



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ciencias Químicas  
Departamento de Ciencias de la Tierra



**ESTUDIO GEOFÍSICO E HIDROGEOLÓGICO Y  
SU INFLUENCIA EN LA CREACIÓN DE UN  
PROYECTO DE AGUA POTABLE COLECTIVO  
PARA LA URBANIZACIÓN DEL “FUNDO LAS  
TINAJAS” EN LA CIUDAD DE TALCA, REGIÓN  
DEL MAULE, CHILE.**

Memoria para optar al título de Geóloga

**Danitza Beatriz Campos Sovino**

**Profesora Guía:** MSc. Liubow Nikolaivna González Martínez  
**Profesor Co-Guía:** Sr. Ignacio Paolo Bernard Barriga  
**Profesor Comisión:** MSc. Abraham Elías González Martínez

**Concepción, 2024**

## **i. AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento a cada persona que ha contribuido en la realización de este trabajo y a lo largo de toda mi carrera. Al principio fue muy difícil para mi y creía que nunca lo lograría, pero este viaje académico al fin está concluyendo y no es solo gracias a mi esfuerzo, sino es también de todas las personas que han sido pilares fundamentales para mi durante todo mi período universitario.

Primeramente, agradecer a mi profesional guía, Ignacio Bernard, director de la empresa MHT SpA, por la financiación de esta memoria y por su dedicación, paciencia y conocimiento, que han sido cruciales para el desarrollo de este trabajo. Por su increíble buena disposición, confianza y amabilidad para la entrega de equipos, información, ayuda en el trabajo de terreno y más.

También agradecer a la profesora Liubow González por acceder a ser mi profesora guía y brindarme su ayuda y conocimiento. Al profesor Abraham González y a todo el personal del Departamento de Ciencias de la Tierra, por hacer de ir a la universidad un ambiente cálido y familiar.

Agradecer a mis padres, que han sido mi fuente inagotable de amor, aliento y comprensión. Su apoyo incondicional ha sido todo lo que necesito para alcanzar mis metas. Gracias por estar a mi lado en cada paso del camino, con una palabra de motivación, con un plato de comida, con apoyo monetario para que no me preocupe de nada más que de lograr mis objetivos académicos y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mi novio, por su soporte constante, por aguantar los momentos de estrés y carga emocional, por entender muchas veces la falta de tiempo, por ayudarme a estudiar cuando recién estaba comenzando, por sus palabras de ánimo de cada día, por ser mi lugar de paz y tranquilidad cuando no podía más y por su infinito amor. Cada paso lo hemos dado juntos, y nuestro amor es mi motivación.

A mi hermana Valeska, a mi hermano Christopher, a mis primas Karen y Alejandra, a mis amigos y amigas, que han estado a mi lado durante toda esta travesía, gracias por ser mi red de apoyo, por ser mi desconexión, por compartir mis alegrías y por estar en cada momento.

## ii. ÍNDICE DE CONTENIDOS

vii. RESUMEN.....	.....
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivos.....	2
1.1.1    Objetivo general .....	2
1.1.2    Objetivos específicos .....	2
1.2    Ubicación y accesos.....	2
1.3    Antecedentes meteorológicos .....	3
1.3.1    Clima y precipitaciones .....	3
1.4    Metodología.....	4
1.4.1    Recopilación de antecedentes y análisis de la información.....	4
1.4.2    Trabajo de terreno.....	5
1.4.3    Integración e interpretación de los resultados .....	7
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1    Geomorfología.....	10
2.2    Geología.....	11
2.3    Hidrogeología .....	15
2.3.1    Red hidrográfica .....	15
2.3.2    Unidades hidrogeológicas .....	16
2.4    Geofísica .....	18
2.4.1    Método Magnetotelúrico (MT).....	19
2.4.2    Antecedentes.....	20
2.4.3    Consideraciones y normativas para captaciones de aguas subterráneas.....	26
3. RESULTADOS.....	29
3.1    Geofísica .....	29

3.1.1	Zona de prospección P1.....	29
3.1.2	Zona de prospección 2.....	31
3.1.3	Zona de prospección 3.....	32
3.2	Hidrogeología .....	34
3.2.1	Cálculo de parámetros hidráulicos .....	34
3.2.2	Vulnerabilidad de acuíferos.....	37
4.	DISCUSIÓN.....	38
4.1	Interpretación de perfiles geofísicos .....	38
4.1.1	Zona de prospección 1 .....	38
4.1.2	Zona de prospección 2.....	40
4.1.3	Zona de prospección 3.....	40
4.1.4	Homologación a unidades hidrogeológicas.....	41
4.2	Determinación de zonas de captación.....	41
4.3	Limitaciones y consideraciones a futuro.....	42
5.	CONCLUSIONES .....	44
	REFERENCIAS .....	46
	ANEXOS.....	48

### iii. ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Mapa de ubicación del área de estudio en la Región del Maule, Chile. Fuente: Elaboración propia.....	3
<b>Figura 1.2</b>	Precipitaciones promedio de la estación de Río Claro en Rauquen entre los años 1999 a 2023. Fuente: Explorador Climático CR2.....	4
<b>Figura 1.3</b>	Mapa de ubicación de los puntos MT. Elaboración propia.....	5

<b>Figura 1.4</b>	(A) Esquema de medición MT (Magneto Telúrico). (B) Disposición del equipo en terreno.....	7
<b>Figura 1.5</b>	Diagrama para el cálculo de vulnerabilidad de acuíferos con método GOD. Fuente: Foster, S., 1987.....	9
<b>Figura 2.1</b>	Zonas geomorfológicas de la Región del Maule. Extraído del Instituto Geográfico Militar. Fuente: Modificado por Börgel, J., 1983.....	10
<b>Figura 2.2</b>	Mapa geológico del área de estudio en el “Fundo Las Tinajas”, ciudad de Talca, Chile. Fuente: Modificado de Hauser, A., 1995.....	12
<b>Figura 2.3</b>	Mapa de la red hidrográfica de la Cuenca del Río Maule y la subcuenca del Río Claro. Fuente: Modificado de Inventario de Cuencas y Subcuencas de Chile, MOP, 2014.....	15
<b>Figura 2.4</b>	Diagrama de unidades hidrogeológicas. Fuente: Struckmeier y Margat, 1995.....	16
<b>Figura 2.5</b>	Mapa hidrogeológico del área de estudio. Fuente: Modificado de Hauser, A., 1995. ....	17
<b>Figura 2.6</b>	Rango de valores de resistividad eléctrica de algunas rocas y minerales. Fuente: Palacky, G., 1987.....	20
<b>Figura 2.7</b>	Imagen satelital del área de estudio donde se detallan captaciones subterráneas según DGA (amarillo), pozos con información estratigráfica analizadas (resaltadas en rojo) y mediciones MT (verde) Fuente: Elaboración propia.....	21
<b>Figura 2.8</b>	Mapa de captaciones subterráneas ubicadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	22
<b>Figura 3.1</b>	Perfil geoelectrico 2D (Perfil 1) entre los puntos LT3 – LT1. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.....	30
<b>Figura 3.2</b>	Perfil geoelectrico 2D (Perfil 2) entre los puntos LT2 – LT3. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.....	31
<b>Figura 3.3</b>	Perfil geoelectrico 2D (Perfil 3) entre los puntos LT5 – LT4. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA. ....	32

<b>Figura 3.4</b> Perfil geoelectrico 2D (Perfil 4) entre los puntos LT7 – LT6. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA. ....	33
<b>Figura 3.5</b> Perfil geoelectrico 2D (Perfil 5) entre los puntos LT8 – LT7. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA. ....	34

#### iv. ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 2.1</b> Descenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de bombeo a caudal constante para la captación ND-0702-5520. Fuente: Elaboración propia.....	23
<b>Gráfico 2.2</b> Ascenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de recuperación para la captación ND-0702-5520. Fuente: Elaboración propia.....	24
<b>Gráfico 2.3</b> Descenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de bombeo a caudal constante para la captación ND-0702-4466. Fuente: Elaboración propia.....	25
<b>Gráfico 2.4</b> Ascenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de recuperación. para la captación ND-0702-4466. Fuente: Elaboración propia.....	26
<b>Gráfico 3.1</b> Gráfico de software Aquifer Test para la captación ND-0702-5520. Fuente: Elaboración propia.....	35
<b>Gráfico 3.2</b> Gráfico de software Aquifer Test para la captación ND-0702-4466. Fuente: Elaboración propia.....	36

#### v. ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Tabla de homologación de las unidades hidrogeológicas con las resistividades tomadas a partir de perfiles geofísicos, potenciales hidrogeológicos en función del cálculo de parámetros hidráulicos e interpretaciones del subsuelo. Fuente: Elaboración propia.....	41
--	----

## **vi. ANEXOS**

<b>Anexo I: Mapa 1:</b> Mapa de ubicación de la zona de prospección 1, de los puntos MT LT1, LT2 y LT3 y perfiles 1 y 2. ....	48
<b>Anexo I: Mapa 2:</b> Mapa de ubicación de la zona de prospección 2, de los puntos MT LT4 y LT5 y perfil 3. ....	49
<b>Anexo I: Mapa 3:</b> Mapa de ubicación de la zona de prospección 3, de los puntos MT LT6, LT7 y LT8 y perfiles 4 y 5. ....	50
<b>Anexo II: Tabla 1:</b> Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de bombeo a caudal constante de 1,5 L/s para la captación código ND-0702-5520. ....	51
<b>Anexo II: Tabla 2:</b> Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de recuperación para la captación código ND-0702-5520. ....	52
<b>Anexo II: Tabla 3:</b> Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de bombeo a caudal constante de 20,5 L/s para la captación de código ND-0702-4466. ....	52
<b>Anexo II: Tabla 4:</b> Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de recuperación para la captación código ND-0702-4466. ....	53
<b>Anexo Fotográfico:</b> Puesta en terreno de los equipos de medición geofísica. ....	54

## **vii. RESUMEN**

El presente estudio se enfoca en la realización de prospecciones geofísicas e interpretaciones hidrogeológicas, con el objetivo de determinar las ubicaciones ideales para realizar captaciones de aguas subterráneas y así garantizar un alto caudal de extracción en el “Fundo Las Tinajas”, ubicado al suroeste de la ciudad de Talca, Región del Maule, Chile, en el cual se desea realizar un gran proyecto de urbanización.

Debido al gran requerimiento hídrico del proyecto hidráulico, se realiza una prospección geofísica con el método Magneto Telúrico, que registra las variaciones del campo electromagnético natural de la tierra, esto con el objetivo de ubicar estratos de acuíferos que puedan presentar un mayor potencial hidrogeológico y una mayor seguridad hídrica. De esta manera, se obtienen perfiles de resistividad eléctrica, los que exponen que a menor resistividad eléctrica se tienen depósitos con muy baja transmisibilidad, como limos y/o arcillas, y a mayor resistividad se tienen rocas compactas o meteorizadas con potencial hidrogeológico bajo a nulo.

Posteriormente, a través de los datos de pruebas de bombeo preexistentes, es posible realizar el cálculo de los parámetros hidráulicos mediante el software Aquifer Test 11 Pro (2021), de los primeros dos estratos del subsuelo, homologando los resultados a los perfiles realizados, obteniéndose que en las zonas de resistividades de entre 50 a 150 ohm se tiene una alta transmisibilidad y un alto potencial hidrogeológico, y en las zonas de resistividades entre 0 a 50 ohm se tiene una baja transmisibilidad y un potencial hidrogeológico bajo a nulo. Por otro lado, se realiza un análisis de vulnerabilidad de acuíferos con el método GOD, considerando que, en el primer estrato del subsuelo, a pesar de tener un alto potencial hidrogeológico, presenta una alta vulnerabilidad, puesto que corresponde a un acuífero libre ubicado a poca profundidad. Como resultado, se obtiene que los puntos MT LT1 y LT7 a la profundidad de 20 a 40 m aproximadamente representan mejores zonas para realizar una captación, puesto que tienen un alto potencial hidrogeológico y una baja vulnerabilidad a la contaminación.

El estudio permite determinar que es de gran importancia el papel que juega un geólogo en la planificación de un abastecimiento de agua potable colectiva, puesto que permite garantizar un suministro sostenible de agua y una disminución de los costos asociados al proyecto hidráulico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (2018), la población urbana mundial ha aumentado exponencialmente desde 1950 hasta 2018, es por esto que, la extracción de aguas subterráneas es fundamental para satisfacer las demandas hídricas actuales y para poder contribuir al desarrollo y expansión de una ciudad. La urbanización de tanto áreas rurales como urbanas requiere de un enfoque integral que garantice un suministro sostenible de agua, considerando sobre todo la actual escasez de agua, la variabilidad climática, y el déficit pluviométrico actual que es de un 22% (DGAC, 2023). El presente estudio tiene como objetivo destacar la importancia de un geólogo para contribuir en los lineamientos base de la planificación de un abastecimiento de agua potable colectiva y así aportar en el crecimiento sostenible y mejoramiento de centros urbanos.

El área de estudio corresponde al “Fundo Las Tinajas”, en el cual se quiere realizar un proyecto de urbanización, para el cual se debe realizar un abastecimiento de agua potable, éste se encuentra ubicado en el sector suroeste de la ciudad de Talca, a 2,3 km de la plaza de armas y presenta una superficie de 300 hectáreas aproximadamente, mayormente de uso urbano. El contexto estratigráfico de la zona indica la existencia de depósitos de gravas, arenas y arcillas principalmente. En el fundo existe un pozo profundo de 26 m y se determinó a partir de una prueba de bombeo que el caudal constante a extraer es de 1,5 L/s, sin embargo, para el proyecto que se quiere desarrollar se necesita un caudal de entre 50 a 100 L/s, por esto, es necesario realizar una prospección de aguas subterráneas con el objetivo de encontrar acuíferos que tengan una mayor transmisibilidad y otorguen una mayor seguridad hídrica, tanto por el volumen como por la calidad de éstos.

Por lo anterior, este estudio se enfoca en la realización de una prospección geofísica a través del Método Magnetotelúrico (MT), el cual registra variaciones temporales del campo electromagnético natural de recursos hídricos, obteniéndose de esta manera, perfiles de resistividad eléctrica vs profundidad. Por otro lado, con la utilización de datos tomados de captaciones previamente realizadas se determinan potenciales acuíferos que puedan presentar mayor transmisibilidad y así poder identificar los lugares ideales para poder realizar captaciones de aguas subterráneas para un proyecto hidráulico de agua potable.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

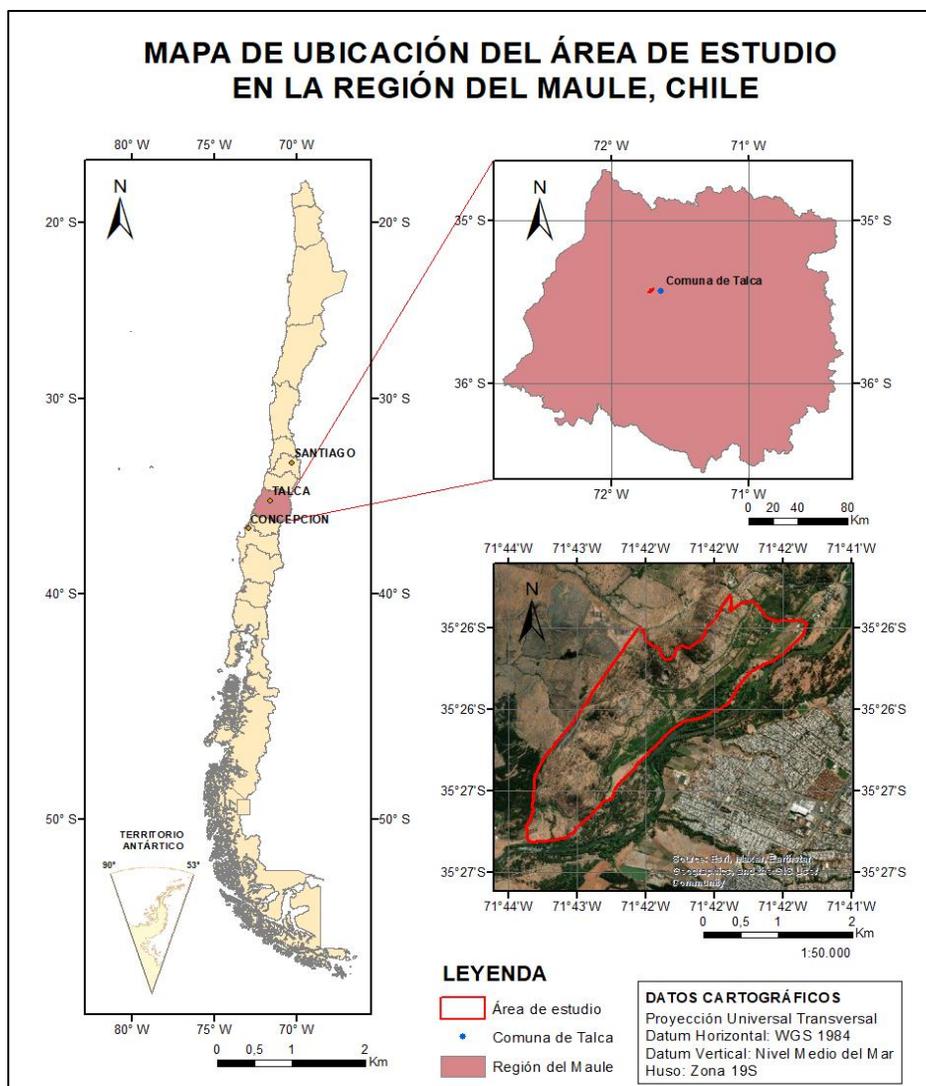
Definir los lineamientos base para la elaboración de un proyecto de agua potable particular y colectivo en el “Fundo Las Tinajas” de la ciudad de Talca, Región del Maule a través de la realización de prospecciones geofísicas e interpretaciones hidrogeológicas.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realizar una prospección de aguas subterráneas con método geofísico magnetotelúrico (MT) a partir de puntos estratégicamente predefinidos.
- Obtener perfiles geofísicos mediante una inversión de datos y homologarlos a unidades hidrogeológicas considerando parámetros hidráulicos estimados de captaciones preexistentes.
- Determinar ubicaciones ideales para captaciones de aguas subterráneas e identificar la influencia del estudio realizado en los lineamientos base de un proyecto hidráulico.

## **1.2 Ubicación y accesos**

El área de estudio se encuentra al oeste del Río Claro en el “Fundo Las Tinajas” ubicado en la Comuna de Talca, Región del Maule, Chile, en la zona comprendida entre los 35°25'6.29"S - 71°42'5.30"W, 35°25'31.46"S - 71°41'12.44"W y 35°26'31.38"S - 71°43'50.20"W, 35°26'55.56"S - 71°43'10.18"W (Figura 1.1). Desde la ciudad de Santiago, se puede acceder por vía terrestre a través de la Ruta 5 Sur hacia el sur, se debe seguir por esta ruta por 215 km, luego, se debe tomar la salida 168 hacia Talca. Desde la Plaza de Armas de Talca se debe acceder por la calle Cuatro Norte, luego, tomar la ruta K-60 y doblar a la izquierda en la calle Las Tinajas, accediendo de esta manera al “Fundo Las Tinajas”.



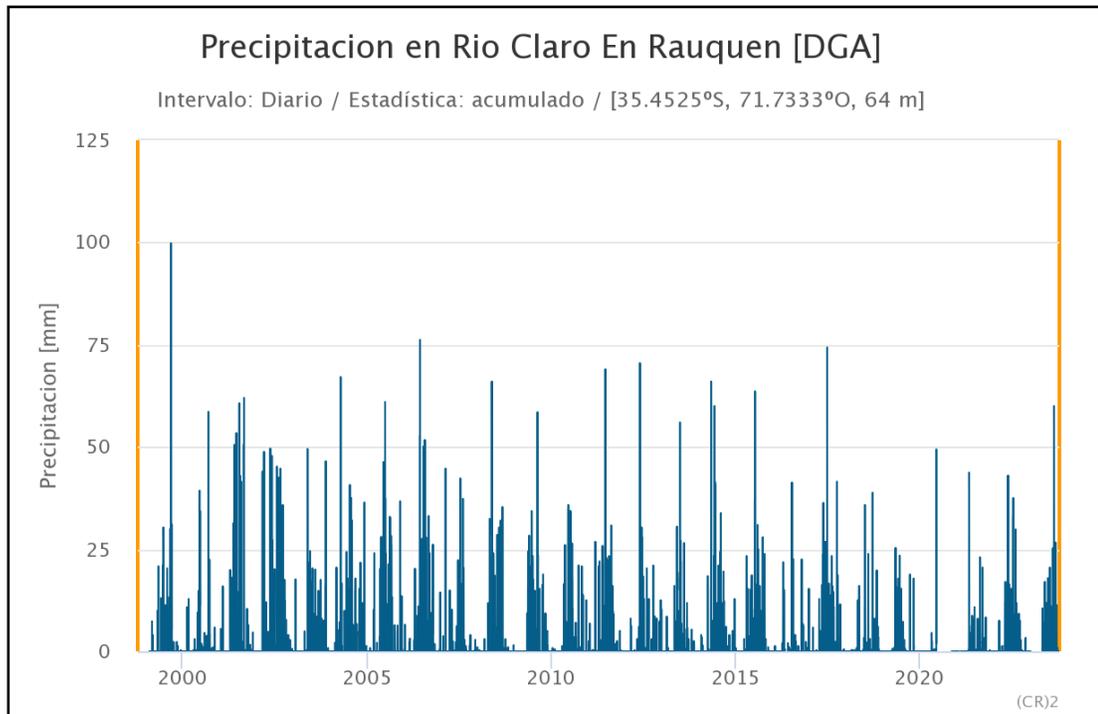
**Figura 1.1** Ubicación del área de estudio en la Región del Maule, Chile.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 1.3 Antecedentes meteorológicos

#### 1.3.1 Clima y precipitaciones

Según la Dirección General de Aguas en Cuenca del Río Maule, (DGA, 2004), el clima para la ciudad de Talca es mediterráneo, lo cual corresponde a un clima templado, seco a subhúmedo, caracterizándose por inviernos húmedos y veranos secos con déficit hídrico, propio de la depresión intermedia del país. En la estación de Río Claro en Rauquen, ubicada a 1,75 km aproximadamente del suroeste del área de estudio, la temperatura promedio en verano (de Octubre a Marzo) es de 19,4°C, mientras que en invierno (de Abril a Septiembre) es de 11,1°C (Extraído de Explorador Climático CR<sup>2</sup>).

La duración promedio del período seco de la ciudad de Talca es de 5 meses, mientras que la duración promedio del período de receso vegetativo es de 2 meses, por último, la duración promedio del período húmedo es de 4 meses, teniéndose que durante el invierno las precipitaciones promedio son de 475 mm, mientras que para el verano éstas son de 29 mm como se puede ver en la Figura 1.2, que muestra las precipitaciones promedio de la estación de Río Claro en Rauquen.



**Figura 1.2** Precipitaciones promedio de la estación de Río Claro en Rauquen entre los años 1999 a 2023. Se observa una notoria disminución en las precipitaciones desde el año 2018 aproximadamente. Fuente: Explorador Climático CR2.

## 1.4 Metodología

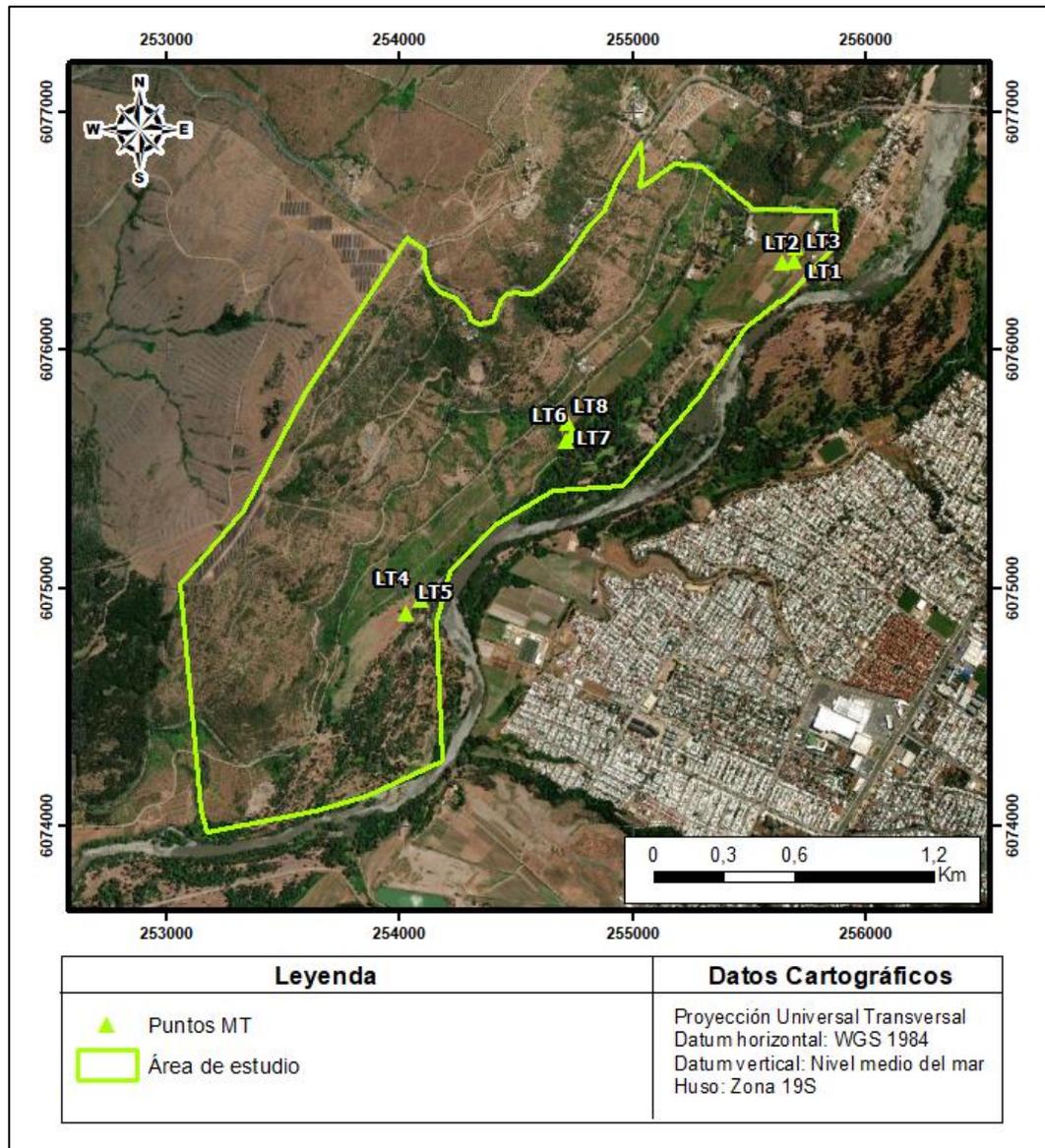
### 1.4.1 Recopilación de antecedentes y análisis de la información

Primeramente, se realiza una recopilación de trabajos anteriores que puedan aportar a conocer la estratigrafía, hidrogeología y principales unidades de afloramientos de rocas en el área de estudio, así mismo, correlacionar y contrarrestar los datos obtenidos.

Luego, se realiza una breve revisión de normativas de aguas subterráneas presentes en el área, esto incluye la identificación y recopilación de algunas leyes, políticas y normativas relevantes relacionadas con la gestión de aguas en el área de estudio.

### 1.4.2 Trabajo de terreno

Se definieron 8 puntos específicos (Figura 1.3) para realizar una prospección geofísica con el método magnetotelúrico (MT), considerando la geología, topografía y sitios de mayor accesibilidad de la zona, las cuales se describen a continuación:



**Figura 1.3** Mapa de ubicación de los puntos MT realizados para el estudio geofísico en el “Fundo Las Tinajas”. Fuente: Elaboración propia.

- Los puntos LT1, LT2 y LT3 (Anexo I: Mapa 1) se definieron considerando la existencia previa del pozo profundo de 26 m de código ND-0702-5520 y una noria, de 6 m de

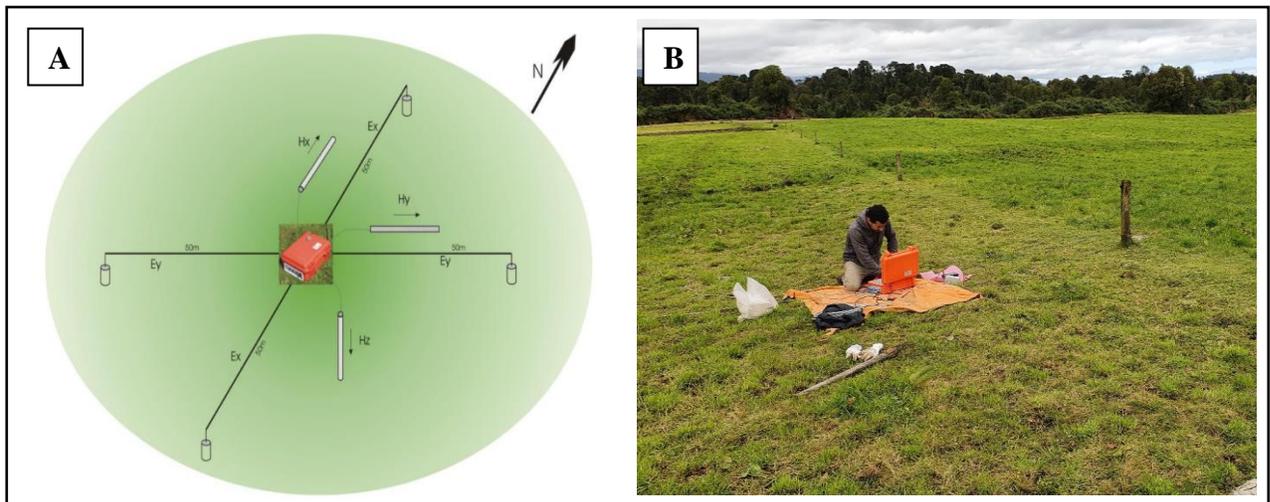
profundidad, de código ND-0702-4466, esto con el objetivo de identificar si en zonas más profundas pudiesen existir estratos acuíferos de mayor potencial hidrogeológico.

- Los puntos LT4 y LT5 (Anexo I: Mapa 2) se definieron en esa zona con el propósito de analizar la factibilidad de agua subterránea en la zona suroeste del fundo.
- Por último, los puntos LT6, LT7 y LT8 (Anexo I: Mapa 3), se establecieron en un área cercana al cauce principal del Río Claro, con el objetivo de analizar la continuidad lateral de los acuíferos y la influencia del río en esta zona, también debido a que es la zona más cercana al punto de mayor altitud del fundo, lo que disminuiría el costo de transporte y movimiento de tierras en caso de realizarse una captación en esos puntos.

Posterior a la definición de los puntos, se llevó a cabo el estudio geofísico mediante el método Magneto Telúrico en el Fundo Las Tinajas, con el propósito de obtener la profundidad de los estratos acuíferos, así como su estructura, geometría y relación con unidades geológicas de los potenciales hidrogeológicos de la zona.

En la Figura 1.4 (A) se esquematiza la medición MT (Magneto Telúrico), que registra las variaciones temporales del campo electromagnético natural por medio de 4 electrodos no polarizables que registran el campo eléctrico, éstos se ubican en los extremos de la cruz y están denotados como Ex y Ey, de igual forma un electrodo Ey apunta al este y el otro al oeste, se conectan mediante cables a la unidad análogo digital (ADU), que registra los datos y su posición mediante un GPS integrado. Para el trabajo de terreno realizado, el arreglo fue ubicado a 50 m del equipo ADU, con una equidistancia de 5 m entre cada electrodo y su posición fue registrada a través de un GPS manual, esto se realizó con el objetivo de disponer el equipo en una posición estratégica para la medición de los siguientes puntos. Por otro lado, los tubos largos con letras Hx, Hy y Hz son las bobinas que miden el campo magnético norte – sur, este – oeste y vertical, respectivamente. En la Figura 1.4 (B) se muestra la disposición del equipo de medición MT en

terreno para la adquisición de datos, el cual no es invasivo ni perturba el entorno. (Anexo Fotográfico).



**Figura 1.4** (A) Esquema de medición MT (Magneto Telúrico). (B) Se aprecia la disposición del equipo en terreno.

### 1.4.3 Integración e interpretación de los resultados

#### 1.4.3.1 Geofísica

Luego de realizar las 8 mediciones geofísicas MT, los datos magnetotelúricos recopilados se someten a un procesamiento que incluye filtrado, corrección de ruido y ajustes para mejorar su calidad, esto es crucial para garantizar que los datos sean confiables y proporcionen una representación de las propiedades eléctricas del subsuelo.

Posteriormente, se realiza una inversión de datos para finalmente obtener los 5 perfiles de resistividad eléctrica, los cuales fueron elaborados por geofísicos de la empresa GeoResource SpA, éstos fueron realizados con la finalidad de caracterizar la resistividad eléctrica del subsuelo según la profundidad y permitiendo el reconocimiento de la disposición de las distintas unidades litológicas presentes en el subsuelo, así como también los tramos acuíferos de mayor potencial hidrogeológico, esto por medio de la correlación de la información de resistividad representada en ellos con las unidades geológicas e hidrogeológicas presentes en el área de estudio.

#### 1.4.3.2 Hidrogeología

Se utiliza el software Aquifer Test 11 Pro (2021) para calcular parámetros hidráulicos, tales como transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento a partir de datos de pruebas de bombeo obtenidos

de captaciones preexistentes, correspondientes al pozo profundo código ND-0702-5520 de 26 m y una noria código ND-0702-4466, de 6 m de profundidad. Para esto, se deben introducir en el programa los datos de espesor del acuífero, diámetro del pozo, profundidad del nivel freático y los datos de descarga determinados en la prueba de bombeo, los cuales son expresados en minutos/profundidad, determinándose de esta manera las capacidades hidráulicas del acuífero.

El software entrega la transmisibilidad promedio del acuífero y la porosidad eficaz, de esta manera y utilizando la Ley de Darcy (Darcy, H., 1856) (Fórmula 1), en donde T corresponde a la transmisibilidad y b al espesor del acuífero, se obtiene la permeabilidad (K). Por último, una vez obtenidos y analizados los parámetros hidráulicos del acuífero, se estima el caudal máximo para la extracción.

$$K = (T/b) \text{ m/día} \quad (1)$$

Posteriormente, se estiman los parámetros hidráulicos y potencial hidrogeológico de los estratos más profundos que 26 m, debido a que éstos no tienen datos de prueba de bombeo. La estimación se realiza en base a las resistividades que estas zonas presentan, tomadas a partir de los perfiles geofísicos, promediando los datos de los parámetros hidráulicos previamente calculados en las captaciones preexistentes, con el propósito de obtener las unidades hidrogeológicas del subsuelo de la zona de estudio.

Luego, se realiza un análisis de la vulnerabilidad de acuífero a través de la metodología GOD (Foster, S.,1987), la cual se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables del acrónimo:

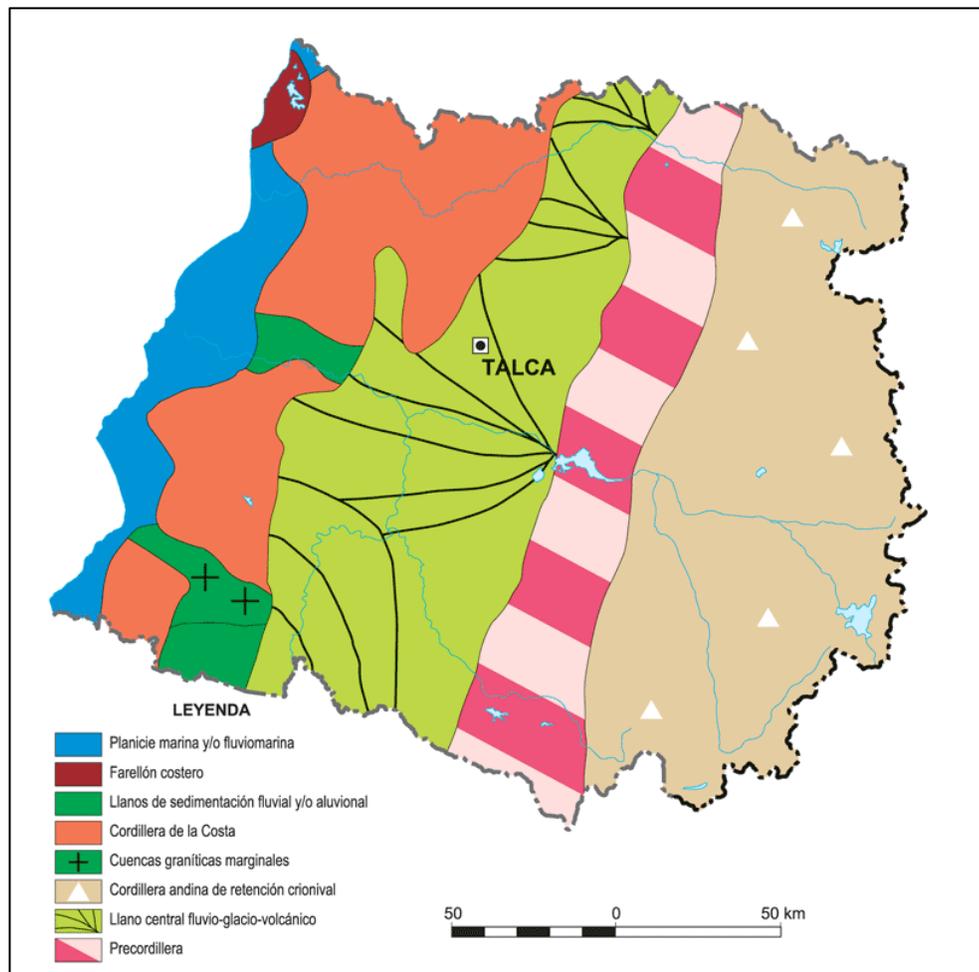
- G (ground water occurrence – tipo de acuífero)
- O (overall aquifer class – litología de la cobertura)
- D (depth to groundwater – profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico)



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Geomorfología

Según Börgel, 1983 el segmento correspondiente a la Región del Maule se encuentra distribuido en franjas orientadas norte – sur en 5 grandes unidades morfoestructurales, las que corresponden de oeste a este a: planicie litoral y/o fluviomarina, cordillera de la costa, llano central fluvio – glacio – volcánico, precordillera y cordillera andina de retención crionival (Figura 2.1). El área de estudio corresponde a una zona transicional entre la cordillera de la costa y depresión o llano central.



**Figura 2.1** Zonas geomorfológicas de la Región del Maule. Extraído del Instituto Geográfico Militar. Fuente: Modificado por Börgel, J., 1983.

La cordillera de la costa se presenta como un cordón montañoso y accidentado, con una orientación general norte – sur, este sistema cordillerano configura una sucesión regular de quebradas y valles, que corresponden a vías de evacuación de aguas (Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU),

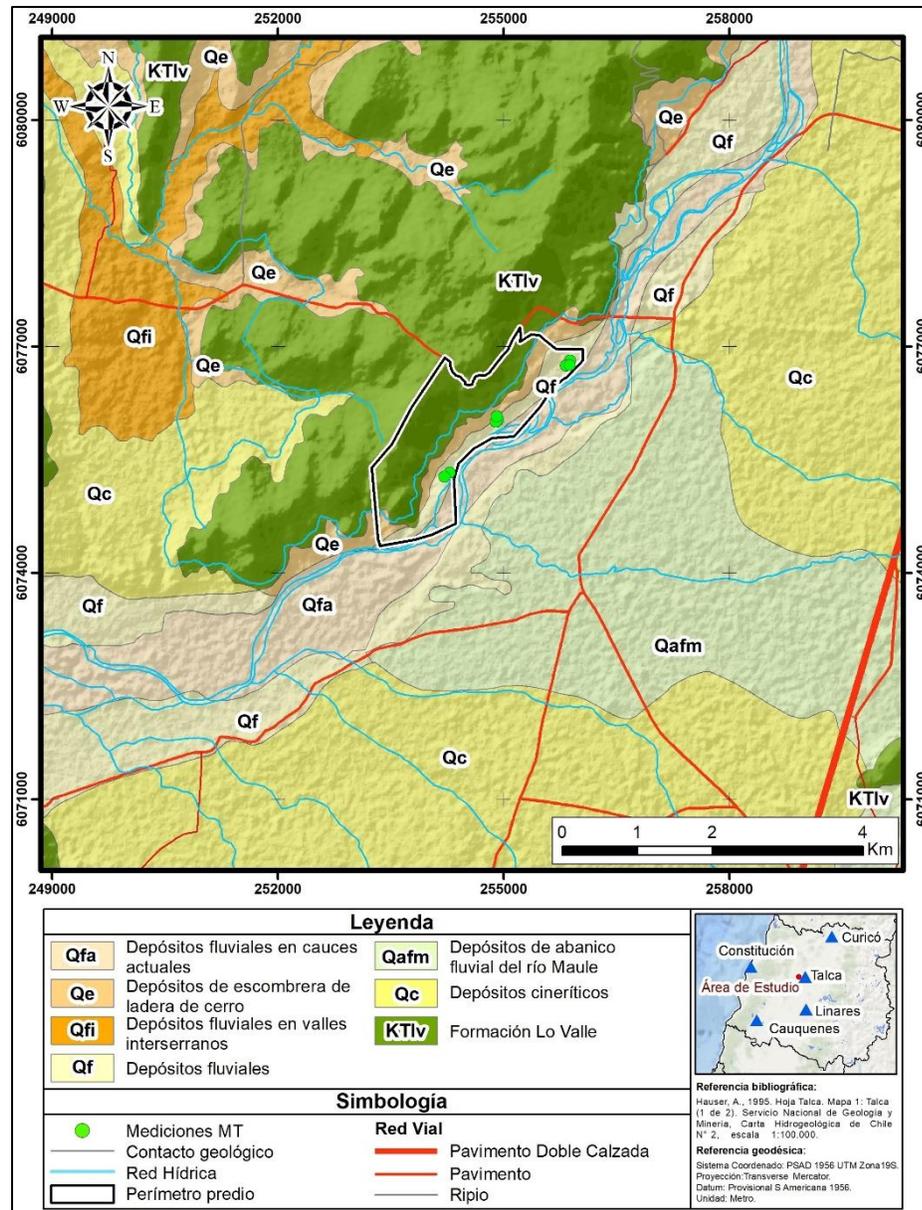
2019). En el área de estudio, está compuesta por cerros que presentan elevaciones de hasta 285 ms.n.m, éstos tienen pendientes de hasta 45°, se ubican en la zona noroeste y están conformados por la Formación Lo Valle (Figura 2.1).

La depresión o llano central fluvio – glacio - volcánico corresponde a una cuenca rellena de depósitos aluviales y fluviales, que en el área de estudio presentan elevaciones de hasta 80 ms.n.m, en general, la depresión central presenta pendientes muy bajas, que aumentan levemente al acercarse hacia los cerros de la cordillera de la costa, debido a la influencia de los abanicos aluviales que se generan a la salida de las quebradas y valles. (MINVU, 2019).

Respecto a los cursos de agua que cruzan la depresión central, se forman pequeñas terrazas fluviales con poca profundización, generando pequeños escarpes relacionados a la erosión causada por los cursos de agua. En el área de estudio se encuentra como principal red de agua el Río Claro. (MINVU, 2019).

## **2.2 Geología**

La geología del área de estudio (Figura 2.2) está representada principalmente por sedimentos de edad cuaternaria depositados producto de procesos fluviales, volcánicos y gravitacionales que se disponen sobre rocas más antiguas que son principalmente de tipo volcanoclásticas. A continuación, se describen las unidades presentes de base a techo.



**Figura 2.2** Mapa geológico del área de estudio en el “Fundo Las Tinajas”, ciudad de Talca, Chile. Fuente: Modificado de Hauser, A., 1995.

### Formación Lo Valle (KTlv) – Cretácico Superior - Paleógeno

Fue definida por Thomas (1958). Corresponde a la unidad más antigua de la zona, y conforma las zonas topográficamente altas al noroeste del sector. Esta formación se define como una secuencia de rocas volcanoclásticas que presenta variación de facies de norte a sur, se constituye principalmente por lavas andesíticas y riolíticas e ignimbritas, y brechas con escasas

intercalaciones locales de tufitas y areniscas. Gran parte de las lavas presentan texturas porfídicas, fluidales y/o amigdaloides. (Hauser, A., 1995).

Al oeste de la ciudad de Talca, esta formación exhibe un fuerte fracturamiento e intensa intemperización, lo cual se acentúa en torno al eje de esteros y quebradas, favoreciendo el desarrollo de una cubierta de suelo de 0,4 a 1,5 m de espesor. (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos cineríticos (Qc) – Cuaternario**

Este tipo de depósitos se distribuyen ampliamente en el sector, forman una secuencia de espesor importante, compacta y bien cementada de cenizas y tobas de lapilli intercaladas. Éstas son de carácter ácido y se encuentran constituidas por esquirlas vítreas, cristales de plagioclasa y fragmentos de pómez, que también pueden presentar lentes o bancos inestratificados de arenas y gravas y niveles arcillosos intercalados. La escasa permeabilidad superficial de esta unidad provoca el desarrollo de una densa red de drenaje. (Hauser, A., 1995).

En el sector oriental de Talca la secuencia superior de esta unidad es de 12 a 15 m de espesor e integra una capa bien desarrollada de arena media a gruesa conformada por cristales de cuarzo y cenizas, de carácter friable, poroso y permeable. Casi la totalidad del extenso llano interfluvial del Río Claro está conformado por este tipo de depósitos (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos de abanico fluvial del Río Maule (Qafm) – Cuaternario**

Esta unidad se encuentra constituida principalmente por sedimentos de granulometría gruesa, con claro aspecto de acumulaciones fluviales tales como rípios de bolones, rípios, gravas y arenas con muy ocasionales intercalaciones lenticulares finas (limo y arcillas). Los clastos de estos sedimentos son resistentes, de aspecto fresco, con superficie pulida y bien redondeada, por efectos de un prolongado transporte, predominan los correspondientes a rocas volcánicas y graníticas, y subordinadamente, a tobas y brechas. El espesor de esta unidad es de 30 m aproximadamente en el área de estudio. Estos depósitos constituyen un extenso llano con suave inclinación hacia el este (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos fluviales en valles interserranos (Qfi) – Cuaternario**

En esta unidad se incluyen todos los materiales fluviales que rellenan el fondo de una serie de valles secundarios ubicados en torno al borde preandino y en la parte occidental del Valle Central. La

unidad está integrada por arenas y gravas arenosas, con esporádicos niveles lenticulares finos (limos y arcillas), cuyos clastos derivan de la erosión de relieves volcanoclásticos (tales como la Formación Lo Valle y Coya Machalí) y graníticos. Su transporte y deposición se produjo por acción de una paulatina disgregación de laderas ligada a una intensa actividad pluvial. Los clastos de estos depósitos son subangulosos a angulosos, de mala selección, alta friabilidad y no consolidados, su granulometría disminuye a partir de las cabeceras de los valles. (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos fluviales (Qf) – Cuaternario**

Están conformados por sedimentos clásticos de grano grueso, tales como ripios y gravas, y niveles arenosos, los cuales están presentes en zonas llanas con forma de terrazas producto de la incisión de los ríos, por cambios locales en el régimen fluvial. Los clastos de estos sedimentos, los cuales son predominantemente volcánicos y graníticos, son subredondeados, con superficies lisas, bien pulidos, de aspecto fresco y muy resistentes. La unidad se encuentra débilmente compactada, de buena selección y de alta porosidad y permeabilidad, aun cuando, la secuencia puede mostrar cambios laterales exhibiendo lentes de sedimentos finos de limos y/o arcillas, debido a pérdidas graduales en la energía del transporte (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos de escombrera de ladera de cerro (Qe) – Cuaternario**

A los pies de los relieves montañosos se exhiben este tipo de depósitos, los cuales son generados por material fragmental, producto de un intenso fracturamiento y alteración superficial, el cual es transportado por acción gravitacional e hídrica desde laderas de fuerte pendiente hasta zonas bajas, formando abanicos cuyo ápice coincide con el eje de la quebrada. Estos depósitos son heterogéneos conformado por distintos fragmentos rocosos de variados tamaños, formas, composición y resistencia, que a su vez estarían inmersos en una escasa matriz de gravilla, arenas y limos, formando un conjunto macizo, suelto y de buena permeabilidad. (Hauser, A., 1995).

### **Depósitos fluviales en cauces actuales (Qfa) – Cuaternario**

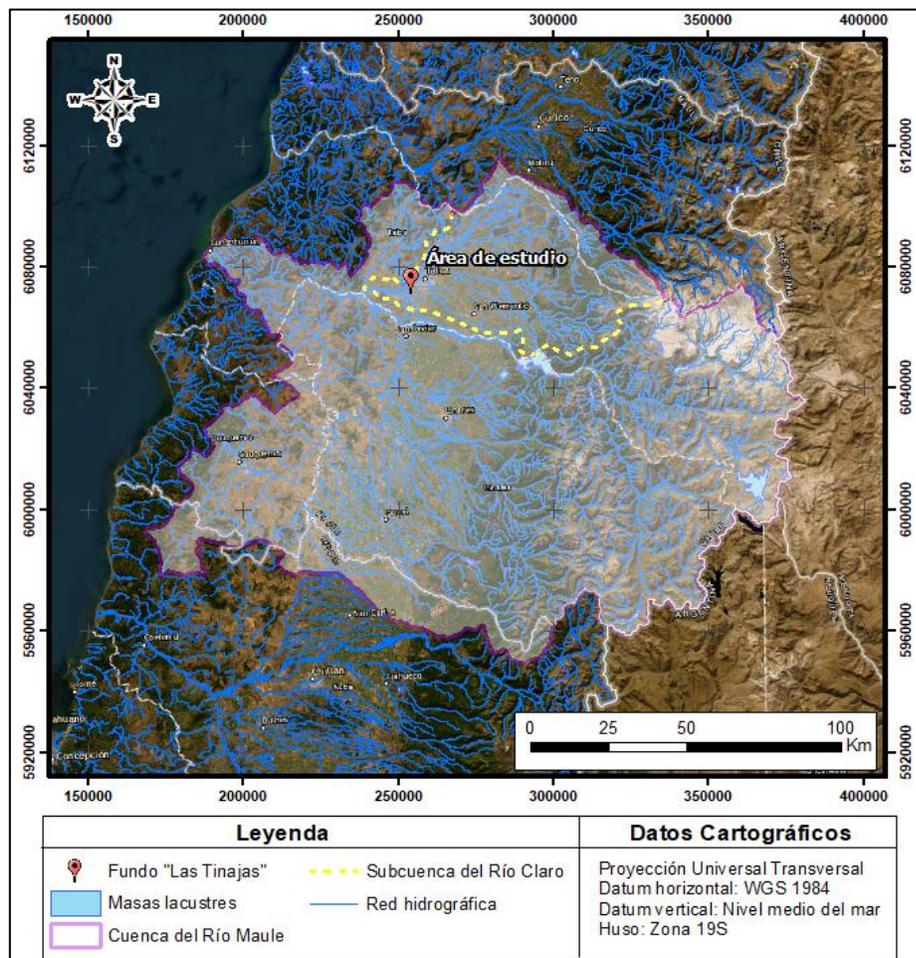
Los depósitos de esta unidad consisten en ripios, gravas y gravas arenosas y se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de la actual llanura de inundación de los ríos mayores. Los clastos son heterogéneos, muy bien redondeados, con superficies pulidas, duros y resistentes. Los clastos mayores se disponen en una escasa matriz de arenas gruesas a gravillas, conformando numerosas islas o bancos dispuestos a lo largo y ancho de todos los cauces (Hauser, A., 1995).

## 2.3 Hidrogeología

La hidrogeología es una interrelación entre la diversidad geológica, geomorfológica y climática que controla la distribución de los recursos hídricos a lo largo del territorio. Una parte de estos recursos se acumulan bajo la superficie en unidades conocidas como acuíferos. De esta manera, es de gran importancia la comprensión de la disposición del agua en las rocas y suelos para poder clasificarlos considerando la permeabilidad y transmisibilidad de éstos.

### 2.3.1 Red hidrográfica

Río Claro es una subcuenca de la gran cuenca hidrográfica del Río Maule, ésta presenta un área de 3.064,94 km<sup>2</sup>, es una cuenca exorreica, se encuentra en la zona norte de la Cuenca del Río Maule y constituye un 14,5% de ella (Figura 2.3).

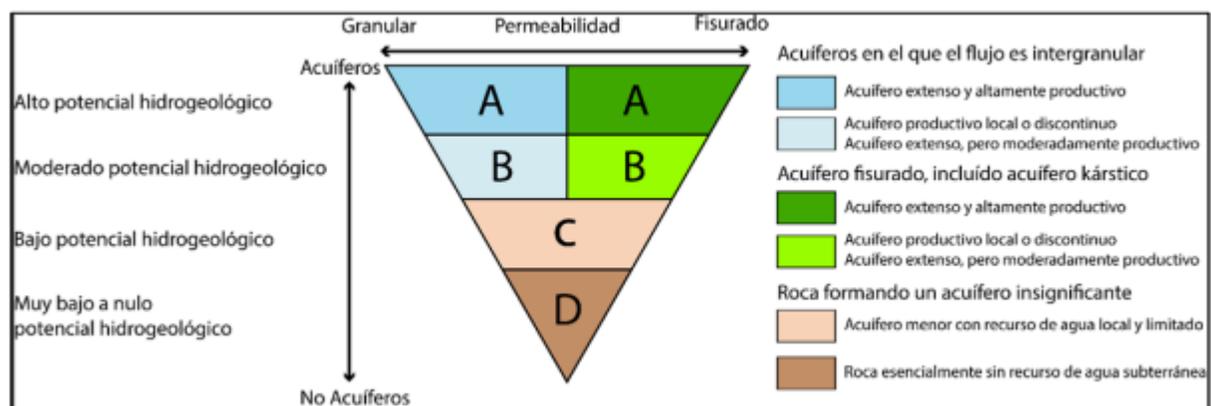


**Figura 2.3** Mapa de la red hidrográfica de la Cuenca del Río Maule y la subcuenca del Río Claro, en la cual se ubica el área de estudio. Fuente: Modificado de Inventario de Cuenas y Subcuenas de Chile, MOP, 2014.

La Cuenca del Río Maule se encuentra influenciada bajo un clima mediterráneo y es de gran importancia debido a su extensión, ésta desemboca en la ciudad de Constitución y su principal red de drenaje es el río homónimo. A 90 km de su origen, éste expande su cauce para atravesar el llano central fluvio-glacio-volcánico (Figura 2.1), y penetrar en la cordillera de la Costa, donde confluye por el norte con el Río Claro, tributario de gran importancia, sobre todo en el área de estudio, pues éste es la principal fuente de recarga de acuíferos (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2014).

### 2.3.2 Unidades hidrogeológicas

Para realizar la caracterización de unidades hidrogeológicas se utiliza la metodología de Struckmeier y Margat (1995), la cual clasifica unidades litológicas de acuerdo con el tipo de permeabilidad, las cuales corresponden a: (a) granular, que son aquellos ambientes en que los sedimentos son detríticos, tales como conglomerados, arenas y areniscas, los cuales presentan buenas condiciones para almacenar y transmitir el agua; o (b) fisurado, que son ambientes ubicados en las fracturas de rocas plutónicas y metamórficas, tales como granitoides, andesitas, basaltos, entre otros. También las agrupa según su potencial para transmitir agua, donde cada clasificación considera la capacidad productiva y la extensión lateral de las unidades, éstas se clasifican según potencial alto, moderado, bajo y muy bajo a nulo (Figura 2.4). De esta manera, se determina si la unidad estudiada corresponde a un acuífero o no, para esto, es necesario conocer la geología de la zona y las características del suelo, considerando su grado de meteorización, erosión y fracturamiento.



**Figura 2.4** Diagrama de unidades hidrogeológicas. Fuente: Struckmeier y Margat, 1995.



### **2.3.2.1 Unidades de alta a media importancia hidrogeológica**

Son aquellas unidades que presentan un alto potencial hidrogeológico, es decir, que tienen una alta permeabilidad y transmisibilidad y, por lo tanto, pueden formar acuíferos. En el área de estudio, cumplen con estas características los depósitos fluviales (Qf) y los depósitos asociados a cauces actuales (Qfa), los primeros albergan acuíferos libres en bancos de ripio, arena y gravas limpias, de buena selección y escasa matriz fina, donde los clastos son resistentes, subredondeados a redondeados, además, pueden contener intercalaciones arcillosas de poco espesor y continuidad lateral, generando acuíferos semiconfinados. Las zonas de importancia hidrogeológica pueden alcanzar los 32m de profundidad y el nivel freático se encuentra próximo a la superficie. Los depósitos asociados a cauces actuales (Qfa) contienen acuíferos libres en gravas arenosas con frecuentes niveles de arenas sueltas.

### **2.3.1.2 Unidades de media a baja importancia hidrogeológica**

Unidad con potencial hidrogeológico moderado, es decir, tiene una permeabilidad y capacidad baja a media de transmitir el agua y, por lo tanto, pueden formar acuíferos de baja producción. En el área de estudio corresponden a los depósitos de escombros de falda (Qe), los cuales no son considerados de interés hidrogeológico debido a su baja extensión, elevadas pendientes, lo que favorece el escurrimiento de aguas pluviales. El agua que se infiltra es utilizada principalmente por la vegetación, sin embargo, conforman sitios favorables para la recarga subterránea local.

### **2.3.1.3 Unidades de baja a nula importancia geológica**

Son las unidades de bajo a nulo potencial hidrogeológico, es decir, que su permeabilidad y transmisibilidad es baja. Forma acuíferos menores, acuífugos y acuícluidos, en general, se forman en rocas meteorizadas o macizas. En el área de estudio corresponde a la Formación Lo Valle (KTlv), que es una unidad de baja a nula importancia, con reducidas zonas de extensión de acuíferos locales, las cuales están asociadas a rocas fracturadas y/o superficialmente meteorizadas. También pueden originar pequeñas vertientes temporales, con escaso caudal.

## **2.4 Geofísica**

La geofísica es una ciencia derivada de la geología que trata el estudio de las propiedades físicas de la Tierra, emplea mediciones físicas y modelos físico - matemáticos para explorar, analizar y comprender la estructura y dinámica de nuestro planeta. A través de la integración de la

información geológica, hidrogeológica y geofísica se puede obtener una caracterización del subsuelo y de esta manera conocer la posición de el o los acuíferos existentes.

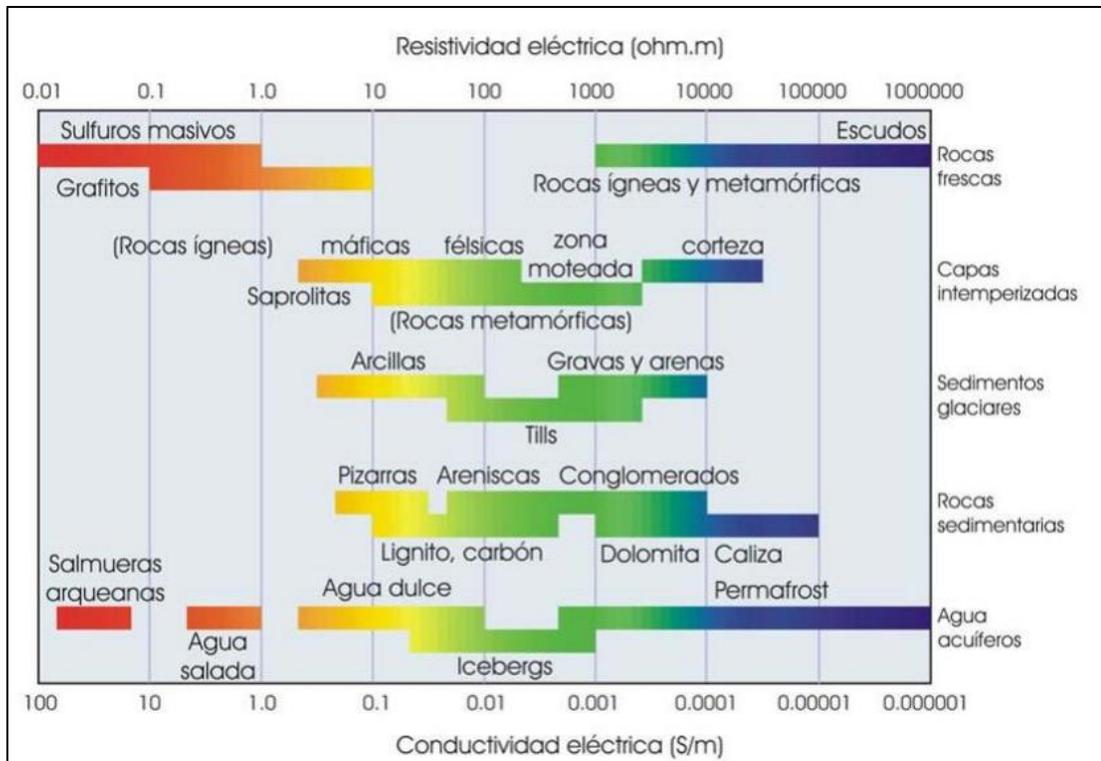
#### **2.4.1 Método Magnetotelúrico (MT)**

El método magnetotelúrico (MT) fue propuesto con los trabajos de (Kato y Kikuchi, 1950), siendo Louis Cargniard quien estableció los fundamentos del método para la exploración geofísica (Cargniard, 1953). El método magnetotelúrico es una técnica que consiste en medir desde la superficie fluctuaciones temporales de los campos electromagnéticos naturales de la Tierra, esto permite obtener información de las propiedades geoelectricas del subsuelo desde profundidades de unos pocos a cientos de kilómetros.

En exploración geofísica se emplea el método magneto telúrico debido a que entrega la resistividad eléctrica, esto es muy importante para la exploración de aguas subterráneas (Reckmann y Maldonado, 2000). Los factores de mayor influencia en el valor de la resistividad eléctrica de las rocas son la constitución mineralógica, el grado de saturación y la calidad del agua que la satura, la porosidad, las unidades geológicas y el grado de compactación de los sedimentos.

Este método es capaz de medir el campo eléctrico y el campo magnético natural de la tierra en la dirección norte-sur, este-oeste y en la vertical. Generando resultados que demuestran la variación de la resistividad eléctrica (inverso de la conductividad) en 3 dimensiones, permitiendo construir perfiles 2D generados por construcción de datos.

La resistividad de las rocas puede variar dentro de un rango por su contenido de agua, salinidad, distribución de poros y temperatura, en la Figura 2.6 se observan los rangos de resistividad de algunas rocas.

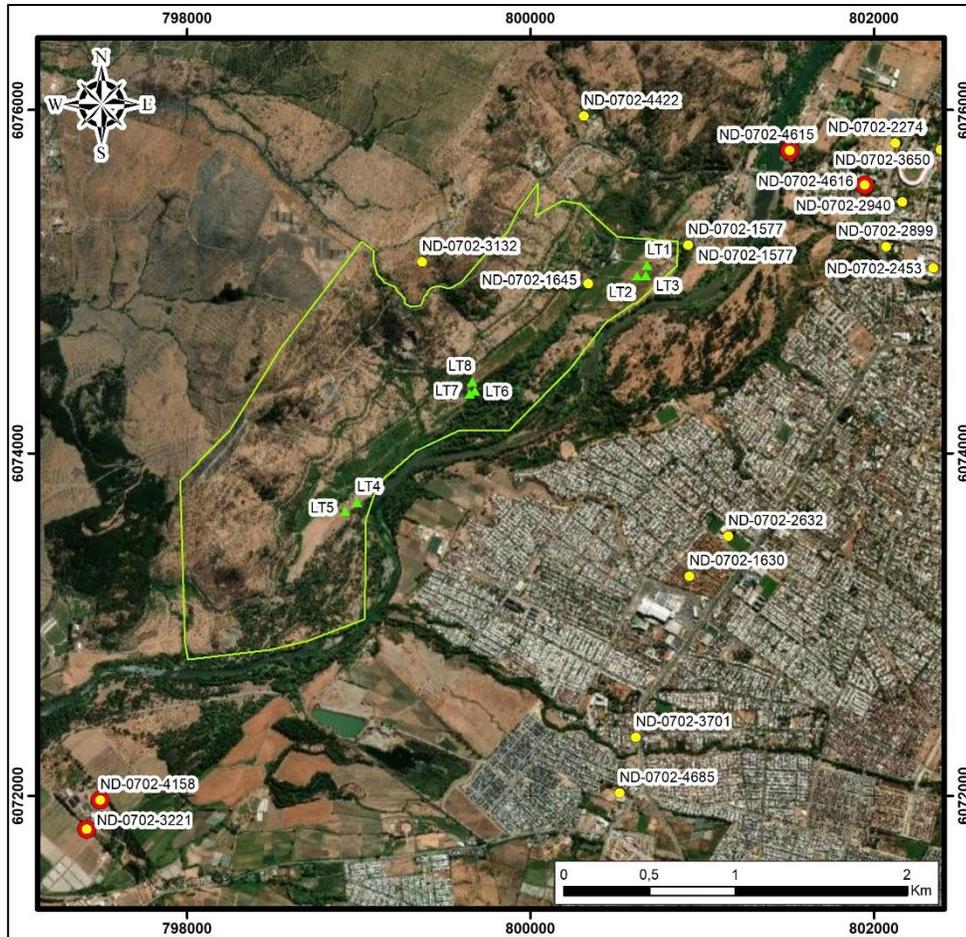


**Figura 2.6** Rango de valores de resistividad eléctrica de algunas rocas y minerales. Fuente: Palacky, G., 1987.

## 2.4.2 Antecedentes

### 2.4.2.1 Captaciones cercanas

Se identifican 4 pozos cercanos inscritos con información disponible en el área de estudio: **ND-0702-4158**, **ND-0702-4615**, **ND-0702-4616** y **ND-0702-3221**. En la Figura 2.7 se puede apreciar la ubicación de estos pozos.

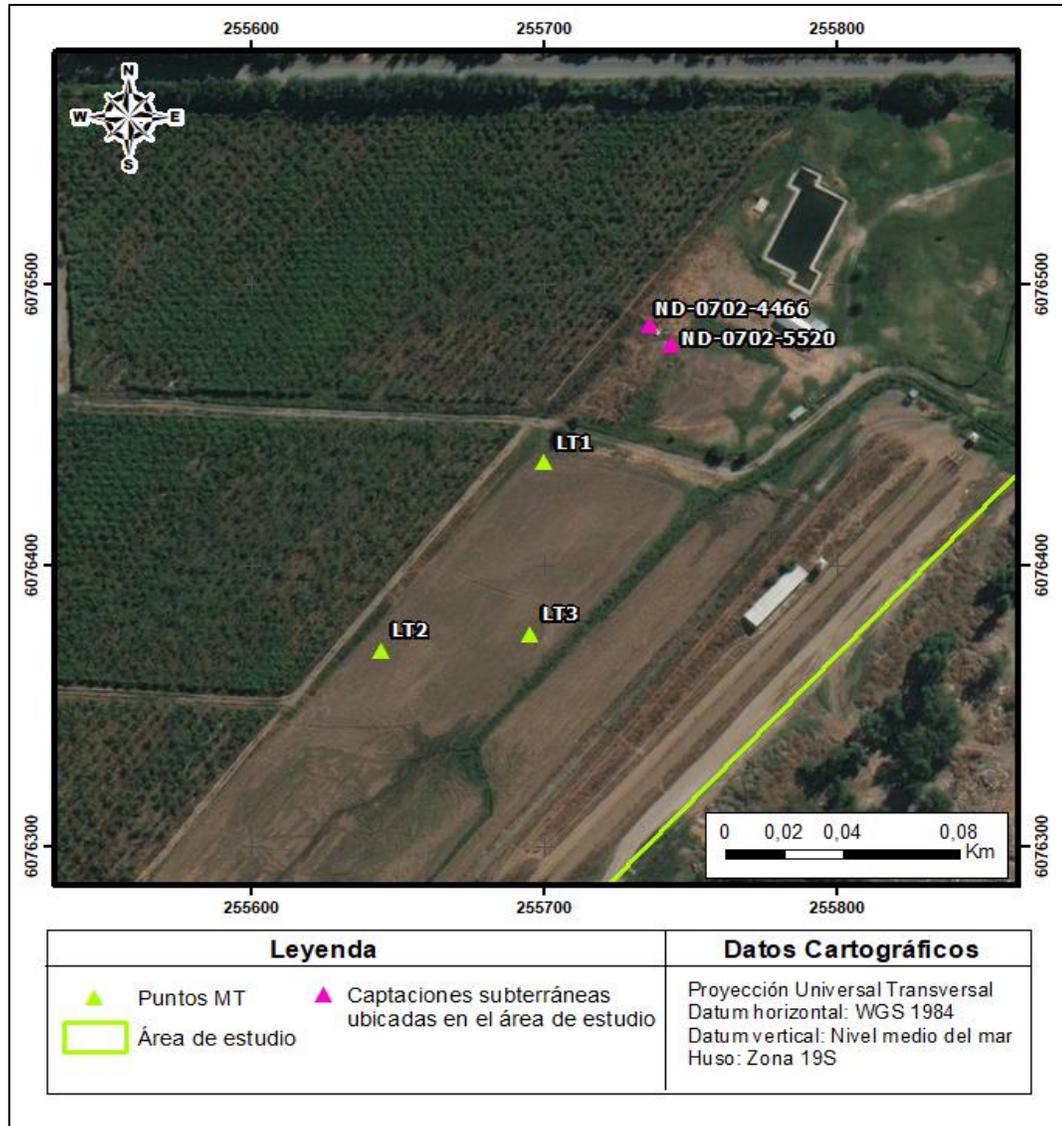


**Figura 2.7** Imagen satelital del área de estudio donde se detallan captaciones subterráneas según DGA (amarillo), pozos con información estratigráfica analizadas (resaltadas en rojo) y mediciones MT (verde). Fuente: Elaboración propia.

Las captaciones **ND-0702-4158** y **ND-0702-3221** se localizan al suroeste del Fundo Las Tinajas y ambas columnas alcanzan los 25 y 31 m de profundidad, respectivamente. En este sector una predominancia de materiales gruesos como gravas, bolones y arenas con nula o muy poca ocurrencia de finos: limo o arcilla (< 15%). El nivel freático se aprecia entre los 3 a 4 m bajo el nivel de terreno (m b.n.t.) con caudales de 15 a 16 L/s (DGA, 2012-2004).

Al noreste del Fundo, se emplazan las captaciones **ND-0702-4615** y **ND-0702-4616**, las cuales alcanzan los 22 m de profundidad y presentan un caudal 1,3 L/s. Existe un predominio del material grueso: grava – arena – grava/arena, con una disminución porcentual de granulometrías finas tipo arcilla – limo, en profundidad. En este sector el nivel freático estaría aproximadamente a los 3 m b.n.t (DGA, 2011 – 2012).

Por otro lado, existen dos captaciones en el “Fundo Las Tinajas”, las cuales no se encuentran inscritas en la DGA, pero, en las cuales se realizaron pruebas de bombeo. En la Figura 2.8 se pueden observar las ubicaciones de dichas captaciones.



**Figura 2.8** Mapa de captaciones subterráneas ubicadas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

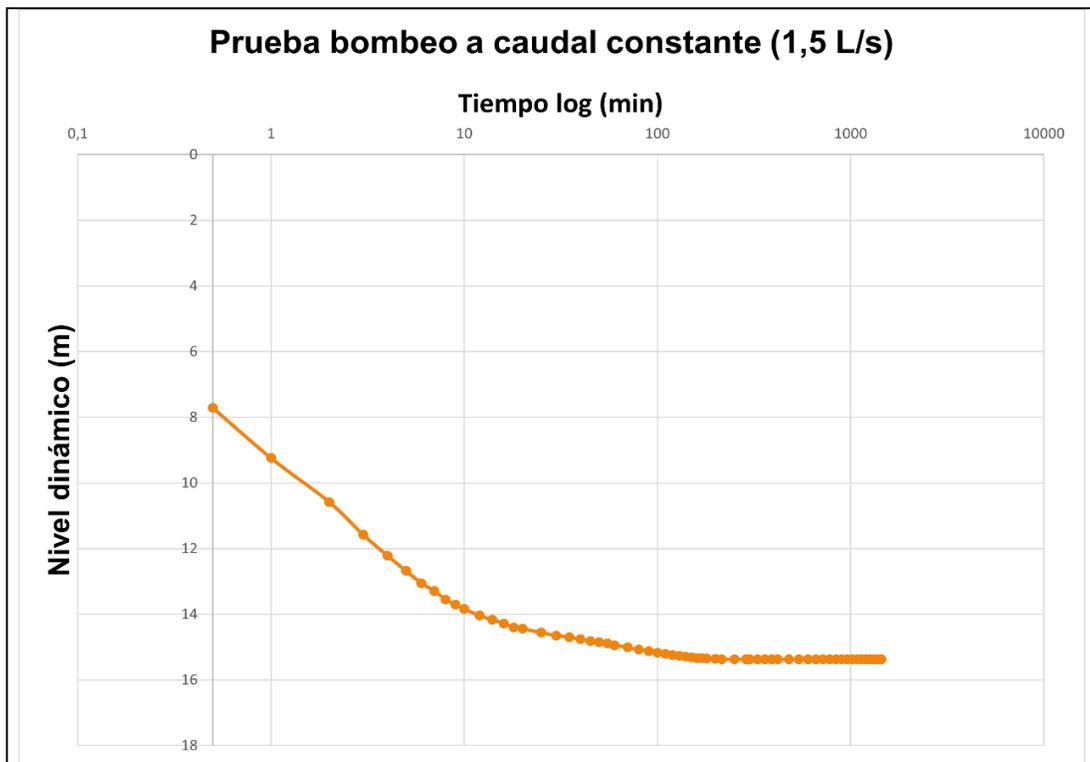
#### 2.4.2.2 Prueba de bombeo captación ND-0702-5520

Se tomaron los datos de una prueba de bombeo a caudal constante realizada el año 2022, en un pozo profundo código ND-0702-5520 en el área de estudio, ubicado en las coordenadas UTM (m) Norte: 6.076.479 y Este: 255.743 del huso 19 sur, referida a la Carta del Instituto Geográfico Militar

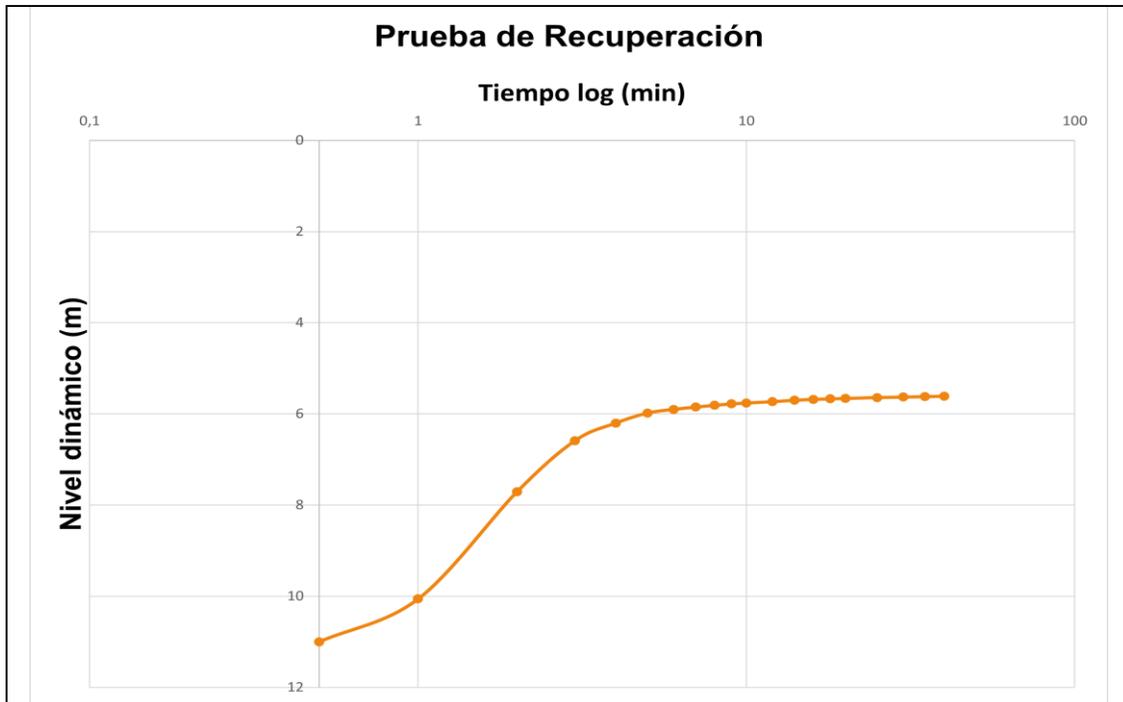
(I.G.M.) código F-049 “Talca” Escala 1:50.000, datum WGS84, al sur del camino Talca Penciahue, km 1, en el sector oeste de Talca. La prueba se realizó a caudal constante de 1,5 L/s durante 24 horas (1440 min) y posteriormente, una prueba de recuperación para así, en conjunto, poder determinar las características físicas hidráulicas del acuífero y solicitar el derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas para un uso consuntivo permanente.

El pozo presenta una profundidad total de 26,5 m, con un diámetro de 6 pulgadas, y la sección ranurada se encuentra entre los 14 a 26 m. Además, el diámetro de salida del pozo es de 63 mm y la profundidad de la bomba es de 23 m. Se determinó que el espesor del acuífero es de 20,4 m.

A continuación, se presentan los gráficos de la prueba de bombeo y recuperación (Gráfico 2.1 y Gráfico 2.2 respectivamente), realizados a partir de los datos de las tablas ubicadas en el Anexo II: Tabla 1 y Tabla 2 respectivamente.



**Gráfico 2.1** Descenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de bombeo a caudal constante para la captación ND-0702-5520. Fuente: Elaboración propia.



**Gráfico 2.2** Ascenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de recuperación para la captación ND-0702-5520. Se observa una recuperación muy rápida al inicio, en la cual recupera 2 minutos prácticamente toda la columna de agua que perdió en el bombeo y luego se recupera lentamente hasta alcanzar nuevamente el nivel estático. Fuente: Elaboración propia.

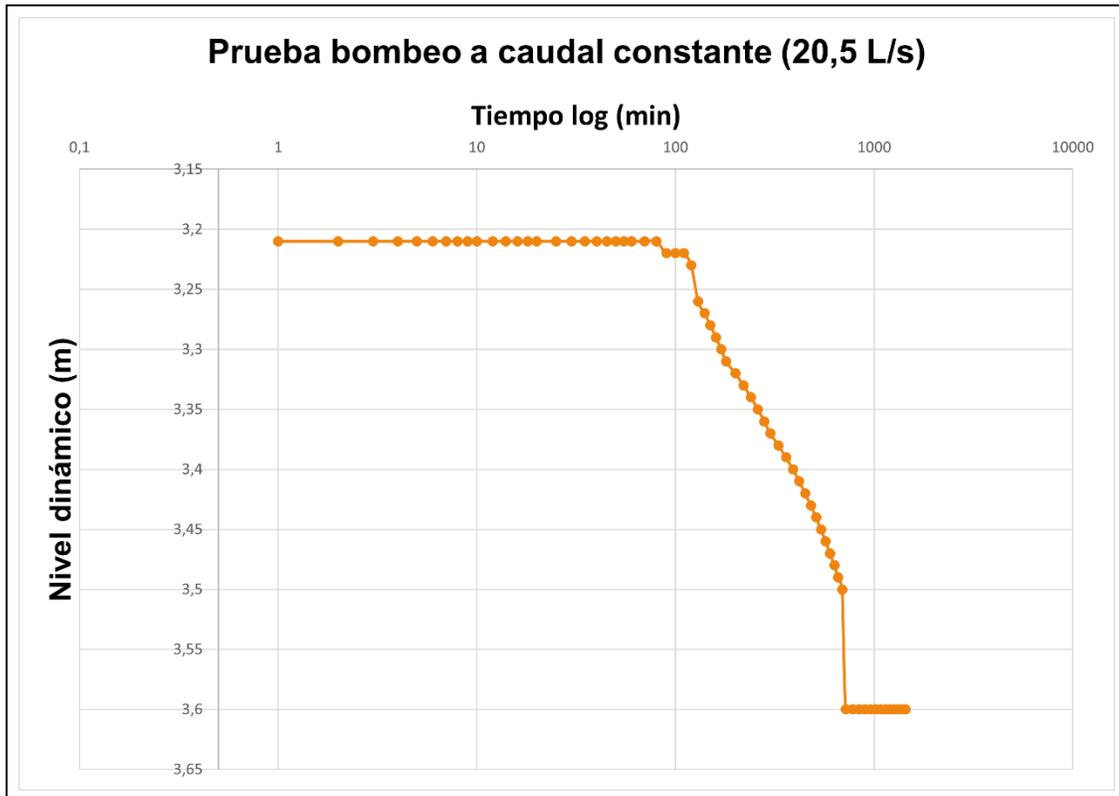
Mediante la prueba de bombeo a caudal constante se determinó que el caudal a inscribir para el pozo profundo es de 1,5 L/s, estabilizándose en el nivel 15,37 metros en 250 minutos, con una duración total de la prueba de 24 horas y con el nivel estático inicial de 5,6 m y nivel dinámico estabilizado de 15,37 m.

#### 2.4.2.3 Prueba de bombeo captación ND-0702-4466

En el área de estudio también existe una noria de código ND-0702-4466, de una profundidad de 6 m con un diámetro de 0,8 m y se encuentra ubicada en las coordenadas UTM (m) Norte: 6.076.486 y Este: 255.736 del huso 19 S referida a la Carta del Instituto Geográfico Militar (I.G.M.) código F-049 "Talca" Escala 1:50.000, datum WGS84, al sur del camino Talca Pencahue, km 1, en el sector oeste de Talca, ésta se encuentra ubicada al 10 m del pozo descrito anteriormente.

Se tomaron los datos de una prueba de bombeo realizada el año 2013, a caudal constante de 20,5 L/s durante 24 horas (1440 min) y posteriormente, una prueba de recuperación, con el objetivo de obtener las características hidráulicas del acuífero y solicitar el derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Además, se determinó que el espesor del acuífero es de 8 m.

A continuación, se presentan los gráficos de la prueba de bombeo y recuperación, realizados a partir de las tablas ubicadas en el Anexo II: Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente.





**Gráfico 2.4** Ascenso del nivel dinámico (m) respecto al log tiempo (min) en la prueba de recuperación para la captación ND-0702-4466. Se observa una recuperación muy lenta al principio, pero luego de 30 minutos aproximadamente toda la columna de agua que perdió en el bombeo se recupera muy rápidamente hasta alcanzar nuevamente el nivel estático. Fuente: Elaboración propia.

Esta prueba arrojó un caudal constante de 20,5 L/s, estabilizándose en el nivel 3,60 metros en 780 minutos, con una duración total de la prueba de 24 horas. Se determina que el nivel estático se encuentra a los 3,21 m, mientras que el nivel dinámico es de 3,60 m.

### 2.4.3 Consideraciones y normativas para captaciones de aguas subterráneas

#### 2.4.3.1 Código de aguas

El Código de Aguas de Chile (Ministerio de Justicia (MINJU), 1981) establece que las aguas terrestres son superficiales o subterráneas, éstas últimas son bienes nacionales de uso público y su uso pertenece a todos los habitantes de la nación. Por lo tanto, cualquier persona puede hacer uso de las aguas subterráneas siempre y cuando esté sujeto a las normas que establece la Dirección General de Aguas (DGA).

Para la realización de un proyecto inmobiliario se debe obtener un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas, el cual es otorgado por la DGA, la solicitud debe contener la ubicación de la captación, el caudal de ésta y la utilización que se le dará.

La DGA debe evaluar el impacto ambiental que la captación de aguas subterráneas pueda tener a través de la solicitud de una Evaluación de Impacto Ambiental, si la captación puede causar un perjuicio al medio ambiente la DGA puede negar el otorgamiento del derecho de aprovechamiento de aguas. La evaluación considera el impacto que la captación pueda tener en la calidad del agua, también en la cantidad de agua, es decir, que no produzca un agotamiento del acuífero y en el medio ambiente.

En el caso de que las captaciones de aguas subterráneas se encuentren cercanas a un río u otro cauce superficial, la DGA debe evaluar el impacto que estas captaciones puedan tener en el caudal de escorrentía superficial. Si la captación ocasiona un daño o perjuicio al caudal del río, la DGA puede negar el otorgamiento de los derechos de aprovechamiento.

El artículo 62 inciso 2º del Código de Aguas establece que si la captación de aguas subterráneas en un acuífero común o en una cuenca hidrográfica común, ocasionare perjuicios a los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales, la Dirección General de Aguas, a petición de uno o más afectados, podrá establecer la reducción temporal del ejercicio de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, a prorrata de ellos. De esta manera, la DGA puede reducir el caudal de una captación de aguas subterráneas en áreas cercanas a un río si esta captación está causando un perjuicio al caudal del río y también prohibir nuevas captaciones según lo estipulado en el Artículo 62 inciso 3º.

Por otro lado, la DGA debe evaluar el impacto que la captación de aguas puede tener en el suministro de agua potable a la comunidad, en el caso de ésta pueda causar un perjuicio al suministro de agua potable, la DGA puede negar el otorgamiento del derecho de aprovechamiento.

Por último, las captaciones deben cumplir con las normas de protección de aguas subterráneas, que tienen como objetivo proteger la calidad y cantidad de aguas subterráneas, la captación debe estar protegida de la contaminación y debe existir un control de la extracción. La DGA puede realizar inspecciones para verificar el cumplimiento de las normas.

#### **2.4.3.2 Consideraciones medioambientales**

De acuerdo con la resolución de la DGA N° 3504 para el “Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos” (Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2008), no se autorizan derechos de agua a las captaciones en áreas declaradas bajo protección oficial para la protección de la biodiversidad, como los parques nacionales, reservas nacionales, reserva de regiones vírgenes, monumentos naturales, santuarios de la naturaleza o humedales de importancia internacional, a menos que se trate de actividades compatibles con los fines de conservación del área.

Las captaciones que se ubiquen en humedales urbanos o en áreas de acuíferos que alimentan humedales declarados por el Ministerio del Medio Ambiente como ecosistemas amenazados, ecosistemas degradados o sitios prioritarios deberán contar con Resolución de Calificación Ambiental y/o consulta de pertinencia.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Geofísica**

A continuación, se presentan los perfiles de resistividad eléctrica obtenidos a partir del método magnetotelúrico, éstos fueron generados a partir de puntos previamente establecidos que se pueden observar en la (Figura 1.3). Los perfiles permiten identificar variaciones geofísicas que pueden ser homologables a variaciones hidrogeológicas en zonas acotadas con alto detalle, evidenciando la resistividad que presentan las distintas secuencias litológicas según la profundidad en la que se encuentran. De esta manera, se establece que las tonalidades más cálidas son aquellas de mayor resistividad, es decir, que hay presencia de secuencias geológicas compactas y levemente meteorizadas de bajo o nulo potencial hidrogeológico, mientras que las de tonalidades violeta son las de menor resistividad, es decir, zonas de materiales muy finos capaces de almacenar agua, pero con una muy baja transmisibilidad.

De acuerdo con lo anterior, se establecen tres zonas de prospección, que serán descritas a continuación:

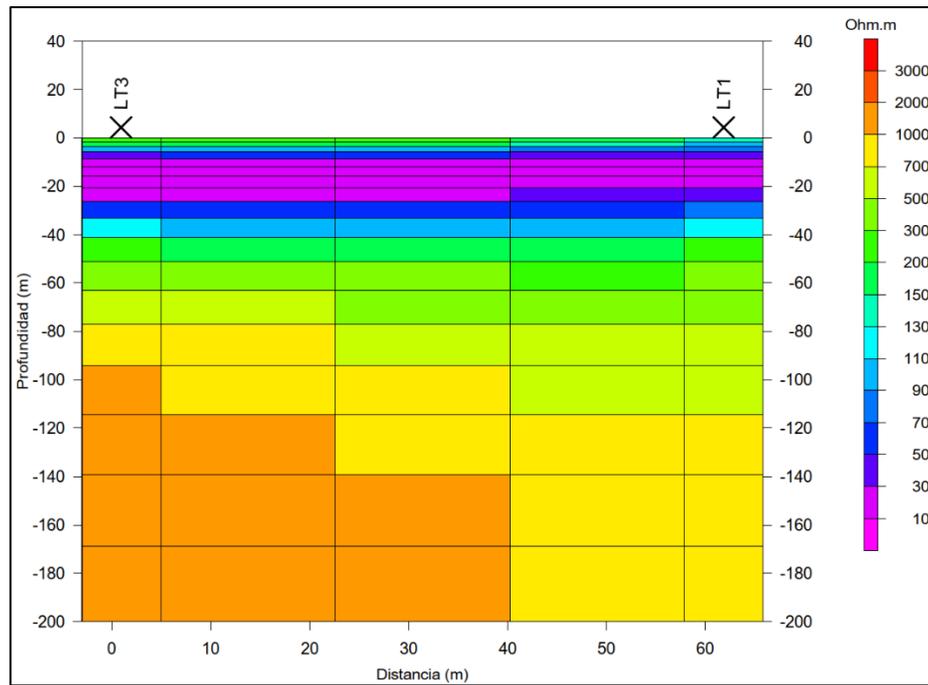
##### **3.1.1 Zona de prospección P1**

Los primeros tres puntos de MT (LT1, LT2 y LT3) se realizaron en la zona de prospección 1 (P1), ubicada al noreste del fundo, donde se obtuvieron los perfiles 1 y 2 (Anexo I: Mapa 1).

###### **3.1.1.1 Perfil 1**

En este perfil (Figura 3.1), se identifica un primer nivel con resistividades de entre 50 a 150 ohm hasta los 6 m de profundidad aproximadamente. Luego, entre los 6 a 25 m de profundidad, se identifican niveles muy bajos de resistividad (0 a 50 ohm). Más hacia profundidad, entre los 25 a 50 m de profundidad se registra un aumento progresivo de los valores de resistividad (valores mayores a 50 ohm), que presenta características similares a las del primer nivel descrito. En general, en los niveles superiores se observan potencias similares tanto en la zona bajo el punto LT1 como del punto LT3. A partir de los 50 m de profundidad, los valores de resistividad más altos, con zonas de entre 150 a 700 ohm, más potentes bajo el punto LT1, evidenciando una variación lateral entre ambos puntos. A partir de los 80 m bajo el punto LT3 se observa la presencia

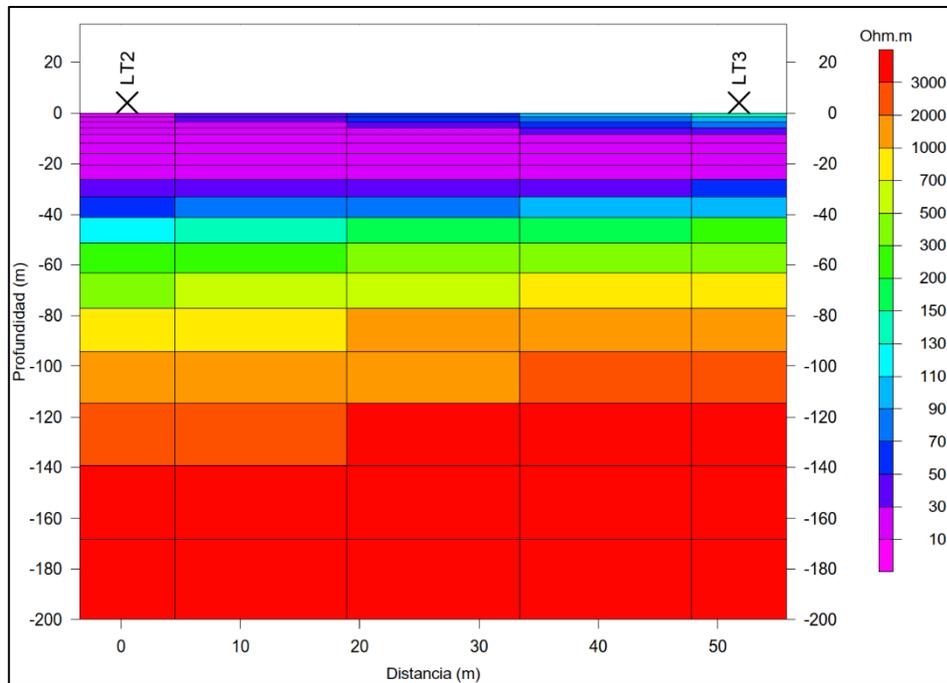
de zonas con resistividades muy altas por sobre 700 ohm, en el lado derecho del perfil la zona de altas resistividades es más profunda, menos potente y sin resistividades mayores a 1000 ohm.



**Figura 3.1** Perfil geoelectrico 2D (Perfil 1) entre los puntos LT3 – LT1. La paleta de colores indica los valores de resistividad utilizados, donde los valores altos indican roca sólida y los valores bajos a acuíferos, arcillas y/o arcillas saturadas en agua, entre otros. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.

### 3.1.1.2 Perfil 2

En el perfil 2 (Figura 3.2), se reconoce primeramente una cobertura con resistividades entre 50 y 150 ohm, y a partir de los 6 m hasta los 25 m de profundidad aproximadamente, se reconocen secuencias de muy baja resistividad (inferiores a 50 ohm), evidenciado en tonalidades moradas. Luego, desde los 25 m de profundidad, se observan secuencias representadas con rangos de resistividad entre 50 a 150 ohm. Posteriormente, hay aumento progresivo de las resistividades (150 a 700 ohm). Luego, se puede observar una franja de tonalidades amarilla y naranja, que representa las zonas con resistividades entre 700 a 2000 ohm, a partir de los 60 m de profundidad bajo el punto LT3 y tiene un espesor de 40 m aproximadamente a lo largo del perfil. Por último, una zona de resistividades muy altas, mayores a 2000 ohm comienzan a partir de los 100 m bajo el punto LT3, este nivel ocupa una gran extensión en el perfil.



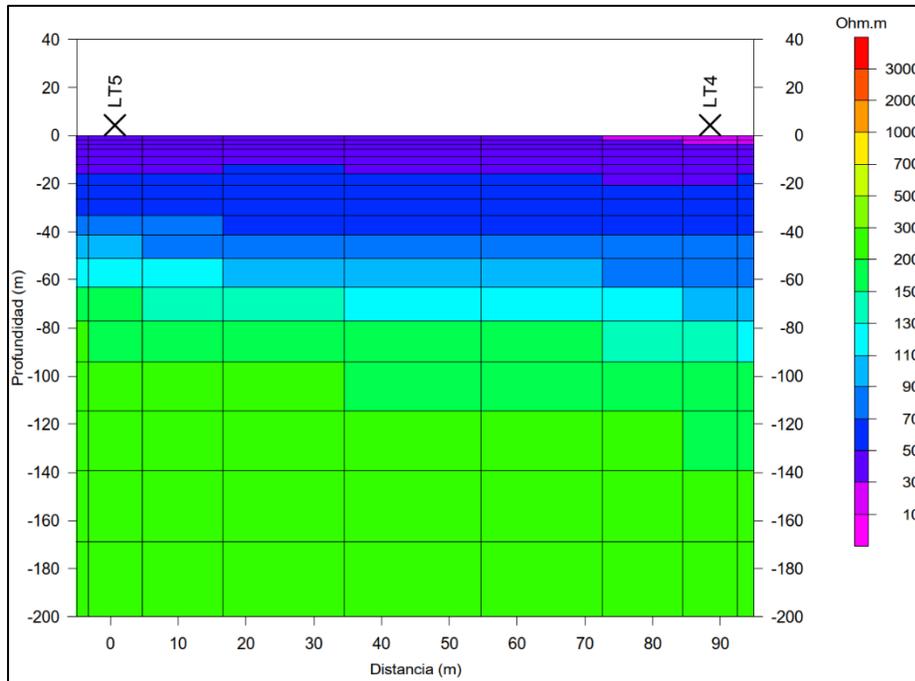
**Figura 3.2** Perfil geoelectrico 2D (Perfil 2) entre los puntos LT2 – LT3. La paleta de colores indica los valores de resistividad utilizados, donde los valores altos indican roca solida y los valores bajos a acuíferos, arcillas y/o arcillas saturadas en agua, entre otros. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.

### 3.1.2 Zona de prospección 2

Posteriormente, se realizaron 2 puntos de MT (LT4 y LT5) en la zona de prospección 2 (P2), que se encuentra en el sector suroeste del fundo, generando el perfil 3 (Anexo I: Mapa 2).

#### 3.1.2.1 Perfil 3

En este perfil (Figura 3.3) se observa una zona de menor resistividad superficial muy potente, entre 0 a 200 ohm, la cual presenta valores muy bajos hasta los 18 m de profundidad aproximadamente, representados en tonos morados, luego, se observan zonas de resistividades medias – bajas en tonalidades azules. Bajo el punto LT5, a los 60 m de profundidad aproximadamente, se registra un aumento de las resistividades, las cuales no superan los 300 ohm a lo largo del perfil, se puede observar que esta zona de mayores resistividades se comienza a registrar a mayor profundidad en el punto LT4 respecto del punto LT5, así mismo, la zona de bajas resistividades alcanza mayores profundidades bajo el punto LT4, llegando hasta los 100 m aproximadamente.



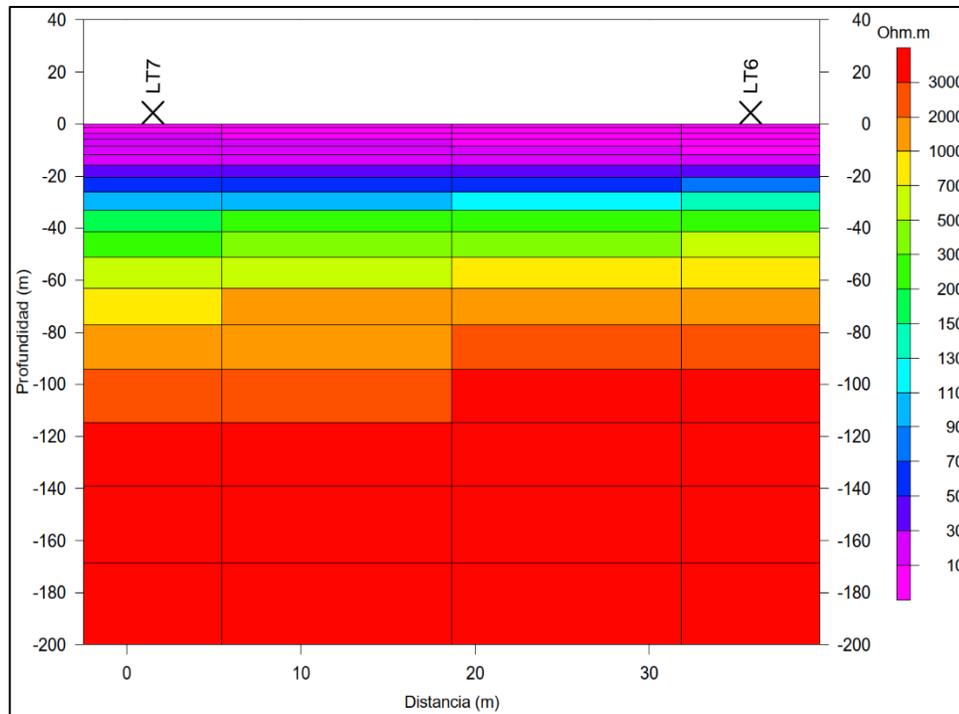
**Figura 3.3** Perfil geoelectrico 2D (Perfil 3) entre los puntos LT5 – LT4. La paleta de colores indica los valores de resistividad utilizados, donde los valores altos indican roca solida y los valores bajos a acuíferos, arcillas y/o arcillas saturadas en agua, entre otros. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.

### 3.1.3 Zona de prospección 3

Finalmente, se realizaron 3 puntos de MT (LT6, LT7 y LT8) en la zona de prospección 3 (P3), ubicada en la zona central del fundo a 1,21 km al suroeste de la zona de prospección 1 y a 1 km de la zona de prospección 2, realizándose los perfiles 4 y 5 (Anexo I: Mapa 3).

#### 3.1.3.1 Perfil 4

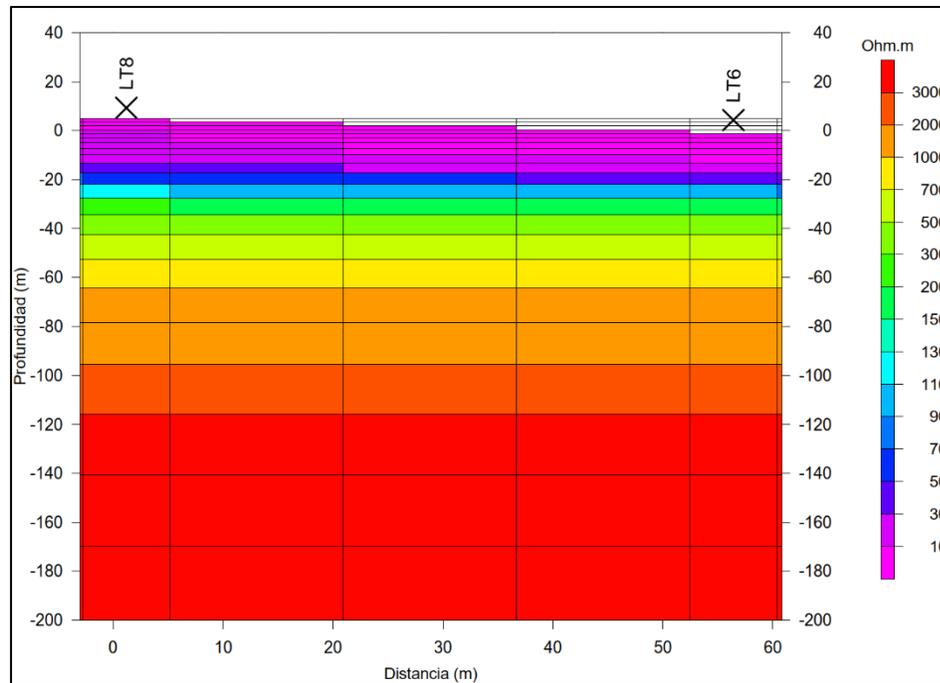
En el perfil 4 (Figura 3.4) se reconoce una cobertura de muy baja resistividad, menores a 50 ohm, esta franja se extiende hasta los 18 m de profundidad aproximadamente y se puede observar una continuidad lateral muy clara de este nivel a lo largo del perfil. Posteriormente, se observa un aumento progresivo de los rangos de resistividad, lo cual se evidencia en tonalidades azules – celestes, de entre 50 a 150 ohm. Luego, se registra un aumento de resistividades a partir de los 35 m, exhibido en tonalidades verdosas, de entre 150 a 700 ohm. Desde los 50 m de profundidad bajo el punto LT6, se observa una franja con resistividades entre 700 a 2000 ohm con una potencia de 30 m aproximadamente, aumentando posteriormente a resistividades mayores a 2000 ohm de forma muy potente.



**Figura 3.4** Perfil geoelectrico 2D (Perfil 4) entre los puntos LT7 – LT6. La paleta de colores indica los valores de resistividad utilizados, donde los valores altos indican roca sólida y los valores bajos a acuíferos, arcillas y/o arcillas saturadas en agua, entre otros. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.

### 3.1.3.2 Perfil 5

Por último, el perfil 5 (Figura 3.5), se realizó de forma casi perpendicular al perfil 4, con el objetivo de reconocer de mejor manera las variaciones laterales que pudiesen existir en el subsuelo, se puede notar una cobertura de baja resistividad con valores menores a 50 ohm hasta los 18 m de profundidad aproximadamente. Posteriormente, se observa una franja de resistividades de entre 50 a 150 ohm hasta los 25 m aproximadamente. A continuación de esta zona, se registra un aumento progresivo de las resistividades y una continuidad lateral muy clara en las secuencias subyacentes, en donde se tienen niveles de entre 150 a 700 ohm con una potencia de 20 m aproximadamente, luego, una zona con resistividades entre 700 a 2000 ohm, que se extiende hasta los 100 m de profundidad y finalmente, con área muy potente de altas resistividades (mayores a 2000 ohm).



**Figura 3.5** Perfil geoelectrico 2D (Perfil 5) entre los puntos LT8 – LT6. La paleta de colores indica los valores de resistividad utilizados, donde los valores altos indican roca sólida y los valores bajos a acuíferos, arcillas y/o arcillas saturadas en agua, entre otros. Fuente: Elaboración de GeoResource SpA.

## 3.2 Hidrogeología

Se procede a realizar los cálculos de los parámetros hidráulicos obtenidos de ensayos de bombeo y recuperación en las captaciones realizadas del “Fundo Las Tinajas”, las cuales se muestran en la Figura 2.8. Posteriormente se estiman los potenciales hidrogeológicos que pueden presentar los estratos más profundos del subsuelo considerando los valores de niveles más superficiales, lo cual se realiza a través del programa Aquifer Test 11 Pro (2021). Además, se realiza un análisis de vulnerabilidad de los acuíferos.

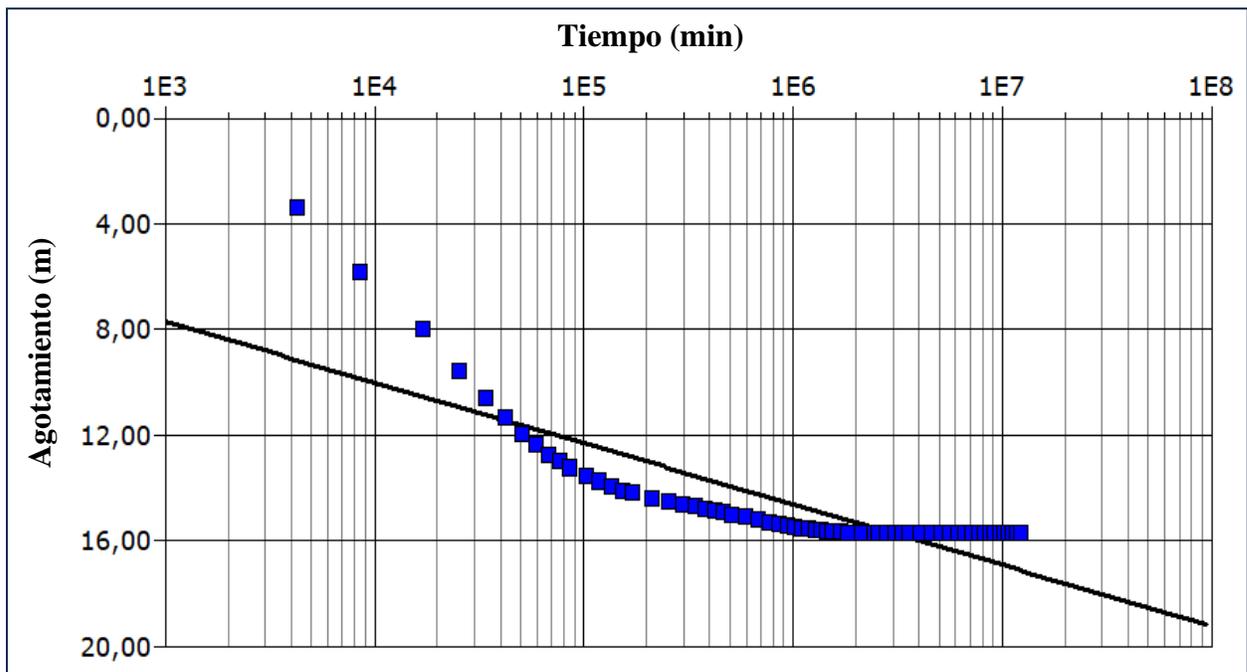
### 3.2.1 Cálculo de parámetros hidráulicos

Para el cálculo de parámetros hidráulicos utilizando el software Aquifer Test 11 Pro (2021) de la empresa MHT SpA, se considera el Método Neuman para acuíferos libres, únicamente con el objetivo de realizar los cálculos, una extensión del acuífero infinita, una descarga constante y una penetración de pozo completa. Los resultados se expresan a continuación:

### 3.2.1.1 Captación ND-0702-5520

Mediante los datos obtenidos de la prueba de bombeo a caudal constante realizado a 26 m de profundidad, con ranuras ubicadas entre los 14 a 26 m, se determinó que el caudal a inscribir para éste es de 1,5 L/s, con nivel dinámico estabilizado a 15,37 metros en 250 minutos. El nivel estático inicial se encuentra a los 5,6 m, mientras que el nivel dinámico es de 15,37 m y el espesor del acuífero es de 20,4 m.

Para obtener los parámetros del acuífero se utilizó el software Aquifer Test 11 Pro (2021) con el Método de Neuman para un acuífero libre, en base al comportamiento del acuífero en el bombeo. En el Gráfico 3.1 se puede observar el tiempo v/s el agotamiento del pozo, que indica la disminución del nivel del agua en la prueba de bombeo a caudal constante.



**Gráfico 3.1** Gráfico de software Aquifer Test para la captación ND-0702-5520, en el cual el eje X corresponde al tiempo en minutos y el eje Y el agotamiento en metros. La pendiente representa la transmisividad del acuífero. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el software, se indica que la transmisibilidad promedio del acuífero es de 16,6 m<sup>2</sup>/d, la porosidad eficaz es de 0,00121. Considerando que el espesor del acuífero es de 20,4 m, y utilizando la Fórmula 1, donde:

T = Transmisibilidad (16,6 m<sup>2</sup>/día)

$b$  = Espesor del acuífero (20,4 m)

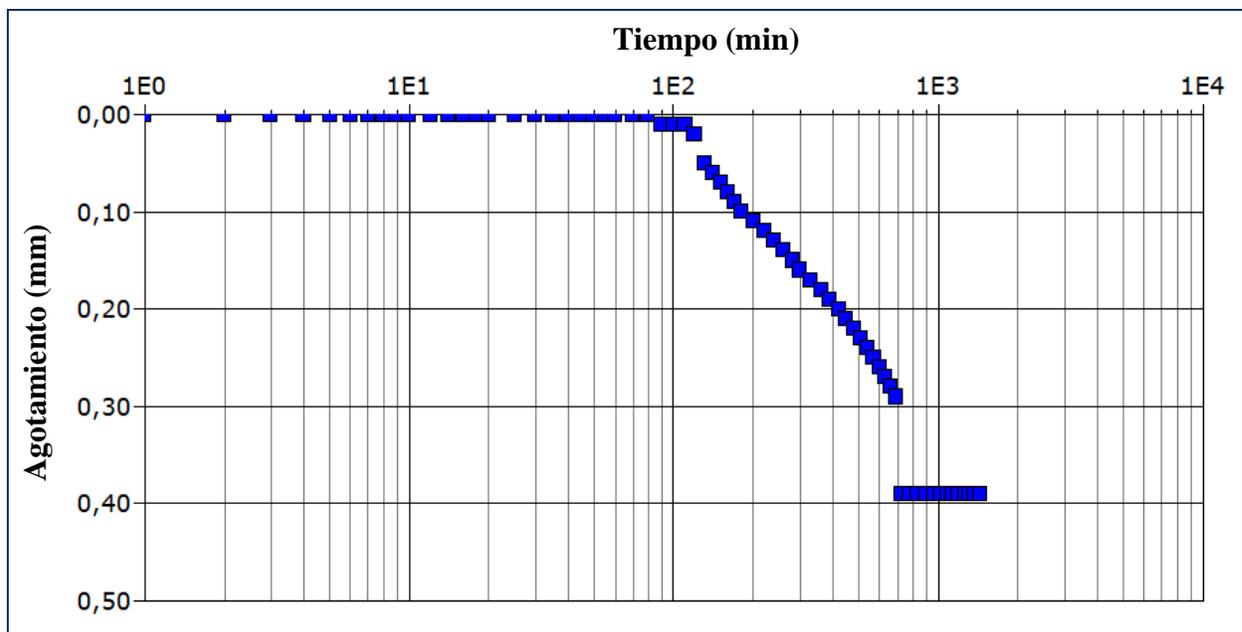
$$K = 16,6 \text{ m}^2/\text{día} / 20,4 \text{ m} = 0,813 \text{ m/día}$$

Se obtiene que la permeabilidad “K” es de 0,813 m/día. Mediante la prueba de bombeo a caudal constante se determinó que el caudal a inscribir para el pozo profundo es de 1,5 L/s, es decir, un volumen de 47.304 m<sup>3</sup> al año.

### 3.2.1.2 Captación ND-0702-4466

Mediante los datos obtenidos de la prueba de bombeo realizada para la noria de 6 m de profundidad, se determinó que el caudal a inscribir es de 20,5 L/s, estabilizándose en el nivel 3,60 metros en 780 minutos. El nivel estático se encuentra a los 3,21 m, mientras que el nivel dinámico es de 3,60 m y el espesor del acuífero es de 8 m.

Ahora, utilizando el Método de Neuman para un acuífero libre se obtiene el Gráfico 3.2.



**Gráfico 3.2** Gráfico de software Aquifer Test para la captación ND-0702-4466, en el cual el eje X corresponde al tiempo en minutos y el eje Y el agotamiento en metros. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados entregados por el software, se obtiene que la transmisibilidad promedio del acuífero es de 86,4 m<sup>2</sup>/d, la porosidad eficaz es de 0,1. Considerando que el espesor del acuífero es de 8 m y utilizando la Fórmula 1, donde:

$$T = \text{Transmisibilidad (86,4 m}^2/\text{día)}$$

$b =$  Espesor del acuífero (8 m)

$$K = 86,4 \text{ m}^2/\text{día} / 8 \text{ m} = 10,8 \text{ m/día}$$

Se obtiene que la permeabilidad “K” es de 10,8 m/día. Mediante la prueba a caudal constante, se determinó que el caudal a inscribir para la noria es de 20,5 L/s, es decir, un volumen de 646.488 m<sup>3</sup> al año.

### 3.2.2 Vulnerabilidad de acuíferos

Ahora, para determinar cuál es la mejor zona y profundidad a la cual se debería realizar la captación se utiliza el método GOD utilizando la Figura 1.5. Tomando de referencia el perfil 1 (Figura 3.1), se considera como zonas de potenciales acuíferos a aquellos con resistividades entre 50 a 150 ohm, de esta manera, se estima como acuífero libre a aquel ubicado en los primeros metros del subsuelo y como acuífero semi confinado a aquel ubicado entre los 25 a 40 m de profundidad. Además, para método de cálculos se consideran ambos con granulometría de arenas.

Para el acuífero libre, se tiene:

$$G = 1,0 \text{ (acuífero libre)}$$

$$O = 0,7 \text{ (arenas)}$$

$$D = 0,9 \text{ (< 5 m de profundidad)}$$

Utilizando la Fórmula 2, se obtiene una vulnerabilidad a la contaminación de 0,63 para el acuífero libre, esto indica una alta vulnerabilidad.

Para el acuífero semi confinado, se tiene:

$$G = 0,4 \text{ (acuífero semi confinado)}$$

$$O = 0,7 \text{ (arenas)}$$

$$D = 0,7 \text{ (20 a 50 m de profundidad)}$$

Utilizando la Fórmula 2, se obtiene una vulnerabilidad a la contaminación de 0,196 para el acuífero semi confinado, esto indica una baja vulnerabilidad.

## **4. DISCUSIÓN**

### **4.1 Interpretación de perfiles geofísicos**

#### **4.1.1 Zona de prospección 1**

A partir de los resultados proporcionados por los perfiles de resistividad eléctrica se puede determinar que para la zona de prospección 1, representada por los perfiles 1 y 2 (Figura 3.1 y 3.2 respectivamente) se identifican niveles de menos de 6 m de espesor aproximadamente con resistividades de entre 50 a 150 ohm, estas zonas, de acuerdo con el mapa geológico (Figura 2.2) corresponderían a depósitos fluviales (Qf), los cuales están compuestos por sedimentos clásticos de ripios y gravas con niveles arenosos, son sedimentos de alta permeabilidad. Por otro lado, en la prueba de bombeo de la noria de código ND-0702-4466 ubicada a 59,3 m del punto LT1, de 6 m de profundidad se determinó que el caudal a extraer es de 20,5 L/s, además, se calculó una alta transmisibilidad (de 86,4 m<sup>2</sup>/día) y una alta permeabilidad (10,8 m/día). Según la tabla de rangos de resistividad (Figura 2.6) esta cobertura correspondería a una zona con presencia de gravas gruesas y bolones, los cuales, en este caso, se encuentran saturados en agua, lo cual disminuye las resistividades del subsuelo. Debido a la cercanía del punto LT1 y las condiciones topográficas similares con la captación realizada es posible extrapolar estos datos, indicándose de esta manera que existe un potencial hidrogeológico alto en el nivel de resistividades entre 50 a 150 ohm. Se puede definir este nivel como un acuífero libre, puesto que el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie (3,21 m).

Luego se identifican niveles muy bajos de resistividad (0 a 50 ohm) entre los 6 a 25 m de profundidad. En la prueba de bombeo realizada en el pozo de código ND-0702-5520 ubicado a 60 m del punto LT1, con una sección ranurada de entre 14 a 26 m de profundidad se determinó que el caudal a extraer es de 1,5 L/s, además, se calculó una transmisibilidad menor respecto de la noria (16,6 m<sup>2</sup>/día) y una baja permeabilidad (0,813 m/día). Por otro lado, según la tabla de rangos de resistividad eléctrica (Figura 2.6) se indica la presencia de depósitos con un mayor contenido de matriz fina, tales como arenas finas, limos, arcillas y/o depósitos saturados. Así, extrapolar los datos de la prueba de bombeo y a través de la determinación de la granulometría de este nivel, se puede indicar que en esta zona existe un potencial hidrogeológico bajo a nulo. El nivel freático de este pozo se encuentra a los 5,6 m, y debido a la baja transmisibilidad que presenta es posible definirla esta zona como un acuitardo.

Más hacia profundidad, se registra un aumento progresivo de los valores de resistividad (entre 50 a 150 ohm), lo cual, al igual que en el primer nivel descrito, corresponderían a depósitos de mayor granulometría y con una muy buena transmisibilidad, por lo que, existiría una gran factibilidad de encontrar potenciales acuíferos entre los 25 a 50 m de profundidad, tanto en la zona del perfil 1 como en el perfil 2, sin embargo, en estas profundidades el acuífero se consideraría como semi confinado debido a la presencia de la capa de limo/arcilla de tonalidad morada ubicada en la parte superior. Además, se determina que el acuífero libre aporta recarga por goteo a través del acuitardo al acuífero semi confinado ubicado bajo la capa morada.

A partir de los 50 m de profundidad aproximadamente, los valores de resistividad son cada vez más altos, de entre 150 a 700 ohm indicando la presencia de depósitos cada vez más compactos, y por ende con menor transmisibilidad, identificándose como una zona de potencial hidrogeológico medio. De acuerdo con la tabla de rangos de resistividad (Figura 2.6), esta zona puede corresponder a arenas o arenas con gravas, debido a que éstas son más resistivas que los depósitos de granulometría fina y que los de granulometría gruesa. Para esta capa se asumen condiciones similares a las de tonalidad azul (de resistividades entre 50 a 150 ohm), pero con transmisibilidades probablemente más bajas debido al aumento de resistividad, éstas corresponderían a un acuífero semi confinado con medio a alto potencial hidrogeológico.

Luego, en la zona ubicada a los 80 m bajo el punto LT3 se observa la presencia de zonas con resistividades altas, entre 700 a 2000 ohm, estas zonas evidencian la presencia de rocas hidrogeológicamente poco favorables, como la Formación Lo Valle (KTlv), que se presenta principalmente como rocas disgregadas y/o fracturadas con bajo a nulo potencial hidrogeológico. Esta capa se define como acuitardo debido a su baja a nula capacidad de transmitir el agua.

Se puede apreciar un límite de resistividades superiores a 2000 ohm en el perfil 2 (Figura 3.2), el cual comienza a partir de los 100 m de profundidad bajo el punto LT3, se determina que debido a su alta resistividad esto correspondería a basamento o rocas altamente compactas, y de esta manera, constituyen zonas de nulo potencial hidrogeológico. Esta zona se define como acuífugo debido a su nula capacidad de transmisibilidad de agua.

#### **4.1.2 Zona de prospección 2**

Este perfil (Figura 3.3) difiere de los anteriormente descritos, observándose una zona de menor resistividad superficial más potente (0 a 150 ohm). De acuerdo con el mapa geológico (Figura 2.2), esta zona corresponde a depósitos fluviales (Qf), los cuales están compuestos por sedimentos clásticos como ripios y gravas con niveles arenosos, con resistividades entre 50 a 150 ohm, al igual que en los perfiles 1 y 2 corresponderían a depósitos de granulometría gruesa y que, por ende, son más transmisivos. Si bien se observa una cobertura de baja resistividad que correspondería a limos y/o arcillas, ésta es de mucho menor potencia respecto de los perfiles 1 y 2 (Figura 3.1 y 3.2), por lo cual, se consideraría como acuífero libre.

En el punto LT5, bajo los 60 m de profundidad, se observa un aumento de resistividades, que puede indicar la presencia de depósitos con presencia de arenas o arenas con gravas saturados en agua, debido a su cercanía al Río Claro.

Se puede notar una gran diferencia de magnitudes entre los dos extremos del Fundo Las Tinajas, lo que puede indicar variaciones importantes en las condiciones litológicas en profundidad, ya sea, por la presencia de estructuras (fallas geológicas), y/o disgregación del material y/o cambios litológicos, debido a que en la zona de prospección 1 a mayores profundidades se observan niveles de resistividad muy altos.

#### **4.1.3 Zona de prospección 3**

Los perfiles 4 y 5 (Figura 3.4 y 3.5) señalan condiciones muy similares a las presentes en el límite noreste del fundo (zona de prospección P1), reconociéndose de igual manera una cobertura de muy baja resistividad que de acuerdo con la Figura 2.6 pueden corresponder a depósitos de granulometría fina como limos y/o arcillas. Posteriormente, se tiene una franja con resistividades de entre 50 a 150 ohm, que pueden corresponder a depósitos de granulometría gruesa y, por ende, alta transmisibilidad, lo cual constituiría un acuífero de alto potencial hidrogeológico. La franja de tonalidades verdosas se determina como depósitos de arenas, lo cual es común encontrar en depósitos fluviales (Qf) (Figura 2.2).

Al igual que en la zona de prospección 1 se determina como acuífero semi confinado a la zona de resistividades entre 50 a 150 ohm debido a la presencia de la capa de muy bajas resistividades ubicada por sobre esta zona.

Desde los 70 m de profundidad aproximadamente, las magnitudes registradas son lo suficientemente altas como para descartar la presencia de unidades de potencial hidrológico importante, esto se representa en tonalidades naranjas – rojas.

#### 4.1.4 Homologación a unidades hidrogeológicas

A partir de los perfiles geoelectricos descritos anteriormente y teniendo en cuenta las unidades hidrogeológicas descritas por Struckmeier y Margat, 1995, se obtiene la Tabla 3.1, que se observa a continuación:

Unidad	Resistividad (ohm)	Potencial hidrogeológico	Diagrama Struckmeier y Margat	Tipo de acuífero	Potencial tipo de roca
1	> 2000	Nulo	D	Acuífugo	Basamento no meteorizado
2	700 a 2000	Bajo a nulo	C	Acuitardo	Basamento meteorizado (KTIv)
3	150 a 700	Medio	B	Acuífero semi confinado	Arenas, arenas con gravas
4	50 a 150	Alto potencial	A	Acuífero libre/ semi confinado	Arenas gruesas, gravas y bolones
5	0 a 50	Bajo a nulo	C	Acuitardo	Limo y/o arcilla

**Tabla 4.1** Tabla de homologación a unidades hidrogeológicas tomando en cuenta la estratigrafía, resistividades tomadas a partir de perfiles geofísicos, potenciales hidrogeológicos en función del cálculo de parámetros hidráulicos e interpretaciones del subsuelo. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Determinación de zonas de captación

Se determina que en la zona de prospección 1 el mejor punto para realizar una captación sería bajo el punto LT1 entre los 25 a 40 m de profundidad (Figura 3.1) debido a que presenta un área de alto potencial hidrogeológico más amplio respecto de los demás puntos, y, además, la zona de resistividades muy altas (superiores a 700 ohm) que se encuentra en profundidad es mucho menor y más profunda en esa zona. Además, al corresponder a un acuífero semi confinado, éste presenta una vulnerabilidad de 0,196, lo cual es mucho menor que el acuífero libre ubicado en los primeros

niveles del subsuelo, el cual tiene una alta vulnerabilidad (0,63), este factor es de gran importancia, debido a que para un proyecto de urbanización de estas características se deben minimizar las posibles fuentes de contaminación, por ende, de hacer un pozo en la zona de prospección 1, éste se debe ubicar en el punto LT1.

Otra zona con características similares es la del punto LT7, en donde se recomienda realizar una captación entre las profundidades de 20 a 35 m aproximadamente, debido a que la zona de potencial acuífero es de mayor espesor en esta área (zona de resistividades entre 50 a 150 ohm), además, corresponde a un acuífero semi confinado, por lo que la vulnerabilidad es más baja respecto de los puntos de la zona de prospección 2. De esta manera, este sería el punto hidrogeológicamente favorable más cercano a las zonas de mayor topografía del fondo (altitudes de hasta 280 m), en las cuales no existe factibilidad de agua, puesto que de acuerdo con el mapa geológico (Figura 2.2), esta zona se encuentra constituida por la Formación Lo Valle (KTlv), la cual tiene un bajo a nulo potencial hidrogeológico (Figura 2.5). Esto permitiría minimizar los movimientos de tierra y tener una captación más directa para la distribución de agua a los sectores de mayor altitud.

Por lo anterior, se determina que el mejor punto para realizar una captación de aguas subterráneas es el LT1, entre los 25 a 40 m de profundidad, debido a que se tiene un acuífero semi confinado de alto potencial hidrogeológico, con una baja vulnerabilidad a la contaminación y que presenta un aumento en las resistividades en zonas más profundas respecto de los demás perfiles, lo que podría favorecer las dimensiones del acuífero. También se recomienda también realizar una captación en el punto LT7, entre los 20 a 40 m de profundidad, puesto que tiene condiciones similares a las de LT1, si bien este punto presenta un acuífero de menores dimensiones que LT1, éste se encuentra más cercano a las zonas de topografía elevada, garantizando un abastecimiento de agua para esta área.

### **4.3 Limitaciones y consideraciones a futuro**

Es importante considerar que una gran limitación para elegir las zonas de exploración geofísica es evitar el ruido electromagnético, el cual es originado por fuentes como cableado de mediana y alta tensión. Por ejemplo, habría sido ideal realizar los puntos MT en la zona en la que se encontraban las captaciones preexistentes correspondientes a la noria y pozo profundo, pero no se pudo debido a la cercanía de éstos con los cables de alta tensión, teniéndose que homologar los datos de las pruebas de bombeo a los puntos MT realizados.

Por otro lado, los informes técnicos de los derechos de agua de la DGA pueden no ser siempre fidedignos, tanto en su estratigrafía, (las cuales muchas veces son inventadas) como en los parámetros hidráulicos de los acuíferos obtenidos mediante las pruebas de bombeo. Debido a esto, solamente se utilizaron los datos de descenso del nivel dinámico vs tiempo en minutos para calcular los parámetros hidráulicos de los acuíferos en base a las características de habilitación de las captaciones y el tipo de acuífero determinado por geofísica.

Además, la exploración geofísica podría hacerse mejor en un horario en que no afecte la presencia de animales, personas y/o maquinarias que puedan afectar las señales captadas por el equipo.

También se pudieron haber realizado puntos en las zonas de topografía elevada, que corresponden a las áreas de bajo a nulo potencial hidrogeológico, esto con el objetivo de obtener una señal de resistividades de referencia de esta formación, y así, poder homologar estas señales a los perfiles geofísicos realizados en la parte baja.

## 5. CONCLUSIONES

En el área de estudio fue posible reconocer la presencia principalmente de depósitos fluviales (Qf), los cuales se encuentran constituidos por ripios, arenas y gravas, que conforman acuíferos libres y semi confinados con un alto potencial hidrogeológico, y que también pueden presentar intercalaciones arcillosas y/o limosas que tienen un potencial hidrogeológico bajo a nulo y generan acuíferos semi confinados en profundidad. Existen variaciones importantes en la zona oeste del fundo, en la cual la factibilidad de encontrar acuíferos es muy baja debido a la presencia de rocas compactas y/o poco meteorizadas correspondientes a la Formación Lo Valle (KTlv).

El mayor potencial hidrogeológico se reconoció en la zona de prospección 1, en el punto LT1, ubicado en el sector noreste del “Fundo las Tinajas”, determinándose que entre los 25 a 40 m de profundidad aproximadamente, existen acuíferos de alto potencial hidrogeológico, con una baja vulnerabilidad a la contaminación debido a una capa confinante bien definida sobre ellos, y que presenta resistividades menores a profundidad, lo que puede favorecer las dimensiones del acuífero a profundidad. En la zona de prospección 3, en el punto LT7, ubicado en el sector central del fundo, se obtuvieron condiciones similares, pero con menores dimensiones respecto de la zona de prospección 1, sin embargo, al estar este punto ubicado en una posición más cercana y de fácil acceso a las zonas de topografía elevada (futura zona de acumulación de agua), se considera este punto como el mejor para realizar una captación de aguas subterráneas del “Fundo Las Tinajas”.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia que tiene realizar una prospección geofísica para identificar y definir la geometría de los acuíferos que puedan presentar mayores potenciales hidrogeológicos y una menor vulnerabilidad a la contaminación de éstos en un proyecto hidráulico. Una correcta interpretación de los perfiles geofísicos ayuda a definir las mejores zonas para la construcción de captación de aguas subterráneas, lo que permite:

- Asegurar una provisión del recurso hídrico, identificando la profundidad y ubicación en la que se encuentran los acuíferos de mayor potencial hidrogeológico, además de definir sus posibles dimensiones, para así obtener una estimación de la capacidad de éstos para abastecer correctamente a un proyecto hidráulico.
- Definir la vulnerabilidad de los acuíferos en base al tipo de acuífero, su granulometría y profundidad, lo que permite asegurar la calidad del recurso previniendo potenciales escenarios de contaminación. Esto permite disminuir los costos asociados a la

potabilización del agua y su mantenimiento, además de los enormes riesgos que constituye una posible contaminación del agua de una urbanización, la cual a futuro será el hogar de miles de personas.

- Cuando las zonas de acumulación de agua ya están definidas en un proyecto, un geólogo es capaz de definir captaciones de aguas subterráneas que estén en zonas de buen potencial hidrogeológico y que, además, se encuentren más cercanas a ellas para evitar a futuro gastos de transporte, mantención y pérdida de carga hidráulica.

## REFERENCIAS

- Borgel, J., 1983.** Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar (IGM): 373 pp. Santiago.
- Cagniard, L., 1953.** Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics 18, 605-635 pp.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), 2023.** Explorador Climático.
- Darcy, H. (1856)** In: Dalmont, V., Ed., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Exposition et Application des Principes a Suivre et des Formulesa Employer dans les Questions de Distribution d'Eau. Paris, 647 p.
- Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), 2022.** Reporte anual de la evolución del clima en Chile. Sección Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile, Meteochile.
- Foster, S., 1987.** Fundamental Concept in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, TNO Committee on Hydrogeological Research, Proceedings and Information, 38.
- Hauser, A., 1995.** Hoja Talca. Mapa 1: Talca (1 de 2). Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Hidrogeológica de Chile N° 2, escala 1:100.000.
- Kato, Y. y Kikuchi, T., 1950.** Scientific Report, Tohoku Univ. Ser. V, Geophysics, 2.
- Ministerio de Justicia (MINJU), 1981.** Código de Aguas, DFL 1122. Última versión: 26 de septiembre del 2023. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN).
- Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2008.** Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. Departamento de administración de recursos hídricos, Dirección General de Aguas (DGA).
- Ministerio de Obras Públicas (MOP), 2014.** Inventario de Cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas (DGA).
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2019.** Plan Regulador Intercomunal de Talca: Informe de Riesgos (Edición 1). SEREMI Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Región del Maule, Chile.
- Naciones Unidas, 2018.** Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DAES).
- Palacky, G., 1987.** Resistivity Characteristics of Geological Targets. In: Nabighian, M., Ed., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Society of Exploration Geophysicists Tulsa, OK, 53-129.
- Reckman, O. y Maldonado, T., 2000.** Pozos profundos. Programa de desarrollo de sistemas de riego en el secano interior y costero. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y Comisión Nacional de Riego (CNR). Santiago, Chile. 44 pp.

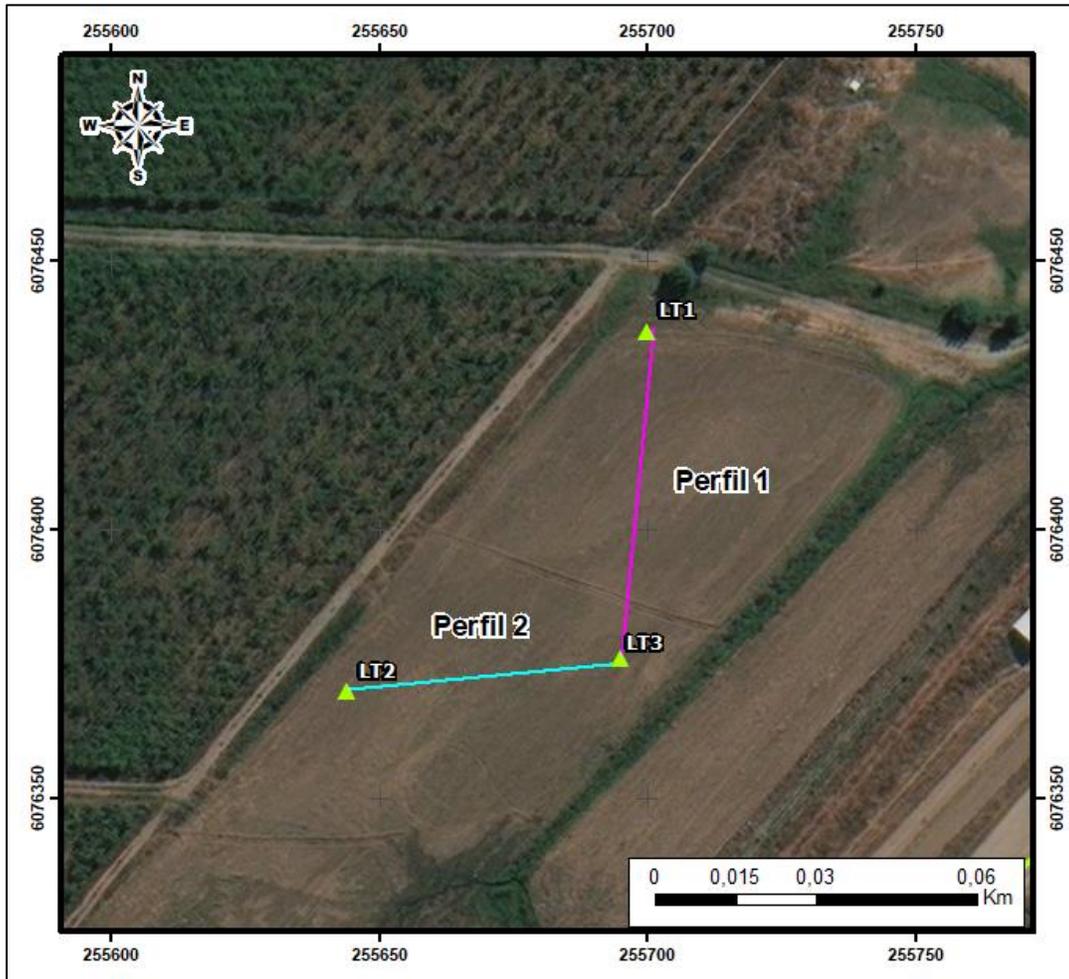
**Struckmeier, W. & Margat, J., 1995.** Hydrogeological maps. A guide and a standard legend. International Association of Hydrogeologists. International contributions to hydrogeology. Vol. 17) ISBN 3-922705-98-7 Series Editorial Board.

**Tapia, G., 2014.** Inventario de Cuencas, Subcuencas y Subsubcuencas de Chile: Informe Técnico SDT N°364. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, MOP.

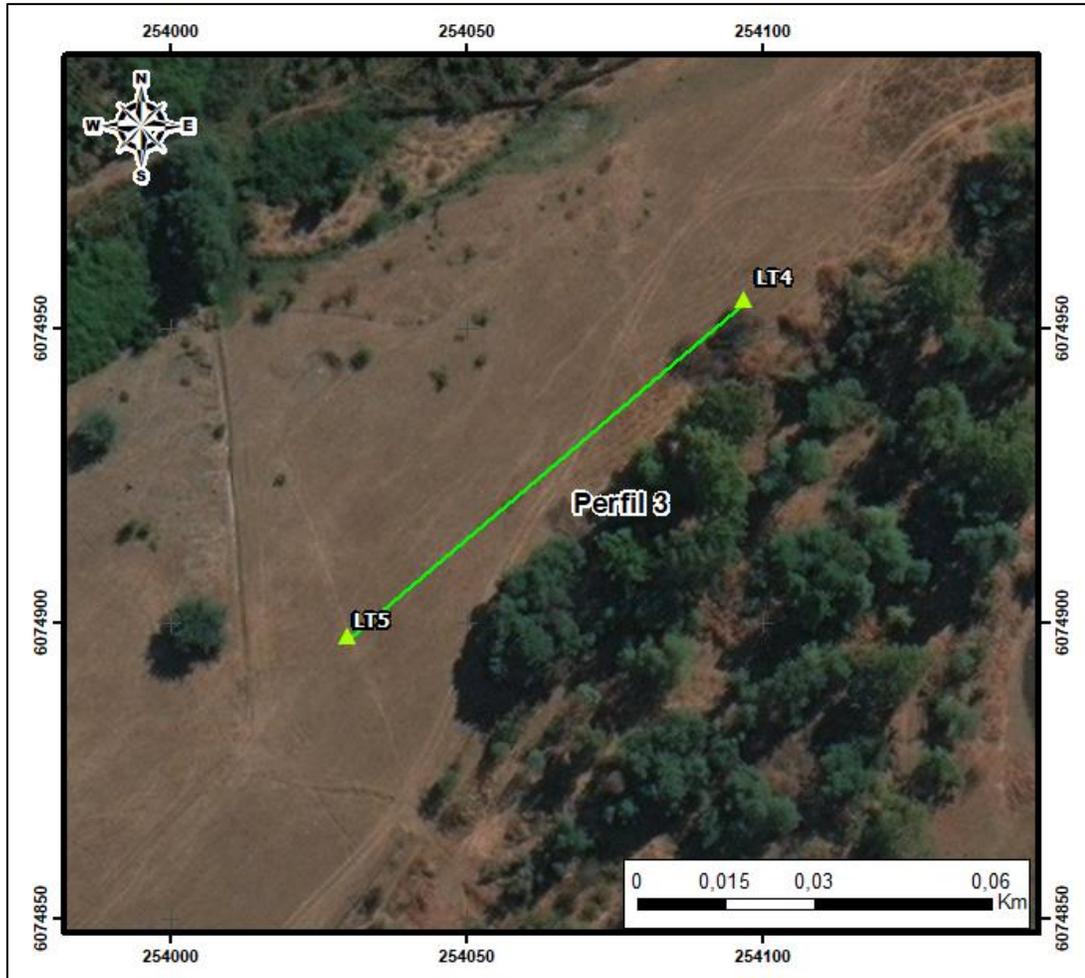
**Thomas, H., 1958.** Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de la Ligua y la cuesta Barriga. En Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas. (p.86)

**ANEXOS**

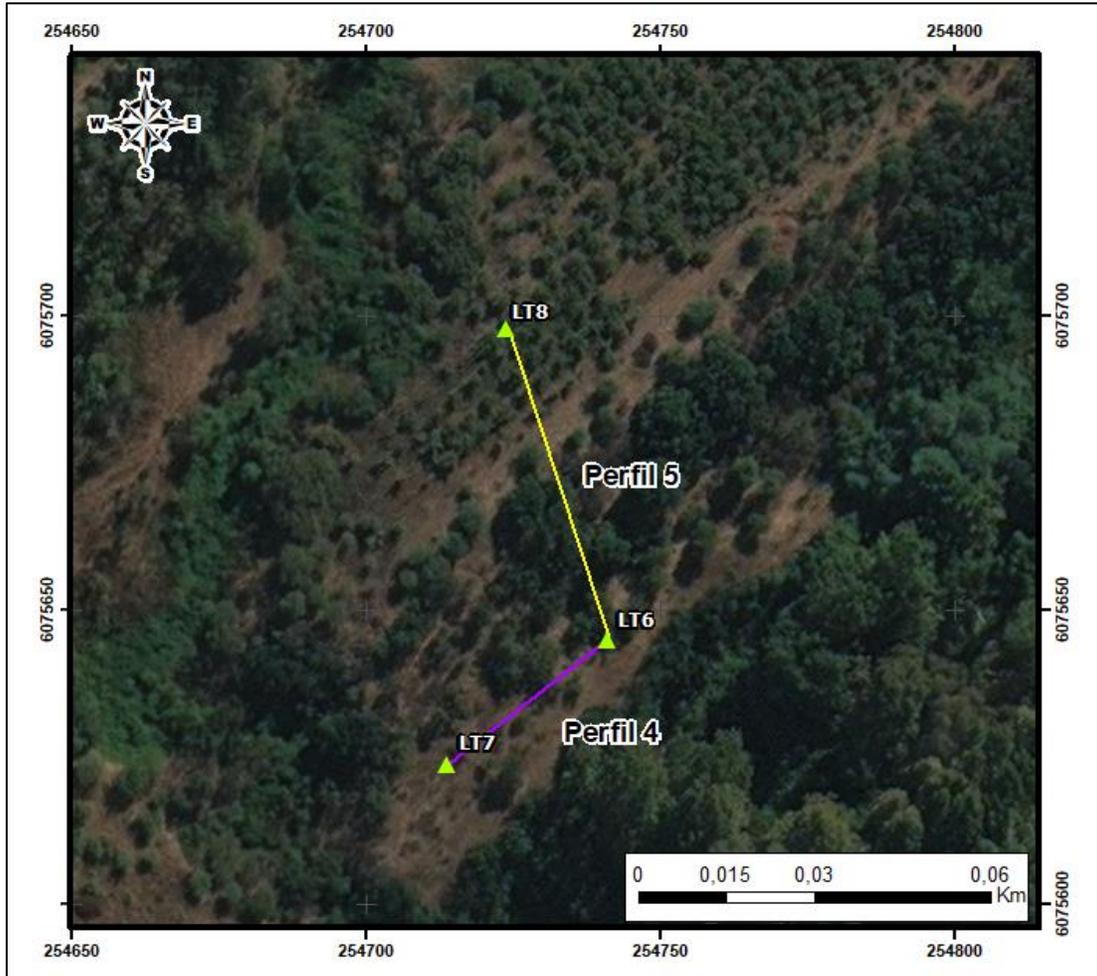
**Anexo I: Mapa 1:** Mapa de ubicación de la zona de prospección 1, de los puntos MT LT1, LT2 y LT3 y perfiles 1 y 2.



**Anexo I: Mapa 2:** Mapa de ubicación de la zona de prospección 2, de los puntos MT LT4 y LT5 y perfil 3.



**Anexo I: Mapa 3:** Mapa de ubicación de la zona de prospección 3, de los puntos MT LT6, LT7 y LT8 y perfiles 4 y 5.



**Anexo II: Tabla 1:** Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de bombeo a caudal constante de 1,5 L/s para la captación código ND-0702-5520.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Profundidad</b>
0	5,6
0,5	7,71
1	9,24
2	10,58
3	11,58
4	12,21
5	12,68
6	13,05
7	13,29
8	13,55
9	13,71
10	13,84
12	14,04
14	14,17
16	14,28
18	14,4
20	14,44
25	14,56
30	14,65
35	14,7
40	14,76
45	14,81
50	14,85
55	14,89
60	14,94
70	15,01
80	15,07
90	15,12
100	15,17
110	15,21
120	15,24
130	15,27

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Profundidad</b>
140	15,29
150	15,31
160	15,33
170	15,34
180	15,35
200	15,36
215	15,37
250	15,37
287	15,37
300	15,37
330	15,37
360	15,37
390	15,37
420	15,37
480	15,37
540	15,37
600	15,37
660	15,37
720	15,37
780	15,37
840	15,37
900	15,37
960	15,37
1020	15,37
1080	15,37
1140	15,37
1200	15,37
1260	15,37
1320	15,37
1380	15,37
1440	15,37

**Anexo II: Tabla 2:** Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de recuperación para la captación código ND-0702-5520.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
0	15,37
0,5	11
1	10,06
2	7,71
3	6,59
4	6,2
5	5,98
6	5,9
7	5,85
8	5,81
9	5,78

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
10	5,76
12	5,73
14	5,7
16	5,68
18	5,67
20	5,66
25	5,64
30	5,63
35	5,62
40	5,61

**Anexo II: Tabla 3:** Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de bombeo a caudal constante de 20,5 L/s para la captación de código ND-0702-4466.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
0	3,21
1	3,21
2	3,21
3	3,21
4	3,21
5	3,21
6	3,21
7	3,21
8	3,21
9	3,21
10	3,21
12	3,21
14	3,21
16	3,21
18	3,21
20	3,21
25	3,21
30	3,21
35	3,21
40	3,21

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
170	3,3
180	3,31
200	3,32
220	3,33
240	3,34
260	3,35
280	3,36
300	3,37
330	3,38
360	3,39
390	3,4
420	3,41
450	3,42
480	3,43
510	3,44
540	3,45
570	3,46
600	3,47
630	3,48
660	3,49

45	3,21
50	3,21
55	3,21
60	3,21
70	3,21
80	3,21
90	3,22
100	3,22
110	3,22
120	3,23
130	3,26
140	3,27
150	3,28
160	3,29

690	3,5
720	3,6
780	3,6
840	3,6
900	3,6
960	3,6
1020	3,6
1080	3,6
1140	3,6
1200	3,6
1260	3,6
1320	3,6
1380	3,6
1440	3,6

**Anexo II: Tabla 4:** Tabla de tiempo (min) v/s nivel dinámico (m) en la prueba de recuperación para la captación código ND-0702-4466.

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
0	3,6
1	3,6
2	3,6
3	3,6
4	3,6
5	3,6
6	3,6
7	3,6
8	3,6
9	3,6
10	3,6
12	3,6
14	3,6
16	3,6
18	3,6

Tiempo (min)	Nivel dinámico (m)
20	3,6
25	3,6
30	3,59
35	3,59
40	3,59
45	3,58
50	3,57
55	3,56
60	3,55
70	3,54
80	3,53
90	3,52
100	3,51
110	3,5
120	3,49

**Anexo Fotográfico:** Puesta en terreno de los equipos de medición geofísica.

