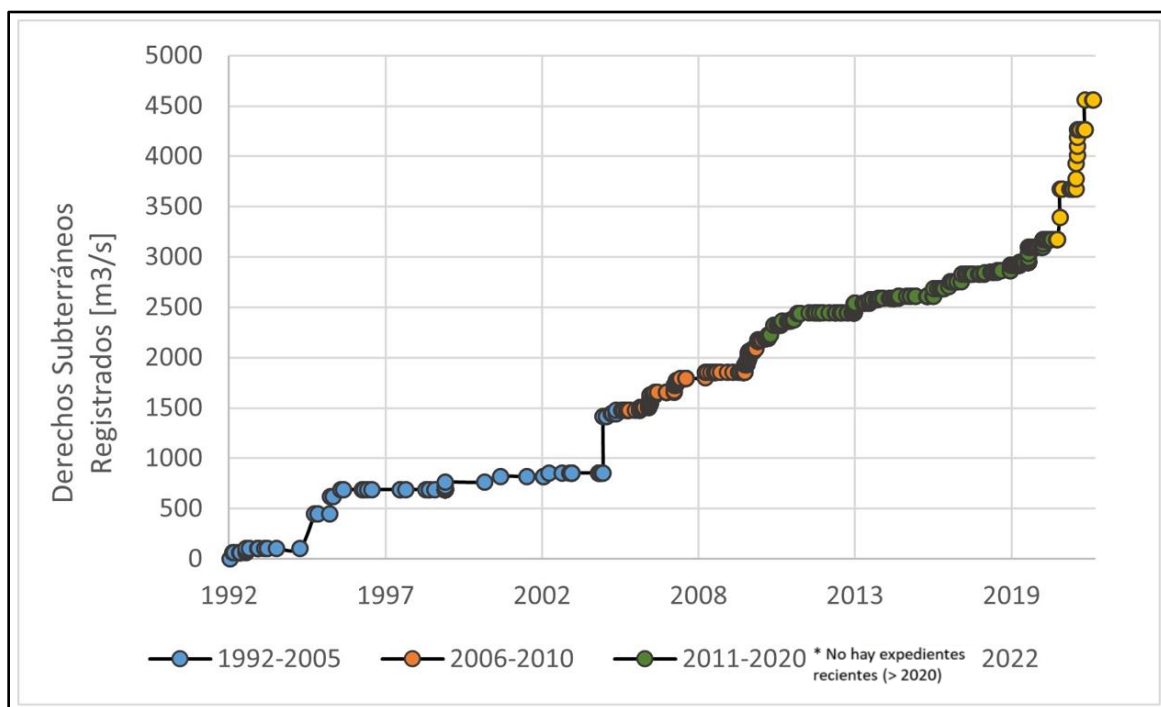


Figura 6.24 Aumento de la demanda de caudales de extracción en el acuífero de Pan de Azúcar .
Fuente: derechos registrados de la DGA al 2022.

Comparando las imágenes satelitales del sector pan de azúcar entre los años 2000 y 2022 (Figura 6.25), se identificaba en el año 2000 la presencia de afloramientos al oeste de Cerrillos y al oeste de la quebrada Lagunillas, en esta fecha los niveles se encontraban, de acuerdo a los registros de la red de control, a una cota de entre 100 y 110 msnm. A esta cota, en los sectores A1 y A2 de la Figura 6.25, el nivel piezométrico era cortado por la topografía, constituyendo una salida al

suroeste por la quebrada lagunillas, lo cual valida la hipótesis de estudios anteriores en la cual se indicaba una salida del acuífero por este sector.

A la fecha los niveles se encuentran a una cota del orden de 60 a 70 msnm y la superficie piezométrica ya no corta la cota topografía, por lo cual no se identifican afloramientos al suroeste y no es posible validar salidas subsuperficiales. Actualmente los bombeos habrían deprimido los niveles generando conos de descenso cambiando la dirección de flujo natural de agua subterránea.

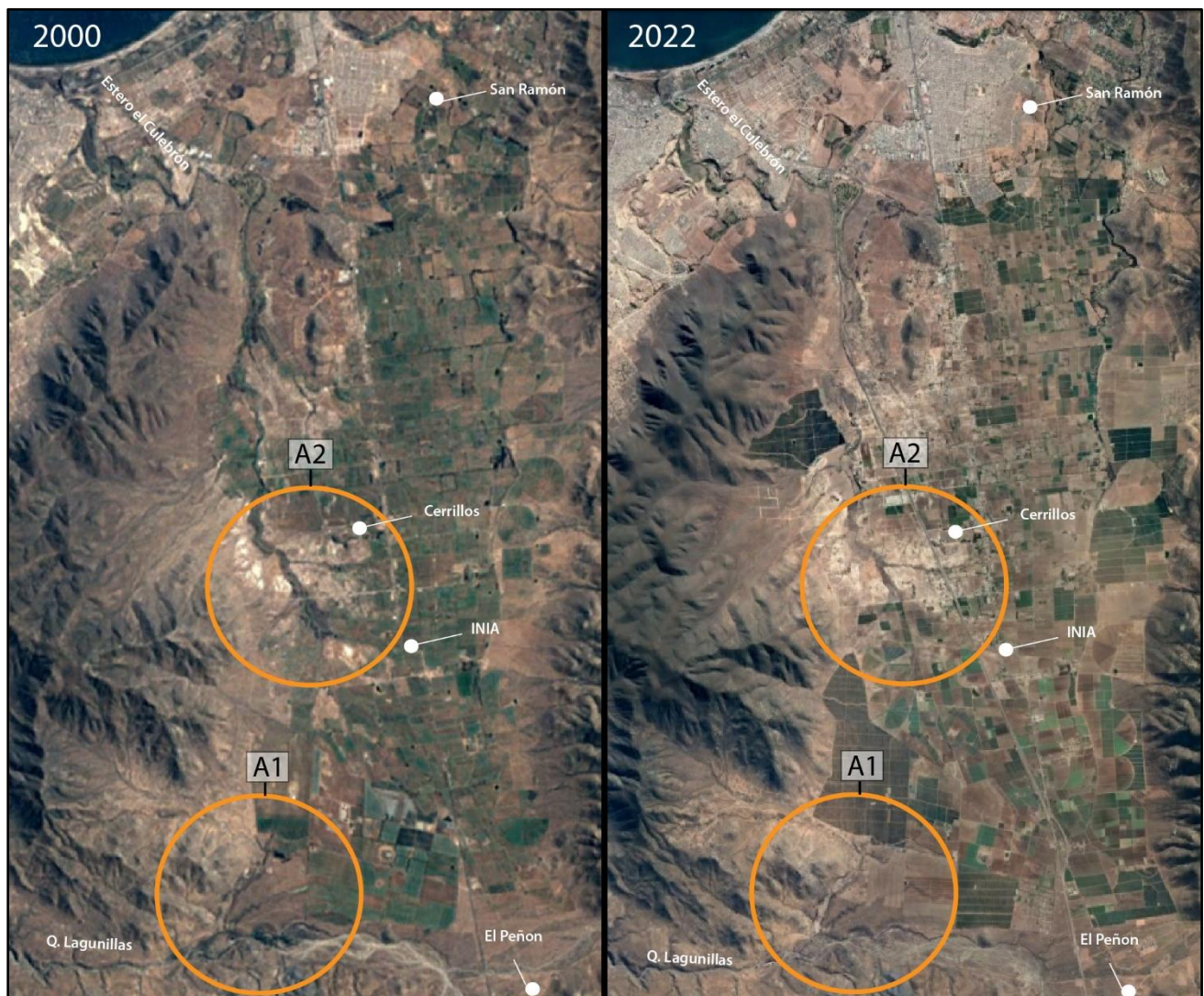


Figura 6.25. Análisis comparativo de los afloramientos. Izquierda año 2000, Derecha Año 2022.
Fuente: Elaborado a partir de imágenes de Google Earth.

Para el acuífero superior del sector noroeste se cuenta con información en el pozo de control de la DGA Santa Amalia, en la cual se registra el nivel estático a 10 m de profundidad y del catastro

de pozos realizado en el presente estudio, observándose la presencia de agua a los 2 m de profundidad al suroeste de El Peñón.

Para determinar la hidrodinámica de ambos acuíferos es necesario contar con mayor información de la profundidad del nivel estático, a futuro se recomienda realizar un catastro de pozos enfocado en el registro de la profundidad en esta unidad.

6.8 HIDROQUÍMICA

De acuerdo con los parámetros fisicoquímicos medidos in situ en el catastro de pozos del presente estudio, se identifica que las mayores conductividades eléctricas del agua del acuífero se registran al suroeste del INIA con valores entre 4000 – 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En el resto del acuífero la conductividad eléctrica de las aguas se encuentra entre 1300 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Las conductividades menores a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, serían las aguas representativas del acuífero superior aluvial, que registrada al suroeste de la localidad de El Peñón.

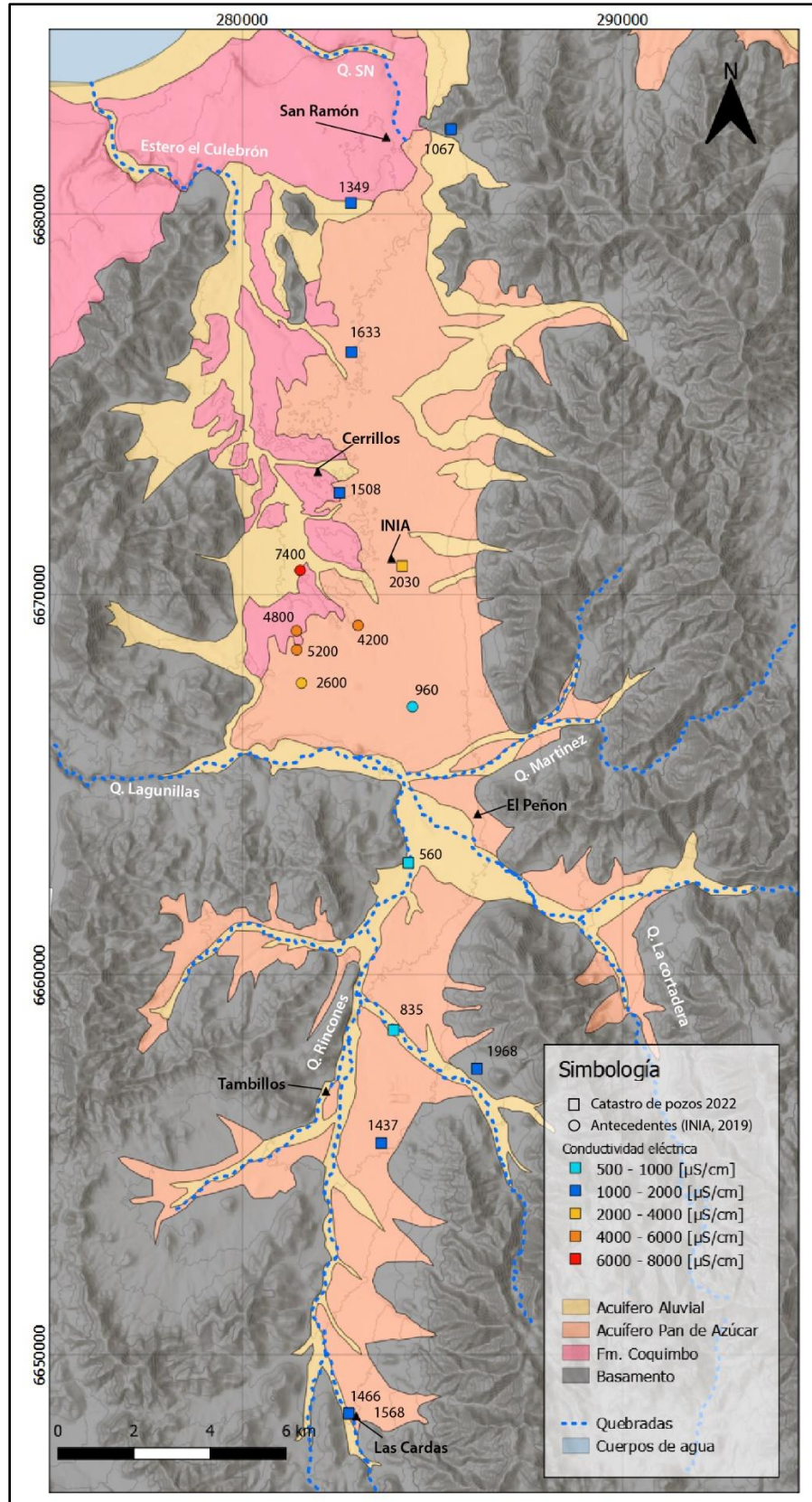


Figura 6.26 Conductividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los antecedentes hidroquímicos de la red de control de la DGA y de la bibliografía (INIA, 2019), se identifican tres tipos de aguas subterráneas:

El tipo de agua de los pozos P6 y P7 (Figura 6.27) corresponde al tipo bicarbonatado cálcico y se asocian a la infiltración del agua de lluvia, y de baja salinidad.

El agua de los pozos P1, P2 P3 y P4 corresponde al tipo clorurada cálcico y presentan una mayor salinidad.

El origen de estas aguas podría asociarse a un proceso intenso de alteración local de recarga en la zona de actividad agrícola en la que el agua de precipitación se evapoconcentra por retención en el suelo y alteración de los minerales del suelo por efecto del CO₂ edáfico.

Lo anterior hace que la marca posiblemente de aerosol marino en la precipitación se concentre y en la alteración se adsorba o se absorba Na, y posiblemente también K, en los minerales de alteración a cambio de la mayor movilización de Ca y Mg.

El pozo P5 es del tipo clorurado sódico, cuyas concentraciones se encuentran entre las aguas descritas anteriormente.

El pozo P8, ubicado al extremo norte del área de estudio, es del tipo sulfatado sódico con una baja concentración de magnesio y cloruros.

La concentración de bicarbonato es del mismo orden de magnitud que en todas las aguas analizadas.

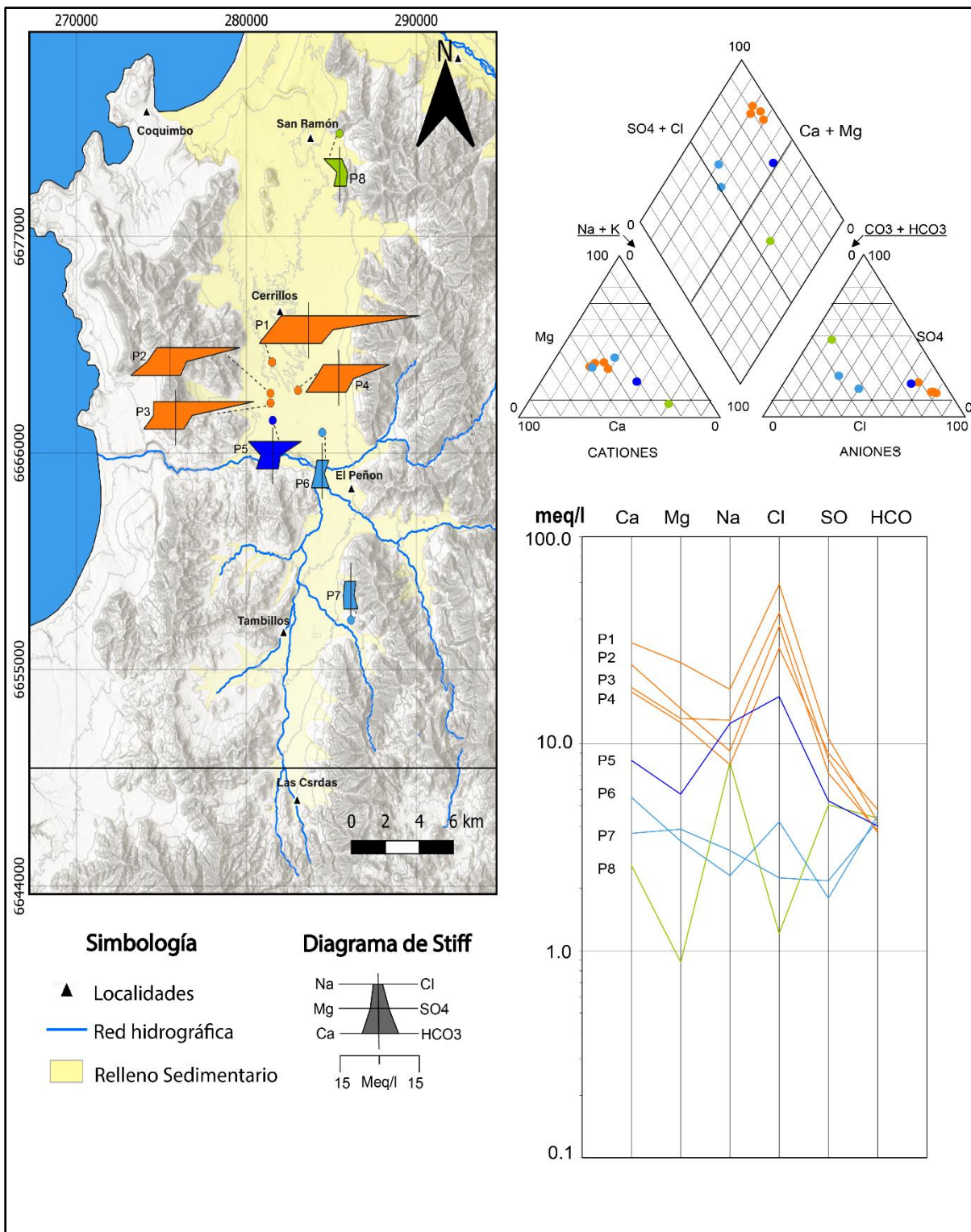


Figura 6.27 Concentraciones hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero Pan de Azúcar. Fuente: Elaboración propia.

6.9 EXTRACCIONES

El agua superficial en la subcuenca del estero Culebrón, proviene del transvase desde el río Elqui a través del canal Bellavista, para el cual se indican caudales de entre 1000 y 2000 l/s.

Se registra un aumento considerable de los derechos de agua subterránea otorgados a partir del año 2005, pasando del orden de 1000 l/s, a 2500 para el 2013 y 4000 el 2020 (Figura 6.28).

De acuerdo al registro de derechos, el sector de Tambillos en la subcuenca Lagunillas, y entre INIA y El Peñon, se presenta la mayor cantidad de nuevos derechos concedidos a partir del 2011. Muy probablemente este aumento de las extracciones ha generado los descensos característicos registrados en los pozos de control.

Los caudales reales de extracción y factor de uso de los derechos se desconocen, al igual que la cantidad de derechos que no se encuentran regularizados. Se estima que la extracción real es menor que los derechos concedidos, siendo los derechos de riego utilizados temporalmente.

Debido a los descensos experimentados en los últimos años, es de esperar que se encuentren pozos sin uso debido a la falta de espesores saturados suficientes para el bombeo.

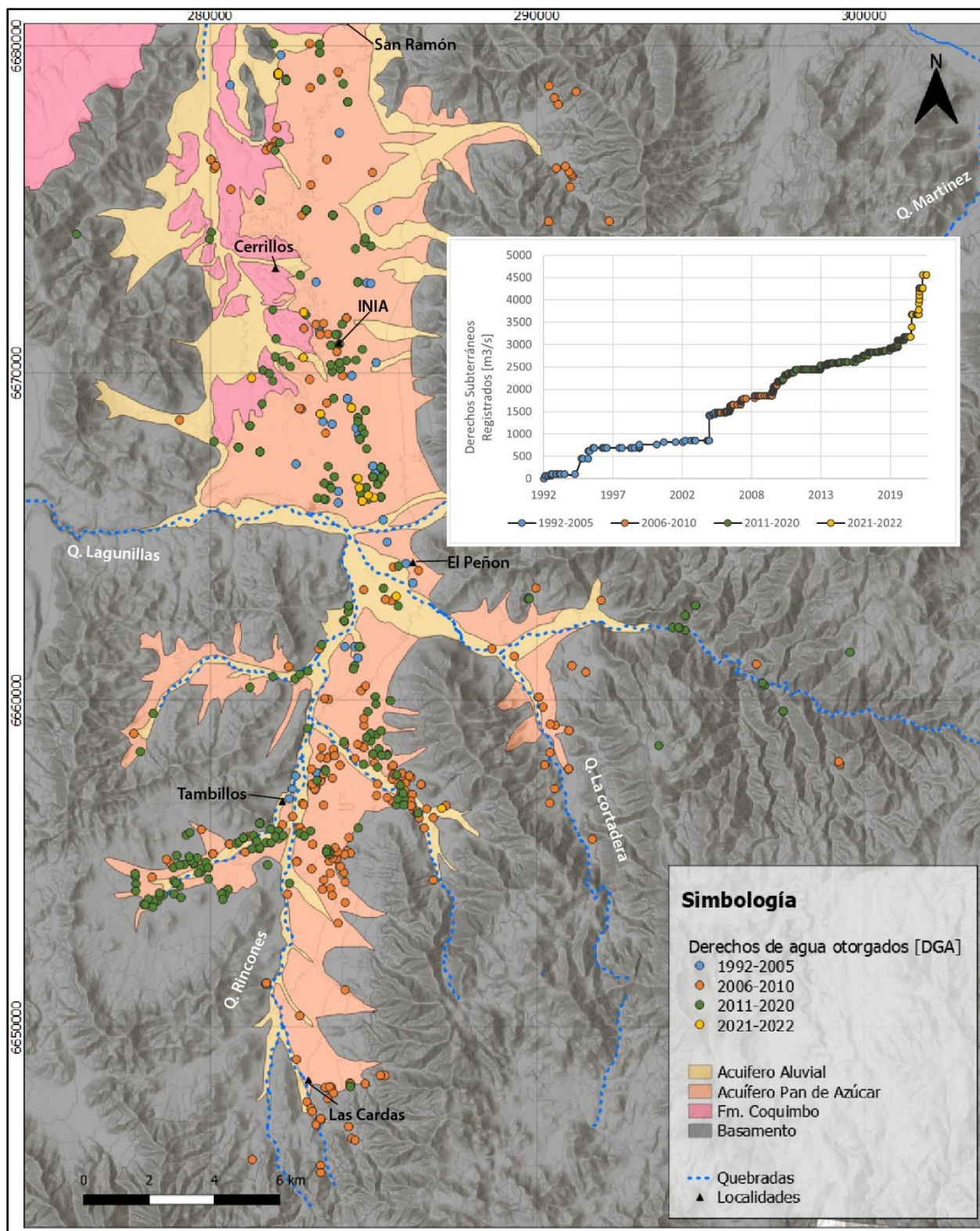


Figura 6.28. Derechos de agua subterránea registrados en la DGA. Fuente: Elaboración Propia a partir de datos DGA.

6.10 RECARGA Y BALANCE HÍDRICO

Para la estimación del balance hídrico se cuantificaron las diversas componentes de entradas y salida del acuífero (Figura 6.29), cuyas variables se definen a continuación.

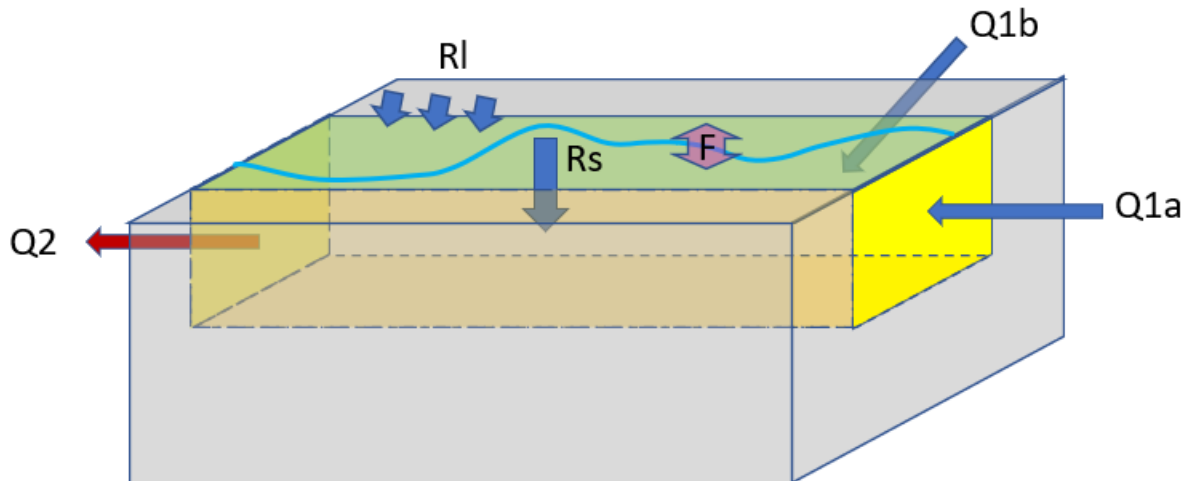


Figura 6.29 Balance hidrogeológico. Fuente: Elaboración Propia.

Entradas al dominio subterráneo se considera:

- La recarga por precipitación y excedentes de riego.
- Los caudales subterráneos entrantes desde subcuencas y lateralmente desde rellenos coluviales
- La infiltración desde canales
- Entradas desde cursos superficiales

Salidas del dominio subterráneo:

- Los caudales subterráneos salientes del acuífero hacia el río y al mar
- Extracciones

6.10.1 CAUDALES SUBTERRÁNEOS (Q1, Q2)

El caudal subterráneo entrante por Lagunillas se ha estimado en torno a los 30 l/s mediante la ley de Darcy (Figura 6.30), considerando la geometría desarrollada en el modelo conceptual, la profundidad de niveles en pozos, para determinar el espesor saturado y el gradiente hidráulico, y una conductividad hidráulica acorde a los parámetros hidráulicos representativos conceptualizados.

Dada la condición piezométrica y gradiente hidráulico condicionado por las extracciones en Pan de Azúcar, no se considera flujo subterráneo que sale hacia la costa por el relleno de la Quebrada Lagunillas.

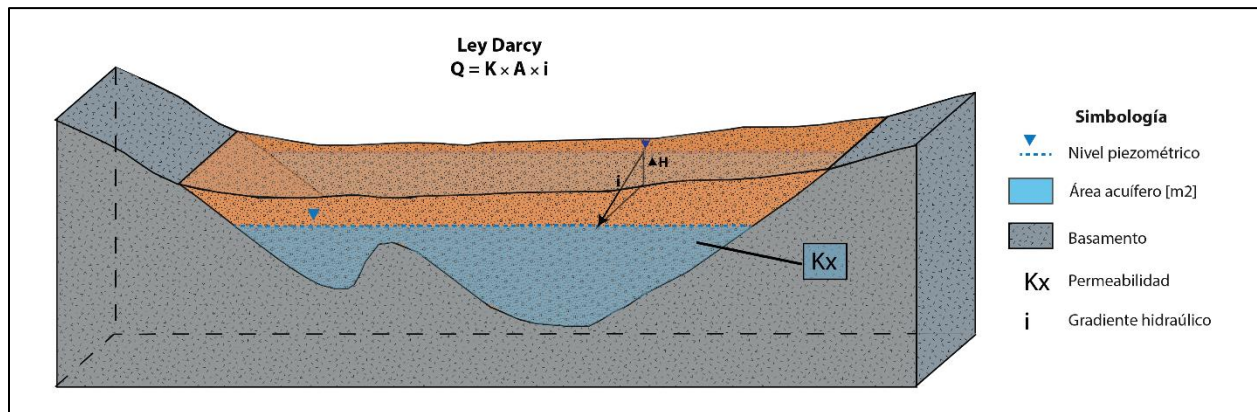


Figura 6.30 Esquema de la Ley de Darcy. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.5. Caudales subterráneos estimados con Ley de Darcy. W: ancho de la sección, H: espesor saturado, A: área sección; K: conductividad hidráulica; i: gradiente hidráulico, Q: caudal.

Parámetro	Q1 Lagunillas
W [m]	2000
H [m]	90
A [m ²]	90000
K [m/d]	2
I [m/m]	0.013
Q [l/s]	27.1

6.10.2 RECARGA LATERAL, POR PRECIPITACIÓN E IRRIGACIÓN (RL, RP, RI)

Para estimar la recarga por precipitación y riego se realizó un balance en el suelo mensual por medio del código Easy-Bal (desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea - Departamento

de Ingeniería del Terreno, UPC), el cual se basa en el método de Thornthwaite para la estimación de la evapotranspiración a partir de las series medias mensuales de temperatura. En zonas con riego se ha sumado a la precipitación el excedente de la. Considerando eficiencias de riego del 85 y 60 % para cultivos de ciclo corto y persistente respectivamente (HDG, 2022) se estima la tendencia temporal de la irrigación promedio a partir de la función temporal de la evapotranspiración real característica, que puede considerarse en torno a 1 mm/día promedio cuando no hay precipitación durante los meses de septiembre a marzo de acuerdo a estimaciones globales de evaporación desde el suelo, superficie y transpiración (cada 8 días, 500 m de resolución) (Zhang, 2018, 2019).

Para la aplicación del método de Thornthwaite se ha considerado la temperatura media mensual y precipitación en estación La Florida, estimándose la recarga resultante en superficie por precipitación y riego despreciable. El registro de precipitaciones se encuentra completo para el periodo analizado.

6.10.3 ENTRADAS DESDE CURSOS SUPERFICIALES (RL)

La recarga desde cursos superficiales puede considerarse como parte de la recarga lateral que ocurre de forma concentrada en quebradas debido a la precipitación. El total anual de precipitación se concentra en los meses de otoño e invierno, en eventos de unos pocos días de duración (CR2, 2022), así los escurrimientos superficiales en la cuenca son esporádicos, y ocurren de forma concentrada en los rellenos de quebradas.

Se puede suponer que la recarga asociada ocurre durante 3 días, de acuerdo a la distribución de la precipitación diaria (CR2, 2022), en dichas áreas de escurrimiento superficial. Considerando las quebradas ubicadas en las subcuencas al norte del acuífero, una conductividad hidráulica del lecho de 5 m/d de acuerdo a los resultados de los ensayos de infiltración realizados, y suponiendo un largo de relleno total de 26 km con un ancho de inundación de 3 m, persistente por 3 días al año, se estima una recarga entorno a los 38 l/s que se suma a la recarga lateral.

De acuerdo con la estratigrafía del sistema acuífero, las precipitaciones del margen oeste que recargan el estero Culebrón, se movería por el relleno somero de mayor permeabilidad en torno a la red de drenaje sin llegar al acuífero profundo de Pan de Azúcar al norte.

6.10.4 RECARGA DESDE CANALES (Rc)

La entrada a la cuenca desde el canal Bellavista puede considerarse del orden de 1500 l/s, la cual es distribuida en la red de canales, mientras que la salida por el estero Culebrón se registra en el orden de 300 l/s hasta el 2012 (CR2, 2022), siendo nula para los años posteriores.

Considerando de acuerdo a los ensayos de infiltración realizados una permeabilidad de 0.8 m/d, una longitud aproximada de canales de 60 km, y un ancho de canal de 0.8 m, se estima una infiltración en torno a 444 l/s, coherente con los 450 l/s de infiltración desde canales estimados al considerar un 30 % de pérdidas, de acuerdo a lo indicado por la Junta de Vigilancia.

6.10.5 EXTRACCIONES – BOMBEO (B)

Por otro lado, los derechos de agua subterránea alcanzan actualmente los 4500 l/s. Sin embargo, se desconoce el factor de uso real, la cantidad de pozos sin uso, y también la existencia de otros pozos no regularizados. Suponiendo un factor de uso del 25%, se estima una extracción promedio anual de 1125 l/s.

6.10.6 BALANCE HÍDRICO

Considerando como volumen de control el relleno sedimentario que se desarrolla entre El Peñon y la estación fluviométrica Culebrón en Sifón, correspondiente al acuífero principal en estudio (79 km² aproximadamente de extensión), se estableció un balance subterráneo, con un intercambio de flujo a través del río (Tabla 5.7).

Entradas – Salidas = Variación en el almacenamiento

$$(Q1+R+I_r) - (Q2+B+Er) = (Q1+R) - (Q2+ B) - F = DS$$

$$(Q1+R) - (Q2 + B) = DS - F$$

Q1: Caudales subterráneos de entrada al dominio subterráneo (Entrante por El Peñon)

Q2: Caudales subterráneos de salida desde el dominio subterráneo (hacia la costa en La Serena)

RI: Recarga lateral

Rp: Recarga por precipitación

Ri: Recarga por irrigación

Rc: Recarga desde canales

R: Recarga, $R = R_p + R_i + R_c + R_l = R_s + R_l$

B: Salida por bombeos

F: Intercambio de flujo superficial-subterráneo, $F = \text{Exfiltración río} - \text{Infiltración río} = E_r - I_r$

DS: Variación en el almacenamiento

Tabla 6.6. Balance acuífero.

Entradas [l/s]	
Q1	27
RI	38
Rp + Ri	0
Rc	450
Total	515
Salidas [l/s]	
B	1125
Q2	0
Total	1125
DS [l/s]	
DS	-610

Se puede estimar una entrada en torno a los 515 l/s para el acuífero Pan de Azúcar, la cual es excedida considerablemente por la descarga, produciendo una disminución en el almacenamiento en torno a los 600 l/s. Este valor es consistente con los 570 l/s, estimados al considerar una porosidad de 0.15, un descenso de 2 m por año de acuerdo a los niveles históricos observados, y un área de 60 km² para el acuífero.

La brecha aumentaría al considerar bombeos en torno a la magnitud de los derechos registrados, otros no regularizados y las posibles mejoras de la eficiencia de riego, ya sea del método de riego o el revestimiento de canales.

Esta aproximación entrega un orden de magnitud de las variables involucradas. Se debe considerar que en la realidad el sistema se presentaría en un estado transitorio durante el año, variando así los flujos durante éste y los almacenamientos en el tiempo.

6.11 DISCUSIÓN

En función del análisis conjunto del comportamiento estratigráfico, hidrodinámico, hidroquímico, de sus parámetros hidráulicos, así como del régimen de extracciones de los pozos es posible establecer que en Pan de Azúcar el sistema acuífero de Pan de Azúcar está conformado por dos sistemas diferenciales, uno superficial y otro profundo.

El acuífero profundo corresponde a aguas fósiles del tipo cloruradas sódica, presentes en los depósitos de mediana a baja consolidación de la Fm. Confluencia, con un reducido aporte del acuífero superior.

Al norte y por el sector occidental, dicho acuífero estaría limitado por la Fm. Coquimbo y en la base y al sur por estratos geológicos consolidados de muy baja permeabilidad de la Fm. Arqueros conformada por areniscas y calizas bioclásticas e intrusivos del Cretácico y Jurásico

El acuífero superficial corresponde a los rellenos sedimentarios actuales de la unidad Superior, cuyas recargas provienen directamente de la infiltración por precipitaciones y aportes del borde de la cuenca. de aguas continentales provenientes de las laderas y las quebradas Maitencillos y La Cortadera. Sus aguas corresponden al tipo bicarbonatado cálcico, y presenta una conductividad eléctrica correspondiente a la cuarta parte que la del acuífero inferior.

Los niveles estáticos del acuífero inferior se emplazan en el orden de 60-70 m de profundidad al año 2022 y se registraron mayor profundidad en las zonas con mayores extracciones. En el pozo AS. Santa Amalia, emplazado en el acuífero superior, el nivel estático se midió a los 10 m de profundidad, a una cota de 20 m por sobre los registrados en el resto del sistema de Pan de azúcar.

Por lo cual el sistema acuífero superior que se drena hacia el oeste por la quebrada Lagunillas, recarga el sistema acuífero de Pan de Azúcar, que actualmente, presenta descensos generados por las extracciones de agua subterránea. Lo anterior es coherente con la hidroquímica dado que las variaciones de la calidad de las aguas podrían ser explicadas por la mezcla de las aguas de menor salinidad del sur, con las aguas del sistema acuífero de Pan de azúcar.

7 ANÁLISIS DE ZONAS DE INTERÉS DE LA DOH

La DOH, en consideración de estudios previos, ha definido cuatro zonas de interés para la extracción de aguas subterráneas (Figura 7.1).

En el presente Apartado, se analizan en detalle dichas zonas, considerando los siguientes aspectos tanto administrativos como e hidrogeológicos:

- Ubicación en bienes nacionales de uso público
- Radios de protección de los derechos de agua (200 m)
- Radios de protección de SSR (1000 m)
- Registro actualizado de niveles y caudales del catastro realizado el año 2022
- Caudales de extracción registrados en la DGA

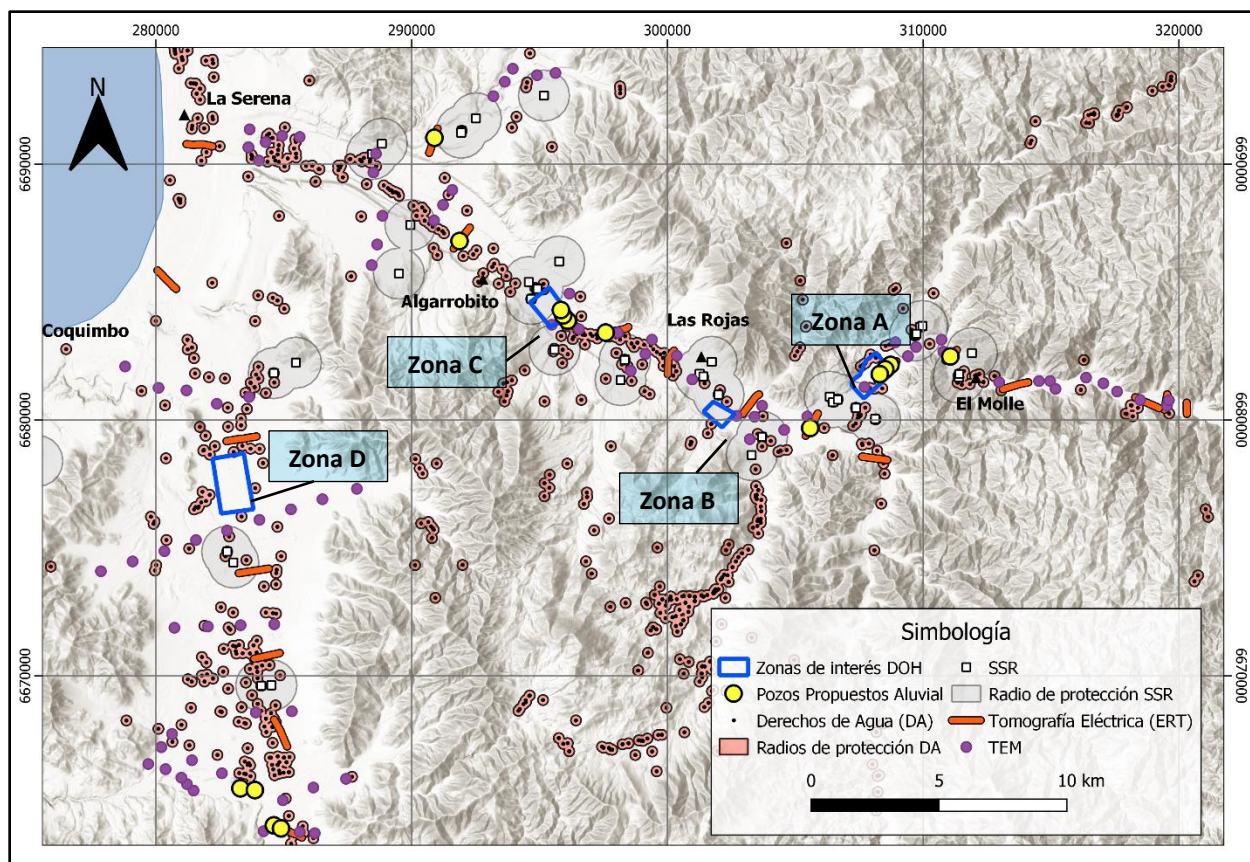


Figura 7.1. Zonas de interés de la DOH. Fuente: Elaboración Propia.

En función de los caudales registrados en el catastro de pozos, los mayores caudales de extracción en la cuenca del río Elqui bajo, se distribuyen en las zonas representadas de la Figura 7.2, observándose caudales por sobre los 10 l/s, dichas zonas coinciden con las zonas A y C de interés de la DOH.

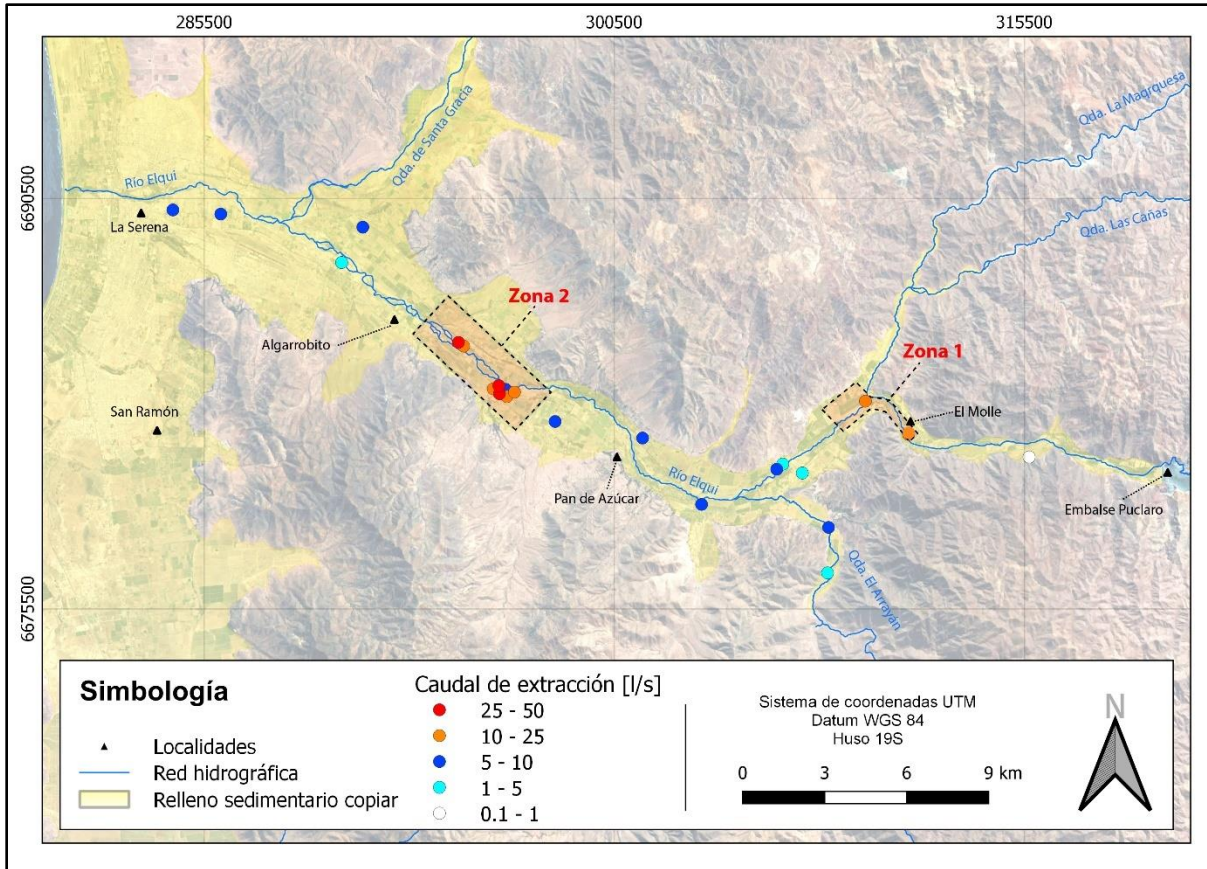


Figura 7.2. Zonas de mayores caudales de extracción actuales en torno al río Elqui Bajo. Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo, se identifica del catastro de pozos que en el sector de Pan de Azúcar los caudales de extracción son superiores a los 10 l/s en las zonas 3 y 4 de la Figura 7.3.

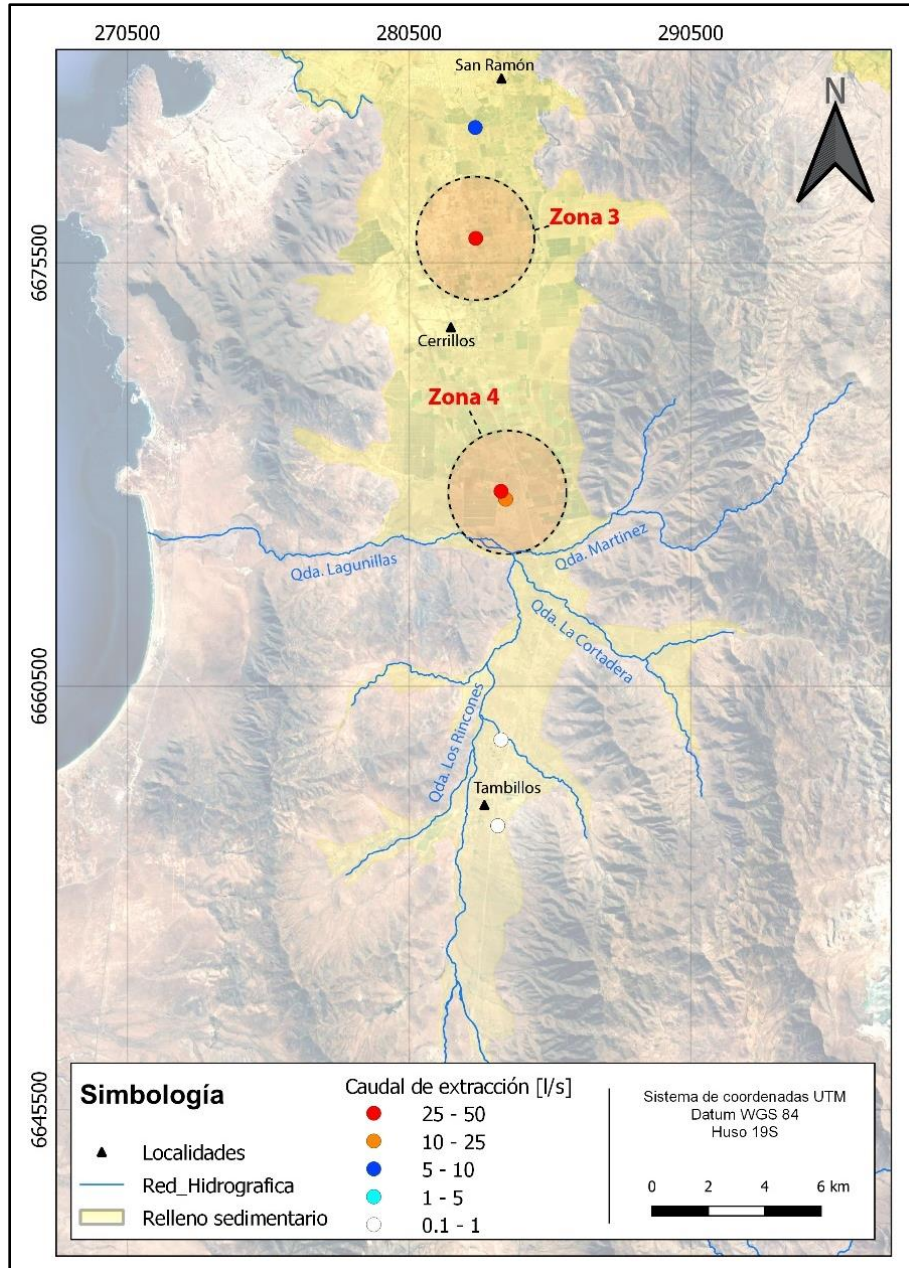


Figura 7.3. Zonas de mayores caudales de extracción actuales en el sector Pan de Azúcar.
Fuente: Elaboración propia.

7.1 ZONA A

La Zona A se ubica al noreste de la localidad de Pelicana y parte de ella interfiere con los radios de protección de nueve derechos de agua y con los radios de protección de tres sistemas sanitarios rurales.

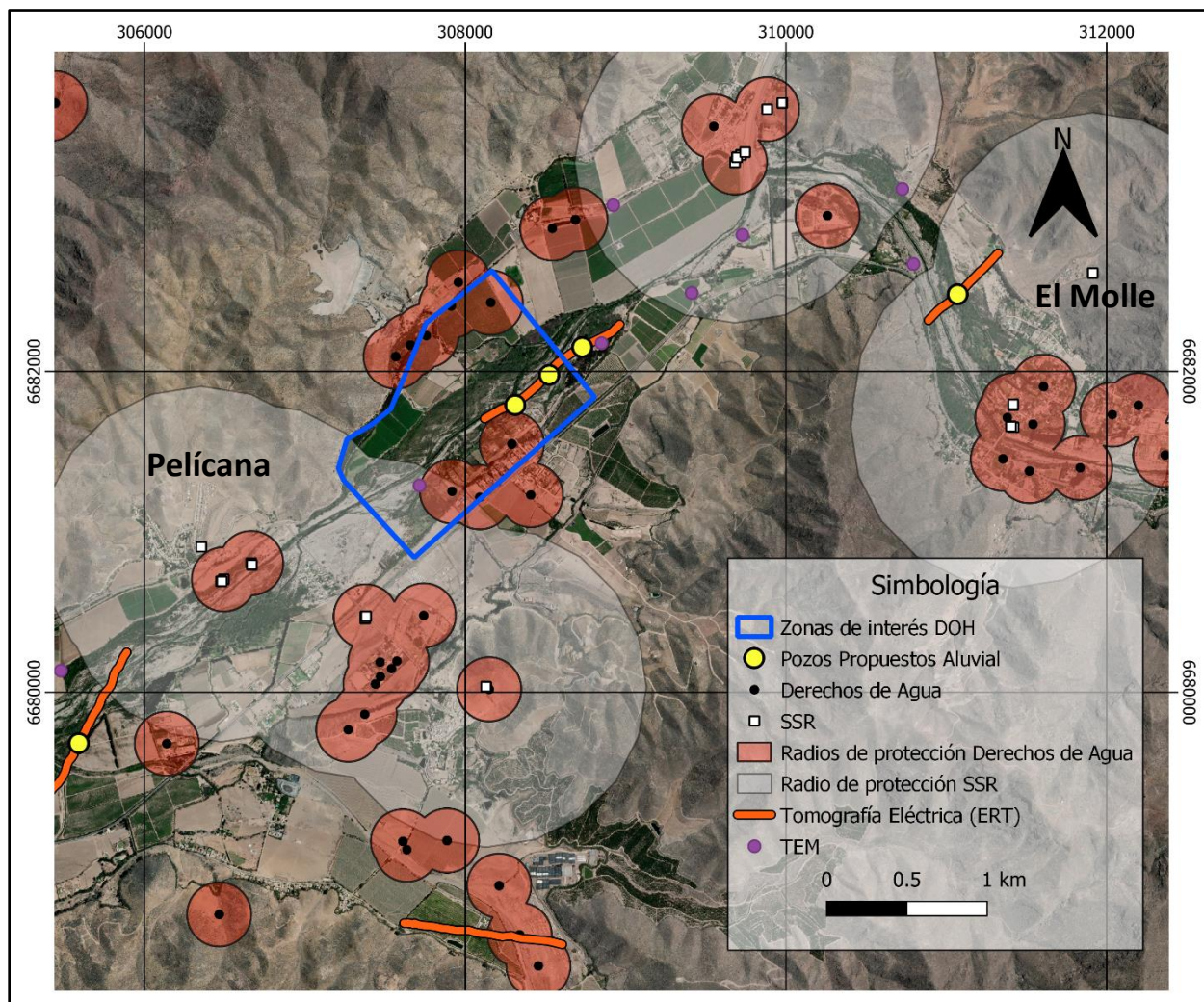


Figura 7.4. Zona A. Fuente: Elaboración propia.

Sobre el área disponible para emplazar nuevos derechos y dentro de un BNUP, se realizó la tomografía eléctrica ERT-5 (Figura 7.5), en la cual se identificó la presencia de un basamento a 130 m de profundidad y un relleno sedimentario heterogéneo, en el cual las resistividades menores a 30 Ohm-m podrían asociarse a estratos con una mayor proporción de finos y menores

rendimientos. Estos dominios de baja resistividad exhiben una mayor densidad hacia el sureste, por lo cual los rendimientos de pozos profundos podrían disminuir en esta misma dirección.

Las resistividades mayores a 30 Ohm-m, se asocian a secuencias de granulometrías gruesas de mayor permeabilidad y mejores rendimientos en la extracción de aguas subterráneas, las cuales serían de interés hidrogeológico.

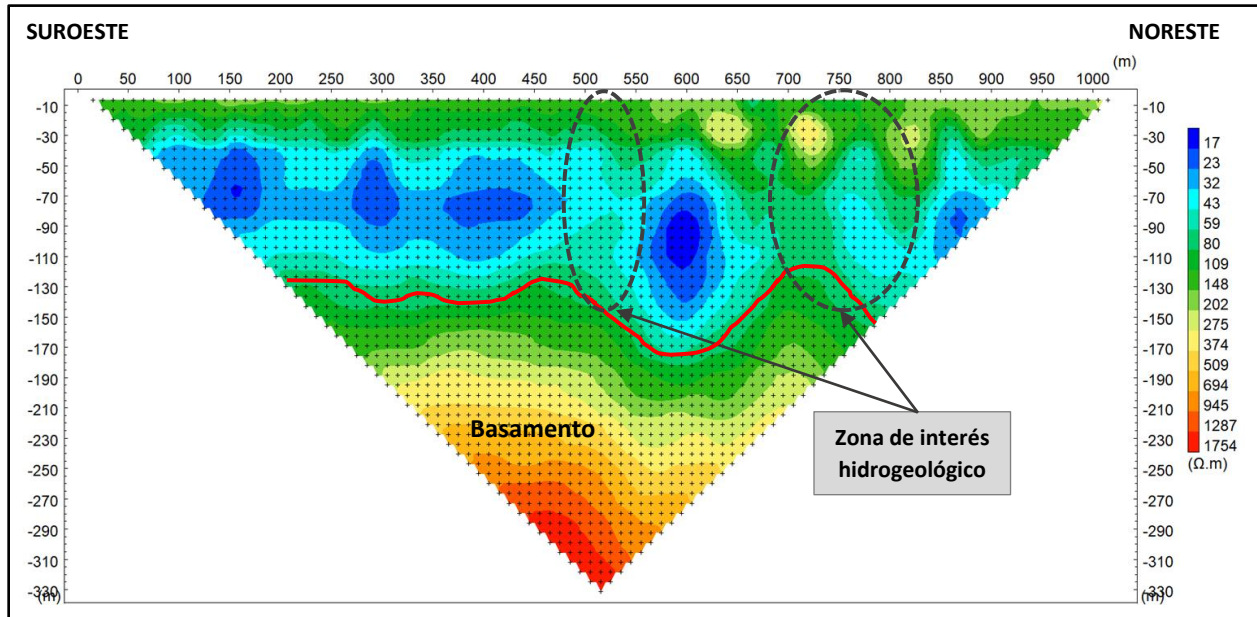


Figura 7.5. Tomografía eléctrica ERT-5. Fuente: Elaboración Propia.

Según el modelo conceptual desarrollado y en consideración de los caudales de extracción catastrados y registrados en la DGA, en la zona A de interés de la DOH, se estiman caudales de extracción de entre 10-20 l/s.

7.2 ZONA B

La Zona B se ubica al sureste de la localidad de Las Roja y se encuentra interfiriendo con un radio de protección de 1000m de un SSR, el área restante de esta zona se encuentra emplazada sobre predio privados, por lo cual no es factible administrativamente realizar una perforación.

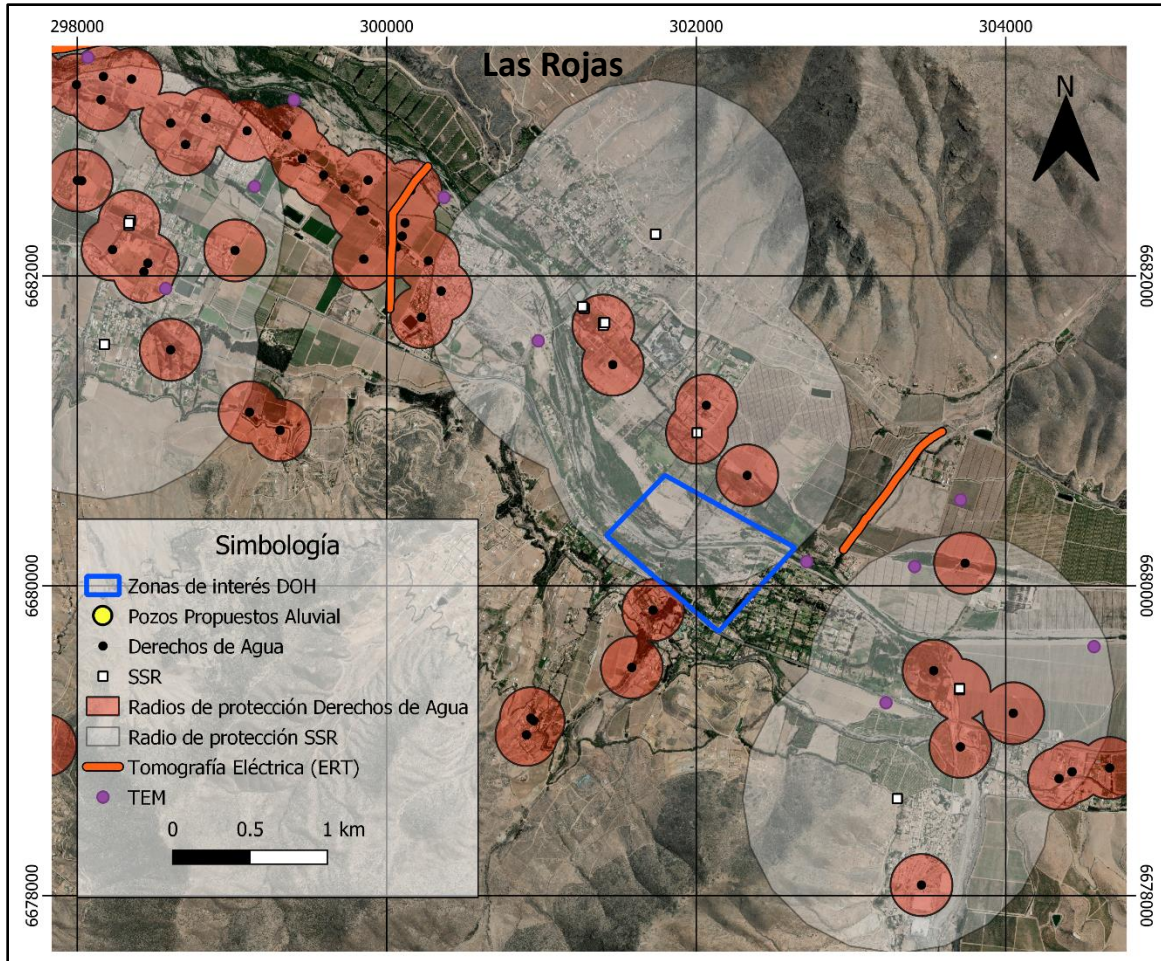


Figura 7.6. Zona B. Fuente: Elaboración propia.

7.3 ZONA C

La Zona C se ubica al sureste de la localidad de Altovalsol (Figura 7.7) y parte de ella se encuentra interfiriendo por el poniente, con los radios de protección de tres sistemas sanitarios rurales y dos derechos de agua.

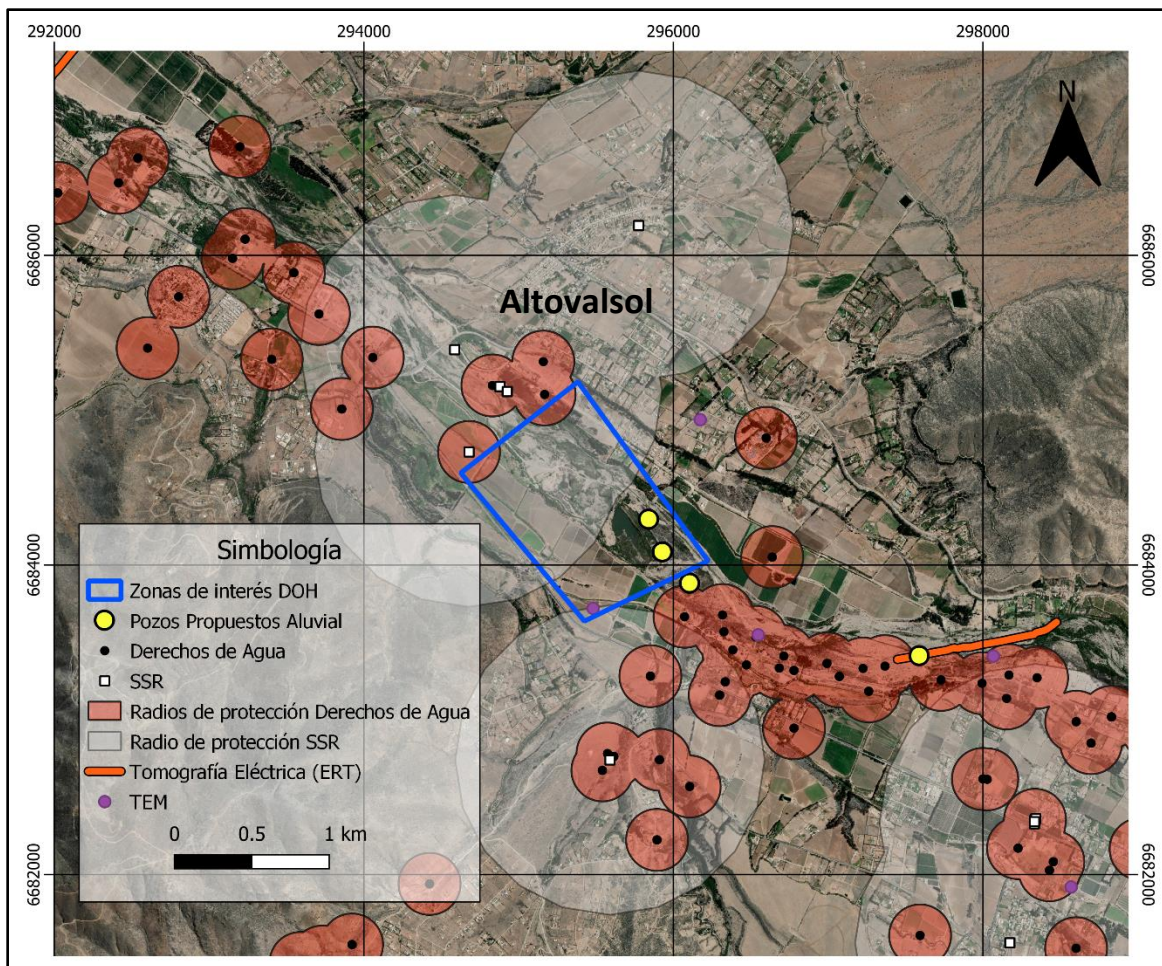


Figura 7.7. Zona C. Fuente: Elaboración propia.

En el entorno de la zona C se cuenta con la información de cuatro TEM y la tomografía eléctrica ERT-10 realizada, en los cuales se identifican resistividades del relleno sedimentario, por sobre los 30 ohm-m, que son favorables para la extracción de aguas subterráneas.

Esto, es consistente con las permeabilidades obtenidas en ensayos de bombeo y con los caudales de extracción registrados en la DGA y catastrados en el presente estudio, que rondan entre 10 y 40 l/s.

7.4 ZONA D

La Zona B está emplazada sobre predios privados y administrativamente no es posible la realización de perforaciones.

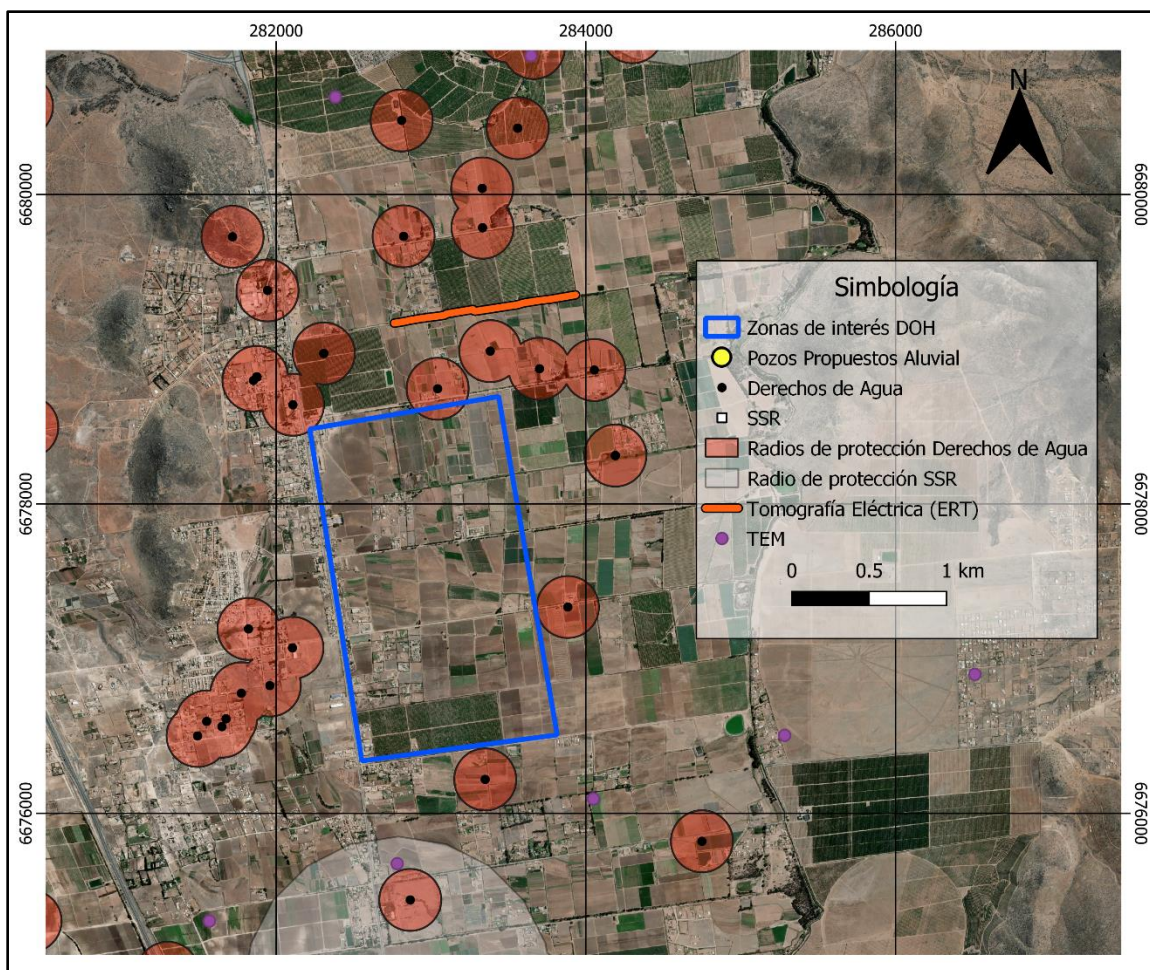


Figura 7.8. Zona D. Fuente: Elaboración propia.

8 UBICACIÓN OPTIMIZADA DE PERFORACIÓN

En consideración del registro de caudales y niveles del catastro de pozos, de los caudales otorgados por la DGA, que entregan información referencial de los caudales de extracción de las zonas y de los resultados resistivos de las tomografías eléctricas, se han propuesto quince puntos de interés para la extracción de aguas subterráneas, de los cuales once han sido emplazados en el acuífero de Elqui y cuatro en el acuífero de Pan de Azúcar (Tabla 8.1, Figura 8.1 y Anexo H).

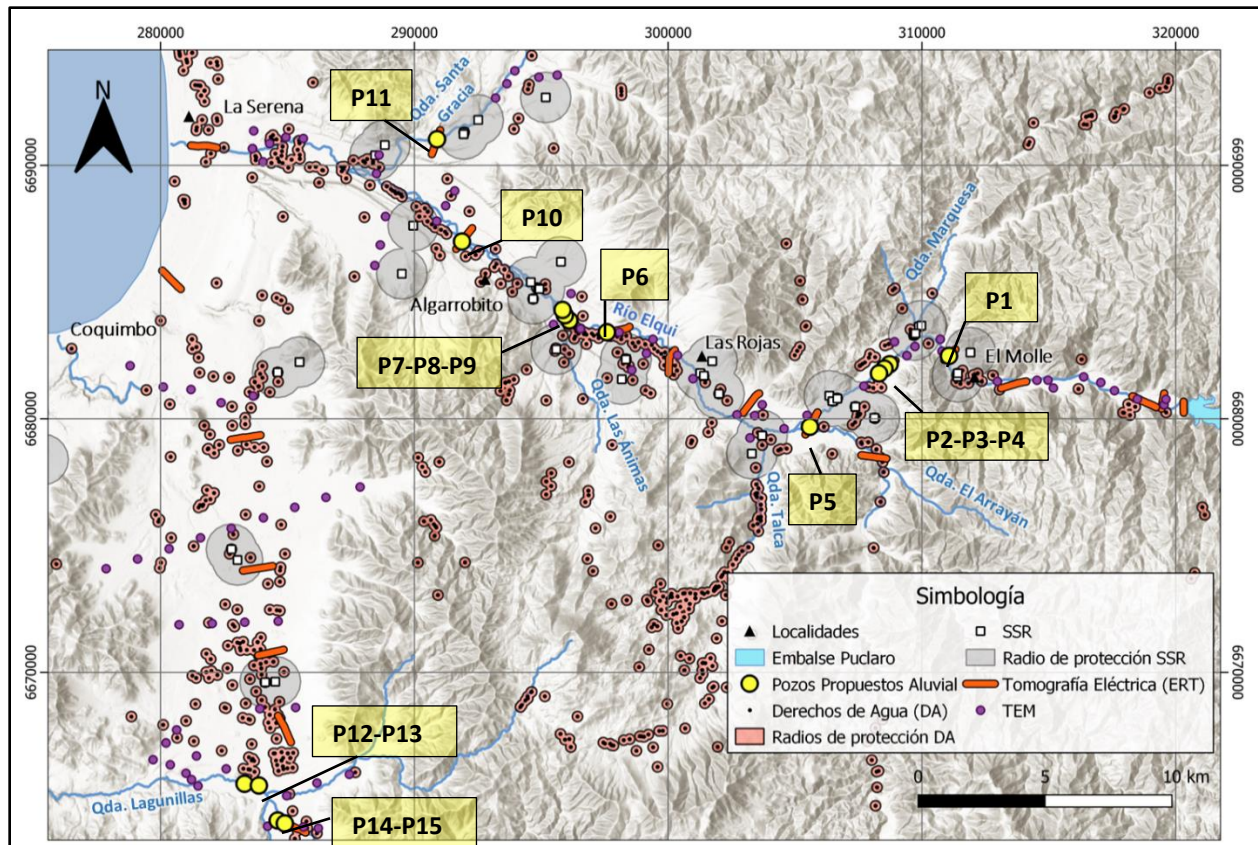


Figura 8.1 Mapa de la ubicación de prospecciones propuestas. Fuente: Elaboración Propia.

Los puntos de perforación propuestos (Figura 8.1) se han emplazado cercanos a canales existentes, en lechos de río que deberían corresponder a un bien nacional de uso público (BNUP) y fuera de los radios de protección de los derechos de agua subterránea (200 m) y de los APR (1000 m).

Previo a la perforación, se recomienda validar las distancias del punto a derechos subterráneos y pozos cercanos, dado que la proyección de datos con distinto Huso y Datum podría generar errores de entre 17 a 40 m de posicionamiento.

El caudal estimado para los puntos propuestos considera la ubicación optimizada de la perforación y los registros de caudales actualizados en el catastro de pozos.

Tabla 8.1 ubicaciones propuestas. Fuente: Elaboración Propia.

Nombre	Coordenadas UTM		Prof. Pozo [m]	Caudal estimado [l/s]
	Este	Norte		
POZO 1	311071	6682479	100	~ 10 l/s
POZO 2	308729	6682150	130	10 - 20 l/s
POZO 3	308524	6681977	120	10 - 20 l/s
POZO 4	308312	6681790	120	10 - 20 l/s
POZO 5	305607	6679675	130	3-6 l/s
POZO 6	297589	6683413	85	7-15 l/s
POZO 7	296102	6683987	120	10 - 40 l/s
POZO 8	295929	6684084	120	10 - 40 l/s
POZO 9	295840	6684295	120	10 - 40 l/s
POZO 10	291921	6687023	75	2-10 l/s
POZO 11	290893	6691029	100	Indeterminado
POZO 12	283304	6665596	100	2-10 l/s
POZO 13	283871	6665528	120	2-10 l/s
POZO 14	284613	6664149	100	2-10 l/s
POZO 15	284893	6664031	120	2-10 l/s

Dado los caudales estimados y la similitud en las características estratigráficas, se sugiere perforar en un diámetro externo de 12" y habilitación en diámetro de 8", mediante método de circulación con polímeros biodegradable, no bentoníticos.

Para evitar arrastres de sedimentos hacia el interior del pozo y una posible colmatación de las cribas, es relevante considerar la selección del macizo de gravas, la ubicación de las rejillas y su apertura de ranura en función de la granulometría del estrato acuífero.

Dado lo anterior, se recomienda efectuar un muestreo del cutting, que sea representativo, realizándose ensayos granulométricos en los tramos de interés.

A continuación, se presenta una ficha resumen de las características hidrogeológicas y constructivas de cada punto propuesto. Se debe tener presente que el anteproyecto presentado es referencial y debe redefinirse en función del avance de la perforación y los resultados granulométricos.

8.2 POZO P2

Pozo de 130 m proyectado desde la ERT-5 a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Titon, se estima un caudal de entre 10-20 l/s. Dada la heterogeneidad observada en la ERT, se podrían perforar capas de baja permeabilidad que disminuyan el rendimiento esperado.

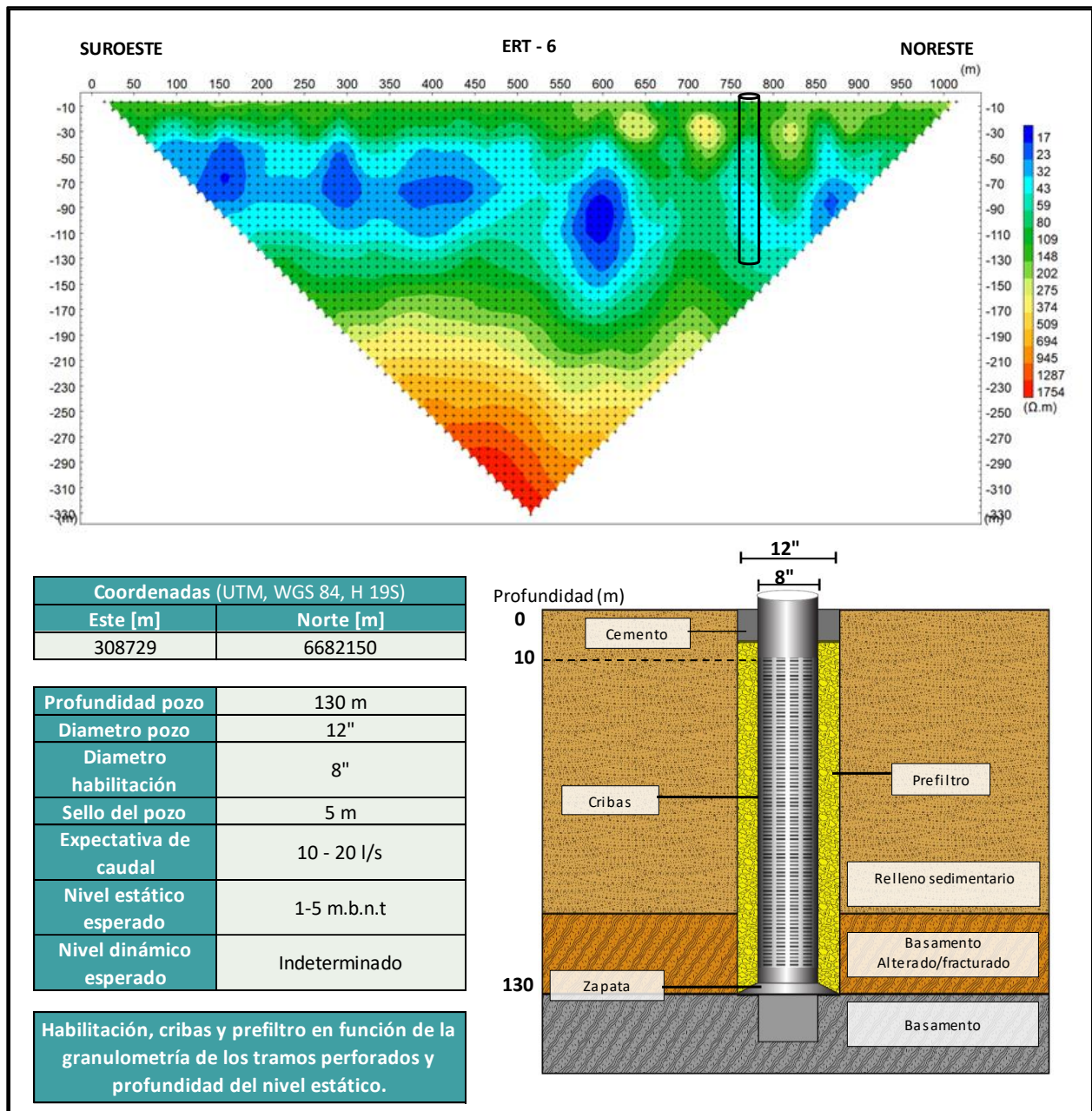


Figura 8.3 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P2. Fuente: Elaboración propia.

8.3 POZO P3

Pozo de 120 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Titon. Este se emplaza al sureste de la tomografía ERT-5 teniendo como supuesto una continuidad de los dominios resistivos y de la profundidad del basamento.

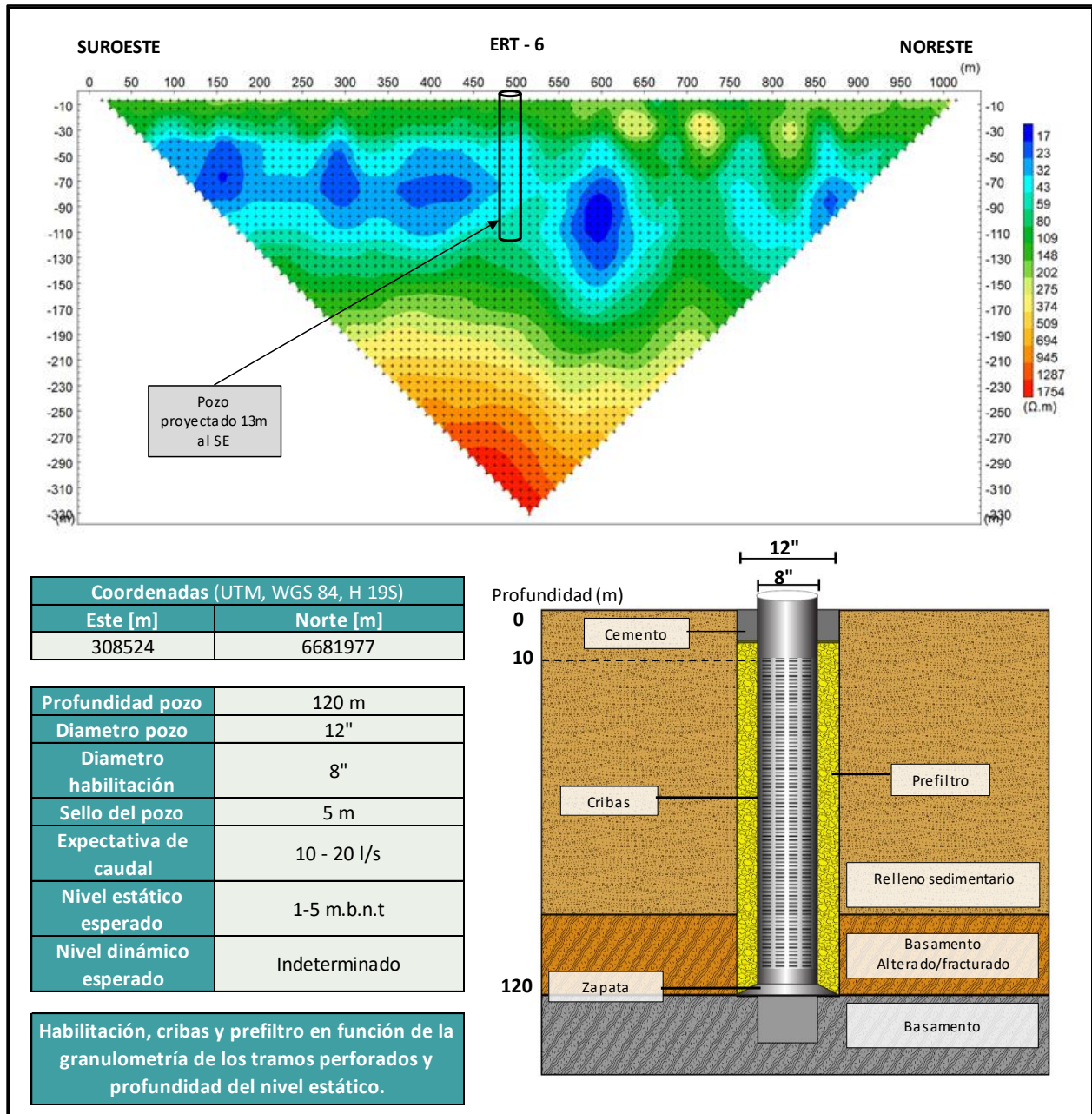


Figura 8.4 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P3. Fuente: Elaboración propia.

8.5 POZO P5

Pozo de 130 m de profundidad emplazado sobre un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Bellavista.

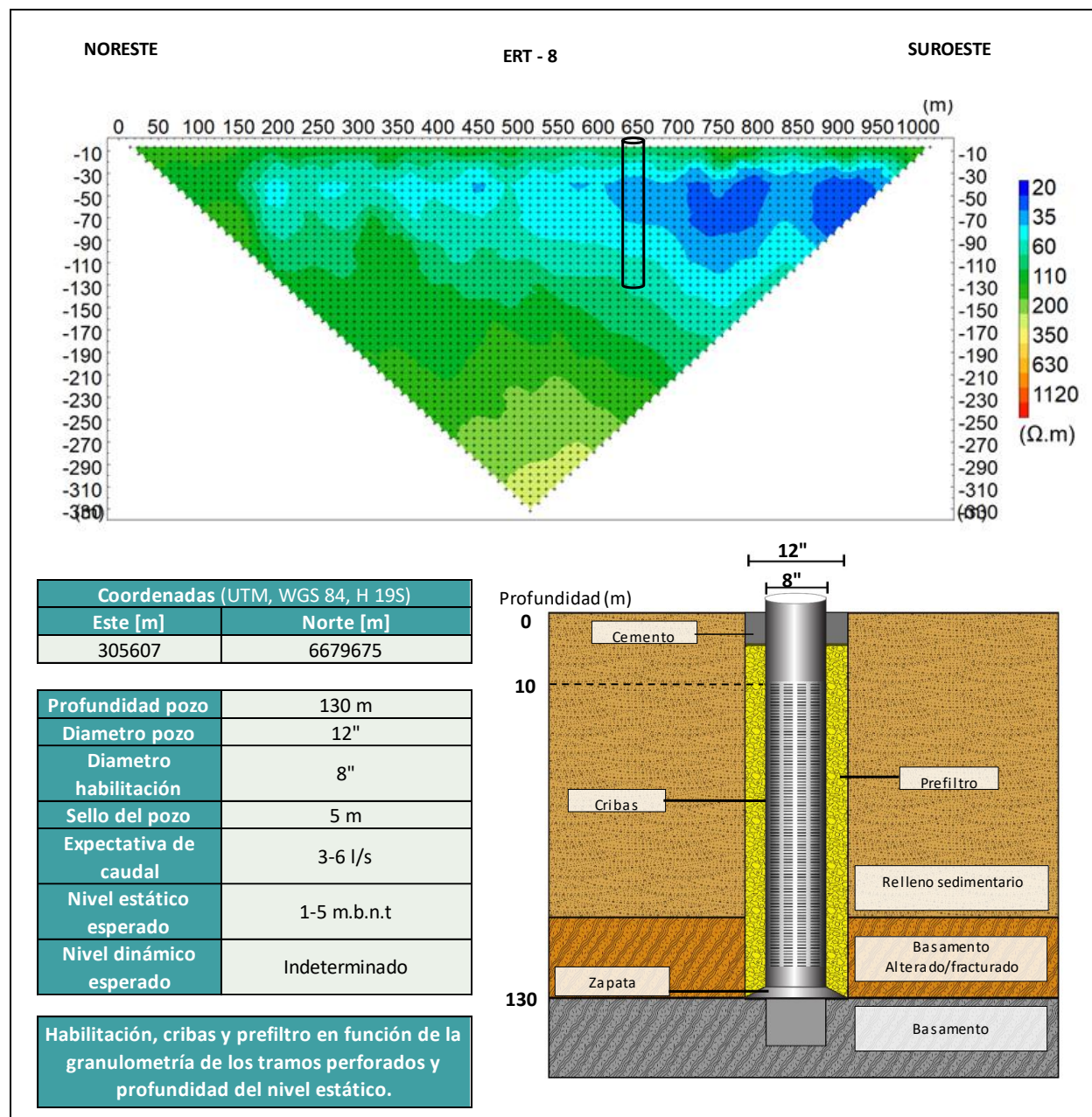


Figura 8.6 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P5. Fuente: Elaboración propia.

8.6 POZO P6

Pozo de 85 m de profundidad emplazado sobre un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Pampa.

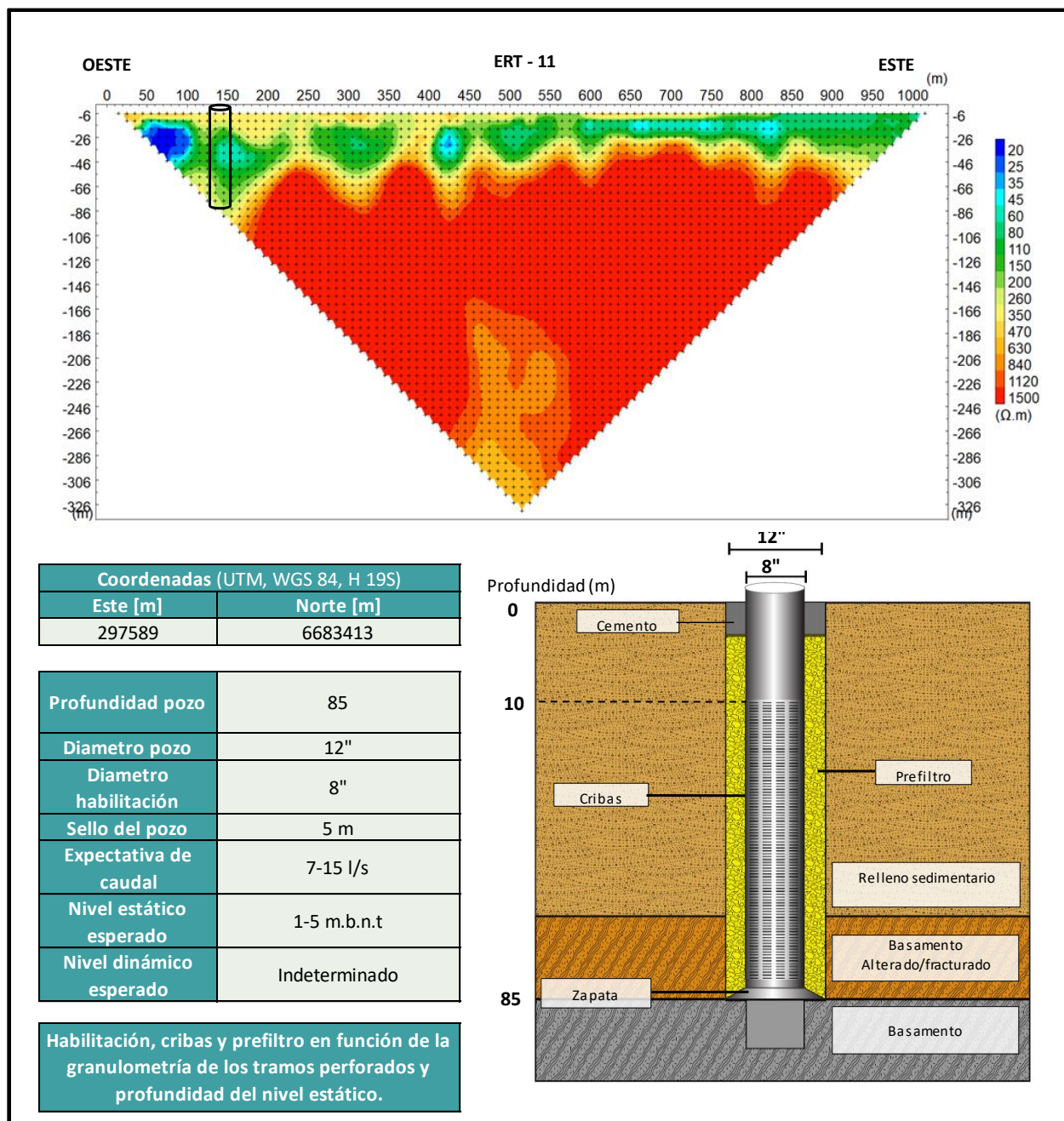


Figura 8.7 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P6. Fuente: Elaboración propia.

8.7 POZO P7

Pozo de 120 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Coquimbito. Se debe considerar la heterogeneidad del sistema acuífero, por lo cual la proyección a ~ 450 m al sureste implica una mayor incertidumbre de las características hidrogeológicas del punto.

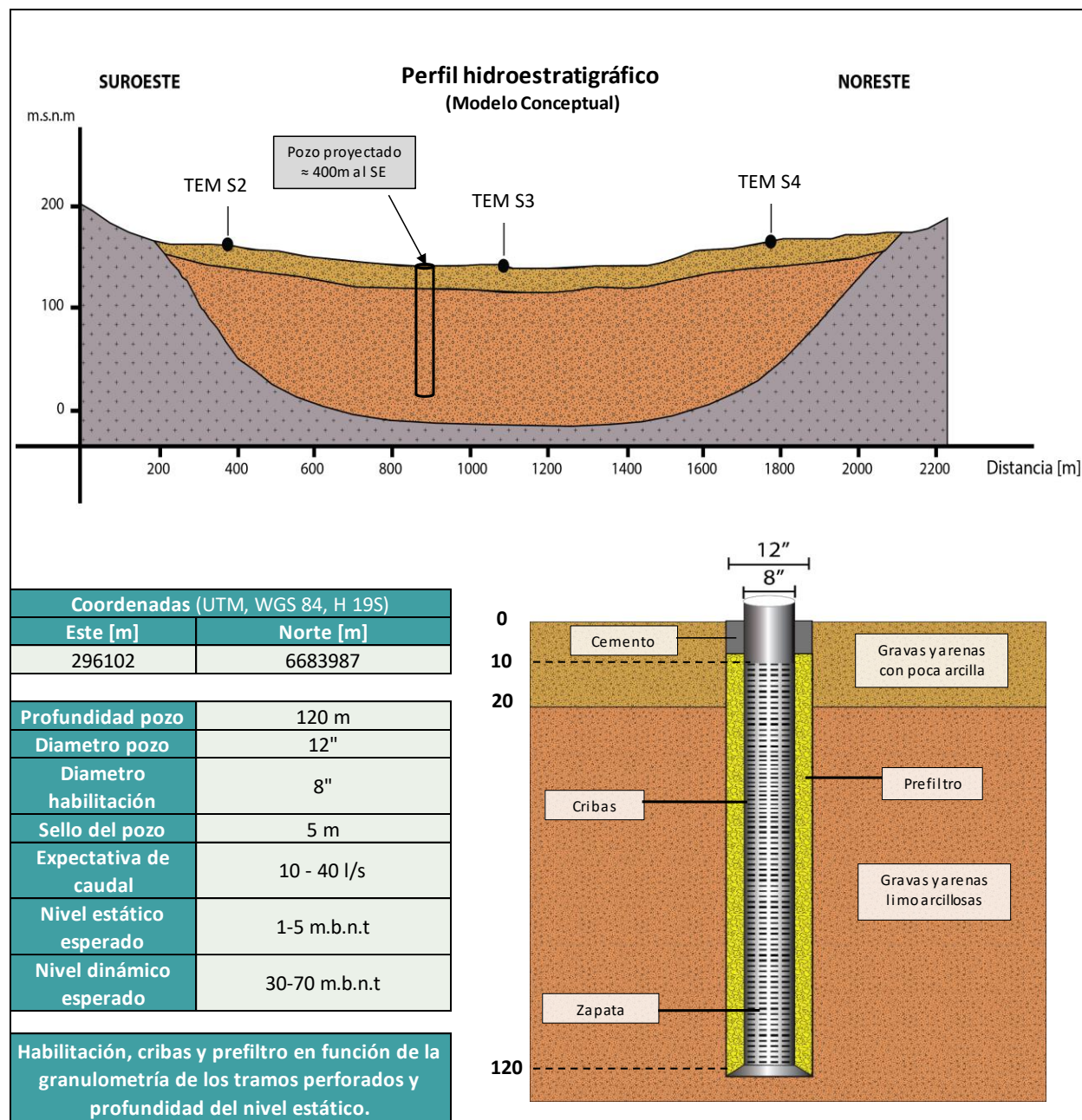


Figura 8.8 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P7. Fuente: Elaboración propia.

8.8 POZO P8

Pozo de 120 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Coquimbito. Este se emplaza al sureste de un conjunto de TEM teniendo como supuesto una continuidad de los dominios resistivos y de la profundidad del basamento.

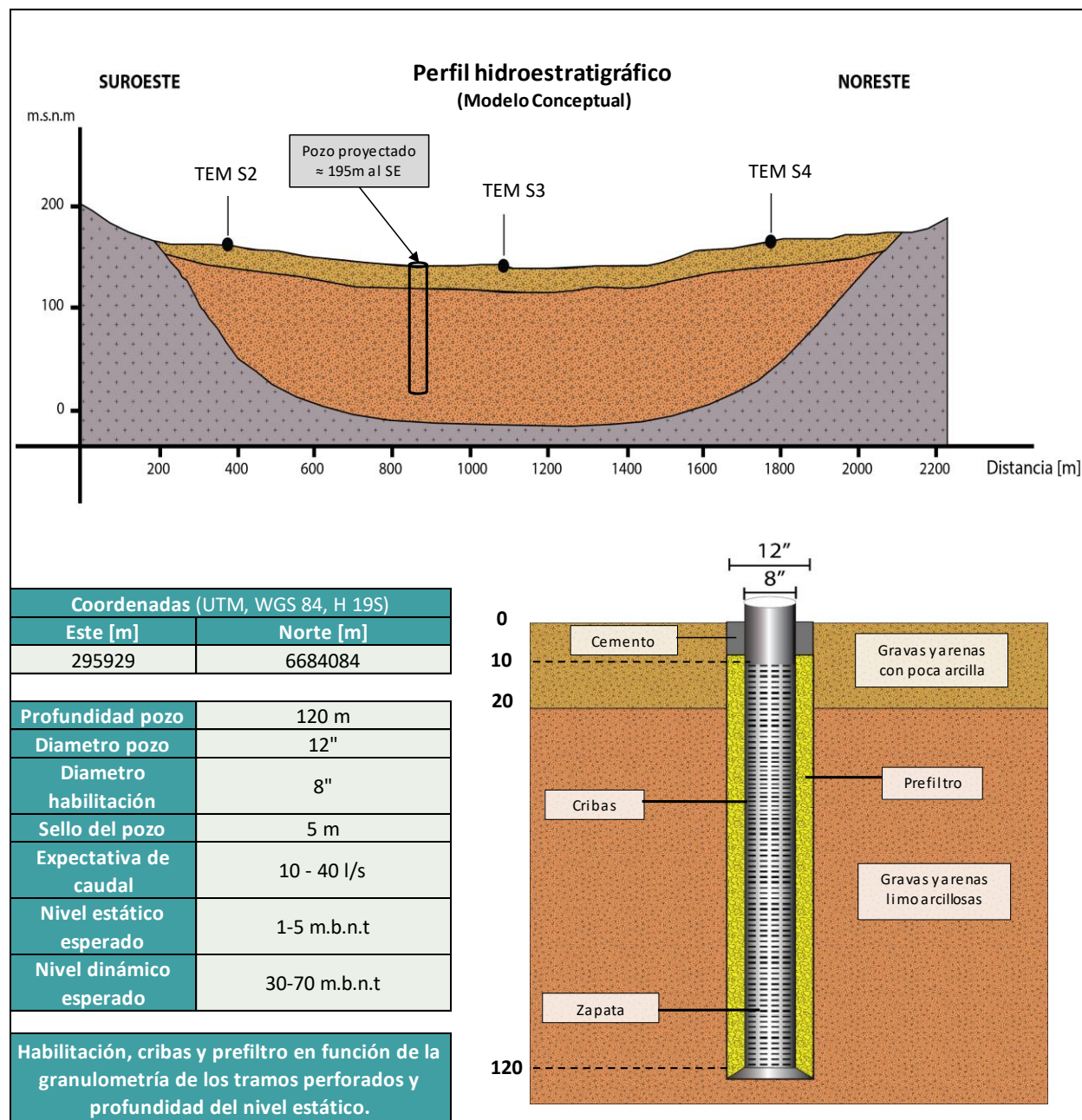


Figura 8.9 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P8. Fuente: Elaboración propia.

8.9 POZO P9

Pozo de 120 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Coquimbito. Este se emplaza al sureste de un conjunto de TEM teniendo como supuesto una continuidad de los dominios resistivos y de la profundidad del basamento.

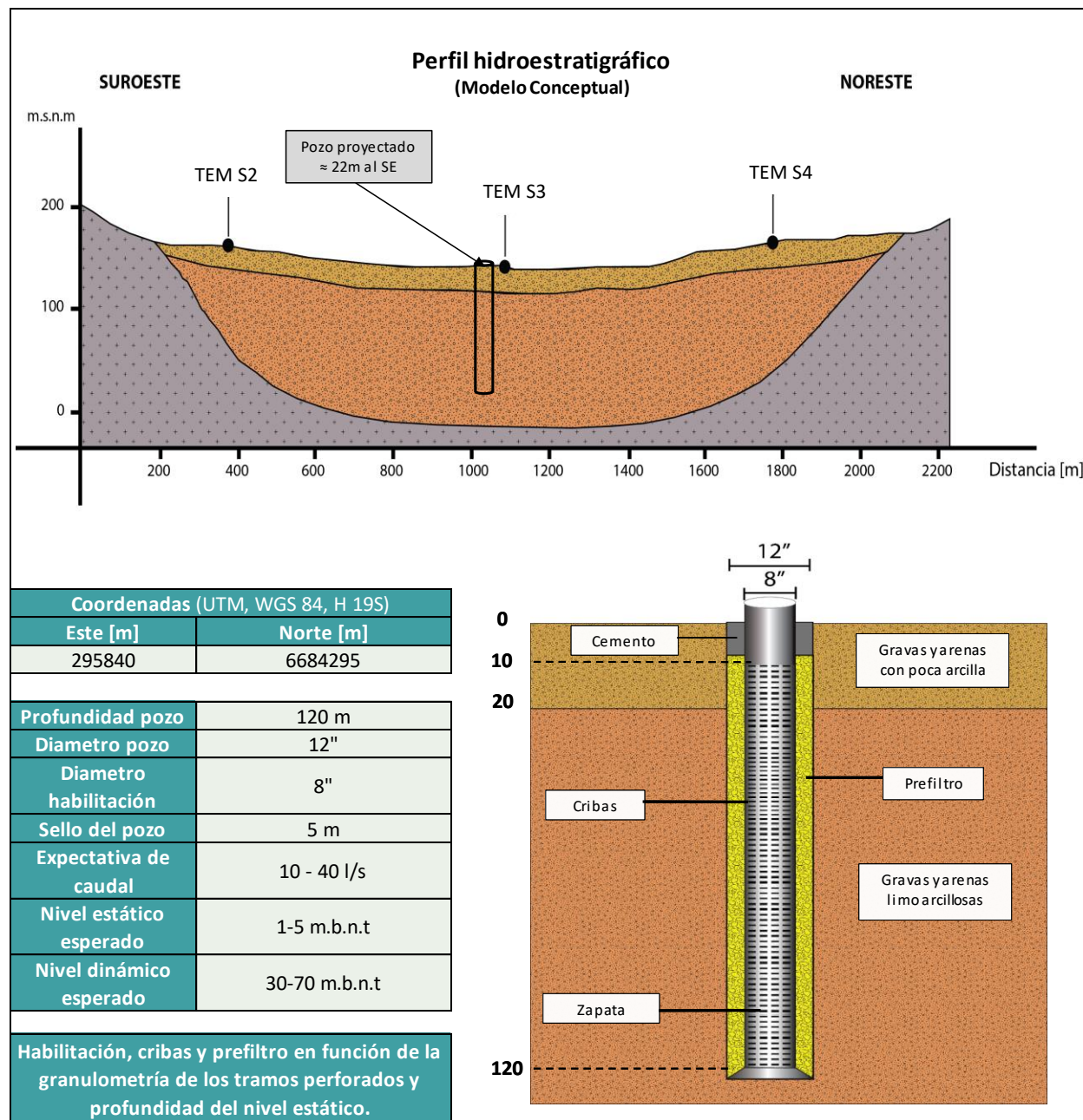


Figura 8.10 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P9. Fuente: Elaboración propia.

8.10 Pozo P10

Pozo de 75 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Pampa.

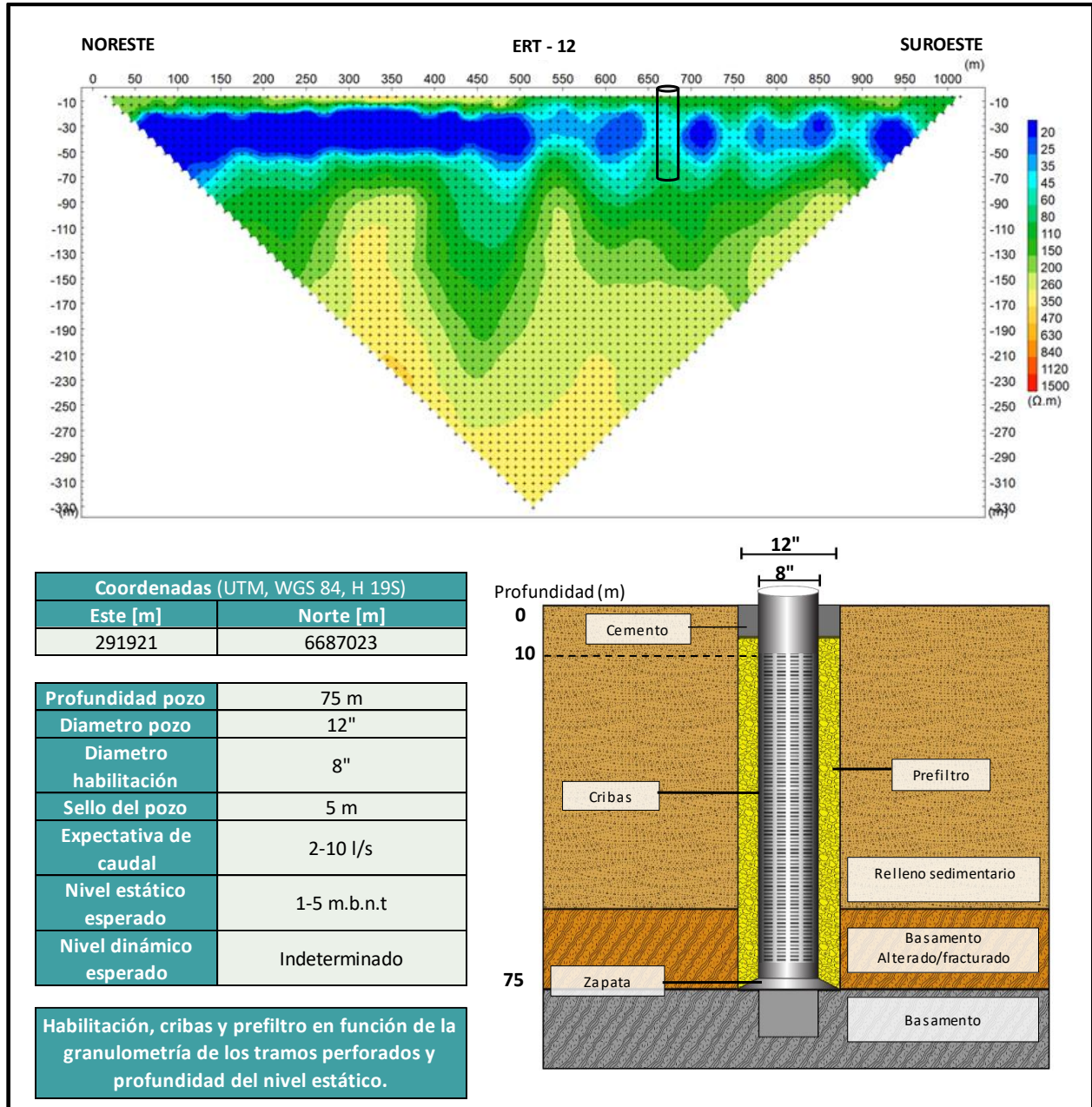


Figura 8.11 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P10. Fuente: Elaboración propia.

8.11 Pozo P11

Pozo de 80 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal más cercano Coquimbito. Este se emplaza al este de la tomografía ERT-12 teniendo como supuesto una continuidad de los dominios resistivos y de la profundidad del basamento.

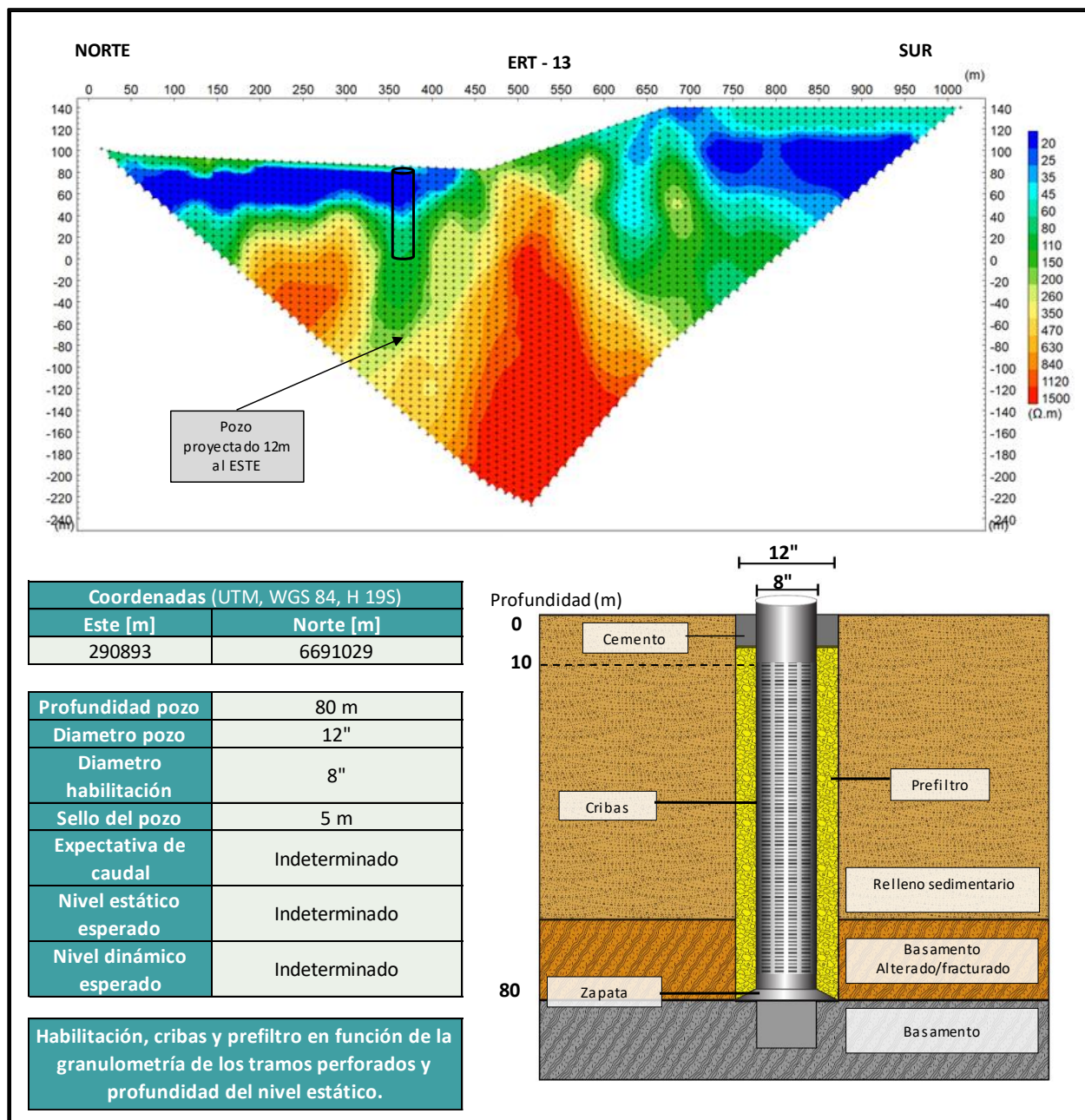


Figura 8.12 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P11. Fuente: Elaboración propia.

8.12 Pozo P12

Pozo de 100 m proyectado a un BNUP. Se debe considerar la heterogeneidad del sistema acuífero, por lo cual la proyección a 250 m al suroeste implica una mayor incertidumbre de las características hidrogeológicas del punto.

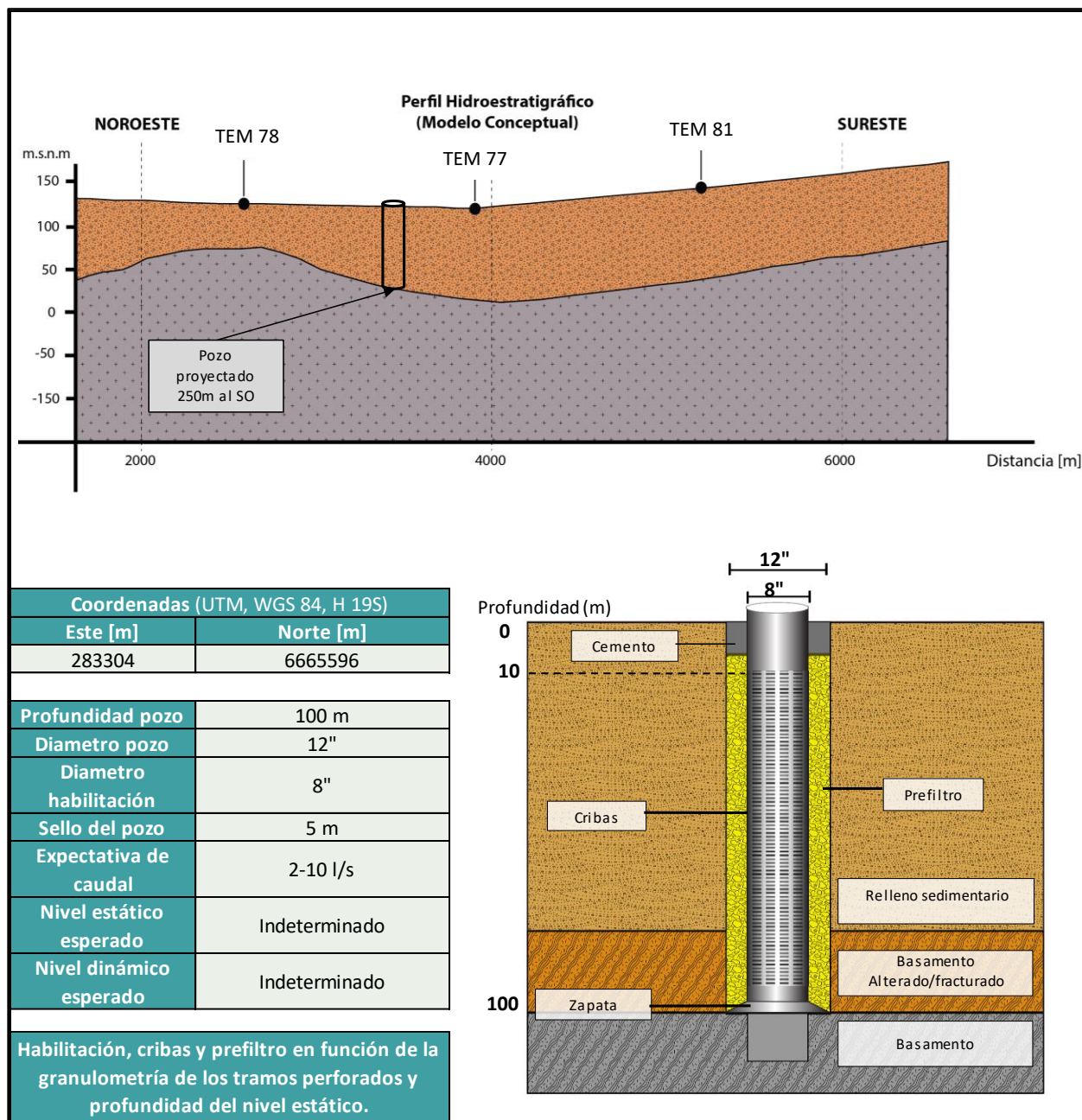


Figura 8.13 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P12. Fuente: Elaboración propia.

8.13 Pozo P13

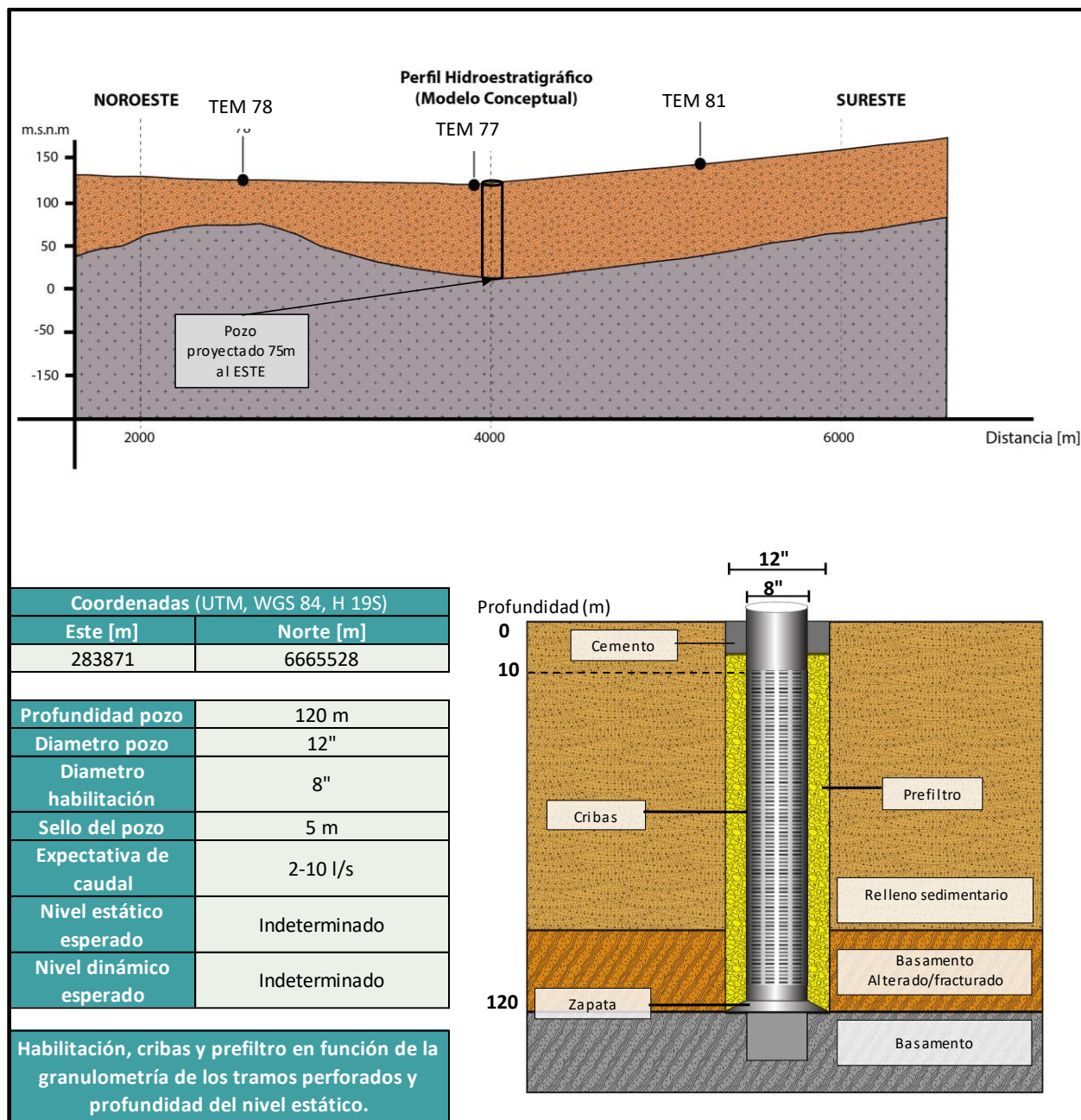


Figura 8.14 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P13. Fuente: Elaboración propia.

8.14 Pozo P14

Pozo de 100 m proyectado a un BNUP. Se debe considerar la heterogeneidad del sistema acuífero, por lo cual la proyección a 135 m al oeste implica una mayor incertidumbre de las características hidrogeológicas del punto.

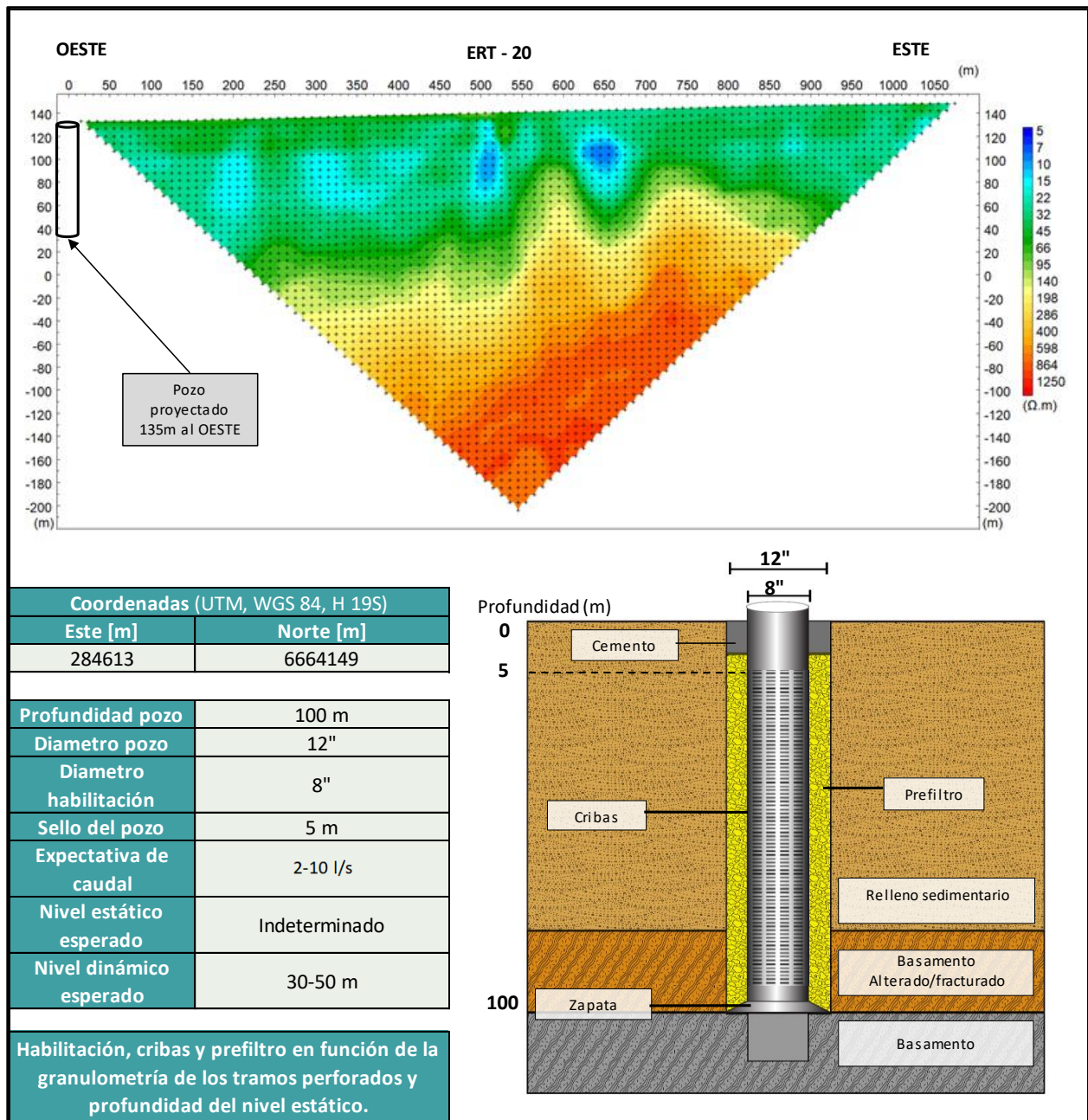


Figura 8.15 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P14. Fuente: Elaboración propia.

8.15 Pozo P15

Pozo de 120 m proyectado a un BNUP y que podría beneficiar al canal cercano Molino de Cerrillos. Se debe considerar la heterogeneidad del sistema acuífero, por lo cual la proyección a 345 m al sureste implica una mayor incertidumbre de las características hidrogeológicas del punto.

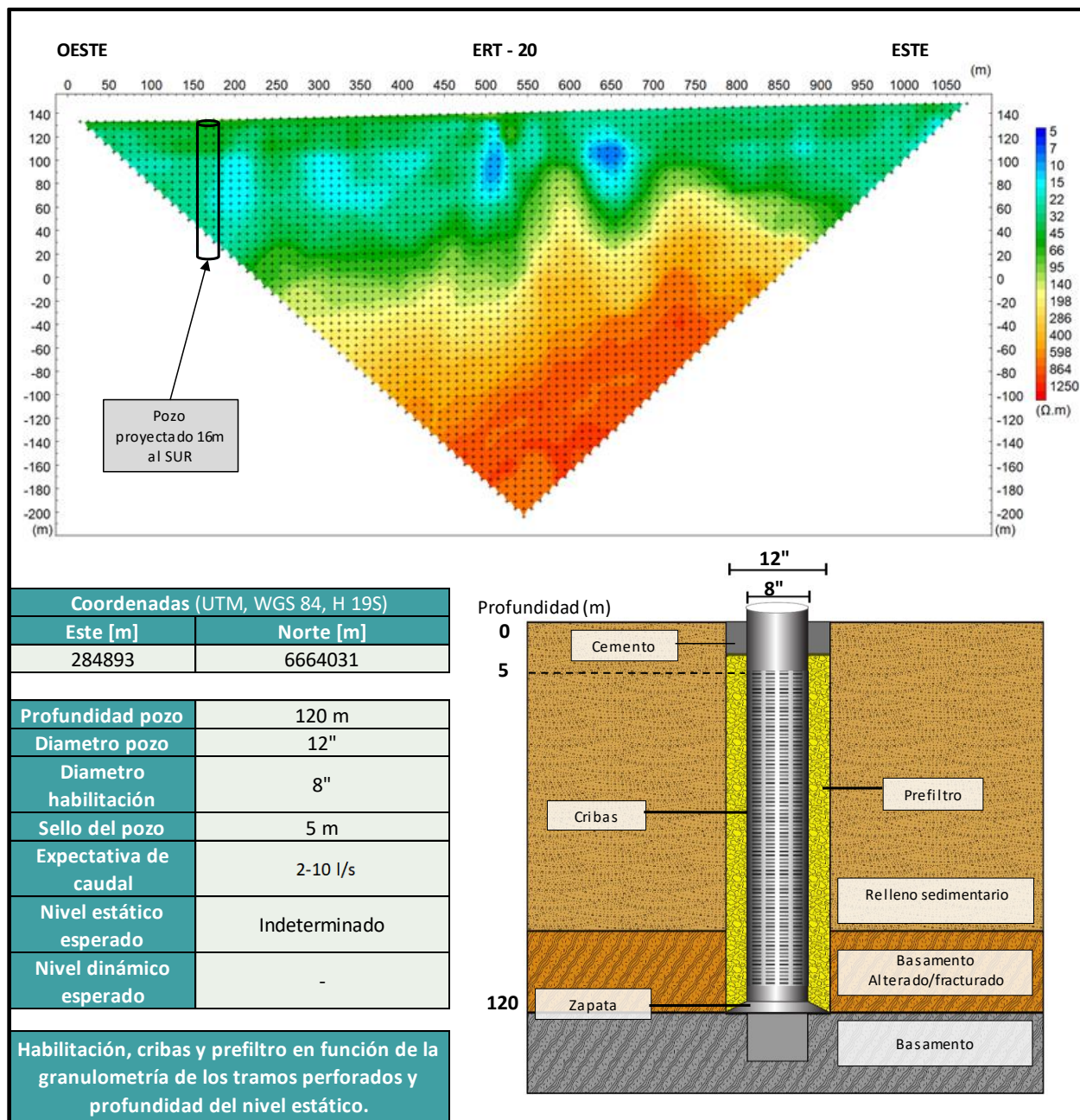


Figura 8.16 Ficha resumen del pozo de perforación propuesto P15. Fuente: Elaboración propia.

9 MODELO NUMÉRICO

Con el objetivo de evaluar los caudales de extracción de las nuevas captaciones propuestas, los efectos en el sistema acuífero del río Elqui y su sustentabilidad en el tiempo, se ha desarrollado un modelo numérico de flujo a escala regional (Figura 9.2) con el código de diferencias finitas MODFLOW, en su interfaz VISUAL MODFLOW, cuyos ejecutables se presentan en el Anexo I.

También ha sido objetivo del modelo numérico el validar el modelo conceptual desarrollado y proporcionar a la DOH una herramienta de gestión del acuífero.

Se destaca que el modelo numérico se ha calibrado en coherencia con la geometría del acuífero determinada en el modelo conceptual, los parámetros hidráulicos determinados en los ensayos de bombeo y asumiendo propiedades equivalentes en la vertical. Así mismo se destaca la coherencia del balance hídrico del modelo numérico con el conceptual.

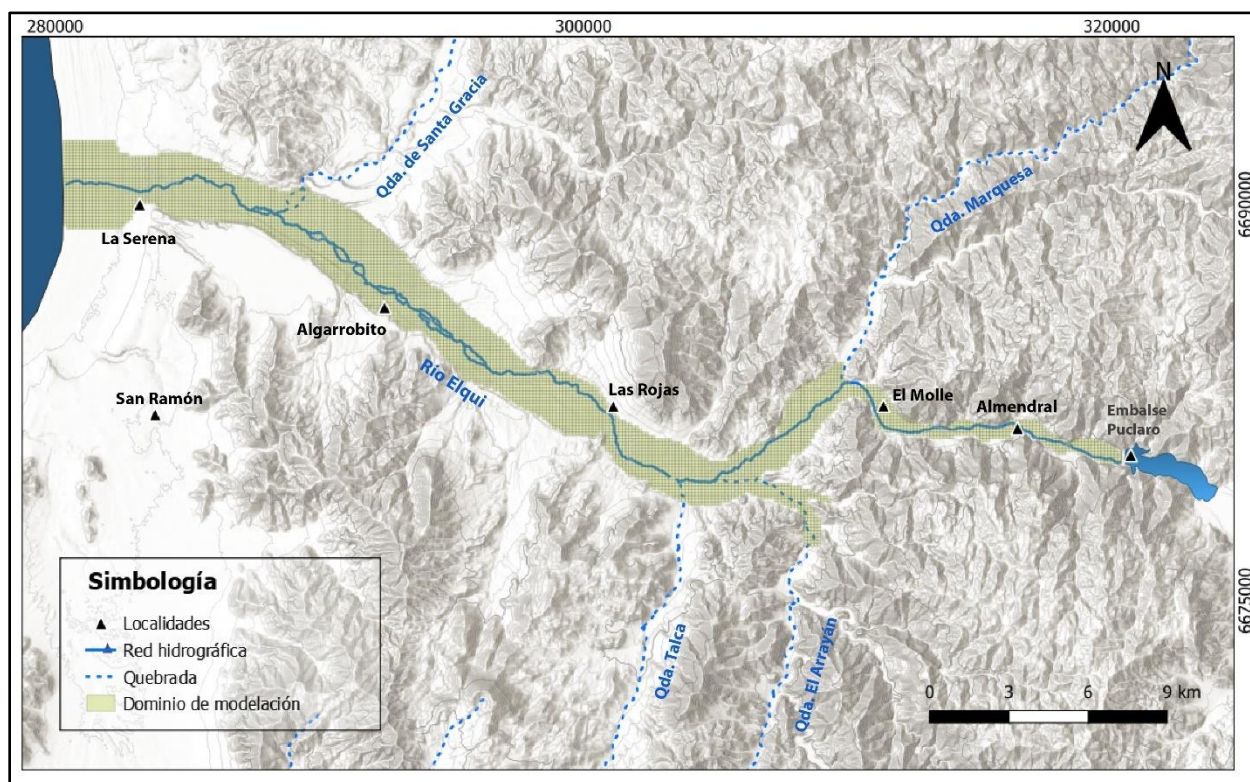


Figura 9.1 Dominio de modelación y malla de diferencias finitas. Fuente: Elaboración Propia.

Se realizan las siguientes modelaciones:

- **Escenario N°1: Escenario base estacionario**

De acuerdo con el modelo conceptual y el balance hídrico desarrollado se reproducen los niveles observados en el acuífero y se realiza una calibración en condiciones permanentes para estimar las conductividades hidráulicas características del sistema y una condición inicial representativa para el año 2000.

- **Escenario N°2: Escenario base régimen transitorio**

En consideración del escenario base, se ha considerado una recarga distribuida en el tiempo y el espacio de acuerdo a la presentada en el balance hidrogeológico conceptual para evaluar las variaciones de niveles en el tiempo y el coeficiente de almacenamiento. Se realiza una simulación hasta el año 2022.

- **Escenario N°3: Simulación captaciones propuestas.**

Se simula la extracción de las captaciones profundas propuestas y que fueron ubicadas en el dominio de modelación, evaluando la capacidad de extracción y los efectos en la piezometría y balance del sistema.

En esta simulación, se considera una extracción continua del orden de 15 l/s por captación y por un periodo de un año, alcanzándose un estado permanente.

9.1 DOMINIO, GEOMETRÍA Y DISCRETIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

De acuerdo al modelo conceptual desarrollado, el dominio de interés corresponde al relleno sedimentario del río Elqui que se desarrolla desde aguas abajo del embalse Puclaro hasta la desembocadura en el mar, y bajo el cual se ubica una unidad de baja permeabilidad, considerada como basamento.

El acuífero se ha discretizado en una capa, con su respectiva zonificación de propiedades hidráulicas equivalentes que lo caracterizan.

La elevación de superficie se ha definido a partir de la capa satelital de elevación de terreno ALOS PALSAR.

La profundidad de la base del acuífero, la cual define el espesor del relleno sedimentario, queda definida de acuerdo al modelo estratigráfico desarrollado en el modelo conceptual a partir de los perfiles ERT, las estratigrafías disponibles y la geología característica.

La discretización horizontal del modelo se ha realizado de forma regular con celdas de 125 x 125 m (Figura 9.2).

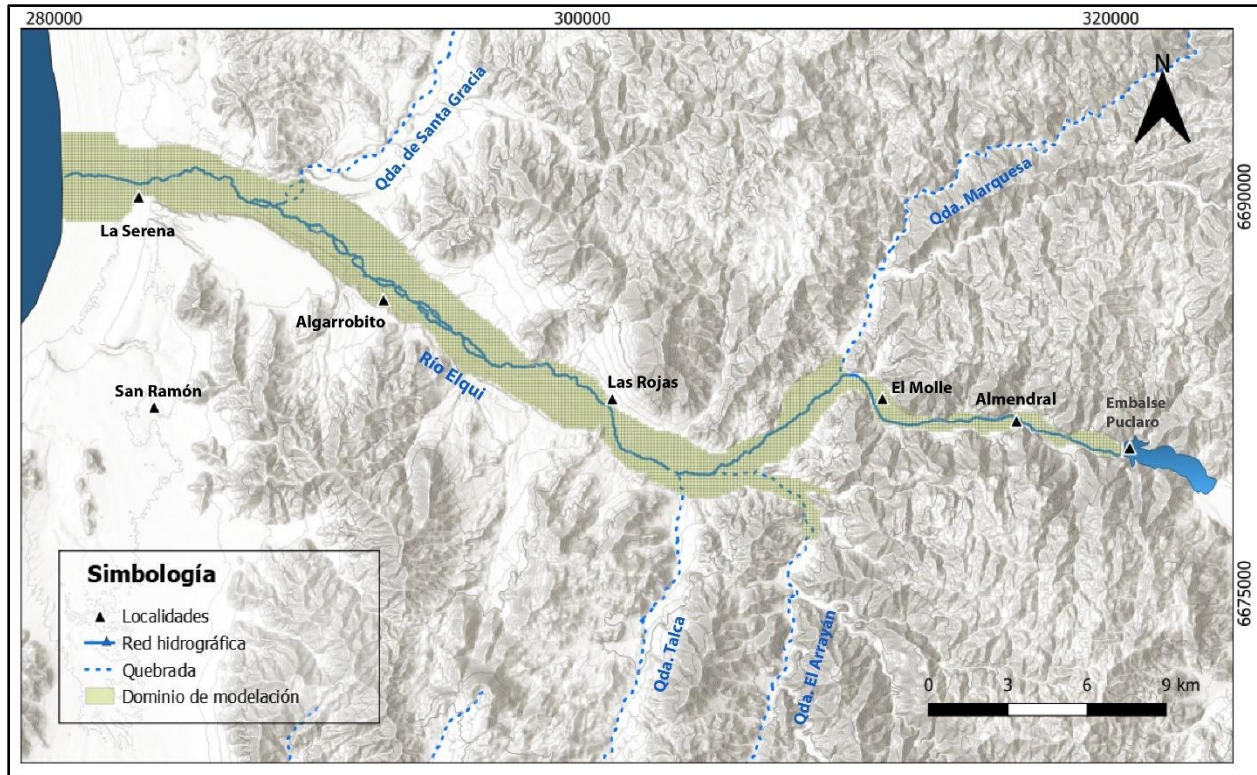


Figura 9.2 Dominio de modelación y malla de diferencias finitas. Fuente: Elaboración Propia.

9.2 PARAMETRIZACIÓN (CONSTANTES ELÁSTICAS DEL ACUÍFERO)

La parametrización se realizó en función de criterios geológicos e hidráulicos, considerando los parámetros hidráulicos estimados en los ensayos de terreno y la representatividad de las captaciones según su profundidad. Durante el proceso de calibración los parámetros se han modificado prácticamente en el entorno de los valores conceptuales, representando finalmente la conductividad hidráulica equivalente de cada zona (Figura 9.3).

El intercambio río acuífero se modeló mediante condición de río, para la cual se consideró una conductividad hidráulica de 8 m/d, y una conductancia de 870 m²/d, valores para los cuales se analiza posteriormente su sensibilidad.

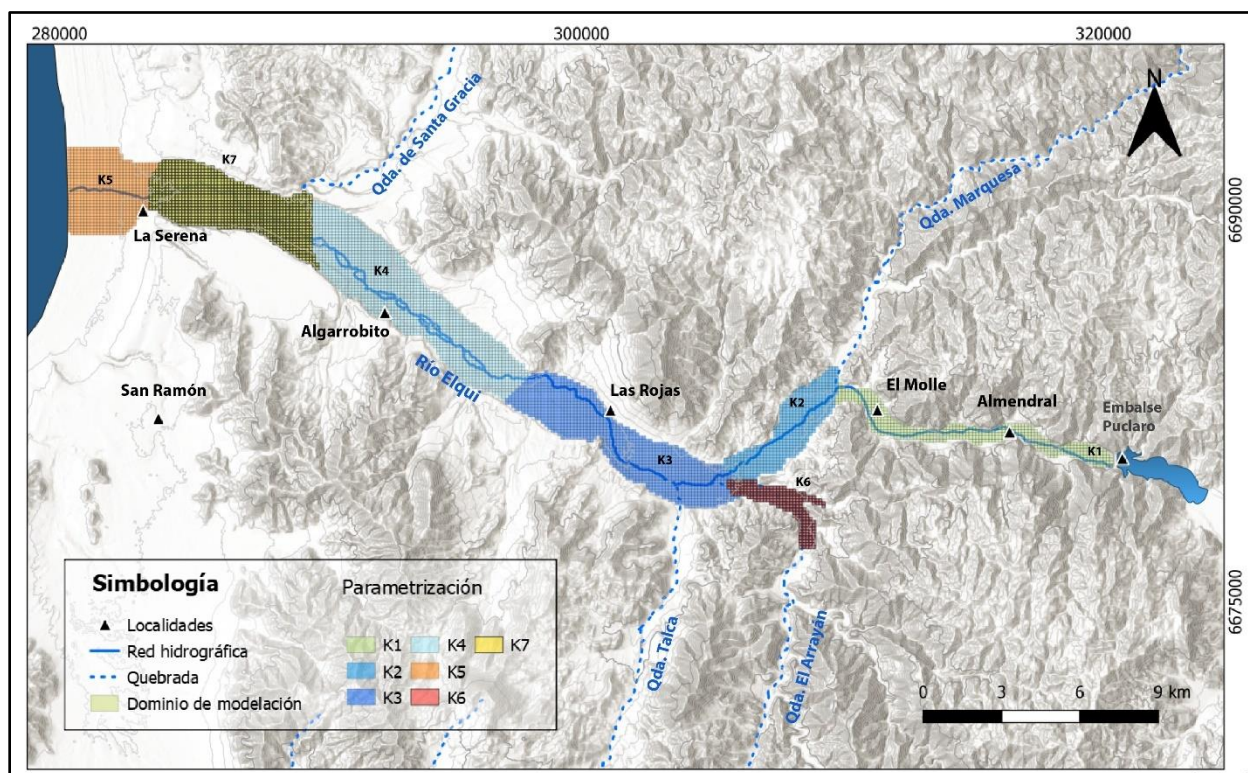


Figura 9.3 Zonificación de parametrización. Fuente: Elaboración Propia.

9.3 CONDICIONES DE BORDE Y CONDICIÓN INICIAL

Se han fijado condiciones de nivel fijo a 435.5 y 0 msnm, de acuerdo con los niveles observados en los extremos de aguas arriba (aguas abajo embalse Puclaro) y abajo del modelo en la costa, correspondiente a secciones de entrada y salida del acuífero (Figura 9.4).

Las recargas laterales conceptualizadas han sido incluidas mediante pozos de inyección en los bordes correspondientes del modelo numérico.

La interacción río acuífero se modeló mediante condición de Cauchy, para la cual se consideró una conductancia de 870 m²/d. Se consideró un nivel de río 0.3 m por debajo del nivel obtenido para la red de drenaje calculada a partir de la topografía.

Se ha considerado una recarga aplicada en las distintas zonas de calibración, de acuerdo a lo estimado en el modelo conceptual, y aplicada en función de las áreas sin cultivo, cultivo persistente y de ciclo corto, distribuyendo la infiltración desde canales de acuerdo a las zonas específicas que estos comprenden.

A partir de la calibración de conductividades hidráulicas en estado permanente se obtiene una condición inicial en equilibrio que se usará para evaluar la variación de niveles en el tiempo de acuerdo a la función de recarga temporal conceptualizada. Así, se inicia el modelo en enero del año 2000.

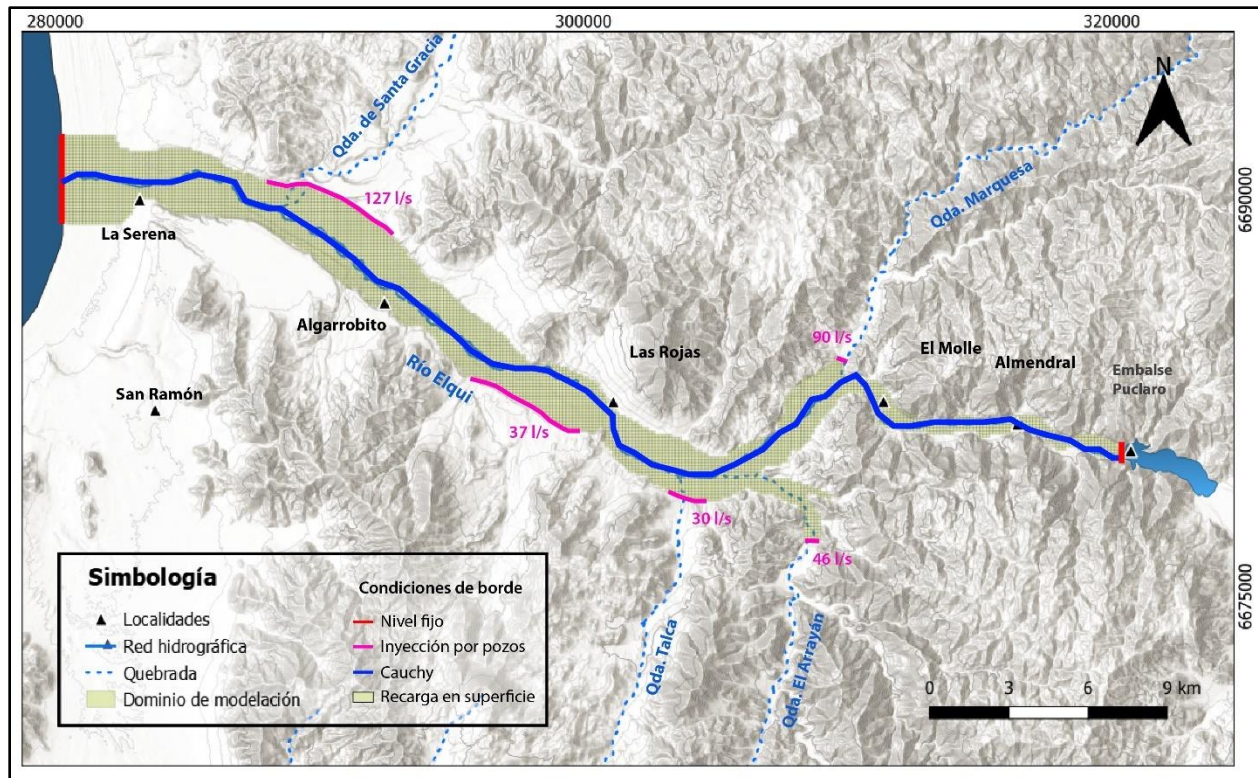


Figura 9.4 Condiciones de borde del modelo numérico. Fuente: Elaboración Propia.

9.4 EXTRACCIONES

Suponiendo que los pozos operan todo el año de forma intermitente, con un factor de uso del 25 %, se han considerado las extracciones subterráneas de derechos registrados en la DGA, suponiendo una extracción anual continua en el tiempo del 25 % del caudal otorgado, y comenzando cada bombeo en la fecha respectiva de tramitación de cada solicitud.

9.5 NIVELES OBSERVADOS

Para la calibración en estado permanente se han considerado 115 niveles obtenidos desde expedientes de la DGA y del catastro realizado (Figura 9.5), utilizando aquellos ubicados en tiempo y lugar en que se observa un comportamiento estable en los pozos de control de la DGA.

El estado transitorio generado a partir de la serie de recarga considerada, se contrasta con las observaciones históricas de los pozos de la red de control DGA a partir del año 2000, utilizando como condición inicial la obtenida desde la calibración en estado permanente. La simulación transiente se extiende hasta el año 2022.

Dado que la recarga se presenta a nivel mensual de acuerdo a lo obtenido desde las series diarias de precipitación y temperatura (Thornwaite), se consideran periodos de estrés a nivel mensual.

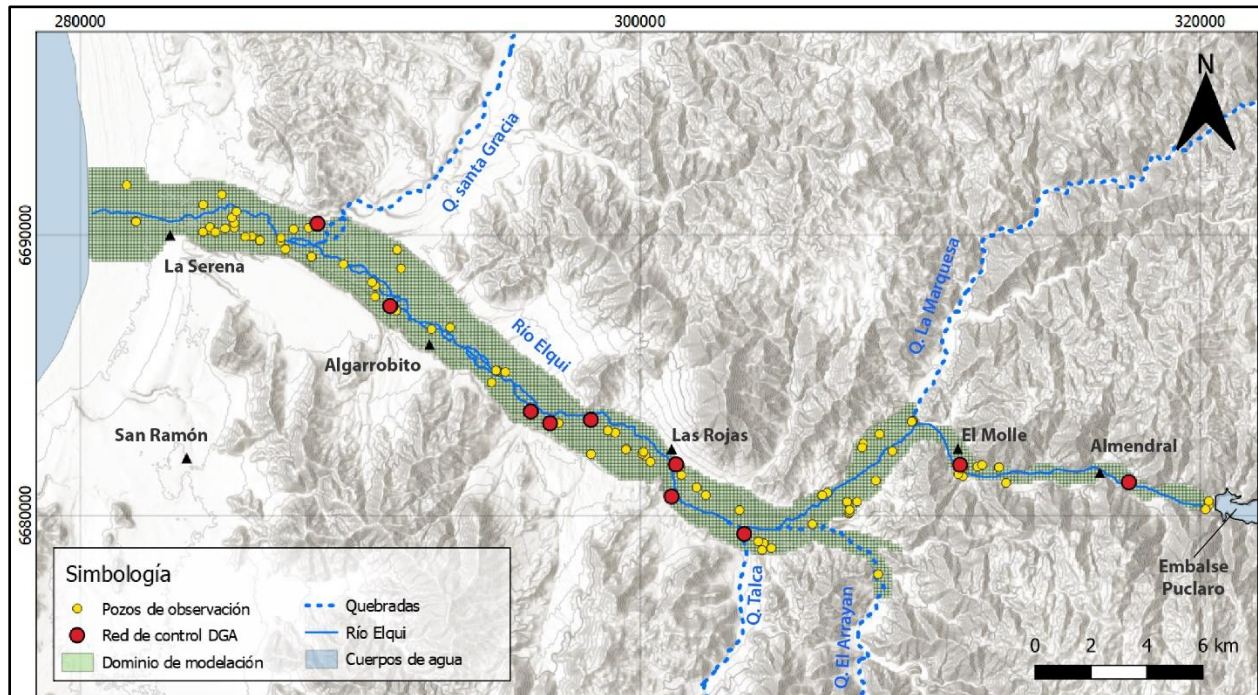


Figura 9.5 Niveles observados. Fuente: Elaboración Propia.

9.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para evaluar la incertidumbre asociada a la interacción río-acuífero, se ha realizado un análisis de sensibilidad respecto a la conductancia del río, considerando una simulación con la mitad de la conductancia y otra con el doble.

9.7 SIMULACIÓN CAPTACIONES PROPUESTAS

Luego de haberse obtenido como escenario base la calibración realizada en estado permanente y transiente, se realiza una simulación considerando la extracción propuesta para las 11 captaciones profundas, evaluando la capacidad de extracción y los efectos en la piezometría y balance del sistema. Se considera una extracción continua del caudal en cada captación por un periodo de un año y se compara con el escenario base que no considera las extracciones.

9.8 RESULTADOS

9.8.1 ESCENARIO N°1: ESCENARIO BASE ESTACIONARIO

En la Figura 9.6 se presentan los niveles observados y calculados numéricamente en los pozos considerados para la calibración en estado permanente y los estadísticos asociados a la calibración. Se obtiene un error cuadrático medio (RMSE) de 2.65 m y un error cuadrático medio normalizado (NRMSE) del 0.61 %, valores aceptables de acuerdo con la Guía de Modelación de Aguas Subterráneas del SEA.

En la Figura 9.7 se muestran las conductividades hidráulicas calibradas. Estas se encuentran en el orden de magnitud de lo estimado en los ensayos de bombeo y antecedentes, representando una permeabilidad equivalente para todo el espesor del relleno. Se agregaron zonas de mayor permeabilidad equivalente (dentro del mismo orden de magnitud) respecto al entorno de las condiciones de borde de pozos de inyección en las quebradas Marquesa y Talca para lograr un mejor ajuste en los niveles locales. Esta permeabilidad mayor es consistente con los parámetros indicados en el modelo conceptual.

La Figura 9.8, muestra la piezometría calibrada en estado permanente correspondiente con la condición inicial obtenida, indicando que el río se comportaría principalmente como ganador.

El balance hídrico calculado numéricamente indica un error de cierre de 0.01 l/s.

Tabla 9.1. Balance hídrico calibración estado permanente. *Entradas laterales. Fuente:

Elaboración propia.

Balance	Entrada [l/s]	Salida [l/s]
Nivel fijo	0.4	161.0
Pozos	363.9*	408.9
Río	605.2	864.1
Recarga	464.5	0.0
Total	1434	1434

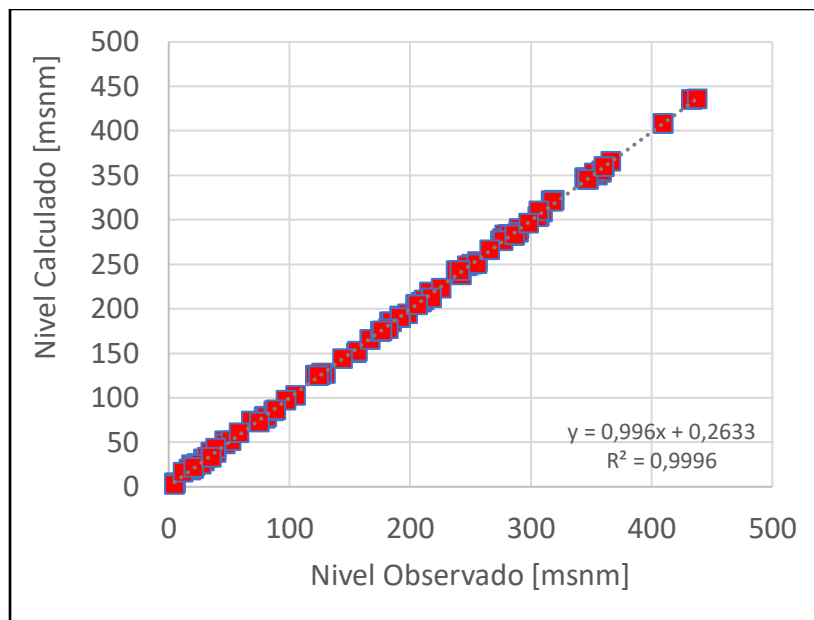


Figura 9.6 Ajuste niveles observados y calculados estado permanente. Fuente: Elaboración propia.

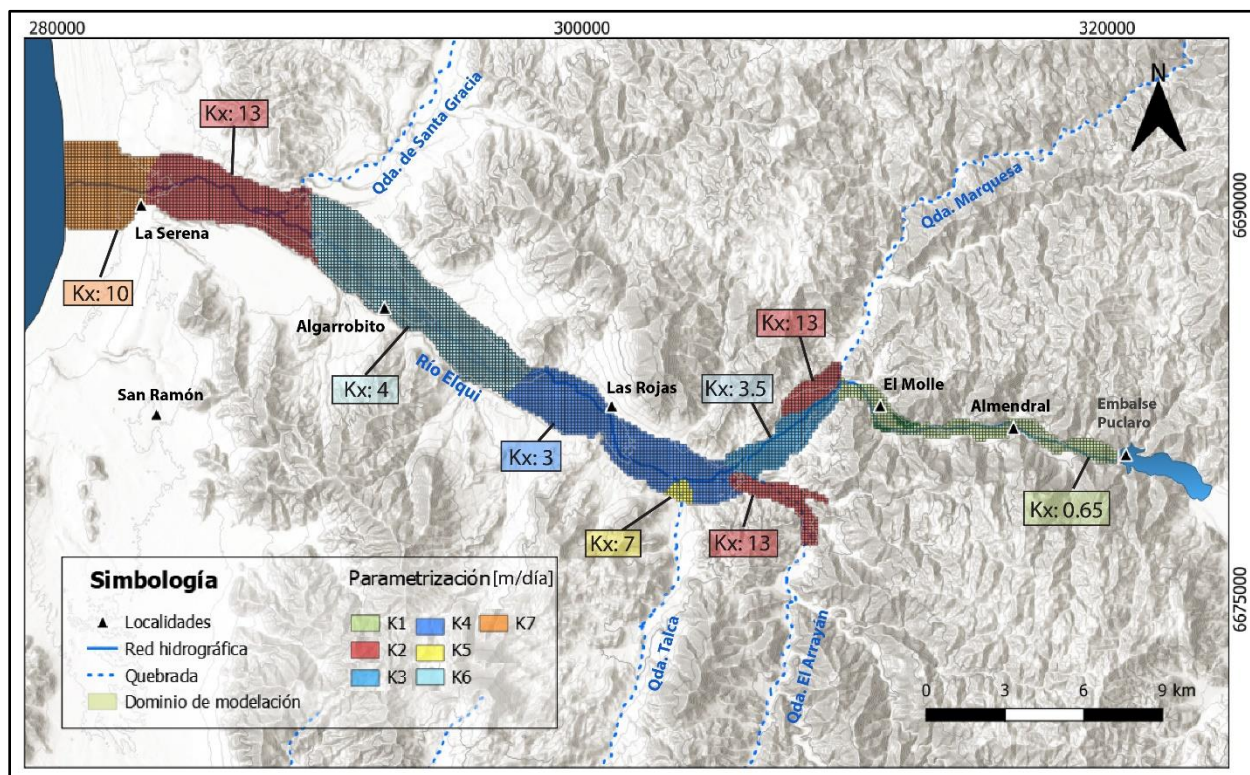


Figura 9.7 Conductividades hidráulicas calibradas en estado permanente. Fuente: Elaboración propia.

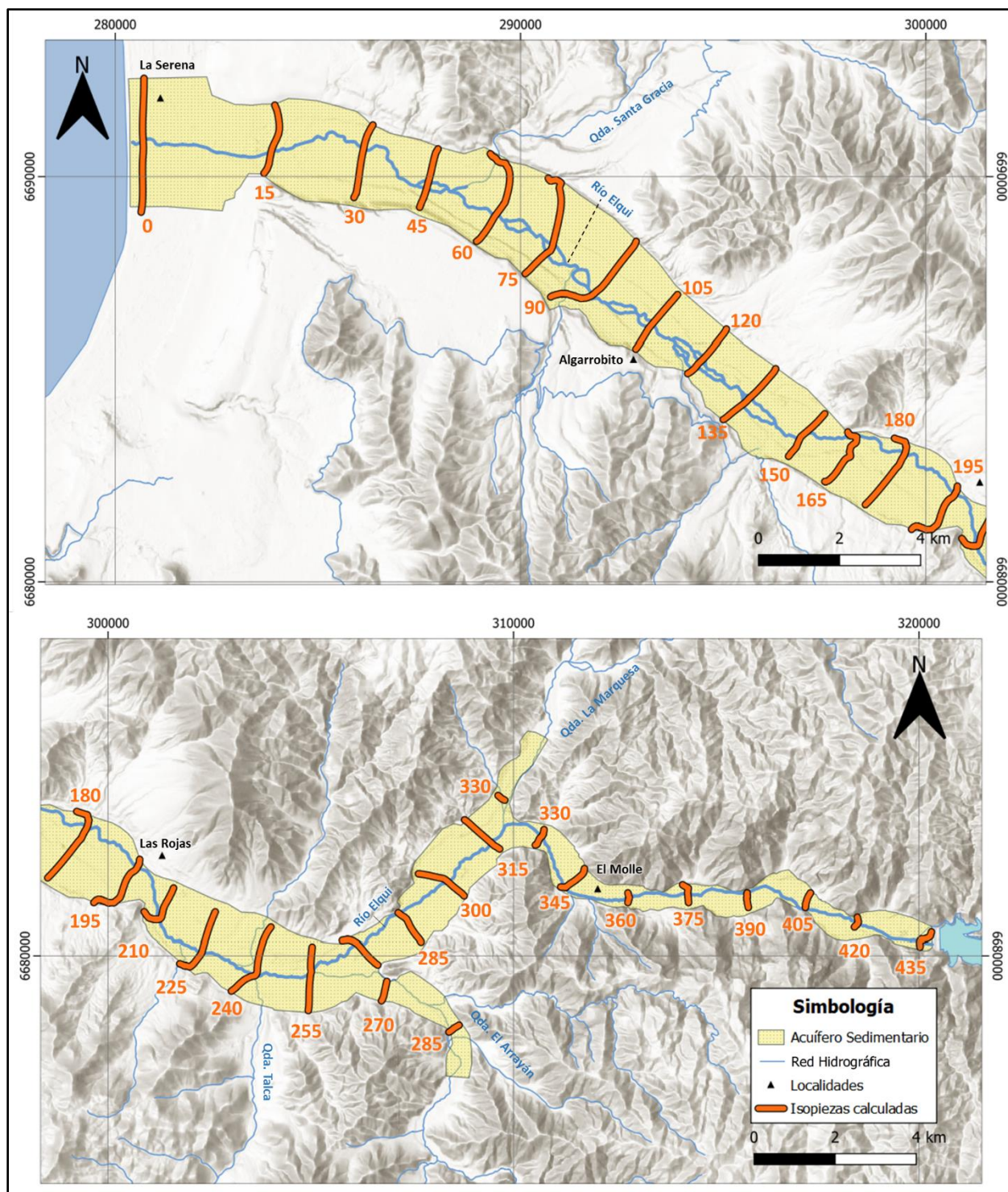


Figura 9.8 Piezometría calculada para calibración en estado permanente. Fuente: Elaboración propia.

9.8.2 ESCENARIO N°2: ESCENARIO BASE RÉGIMEN TRANSITORIO

A partir de la calibración realizada en estado permanente y la condición inicial obtenida, se calibró el coeficiente de almacenamiento, con un valor $1e-5$ 1/m para el total del dominio, siendo del mismo orden de magnitud que el obtenido a partir de las pruebas de bombeo de pozos profundos.

En la Figura 9.9 se muestran los niveles simulados en los pozos de control DGA para el periodo transiente de simulación. Además, se muestra la piezometría característica para fines del año 2000 y comienzos del año 2022.

Teniendo en consideración, el carácter regional del modelo, la discretización y las posibles heterogeneidades que han sido simplificadas, que podrían generar diferencias locales en el comportamiento de niveles, se observa que el modelo reproduce los niveles y descensos generales en el tiempo en los sectores en que se cuenta con observaciones.

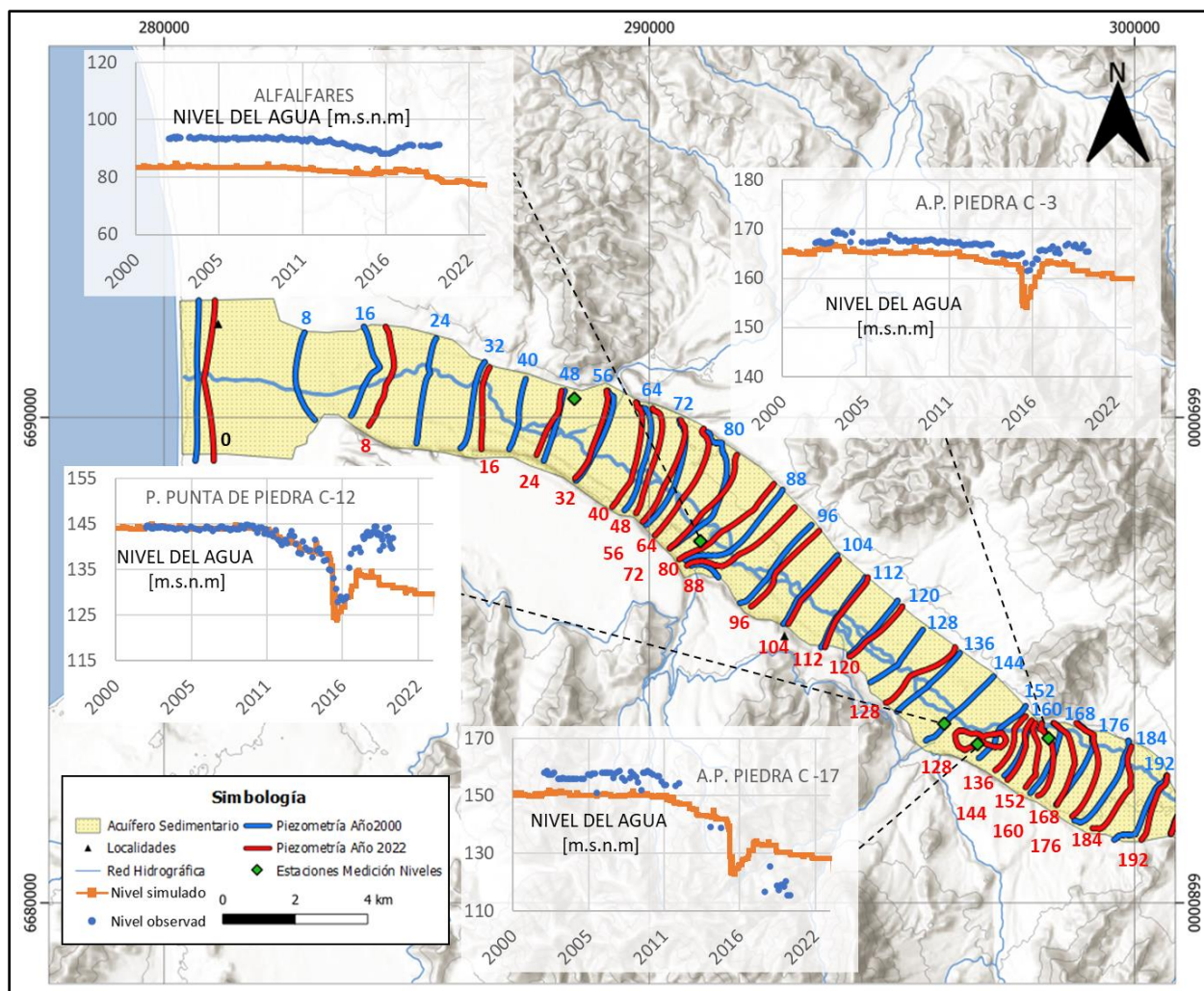


Figura 9.9. Niveles observados y simulados en el tiempo, y piezometría estimada para los años 2000 y 2022, sección oeste. Fuente: Elaboración Propia.

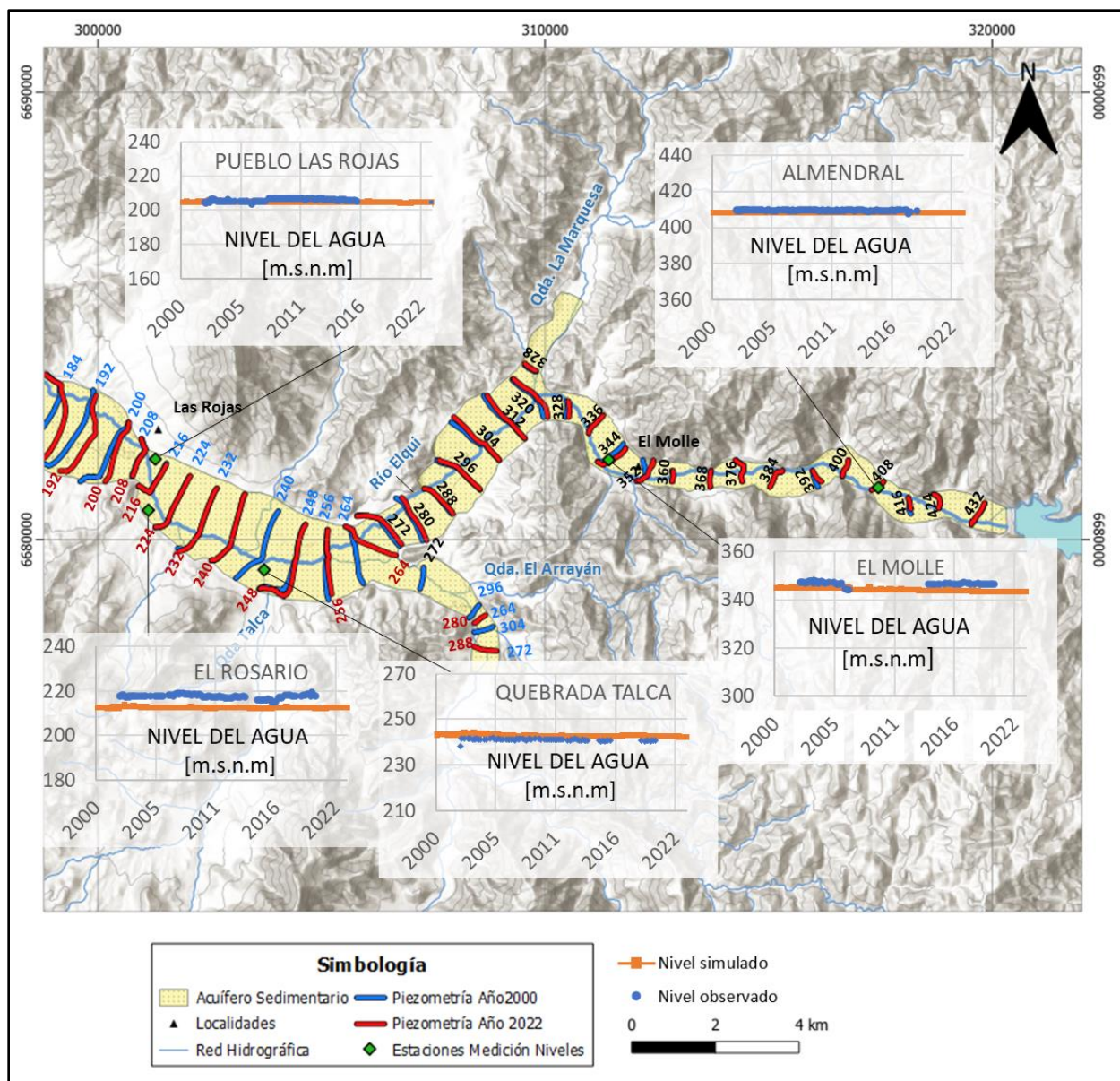


Figura 9.10. Niveles observados y simulados en el tiempo, y piezometría estimada para los años 2000 y 2022, sección este. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 9.11 se muestra el caudal en el tiempo que entra y sale por el río, y la recarga y extracciones en el tiempo. Se observa que tanto la variación de niveles como los flujos de salida y entrada por el río quedan determinados a distinto grado por la recarga impuesta y los bombeos, de tal forma que el aumento de las extracciones en el tiempo y disminución de la recarga producirían el descenso de niveles en pozos y un cambio en los flujos de salida e infiltración del río, aumentando en el tiempo el caudal de infiltración y el carácter perdedor del río. Dicha

situación se produce principalmente en la parte terminal del acuífero, donde los bombeos son mayores.

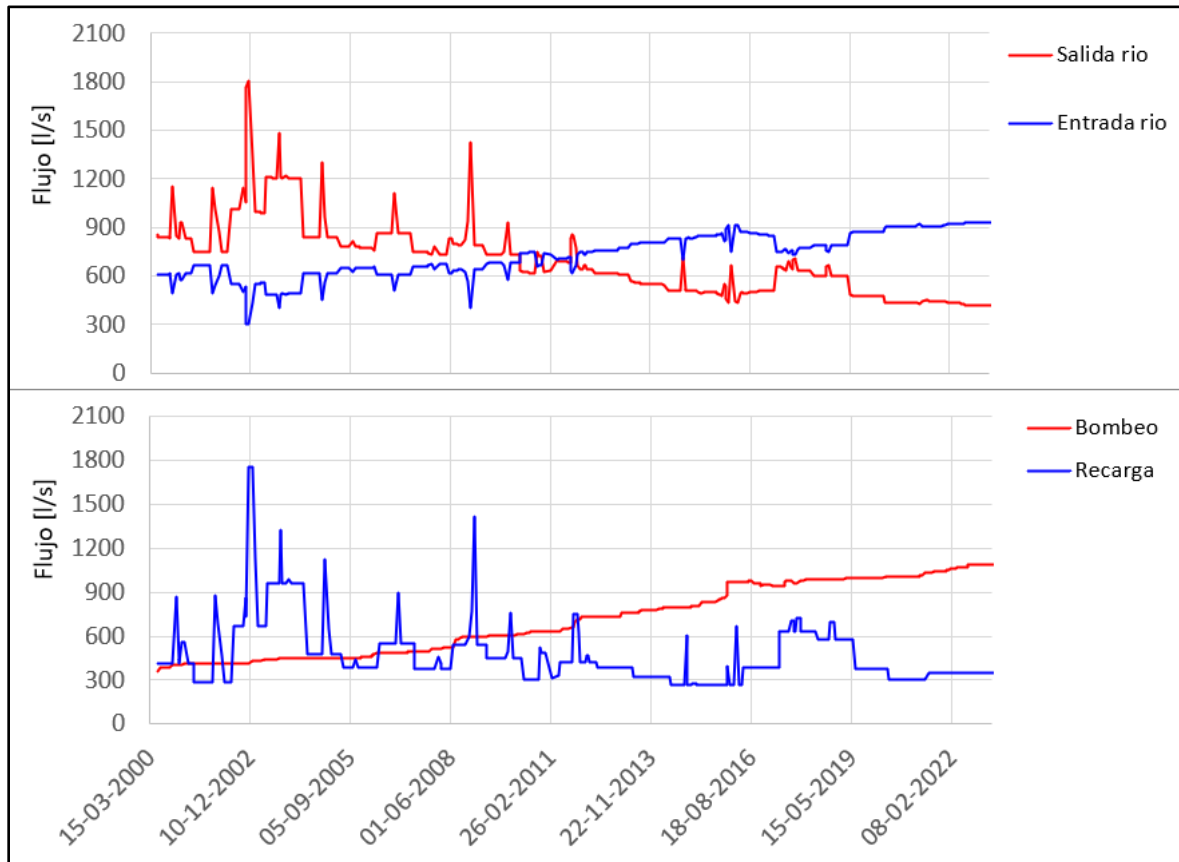


Figura 9.11. Caudal simulado que sale y entra por el río en el tiempo en relación a la recarga y extracciones. Fuente: Elaboración Propia.

Las principales incertidumbres del modelo se destacan a continuación:

- Se desconoce la evolución temporal de las extracciones de agua, la dinámica de operación de pozos.
- Información histórica de la relación río acuífero, lo cual genera incertidumbre en la condición fija impuesta en el río.

Estas y otras limitaciones deben ser solventadas en futuros estudios, incorporando información de niveles piezométricos, estratigrafía, calidad del agua, de los futuros pozos profundos que se construyan. Así mismo es relevante incorporar monitoreos de las extracciones en pozos y canales, aforos en canales para evaluar pérdidas.

9.8.2.1 Análisis de sensibilidad conductancia

Se realizó un análisis de sensibilidad de respecto a la variación de la conductancia del río, por ser un parámetro importante en la estimación del balance. Se consideraron valores de mitad y doble (Tabla 9.2) del considerado en el modelo base. Se observa que, manteniéndose las recargas y extracciones, a pesar de los aumentos y disminuciones de las entradas y salidas del río, la diferencia entre la entrada y salida se mantiene en el mismo orden de magnitud respecto al caso base (en torno a los 260 l/s).

Tabla 9.2. Balance para distintos valores de la conductancia del río.

Balance	Conductancia					
	870 m ² /d		435 m ² /d		1740 m ² /d	
	Entra [l/s]	Sale [l/s]	Entra [l/s]	Sale [l/s]	Entra [l/s]	Sale [l/s]
Nivel fijo	0.4	161.0	0.9	153.8	1.2	165.7
Pozos	363.9	408.9	363.9	408.9	363.9	408.9
Río	605.2	864.1	339.2	605.9	1027.5	1282.6
Recarga	464.5	0.0	464.5	0.0	464.5	0.0
Total	1434	1434	1168.5	1168.5	1857.1	1857.2

9.8.3 ESCENARIO N°3: SIMULACIÓN CAPTACIONES PROPUESTAS.

Se realizado la simulación de las 10 extracciones propuestas que se encuentran dentro del dominio del modelo, considerando un año de bombeo continuo por 15 l/s desde cada una, alcanzándose un estado permanente.

Los descensos adicionales producidos por las captaciones en el sistema se han estimado en un radio del orden de 500 - 1000 m (Figura 9.12), con una magnitud de 25 cm. En un radio de 300 m, los descensos en general no superan 1 m.

En cuanto a la afección de los bombeos, las captaciones P7, P8 y P9 producen descensos del orden de 1 m en pozos cercanos mientras que el resto de las captaciones generan descensos que inferiores a los 0.6 m en pozos cercanos.

Los resultados indican que a los 1 y 2 días continuos de bombeo el 82 y 90 % del agua proviene desde el río respectivamente, alcanzándose un 100 % de interferencia luego de los 20 días de bombeo. El agua extraída desde las captaciones propuestas se traduce en que el mismo caudal deja de aflorar por el río al mediano largo plazo (Figura 9.12 y Figura 9.13), así los bombeos afectarán la esorrentía superficial.

Una extracción sustentable para el sistema río acuífero y los usuarios de la cuenca no debiera superar el caudal portante real del río, estando coordinada con el manejo superficial del recurso.

Para la captación 11 propuesta en quebrada De Santa Gracia, con un caudal de extracción de 15 l/s, se puede considerar que reduciría en esta misma cantidad el caudal pasante al acuífero del río Elqui, el cual se ha estimado en el orden de 120 l/s.

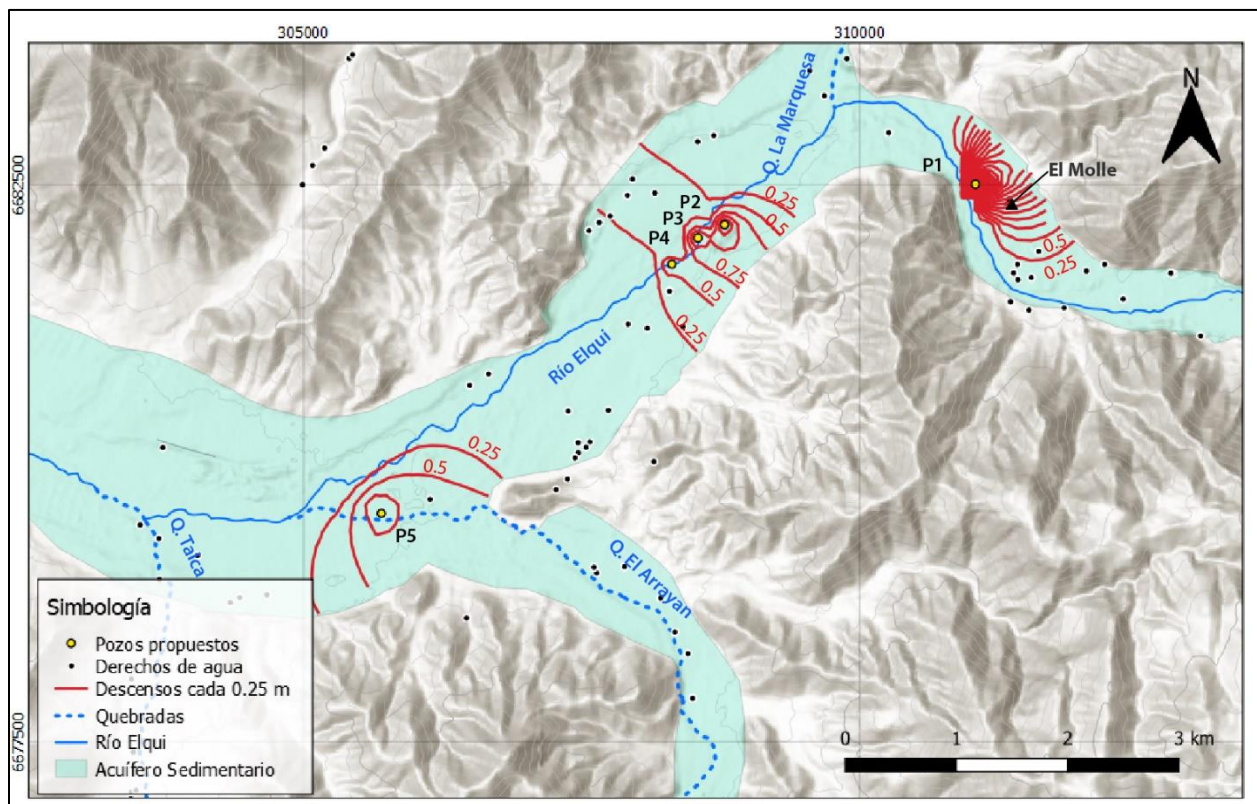


Figura 9.12. Descensos calculados para los pozos de extracción P-1, P2, P3, P4 y P5 propuestos.
Fuente: Elaboración propia.

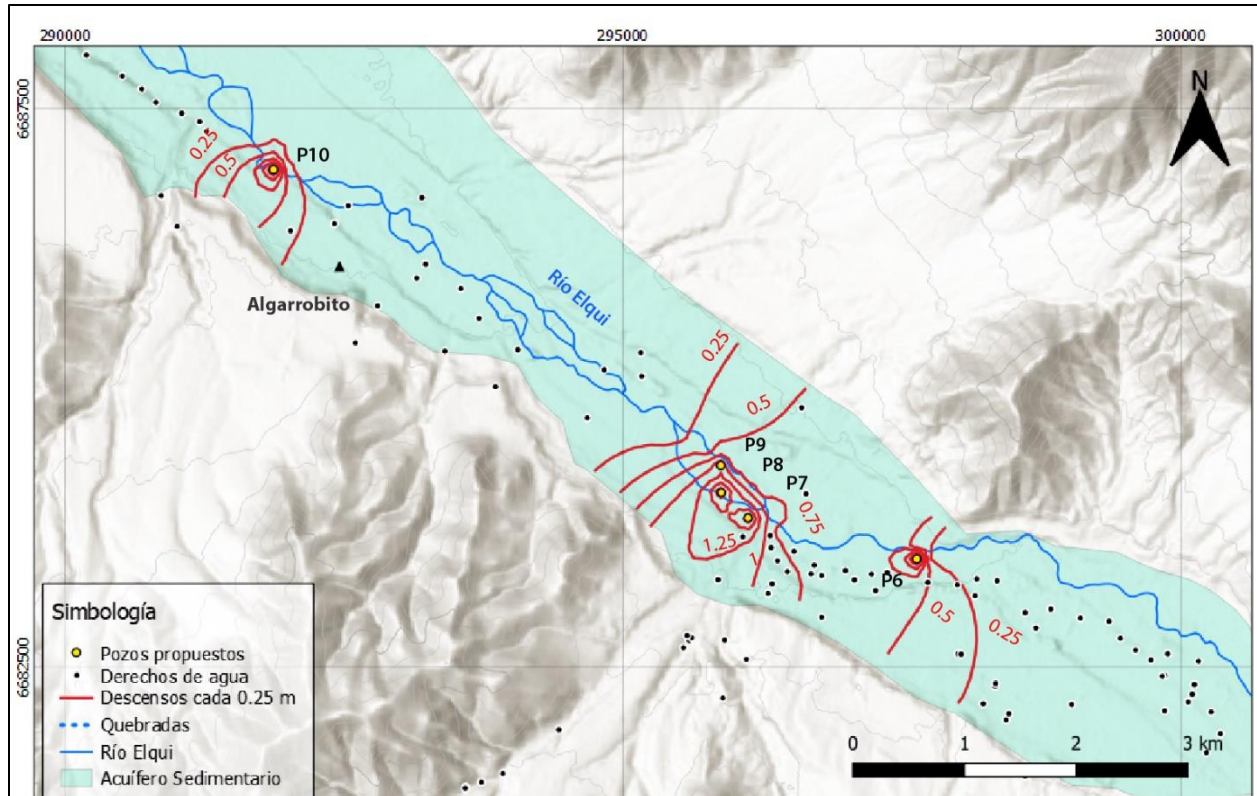


Figura 9.13. Descensos calculados para los pozos de extracción P6, P7, P8, P9 y P10 propuestos.
Fuente: Elaboración propia.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema hidrogeológico de Elqui Bajo y Pan de Azúcar han sido caracterizados conceptualmente a partir de antecedentes y de nueva información levantada en terreno: perfiles geofísicos ERT, diagráfias Gamma Natural, pruebas de bombeo, catastro de captaciones, y ensayos de infiltración. Luego en el caso de Elqui, se ha desarrollado un nuevo modelo numérico de flujo, validándolo en sus componentes, hidroestratigrafía, hidrodinámica, parámetros hidráulicos, y balance hídrico, para evaluar el efecto y sustentabilidad de implementar 10 nuevas extracciones de agua subterránea.

Acuífero Elqui Bajo

La cuenca del Elqui Bajo, se emplaza entre dos unidades geomorfológicas predominantes, los Cordones Transversales y Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional. El río Elqui se sitúa en la

unidad geomorfológica Llanos de sedimentación fluvial o aluvional, correspondiente al acuífero sedimentario.

La base del acuífero Elqui, está constituida por el este por depósitos consolidados de la Fm. Quebrada Marquesa, secuencia volcánica sedimentaria, al centro por intrusivos dioríticos, al oeste por depósitos semi – consolidados de las formaciones Confluencia y Coquimbo.

La cuenca del río Elqui bajo, con aproximadamente 2870 km², corresponde a la cuenca aportante al río Elqui desde inmediatamente aguas abajo del embalse Puclaro hasta su desembocadura en La Serena, con una precipitación media en torno a los 85 mm al año.

El río Elqui presenta un régimen controlado por los embalses, registrándose un caudal medio en Almendral en torno a los 9 m³/s, con una predominancia en torno a los 4 m³/s.

Los derechos de agua superficial, aproximadamente 11 m³/s, son distribuidos durante todo el año por canales en general sin revestir, con pérdidas estimadas en torno al 30 % por infiltración. Se estima que actualmente los canales funcionan en torno al 20 % de sus derechos de agua (com per JJVV). Del orden de 1500 l/s pasarían por el canal Bellavista hacia la cuenca Pan de Azúcar, mientras que 1000 l/s de derecho pertenecen a Aguas del Valle.

El sistema acuífero del río Elqui está compuesto por una estratigrafía de carácter lenticular, de gravas y arenas con intercalaciones discontinuas de limos y/o arcillas gravo arenosas, de hasta 10 m de espesor. Es así que en el modelo conceptual se le considera como una capa heterogénea con confinamientos locales, del orden de 100 a 200 m de espesor.

Las resistividades eléctricas de los estratos acuífero son del orden de 30 a 110 Ohm-m lo cual se correlacionaría, según las estratigrafías de pozo consultadas, con horizontes de gravas y arenas con un bajo contenido de arcillas.

Las permeabilidades equivalentes del acuífero varían en el orden de 1 a 30 m/d, excepcionalmente 100 m/d, los coeficientes de almacenamiento estimado en pozos profundos, del orden de 1E⁻⁴ y 1E⁻³ y porosidades eficaces del orden de E⁻¹ determinadas en norias.

De acuerdo a los datos obtenidos del catastro de pozos, en la sección este del acuífero Elqui Bajo, la profundidad de los niveles estáticos es inferior a 10 metros de la superficie, sin variaciones importantes en los últimos 20 años. Hacia el oeste, se observan disminuciones más importantes

de niveles en los últimos años, comenzando en torno al año 2012, alcanzando descensos de hasta 20 -40 m en la actualidad. Esta baja de niveles estaría asociada a las mayores extracciones constituidas en la parte oeste del acuífero, junto a los años secos consecutivos del periodo 2010 – 2014.

Se presenta un aumento continuo a partir del año 1997 de los derechos de agua subterránea concedidos en el acuífero Elqui Bajo, pasando a ser del orden de 500 l/s antes de año 1995, a aproximadamente 4500 l/s el año 2020.

Una de las principales fuentes de recarga y descarga del acuífero Elqui Bajo la constituye el río, el cual se deriva a los canales de riego infiltrando por estos un caudal estimado en torno a las 440 l/s. Por otro lado, las recargas subterráneas laterales desde las quebradas más importantes hacia el acuífero se estiman en torno a los 350 l/s. A partir del año 2012, por medio del modelo numérico se estima que el río pasa a comportarse predominantemente como perdedor, esto debido principalmente al aumento de las extracciones. El flujo de salida subterráneo por la costa se estima en torno a los 160 l/s.

La calidad del agua del acuífero corresponde al tipo sulfatada cálcica, y aumenta su concentración hacia la costa.

Acuífero Pan de Azúcar

La cuenca de Pan de azúcar presenta elevaciones máximas del orden de 300 msnm en el margen sureste de la cuenca, y bajos topográficos en los llanos de sedimentación fluvial del orden de 150 metros de altitud, donde se emplaza el acuífero Pan de Azúcar.

El acuífero de Pan de Azúcar, estaría emplazado en la unidad geológica Formación La Confluencia (Figura 5.5), siendo su base rocas intrusivas y rocas sedimentarias de la Fm. Arqueros. El acuífero, se extiende desde la localidad de Las Cardas hasta el sur de la localidad de San Ramón y en la cual los niveles estáticos se han medido entre 30-70 m de profundidad. Sobre esta unidad geológica es en la cual se encuentran la mayoría de las captaciones, las cuales en general son de profundidades de entre 70 y 170 m.

La Confluencia está compuesta por conglomerados medios a gruesos en una matriz intersticial de arena muy fina a gruesa, poco consolidados, con intercalaciones de arcillas y limos arenosos, que se interdigitan con los sedimentos marinos de la Fm. Coquimbo, de muy baja permeabilidad.

Para este sistema acuífero, se estiman espesores del orden de 200 m en el tramo San Ramon – El Peñón y del orden de 100 m entre San Ramon y Las Cardas.

Sobre el acuífero de Pan de Azúcar, se desarrolla un acuífero superior, asociado a depósitos aluviales y coluviales no consolidados actuales, dispuesto preferencialmente en los bajos topográficos de los cursos esporádicos de agua superficial que ocurren en periodos de precipitación, con un nivel estático emplazado a 2 a 10 m de profundidad.

Este acuífero superior se subdivide a su vez en dos sistemas, uno de ellos del sector noroeste se desarrolla al oeste de Cerrillos y se drena por el norte por la Quebrada el Culebrón, mientras que el segundo de mayor extensión se desarrolla al sur de El Peñón y drenaría sus aguas al oeste por la Quebrada Lagunillas.

Los estratos que constituyen la base del acuífero presentan resistividades superiores a los 70 Ohm-m y el acuífero se asociaría a resistividades entre 5-60 Ohm-m.

Dado que no se ha identificado en las tomografías ni en las columnas estratigráficas un estrato arcilloso que pueda ser interpretada como una unidad continua en extensión, se interpreta al sistema acuífero de pan de azúcar como una unidad sedimentaria gravo arenosa heterogénea con intercalaciones arcillosas que aumentan hacia el norte.

Las permeabilidades del acuífero varían en el orden de 1 a 40 m/d, la capacidad de infiltración de lechos de río del orden de 2 a 8 m/d, y la permeabilidad vertical de suelos agrícolas se estimó del orden de 1 m/d.

Actualmente las aguas subterráneas de Pan de Azúcar fluyen hacia los sectores en donde se encuentra una mayor concentración de pozos de bombeo. Desde el norte del acuífero Pan de azúcar, las aguas subterráneas fluyen desde San Ramon hasta el sur de la parcela del INIA, con un bajo gradiente hidráulico de 0.072%, mientras que por el sur, las aguas del acuífero fluyen desde la localidad de Las Cardas hacia el Peñón, con un gradiente hidráulico mayor de entre un 0.3 a 0.8 %.

De acuerdo con los registros históricos de las profundidades de nivel estático de la red de control de la DGA ubicados en el acuífero de Pan de Azúcar, desde el 2000 al 2022, habría ocurrido un descenso del nivel del acuífero de entre 20 a 30 m, con registro máximo en la estación Lo Martínez. Estos antecedentes se presentan al sur del INIA y estarían relacionados principalmente a la extracción del sistema acuífero.

Actualmente (2022) los niveles se encuentran a una cota del orden de 60 a 70 msnm y la superficie piezométrica ya no corta la cota topografía, por lo cual no se identifican afloramientos al suroeste y no es posible validar salidas subsuperficiales. Actualmente los bombeos habrían deprimido los niveles generando conos de descenso cambiando la dirección de los flujo natural de agua subterránea.

En el sector Pan de Azúcar, se identifican tres tipos de aguas subterráneas:

Al sur de El Peñón, corresponden al tipo bicarbonatado cálcico, asociada a la infiltración del agua de lluvia, y de baja salinidad.

Al norte de El Peñón y centro de la cuenca, corresponde al tipo clorurado cálcico y presentan una mayor salinidad. El origen de estas aguas podría asociarse a un proceso intenso de alteración local de recarga en la zona de actividad agrícola en la que el agua de precipitación se evapoconcentra por retención en el suelo y alteración de los minerales del suelo por efecto del CO₂ edáfico. Esto hace que la marca posiblemente de aerosol marino en la precipitación se concentre y en la alteración se adsorba o se absorba Na, y posiblemente también K, en los minerales de alteración a cambio de la mayor movilización de Ca y Mg.

Al extremo norte del sector Pan de Azúcar, las aguas son del tipo sulfatado sódico con una baja concentración de magnesio y cloruros.

El agua superficial en la subcuenca del estero Culebrón, proviene del transvase desde el río Elqui a través del canal Bellavista, para el cual se indican caudales de entre 1000 y 2000 l/s.

Se registra un aumento considerable de los derechos de agua subterránea otorgados a partir del año 2005, pasando del orden de 1000 l/s, a 2500 para el 2013 y 4000 el 2020.

De acuerdo al registro de derechos, el sector de Tambillos en la subcuenca Lagunillas, y entre INIA y El Peñón, se presenta la mayor cantidad de nuevos derechos concedidos a partir del 2011.

Muy probablemente este aumento de las extracciones ha generado los descensos característicos registrados en los pozos de control.

Con un monto anual de precipitación media de 90 mm, de acuerdo al área de la cuenca, suponiendo una extracción por bombeo del orden del 25% de los derechos concedidos, y perdidas por el 30 % en canales, se puede estimar una recarga en torno a los 1400 l/s para el acuífero del estero Culebrón, la cual se vería excedida considerablemente por la descarga al considerar bombeos en torno a la magnitud de los derechos registrados, otros no regularizados y las posibles mejoras de la eficiencia de riego, ya sea del método de riego o el revestimiento de canales.

Del análisis hidrogeológico de la Cuenca de Elqui Bajo y del sector de Pan de Azúcar, se han propuesto 15 perforaciones para la extracción de agua subterránea, de las cuales 11 se encuentran en Elqui y cuatro en el sector de Pan de Azúcar (Tabla 10.1).

Cabe destacar que, en el acuífero de Pan de Azúcar, no es sustentable continuar con la programación de extracciones, dado que la actual sobreexplotación del acuífero genera pérdidas en el almacenamiento que han generado descensos de 2 m/año en el sistema subterráneo.

Tabla 10.1 Ubicaciones propuestas para la extracción de agua subterránea mediante pozos profundos. Fuente: Elaboración Propia.

Nombre	Ubicación	Coordenadas UTM		Prof. Pozo [m]	Caudal estimado [l/s]
		Este	Norte		
POZO 1	Río Elqui Bajo	311071	6682479	100	~ 10 l/s
POZO 2	Río Elqui Bajo	308729	6682150	130	10 - 20 l/s
POZO 3	Río Elqui Bajo	308524	6681977	120	10 - 20 l/s
POZO 4	Río Elqui Bajo	308312	6681790	120	10 - 20 l/s
POZO 5	Río Elqui Bajo	305607	6679675	130	3-6 l/s
POZO 6	Río Elqui Bajo	297589	6683413	85	7-15 l/s
POZO 7	Río Elqui Bajo	296102	6683987	120	10 - 40 l/s
POZO 8	Río Elqui Bajo	295929	6684084	120	10 - 40 l/s
POZO 9	Río Elqui Bajo	295840	6684295	120	10 - 40 l/s
POZO 10	Río Elqui Bajo	291921	6687023	75	2-10 l/s
POZO 11	Río Elqui Bajo	290893	6691029	100	Indeterminado
POZO 12	Pan de Azúcar	283304	6665596	100	2-10 l/s
POZO 13	Pan de Azúcar	283871	6665528	120	2-10 l/s
POZO 14	Pan de Azúcar	284613	6664149	100	2-10 l/s

POZO 15	Pan de Azúcar	284893	6664031	120	2-10 l/s
---------	---------------	--------	---------	-----	----------

Las extracciones propuestas en Elqui fueron simuladas numéricamente e indican que con un caudal de bombeo continuo de 15 l/s cada una, se generan descensos en torno a los 0.25 m en un radio de entre 500 y 1000 m de la zona de extracción.

Al mediano-largo plazo (luego de 20 días) el total de la extracción genera una disminución de los caudales superficiales que es igual al bombeo simulado. Existiendo una dependencia del potencial de los pozos con el curso superficial del Río Elqui. En caso de no existir caudal en el río los pozos comenzaran a extraer desde el almacenamiento del acuífero lo cual no se considera sustentable.

11 REFERENCIAS

- [1] SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- [2] Emparan, C.; Pineda, G. 2006. Geología del área Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No. 96, 85 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- [3] Emparan, C.; Pineda, G. 2000. Área La Serena – La Higuera. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, No. 18, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- [4] GFC Ingenieros, 2015. Informe Final. Estudio Geofísico e Hidrogeológico en la zona baja de la cuenca del río Elqui y en la zona de Pan de Azúcar.
- [5] Geodatos SAIC, 2019. Informe Final. Levantamiento y Análisis de Información Geofísica en el valle de Pan de Azúcar, Región de Coquimbo. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago.
- [6] Pineda, G, Emparan, C. 2006. Geología de área Vicuña – Pichasca. Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Básica. No 97. 40 p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

- [7] Emparan, C.; Pineda, G. 1999. Área Condoriaco – Rivadavia, Región de Coquimbo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapas Geológicos, No. 12, 1 mapa escala 1:100.000. 1 anexo, Santiago.
- [8] Hidrogestión, 2022. HDG-1410-1410-IN-04, Informe Final, Estudio Hidrogeológico para el Análisis de Alternativas Ubicación Baterías Pozos en 2 Acuíferos de la Cuenca Río Elqui Bajo con Modelación Existente para Explotación Aguas Subterráneas en sequía. Región de Coquimbo.
- [9] Zhang, Y., Kong, D., Gan, R., Chiew, F.H.S., McVicar, T.R., Zhang, Q., and Yang, Y., 2019. Coupled estimation of 500m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017. *Remote Sens. Environ.* 222, 165-182, doi:10.1016/j.rse.2018.12.031
- [10] Gan, R., Zhang, Y.Q., Shi, H., Yang, Y.T., Eamus, D., Cheng, L., Chiew, F.H.S., Yu, Q., 2018. Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems. *Ecohydrology*, doi:10.1002/eco.1974
- [11] ODEPA 2018, Información Regional, Publicación de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Ministerio de Agricultura, Región de Coquimbo, Gobierno de Chile.