



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# **AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SAN FERNANDO Y PICHIDEGUA: ANÁLISIS ORIENTADO AL USO DIRECTO DE LA GEOTERMIA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

JASSON HUGO ANDRÉS TONDREAU MORAGA

**PROFESOR GUÍA:**

LINDA DANIELE

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

DIEGO MORATA CÉSPEDES

MAURICIO MUÑOZ MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2018

# RESUMEN

---

## **RESUMEN DE LA MEMORIA DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE: Geólogo**

**POR:** Jasson Hugo Andrés Tondreau Moraga

**FECHA:** 20 de Diciembre de 2018

**PROFESOR GUÍA:** Linda Daniele

### **AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SAN FERNANDO Y PICHIDEGUA: ANÁLISIS ORIENTADO AL USO DIRECTO DE LA GEOTERMIA**

Las ciudades de San Fernando y Pichidegua se encuentran en la Depresión Central, en los 34,5°S aproximadamente. Las zonas de estudio presentan intensa actividad agrícola, que se sustenta por medio de las aguas subterráneas aprovechadas mediante pozos. La presencia de agua y de perforaciones son las que han llevado a la realización de esta memoria cuyo objetivo general es analizar en detalle los acuíferos para evaluar el potencial geotérmico asociado a estas aguas subterráneas. La idea es proporcionar datos y, mostrar potenciales aplicaciones que contribuyan a la difusión del uso directo de la geotermia en las áreas estudiadas. En las zonas de estudio no existe una caracterización de detalle de este recurso, por lo tanto, después de recopilar antecedentes geológicos e hidrogeológicos se realizaron terrenos para medir la temperatura y la conductividad eléctrica del agua subterránea (logs verticales) en pozos disponibles y, la resistividad eléctrica de los sedimentos con técnicas geofísicas (TEM y ERT). A partir del análisis de los perfiles de temperatura medidos, se define un acuífero detrítico cuya influencia externa no desaparece a los 10-15 m como es usual, sino que se observan comportamientos de pozos en los que las temperaturas medidas en invierno y verano se mantienen diferentes a los 40 m indicando que el comportamiento del acuífero es muy variable. Esto se puede relacionar a que los primeros 40 m del acuífero, en ambas zonas de estudio, están sujetos a posibles procesos de recarga durante todo el año.

A partir de aproximadamente 5 m de profundidad, la temperatura del acuífero es superior a los 17°C en Pichidegua y superior a los 16°C en San Fernando. Usando estos valores de temperatura y, los caudales otorgados por la DGA, se ha estimado una energía extraíble del acuífero de 279,1 kW, con lo que se puede suplir la potencia energética demandada de 6,5 invernaderos de 150 m<sup>2</sup> de tomates y 10 invernaderos de lechugas, con las mismas dimensiones. El número de viviendas tipología T2 (peor caso) cuya demanda es factible suplir en Rengo (cercañas de Pichidegua) es de 9,8, mientras que en San Fernando es de 10,6. Con respecto a las viviendas más comunes, se obtuvo que en Rengo-Pichidegua se puede suplir la demanda de 129,2 viviendas T5, y 206,7 viviendas T8 en San Fernando.

# AGRADECIMIENTOS

---

Gracias a la vida

Primero que todo agradecer al Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) FONDAP CONICYT #15090013, por presentarme el proyecto y haber hecho posible esta investigación, y financiar esta investigación. También a mi comisión, Linda Daniele, Mauricio Muñoz y Diego Morata por su apoyo durante este proceso.

Agradezco a mi familia por su eterno apoyo, por su infinita confianza y su inmenso amor. Beño y Kika son mi ejemplo a seguir, soy lo que soy gracias a ustedes y su esfuerzo. A mis hermanas Pole, Ive, Tuta y Lichi, las amo. También a mis cuñados. Agradezco a la vida por regalarme 3 luces por las que seguir luchando, Josefo, Tórtola y Leoncia. Prontito llega el cuarto. A Moraguita y a la ia. A Peñuelas, gracias por tanto.

Agradezco a lxs amigxs que la vida escogió para mí, en geo: Salva, Mati, Mafi, Gonzu, Jipi, Peter, Marcoantonio, Tania, Cali, Mendo, Rodri, Shorin, Toto, Jo... A los Roca Junior y Senior, a Mendeca, Negro, Claudio, a los Weólogos a los que suSedex... Me encantaría nombrar a todxs los que dejaron su huella en mí en esta linda parte de mi vida que se llama Geología, pero me faltarían hojas.

Agradezco a lxs que conocí primero, a lxs de la 1 y Flan Colun, Miguel, Goza, Perro, Pato, Jaime, Javi, Gustavo, Ibieta, Jota, Tomi, Carpa, Diego, Fidi. A la Pasta y a los Sitoman.

A lxs amigxs de la vida, Mitchel, Maxi, Nico, Tedy, Porotita y Noqui.

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1	Formulación del trabajo.....	1
<b>2</b>	<b>Descripción del problema</b> .....	<b>4</b>
2.1	Objetivos .....	4
2.1.1	Objetivo General.....	4
2.1.2	Objetivos Específicos .....	4
<b>3</b>	<b>Marco Geológico e hidrogeológico</b> .....	<b>5</b>
3.1.1	Rocas Estratificadas.....	9
3.1.2	Depósitos no consolidados .....	9
<b>3.2</b>	<b>Hidrogeología de la VI Región</b> .....	<b>10</b>
3.2.1	Unidad I: permeabilidad baja a nula.....	11
3.2.2	Unidad II: permeabilidad alta a media .....	11
3.2.3	Unidad III: permeabilidad alta.....	12
3.2.4	Acuífero Cachapoal .....	14
3.2.5	Acuífero Tinguiririca.....	15
<b>3.3</b>	<b>Medio físico y natural</b> .....	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>18</b>
4.1	Revisión Bibliográfica.....	18
4.2	Trabajo en terreno.....	18
4.2.1	Medición del nivel estático, la temperatura y la conductividad eléctrica .....	19
4.2.2	Mediciones geofísicas .....	20
4.3	Tratamiento y análisis de datos .....	25
4.3.1	Estimación de los parámetros elásticos .....	25
4.3.2	Estimación de la demanda térmica asociada a cultivos y viviendas.....	26
<b>5</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>29</b>
5.1	Parámetros elásticos .....	29
5.2	Nivel estático .....	37
5.3	Temperatura y conductividad eléctrica.....	40
5.4	Prospección geofísica .....	48
<b>6</b>	<b>Discusiones</b> .....	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>Anexo</b> .....	<b>69</b>
	Interpolación de cotas hidráulicas .....	69

# TABLA DE ILUSTRACIONES

---

Figura 1: Utilización y capacidad instalada del uso directo de la energía geotérmica en el mundo entre 1995 y 2015. Datos de Lund y Boyd, 2015. Elaboración propia. ....	2
Figura 2: Utilización y capacidad instalada de diferentes usos directos de la energía geotérmica en el mundo. Datos de Lund y Boyd, 2015. ....	3
Figura 3: Principales morfoestructuras entre los 32º y 35ºS. (Modificado de Fock, 2005.) ....	5
Figura 4: Mapa geológico del área de estudio en San Fernando. Modificado de la Carta geológica del área San Fernando-Curicó. ....	7
Figura 5: Mapa geológico del área de estudio en Pichidegua. Modificado de la Carta geológica del área Rancagua-San Vicente. ....	8
Figura 6: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Tomado de ((DCPRH), 2015). ....	11
Figura 7: Localización de acuíferos Cachapoal y Tinguiririca en la VI Región. Elaboración propia con datos tomados de <a href="http://cigiden.cl/es/">http://cigiden.cl/es/</a> . ....	13
Figura 8: Precipitaciones mensuales (mm) del año 2012 en Pichidegua (estación meteorológica Santa Brisilla). Elaboración propia con datos tomados de <a href="http://www.agromet.cl/">http://www.agromet.cl/</a> . ....	16
Figura 9: Precipitaciones mensuales (mm) del año 2012 en San Fernando (estación meteorológica San Fernando). Elaboración propia con datos tomados de <a href="http://www.agromet.cl/">http://www.agromet.cl/</a> . ....	17
Figura 10: Izquierda: Freatímetro Solinst TLC 107. Derecha: Medición de nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea en un pozo. Elaboración propia. ....	19
Figura 11: Diagrama del funcionamiento del TEM (modificado de ABEM-WalkTEM-Manual, 2015). ....	20
Figura 12: Etapas de medición en TEM: (a) Pulso de transmisión, (b) inducción electromagnética y (c) campo magnético secundario (Tomado de ABEM-WalkTEM-Manual 2015). ....	21
Figura 13: Izquierda: vista en planta de la disposición para la medición de TEM, con la antena receptora central, la antena receptora de 10x10m y el loop del transmisor dispuestos de manera concéntrica. Derecha: medición TEM en San Fernando. Elaboración propia ....	22
Figura 14: Valores de resistividad y conductividad eléctrica de rocas y sedimentos no consolidados, modificado de Palacky (1987). ....	23
Figura 15: Esquema de la disposición de electrodos en un arreglo de la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Las letras A, M, N y B representan electrodos, mientras que I es la corriente continua que se transmite al suelo y V es la diferencia de voltaje registrada. ....	23
Figura 16: Medición de Tomografía de Resistividad Eléctrica. Elaboración propia. ....	24
Figura 17: Ejemplo demostrativo para la solución del método estimativo de transividad hidráulica Recuperación de Cooper & Jacob en un acuífero. ....	25
Figura 18: Ejemplo demostrativo para la solución del método estimativo de transividad hidráulica Recuperación de Theis (1935). ....	26
Figura 19: Distribución de la Transmisividad Hidráulica en San Fernando. Método Cooper & Jacob. Elaboración Propia. ....	31
Figura 20: Distribución de la Transmisividad Hidráulica en Pichidegua. Método Cooper & Jacob. Elaboración Propia. ....	32
Figura 21: Histograma de caudales asignados por la DGA en Pichidegua. Elaboración propia. ....	33
Figura 22: Histograma de caudales asignados por la DGA en San Fernando. Elaboración propia. ....	34
Figura 23: Ubicación zona de estudio. Además se muestra la ubicación de los pozos con perfil de temperatura, tomografías de resistividad eléctrica y sondajes de Transiente Electromagnético en San Fernando. La línea celeste indica la dirección del flujo de aguas subterráneas. ....	35
Figura 24: A) Ubicación de pozos donde se realizaron perfiles de temperatura, B) Acercamiento al área de estudio con ubicación de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético realizado en Pichidegua. La flecha azul indica la dirección inferida de agua subterránea. Elaboración propia. ....	36

<i>Figura 25: Niveles estáticos medidos en Pichidegua. La flecha azul indica la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26: Niveles estáticos medidos en San Fernando. La flecha azul indica la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27: Perfiles de temperatura medidos en Pichidegua. Elaboración propia.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 28: Perfiles de temperatura medidos en San Fernando. Elaboración propia. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 29: Perfiles de Conductividad Eléctrica medidos en Pichidegua. Elaboración propia.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 30: Perfiles de Conductividad Eléctrica medidos en San Fernando. Elaboración propia. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31: CE promedio de cada pozo, medida en <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 32: Transiente electro magnético 1 medido en Pichidegua.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 33: Transiente electro magnético 2 medido en Pichidegua.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 34: Resistividad aparente medida (arriba), resistividad aparente calculada (medio) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (abajo) construida en Pichidegua. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 35: Transiente electro magnético 1 medido en San Fernando. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 36: Transiente electro magnético 2 medido en San Fernando. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 37: Transiente electro magnético 3 medido en San Fernando. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 38: Resistividad aparente medida (arriba), resistividad aparente calculada (medio) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (abajo) construida en San Fernando. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 39: Comparación entre la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético (TEM) en Pichidegua. Ubicación de pozos, sección y sondaje en la Figura 18. Elaboración propia.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 40: Comparación entre la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético (TEM) en San Fernando. Ubicación de pozos, sección y sondaje en la Figura 15. Elaboración propia. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 41: Cotas hidráulicas en el área de interés en Pichidegua. Los puntos amarillos indican la posición de los pozos medidos. Además, se presenta un perfil topográfico. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 42: Cotas hidráulicas en el área de interés en San Fernando. Los puntos amarillos indican la posición de los pozos medidos. Además, se presenta un perfil topográfico. ....</i>	<i>70</i>

---

# 1 INTRODUCCIÓN

---

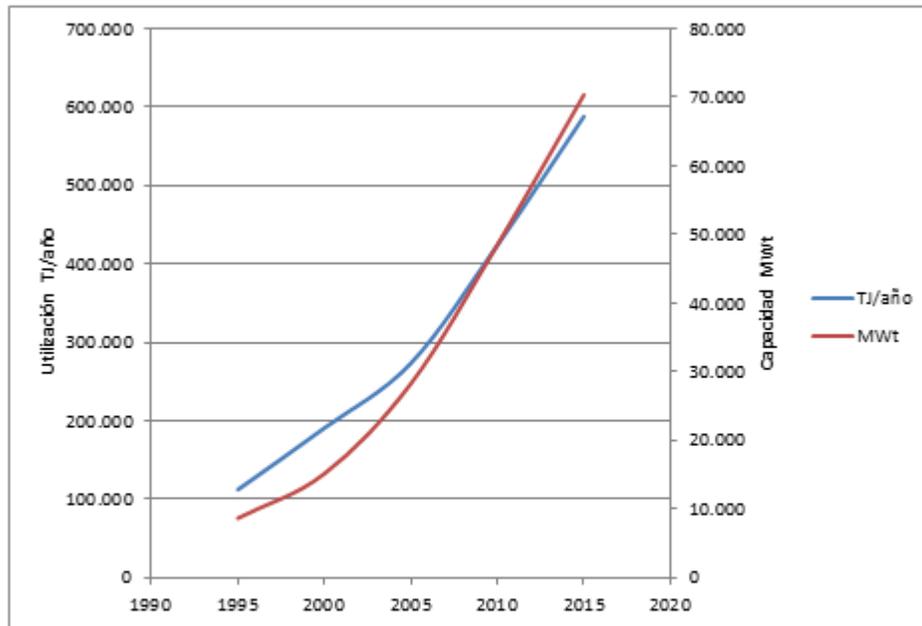
## 1.1 FORMULACIÓN DEL TRABAJO

La energía geotérmica se refiere al calor contenido en el interior de la Tierra, que puede ser recuperado y explotado por el hombre.

Existen aplicaciones de esta energía que no requieren de altas temperaturas y que contribuyen a reducir el uso de combustibles fósiles. Estas aplicaciones utilizan el calor contenido en el agua subterránea, la que experimenta menos fluctuaciones de temperatura respecto del aire en superficie, debido a su inercia térmica (Paksoy y Beyhan, 2015; Turgut et al., 2008). Además, las propiedades térmicas de las rocas y sedimentos favorecen la transferencia de calor. Para recuperar calor del suelo o disipar calor en el suelo, se requiere una bomba de calor que traslada el calor entre el suelo y la superficie.

El uso directo de la Geotermia tiene como principio fundamental el hecho de que la temperatura del subsuelo a partir de, aproximadamente, los 10m de profundidad, es estable y depende solo del gradiente geotérmico, cuyo valor promedio es 30°C/km (Clarck, 2005). La existencia de litologías acuíferas representa una muy buena oportunidad para implementar el uso directo de la geotermia. Especialmente interesante resultan aquellas áreas donde ya existen captaciones de agua subterránea como puede ocurrir en zonas agrícolas, donde la geotermia puede representar una muy buena oportunidad de optimización de procesos productivos, como por ejemplo mejorar y asegurar las cosechas pero también se podría aplicar a la climatización de las viviendas y a nuevos procesos productivos (secar fruta, por ejemplo). Estas mejoras implican inversiones para obtener mayores utilidades.

El uso directo de la geotermia es la aplicación más versátil y común para esta energía. Estimaciones de la capacidad térmica instalada en el mundo hasta el año 2015 indican que alcanza 70.329 MWt. Lo anterior representa un incremento del 45% respecto de 2010, creciendo a un tasa de 7,7% anual (Lund y Boyd, 2015). La tasa de crecimiento de la capacidad instalada y la utilización directa de la energía geotérmica en el mundo se muestran en la Figura 1.



1995	2000	2005	2010	2015
112.441	190.699	273.372	423.830	587.786
8.664	15.145	28.269	48.493	70.329

Figura 1: Utilización y capacidad instalada del uso directo de la energía geotérmica en el mundo entre 1995 y 2015. Datos de Lund y Boyd, 2015. Elaboración propia.

El aumento del uso directo de la energía geotérmica se debe principalmente a un incremento en la instalación de bombas de calor geotérmicas (Figura 2) que permiten la climatización de viviendas, edificios y todo tipo de edificación para uso público y privado.

Representan una tecnología muy eficiente para la climatización de ambientes y su utilización ayuda a reducir el consumo de combustibles fósiles, además de generar ahorro energético a largo plazo (Self et al., 2013). La climatización de ambientes usando bombas de calor es una opción a la climatización residencial actual, la que se lleva a cabo usando tecnologías convencionales como las calderas a gas licuado o los refrigeradores *chillers*. Además, éstas tienen gran aplicabilidad en diversos procesos productivos, como el secado y refrigeración de alimentos, en secadores de leña o en invernaderos.

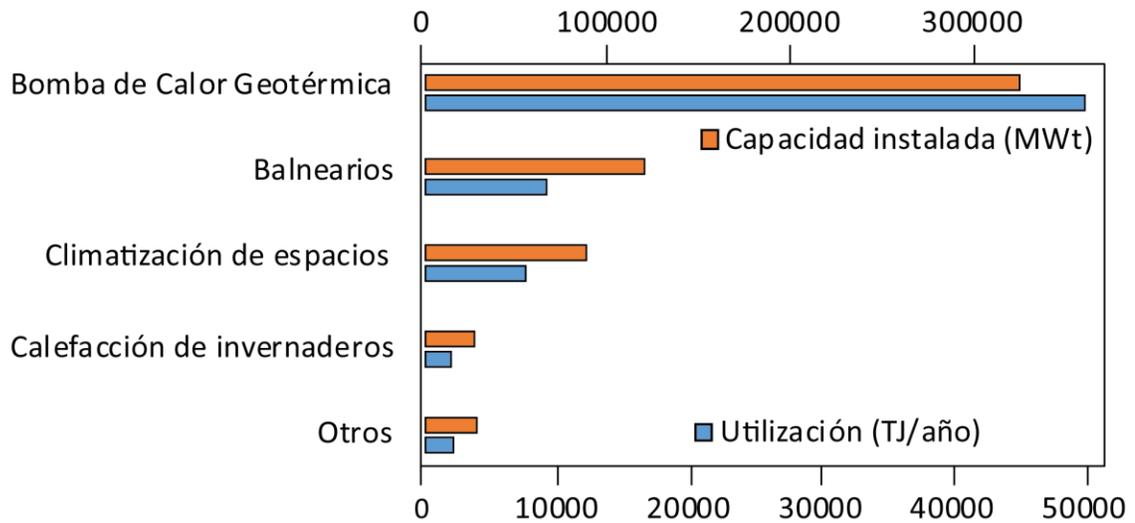


Figura 2: Utilización y capacidad instalada de diferentes usos directos de la energía geotérmica en el mundo. Datos de Lund y Boyd, 2015.

Para cuantificar la eficiencia de una bomba de calor, se usa el coeficiente de rendimiento (COP o *Coefficient of Performance en inglés*). Éste es un indicador que relaciona la energía térmica entregada por la bomba de calor en función de la energía eléctrica entregada al compresor. Según Self et al. (2013) y Omer (2006), para las bombas de calor, el COP es 3-6 y 3-4 respectivamente, mientras que las tecnologías convencionales presentan eficiencias significativamente menores, como por ejemplo las calderas de petróleo y gas (COP de 0,6 a 0,8), o los calentadores eléctricos (COP de 0,36).

Para el correcto y sustentable uso de la energía contenida en el agua subterránea, es necesario conocer en profundidad al acuífero. Para esto, es necesario medir la temperatura del agua subterránea, así como también, su nivel estático a lo largo del tiempo, para detectar posibles variaciones y establecer de manera local la profundidad a la cual la temperatura del agua subterránea no depende de las variaciones de temperatura externas. Además, se hace necesario identificar la geometría del acuífero, para así conocer y comprender los factores geológicos e hidrogeológicos que pueden influir en el funcionamiento del acuífero. En este sentido son útiles las mediciones geofísicas que permiten generar modelos de las rocas en profundidad, y así interpretar la geometría de las distintas capas presentes en el subsuelo.

Considerando todo lo anterior, el presente trabajo tiene como propósito cuantificar y medir la estabilidad del recurso geotérmico de muy baja temperatura en los acuíferos Cachapoal y Tinguiririca, a partir de mediciones en Los Lingues, San Fernando y Pichidegua, en la VI región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

## **2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

---

La presencia de acuíferos representa un potencial térmico no bien aprovechado. Este potencial puede ser explotado de manera sustentable de acuerdo con los actuales usos del agua, que es principalmente riego (Paksoy y Beyhan, 2015). De ser así, el uso de la geotermia en procesos que requieren temperatura constante, como la climatización de ambientes, se convertiría en una gran alternativa a los procesos convencionales.

En Chile aún no se ha explorado la conexión entre el sector productivo agrícola y la geotermia, la que sería una excelente combinación ya que normalmente en las áreas agrícolas existen sondajes y pozos para riego. Por lo tanto esta memoria de título está orientada a San Fernando y Pichidegua, debido a que son zonas de una intensa actividad agrícola.

Los aspectos de la geotermia estudiados en el presente trabajo se relacionan con el desarrollo del uso directo de la geotermia. Este estudio pretende ser una contribución para mejorar el conocimiento que ayude a considerar y evaluar tecnologías renovables en sectores económicos clave, tal como es la agricultura con el fin de mejorar la productividad y, a la vez, crear una mejora social usando energía limpia.

### **2.1 OBJETIVOS**

#### **2.1.1 Objetivo General**

Evaluar si los parámetros hidráulicos del acuífero detrítico en las zonas de San Fernando y Pichidegua permiten el uso directo de la geotermia para proyectos vinculados a procesos productivos y de climatización.

#### **2.1.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar variaciones en parámetros hidrogeológicos y térmicos del agua subterránea.
2. Definir la geometría en 2D del acuífero detrítico en 2 zonas representativas.
3. Determinar el potencial geotérmico de las zonas de estudio, a partir de la comparación entre el potencial obtenido, y la potencia energética demandada por invernaderos y viviendas.

### 3 MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

En Chile central, el orógeno Andino presenta distintas unidades morfoestructurales dispuestas en franjas paralelas al borde continental, con una orientación preferente N-S hacia el norte de los 33°S, y una orientación NNE-SSO hacia el sur de esta latitud (Figura 3). A la latitud del área de estudio (~35°S), estas unidades, descritas de este a oeste, corresponden a la Cordillera de los Andes, la Depresión Central y la Cordillera de la Costa, además de la región del antepaís en territorio argentino (Figura 3).

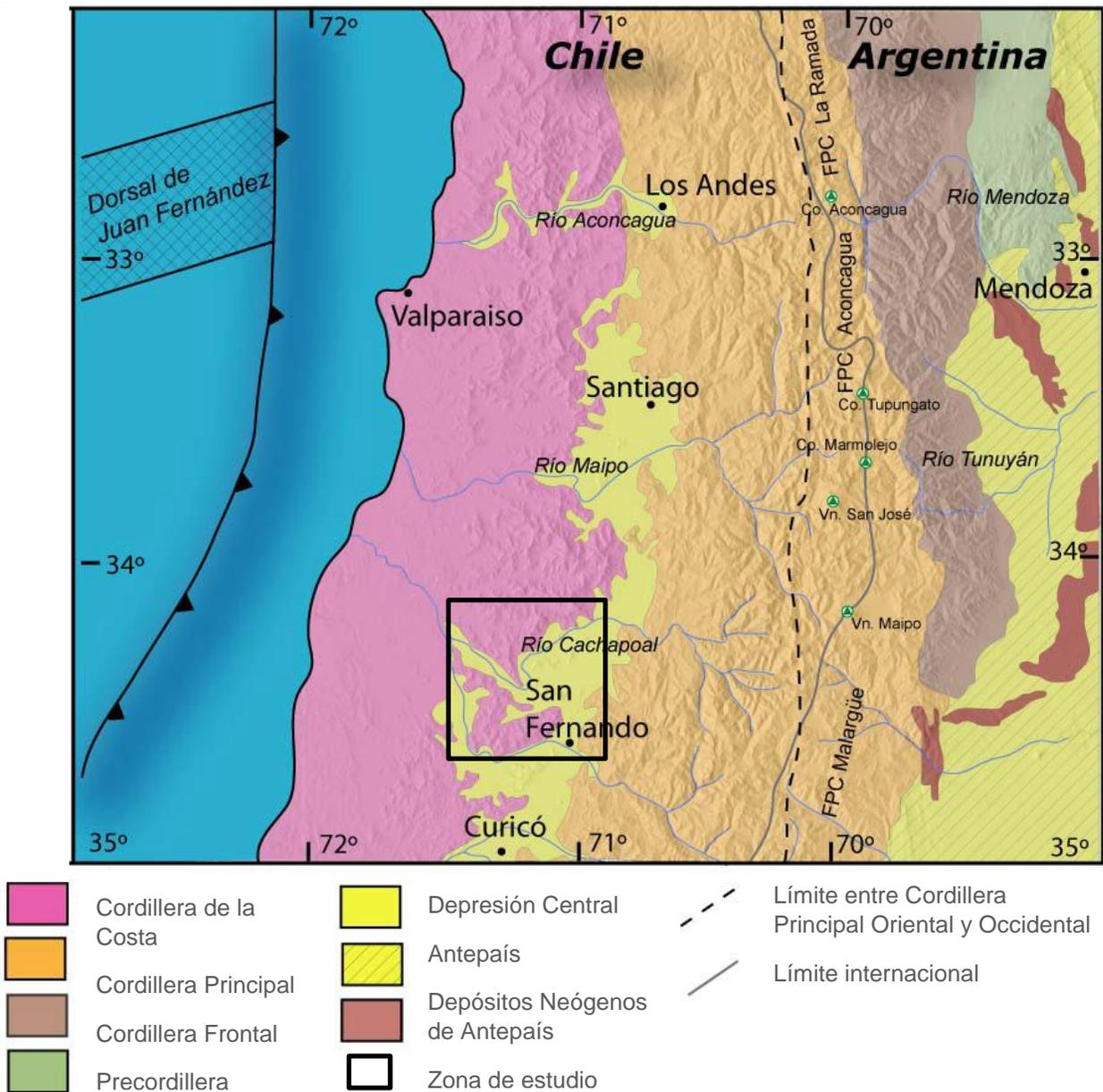


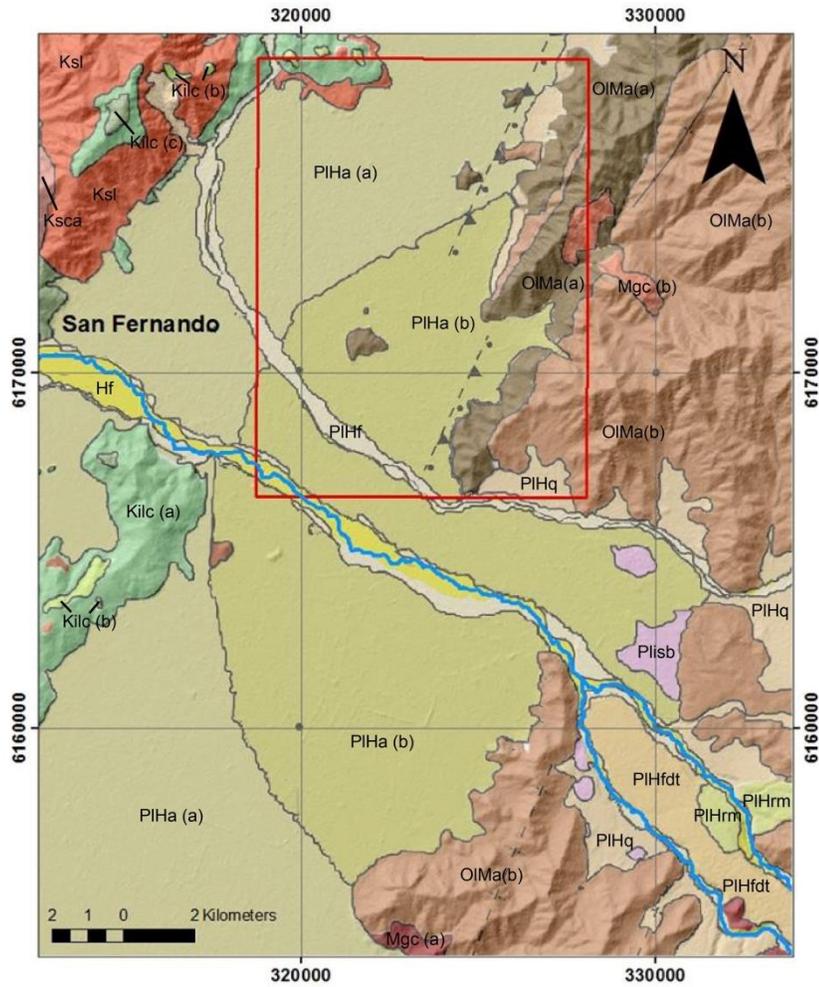
Figura 3: Principales morfoestructuras entre los 32° y 35°S. (Modificado de Fock, 2005.)

La Cordillera de la Costa se ubica en la parte más occidental del margen continental y corresponde a un relieve cuya altura no sobrepasa los 2.200 m (Figura 3). Presenta un dominio occidental dominado por afloramientos de rocas metamórficas del basamento paleozoico, e intrusivos carboníferos y jurásicos, mientras que el sector oriental está dominado por secuencias estratificadas triásicas, jurásicas y cretácicas, intruidas por granitoides de edad Cretácico Temprano (Wall *et al.*, 1999; Sellés y Gana, 2001).

La Depresión Central está compuesta mayoritariamente por depósitos sedimentarios no deformados provenientes desde el este, con algunos pequeños cerros isla formados por rocas de la Formación Abanico y de los Cuerpos Hipabisales del Cerro Verde. El análisis de los datos de la estratificación presente en los cerros isla permite inferir un pliegue muy suave, cuya amplitud puede ser todo el ancho de la Depresión Central en esta zona (Fariás *et al.*, 2008).

La Cordillera Principal corresponde a la porción mayoritaria del orógeno Andino actual y presenta una distribución aproximadamente N-S, extendiéndose desde los 33° hasta los 46°S por más de 1.500 km. Ésta puede ser dividida en dos en base a sus características geológicas dominantes (Figura 3): la Cordillera Principal occidental está dominada por afloramientos de secuencias volcánicas y volcanosedimentarias cenozoicas pertenecientes a las formaciones Abanico y Farellones, las que se encuentran deformadas e intruidas por plutones de edad Oligoceno hasta el presente. La Cordillera Principal oriental, por su parte, está dominada por afloramientos de secuencias sedimentarias mesozoicas, continentales y marinas con limitadas intercalaciones volcánicas. Estas últimas secuencias se encuentran intensamente deformadas, y constituyen una serie de fajas plegadas y corridas de piel fina y gruesa que concentran la deformación hasta la zona del antepaís (Fariás *et al.*, 2008). Ambos dominios se encuentran en contacto por un sistema de fallas de extensión regional que puede ser seguido desde el norte de Santiago (~33°S) hasta los ~35°S, denominado Falla El Fierro en la zona de estudio.

En cuanto a las estructuras presentes, comprenden en su mayoría fallas normales en la zona de la Cordillera de los Andes y pliegues, también en la cordillera y precordillera. No se observan mayores estructuras que las mencionadas.



**Leyenda**

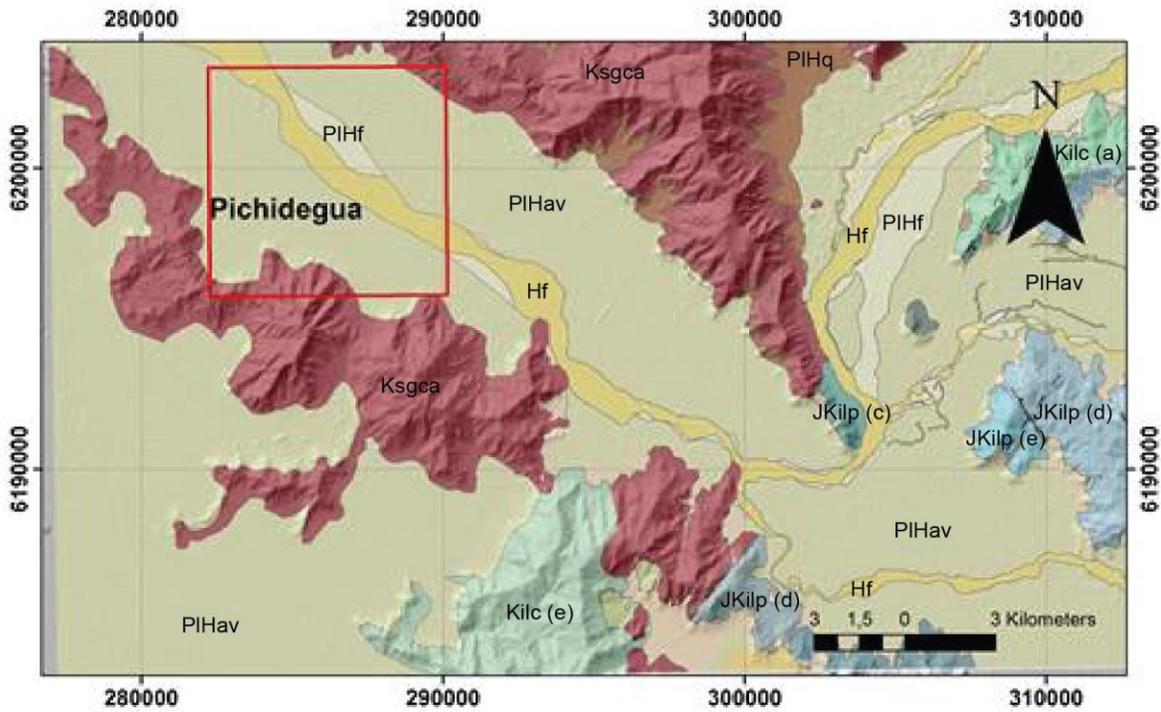
- OIMa(b) Formación Abanico (Eoceno superior - Mioceno inferior)
- OIMa(a)
- Kilc (a) Formación Las Chilcas (Aptiano - Campaniano)
- Kilc (b)
- Kilc (c)
- Mgc (a) Granitoides El Chueco (22 - 16 Ma)
- Mgc (b)
- Ksl Complejo Hipabisal La Leona (90 - 83 Ma)
- Ksca Complejo Plutónico Alhué (97 - 90 Ma)

- Hf Depósitos Fluviales (Holoceno)
- PIHf Depósitos Fluviales Antiguos (Pleistoceno - Holoceno)
- PIHa (a) Depósitos Aluviales Antiguos (Pleistoceno - Holoceno)
- PIHa (b) a) Facies proximales. b) Facies distales.
- PIHq Depósitos Aluviales de Piedemontes y Quebradas (Pleistoceno - Holoceno)
- PIHfdt Depósito de flujo de detritos volcánicos del Tinguiririca (Pleistoceno - Holoceno)
- PIHrm Depósitos de remoción en masa antiguos (Pleistoceno Superior)
- Plisb Ignimbritas Sierra Bellavista (Pleistoceno Inferior - Medio)

**Simbología**

- ▲ ● ▲ ● ● Falla normal con reactivación inversa inferida
- |--- Pliegue Sinclinal Inferido
- |--- Pliegue Anticlinal Inferido

Figura 4: Mapa geológico del área de estudio en San Fernando. Modificado de la Carta geológica del área San Fernando-Curicó.



### Leyenda

**Kilc (a)** Formación Las Chilcas  
(Aptiano - Campaniano)

**JKilp (d)** Formación Lo Prado  
(Titoniano - Hauteriviano)

**JKilp (e)**  
**JKilp (c)**

**Ksgca** Complejo Plutónico  
Alhué (97 - 90 Ma)

**Hf** Depósitos Fluviales (Holoceno)

**PIHav** Depósitos Aluviales de Valle  
(Pleistoceno - Holoceno)

**PIHq** Depósitos Aluviales de Piedemontes y  
Quebradas (Pleistoceno - Holoceno)

**PIHf** Depósitos Fluviales Antiguos  
(Pleistoceno - Holoceno)

### Simbología

----- Falla inferida

Figura 5: Mapa geológico del área de estudio en Pichidegua. Modificado de la Carta geológica del área Rancagua-San Vicente.

### **3.1.1 Rocas Estratificadas**

La Fm Lo Valle corresponde a una potente secuencia volcanoclástica, la que constituye la Depresión Central. Predominan las coladas andesíticas, riolíticas y dacíticas. Las variedades clásticas alcanzan una máxima expresión en torno a Pelequén y San Fernando (tobas arenosas de colores púrpura y gris pálido). La Fm Abanico es una secuencia volcanosedimentaria de 2.500 m de espesor, compuesta por lavas basálticas y andesíticas, tobas y depósitos piroclásticos con intercalaciones de depósitos fluviales, aluviales y lacustres (Charrier, 2002). En el sector del río Tinguiririca, Zapatta (1995) separó esta formación en una secuencia occidental y una oriental debido a diferencias en el contenido fósil a lo largo del valle, y subyace en discordancia angular a la Fm Farellones (Charrier *et al.*, 2002). Charrier *et al.* (2002), en base a dataciones radiométricas y la presencia de fósiles, le asignaron una edad Eoceno Medio-Oligoceno a esta formación. La Fm Farellones corresponde a una unidad esencialmente volcánica, de más de 2.000 m de espesor. Está compuesta por una serie de lavas andesíticas a riolíticas con intercalaciones volcanoclásticas y limitados depósitos sedimentarios. El contacto con la Fm Abanico es discordante, similar al contacto con el volcanismo cuaternario sobreyacente (e.g. Charrier *et al.*, 1996; Tapia, 2015). Dataciones radiométricas de K-Ar (Drake *et al.*, 1982) y U-Pb (Fock, 2005) permiten asignarle una edad Mioceno a esta formación.

### **3.1.2 Depósitos no consolidados**

Se agrupan en esta categoría todos los depósitos que, bajo la forma de sedimentos de diverso origen y litología, no están consolidados y que genéticamente, se asocian a procesos cuaternarios por sus características de permeabilidad, porosidad y transmisibilidad (Contreras y Schilling, 2012). A nivel regional, estos depósitos presentan las mejores condiciones hidrogeológicas como acuíferos potencialmente explotables. Los recursos hídricos contenidos en estos materiales se presentan, en la zona estudiada, como aguas someras o libres, semiconfinadas o francamente confinadas. La Depresión Intermedia, por su morfología, es determinante para albergar gran variedad de depósitos no consolidados o sedimentos, que ofrecen las mayores expectativas hidrogeológicas. Las unidades presentes en el área de estudio son:

#### ***3.1.2.1 Depósitos aluviales de valle PIHav (Pleistoceno-Holoceno)***

Depósitos sedimentarios que junto a los depósitos que forman los grandes abanicos aluviales (PIHa y PIHad) conforman el relleno de la Depresión Central. Los Depósitos aluviales de valle se ubican en la mitad occidental de la cuenca y están caracterizados por una baja pendiente respecto de los Depósitos aluviales antiguos, formados por sedimentos escasamente consolidados y moderadamente bien estratificados. Litológicamente corresponden a arenas y limos con algunas gravas, donde la cantidad de gravas en los sedimentos varía desde 0-20%. Sobre la llanura aluvial, que se presenta labrada por paleocanales, comenzó el desarrollo de parte del sistema fluvial actual. Al acercarse a los cerros que sobresalen en la Depresión Central

y los que forman su borde Occidental, estos depósitos se encuentran engranando con depósitos de remoción en masa como aluviales provenientes de los promontorios.

### **3.1.2.2 Depósitos aluviales antiguos PIHa (Pleistoceno-Holoceno)**

Esta unidad está formada por grandes abanicos ubicados a la salida de los grandes ríos de la Cordillera Principal. En el valle del río Tinguiririca el abanico está muy bien desarrollado y se observa claramente su proveniencia, pero en el río Teno se encuentra cubierto por la Avalancha volcánica del mismo nombre. Remanentes de este depósito se encuentran inmediatamente al sur de la Avalancha, y es el principal componente del suelo de fundación de la ciudad de Curicó y del poblado de Romeral.

- a) **Facies proximales:** Estos depósitos están caracterizados por depósitos con una baja madurez textural formada por una intercalación de gravas matriz soportadas con escasas gravas clasto soportadas. La matriz está compuesta por arenas y limos.
- b) **Facies distales:** La litología de estos depósitos está compuesta por muy escasas gravas, y dominados por la facies matriz, que está compuesta por arenas y limos.

## **3.2 HIDROGEOLOGÍA DE LA VI REGIÓN**

Según las distintas propiedades de las unidades litológicas, éstas se clasifican de acuerdo con su permeabilidad (alta, media, baja o nula) (DARH, 2003):

Las unidades de rocas, tanto ígneas como sedimentarias, presentes en la zona de estudio, carecen de importancia hidrogeológica debido a la ausencia en ellas de porosidad primaria y por su baja permeabilidad. Además, en el caso de las rocas ígneas, éstas resultan especialmente resistentes a la meteorización, que es la que puede provocar porosidad de tipo secundario. La presencia de fallas y fracturas podría favorecer o no la infiltración y acumulación de agua en torno a las quebradas con escurrimiento efímero.

Los sedimentos y depósitos no consolidados son los de mayor importancia en cuanto a regular la presencia, cantidad, calidad y disponibilidad del agua subterránea.

La Figura 6 muestra las tres unidades hidrogeológicas principales identificadas en el estudio Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'higgins. Realizado por la Dirección General de Aguas (DGA) en el año 2015:

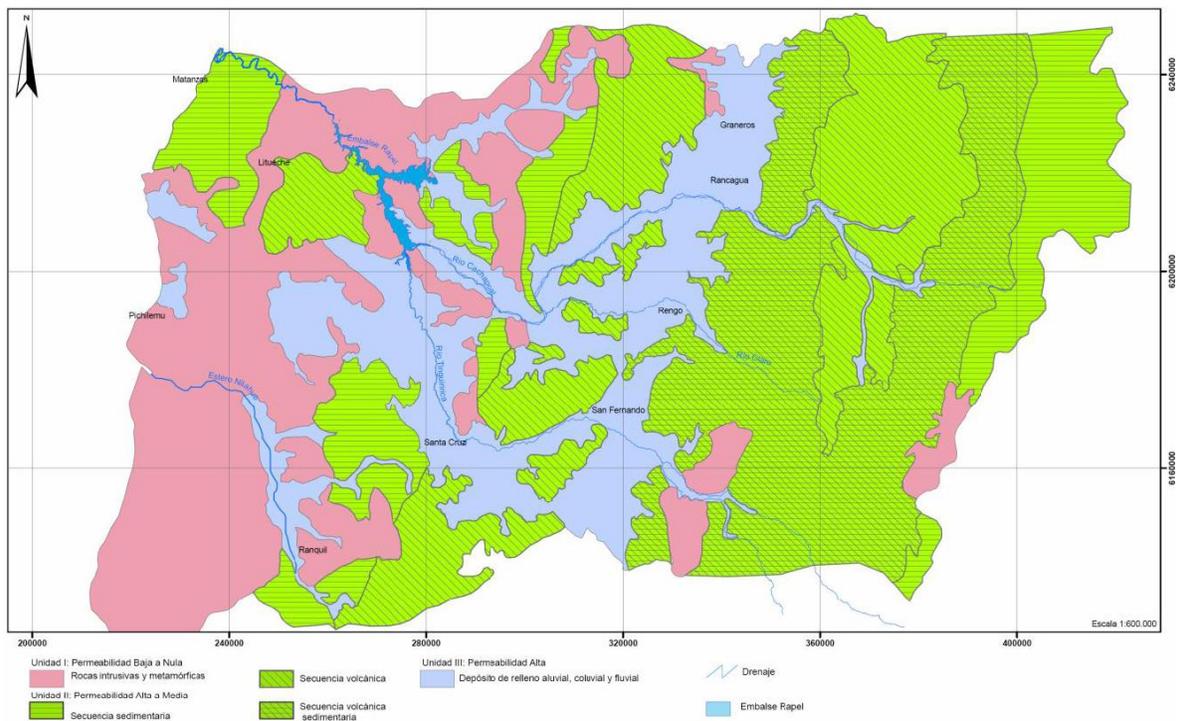


Figura 6: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Tomado de ((DCPRH), 2015).

### 3.2.1 Unidad I: permeabilidad baja a nula

Los cuerpos intrusivos abarcan el área más extensa de esta unidad, siendo los puntos topográficos más altos y antiguos (en la Cordillera de la Costa especialmente), además se tiene la presencia de rocas metamórficas de grado bajo en zonas localizadas. Las rocas presentan permeabilidad escasa o nula, lo que impide que el agua se infiltre en sus capas y se movilice al interior del perfil del suelo (DGA, 2011). La totalidad de las rocas ígneas y metamórficas están altamente meteorizadas, por lo que su dureza disminuye y su superficie se vuelve friable. La acción hídrica libera granos de cuarzo, ortoclasa y plagioclasas, y pasan a ser material suelto con gradación uniforme, de tipo arena gruesa a gravilla. La erosión de este material, por acción del escurrimiento de aguas de lluvia, en laderas empinadas, desarrolla profundas incisiones que degradan el terreno (Hauser, 1990).

### 3.2.2 Unidad II: permeabilidad alta a media

Dentro de esta unidad se distinguen tres subunidades de rocas: rocas sedimentarias, rocas volcánicas y una intercalación de ambas. Las subunidades de rocas volcánicas e intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias pertenecen en su mayoría a la Cordillera de los Andes, por lo que corresponden a unidades antiguas (no tanto como la Cordillera de la Costa) y presentan los altos topográficos más

importantes de la región, mientras que la subunidad sedimentaria se localiza principalmente al oeste, en la Cordillera de la Costa.

Estas rocas presentan una permeabilidad mayor que las rocas de la Unidad I. Se clasifican como permeabilidad media a alta debido a las litologías presentes, donde lo más dominante son las secuencias de sedimentos volcánicos, caracterizados por ser escasamente estratificados, compactos y resistentes (DGA, 2011).

Los materiales laháricos, a pesar de corresponder a sedimentarios recientes (Cuaternario) y estar contenidos dentro de la Unidad II por la litología, tienen un comportamiento hidrogeológico similar al de las rocas pertenecientes a la Unidad I. Corresponden a material macizo y pobremente estratificado, denso, compacto y resistente, por lo tanto, tienen escasa porosidad y permeabilidad, disminuyendo así su importancia hidrogeológica. (Hauser, 1990).

### **3.2.3 Unidad III: permeabilidad alta**

Está constituida por depósitos no consolidados, tanto aluviales, coluviales como fluviales. Estos se encuentran localizados principalmente en la Depresión Intermedia, segmentados por secuencias volcánicas de la Unidad II. En la cuenca del río Cachapoal se distinguen 2 tipos de depósitos, uno compuesto por abundantes partículas finas y el otro por estratos de granulometría gruesa como ripios, gravas y arenas. La base del depósito detrítico está compuesta por arena y arcilla. Esta secuencia tiene una alta continuidad y se ha llegado a detectar una base con una profundidad de 150 m (DGA, 2011).

Hauser (1990) en la Carta Hidrogeológica de la VI Región relacionó con más detalle el tipo de sedimento con su importancia. Para los depósitos fluviales a fluvio-aluviales se tiene que los acuíferos corresponden al tipo semiconfinado, gradando a confinado en los niveles más profundos. Como subunidad litológica, estos depósitos presentan una gran complejidad, debido a que cada nivel clástico constituye un acuífero distinto, a veces conectado con otro. Los horizontes finos actúan como niveles de confinamiento. La capacidad de la subunidad para almacenar y transmitir el agua subterránea se concentra en las capas arenosas, que son de buena selección y alta permeabilidad. En sectores adyacentes a esteros y ríos, el predominio de sedimentos arenosos con alta permeabilidad se traduce en la presencia de acuíferos libres.

La subunidad de los depósitos aluviales está conformada por una secuencia alternada, muy heterogénea en granulometría y continuidad lateral y vertical. Presenta pobre gradación, lo que se traduce en acuíferos de escaso atractivo, difíciles de detectar y habilitar. La mala selección de los depósitos, debido a los sedimentos originados por flujos heterogéneos, torrenciales, que recorren cortas trayectorias, determina su baja permeabilidad y bajo rendimiento. Estos depósitos tienen escasa continuidad lateral y gran lenticularidad, lo que limita la interconexión hidráulica entre acuíferos adyacentes.

Los depósitos con la mayor importancia hidrogeológica pertenecen a arenas de playas y dunas, que son arenas bien gradadas de grano medio-fino, y depósitos fluviales en cauces actuales, principalmente gravas y gravas arenosas. Estos se encuentran en los lechos de los cauces y en la costa.

La región está caracterizada por tres acuíferos principales: Alhué, Cachapoal y Tinguiririca, siendo los dos últimos los de mayor envergadura. La Figura 7 muestra la localización de los acuíferos Cachapoal y Tinguiririca.

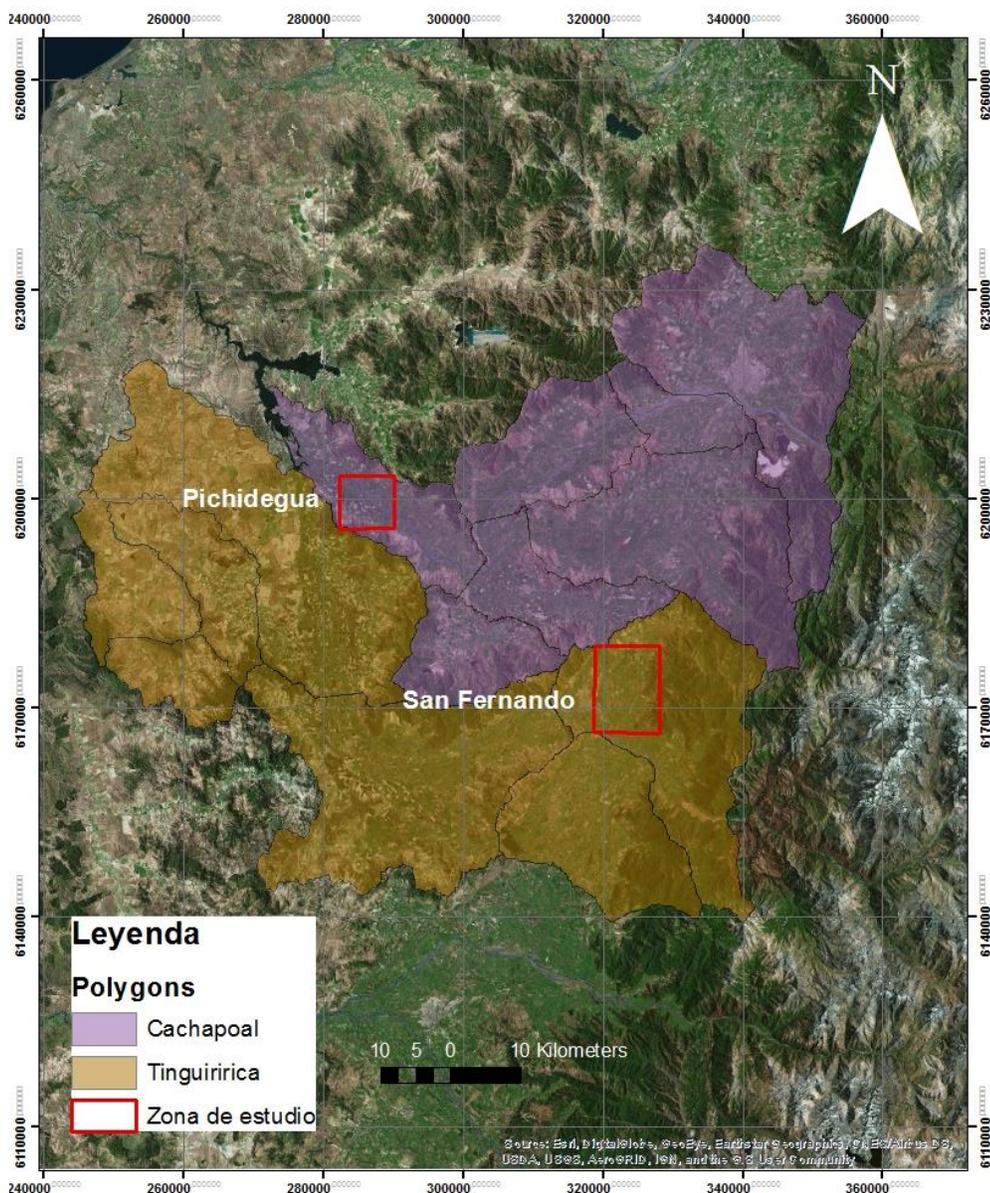


Figura 7: Localización de acuíferos Cachapoal y Tinguiririca en la VI Región. Elaboración propia con datos tomados de <http://cigiden.cl/es/>.

### 3.2.4 Acuífero Cachapoal

El volumen inicial estimado en el acuífero corresponde a 16.620 millones de m<sup>3</sup> con una porosidad variable entre un 3% y un 15%. Se considera que la principal fuente de recarga de la zona corresponde a la infiltración de ríos y esteros en las zonas altas, mientras que esos mismos cursos actúan como la principal fuente de descarga en las partes medias y bajas. (DGA, 2005).

La litología predominante en el acuífero del Cachapoal consiste principalmente en depósitos fluviales como gravas, arenas y arcillas, además de depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, y en una menor proporción depósitos fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

Abarcando un área menor se encuentran secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas de composición andesítica a riolítica, con escasas intercalaciones sedimentarias, y rocas ígneas de composición diorítica y monzodiorítica de piroxeno y hornblenda, además de granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita. De la composición de las rocas ígneas se puede extraer que estas presentan en su mayoría una composición mucho más rica en plagioclasas que en feldespatos alcalinos, como es el caso de las dioritas (compuesta por cerca de dos tercios de plagioclasas) o las monzodioritas, que a diferencia de las dioritas contienen más cuarzo. Químicamente hablando, los feldespatos alcalinos incorporan K en su estructura, mientras que las plagioclasas incorporan Ca en vez de K. De esta forma se puede resumir que las rocas ígneas presentes son más ricas en plagioclasas, cuarzo y minerales ferromagnesianos (biotita, piroxeno y hornblenda).

Desde el punto de vista hidrogeológico y para efectos de su descripción se puede dividir en tres sectores principales, Cachapoal Norte, Cachapoal Sur y Cachapoal Bajo. La zona de estudio ubicada en Pichidegua se encuentra en Cachapoal Bajo, el que se describe a continuación:

Cachapoal Bajo corresponde al valle del río Cachapoal comprendido entre la confluencia de éste con el estero Zamorano cerca de la localidad de Peumo, hasta su desembocadura al Lago Rapel. El espesor total de los rellenos supera en general los 80 m, apareciendo una secuencia más bien fina que le confiere al acuífero características de semiconfinamiento. En el sector de las Cabras el acuífero es semiconfinado encontrándose el acuífero principal bajo una secuencia de sedimentos aluviales de baja permeabilidad.

Si bien el régimen hidrológico de la zona intermedia es netamente pluvial, el de los ríos que nacen en la alta cordillera, como es el caso del Cachapoal, es de régimen pluvionival, donde el agua proveniente del deshielo se utiliza en riego por lo que la onda estacional de deshielo se amortigua e incluso en algunos años secos, la onda de deshielo no se aprecia a la salida de la zona.

### 3.2.5 Acuífero Tinguiririca

El volumen inicial de agua está estimado en 14.027.000 m<sup>3</sup> con una porosidad de drenaje considerada entre 3% y 15%. La principal fuente de recarga corresponde a la infiltración de precipitación (directa e indirecta), mientras que los afloramientos en los cursos superficiales constituyen la principal fuente de descarga. (DGA, 2005).

El espesor total del relleno es superior a 40m de los cuales el acuífero principal ocupa del orden de 25 m. Bajo él se dispone una secuencia aluvial de estratos de distinta permeabilidad. Hacia el poniente aumenta el espesor total de los rellenos, particularmente en el centro del valle, alcanzando a la altura de Santa Cruz espesores superiores a los 130 m. El resto del valle presenta características similares disminuyendo sólo el espesor de los rellenos, los que no superan los 70 m. En el valle central entre las localidades de San Fernando y Chimbarongo la transmisibilidad está comprendida entre 500 y 1.000 m<sup>2</sup>/día, disminuyendo hacia los costados a menos de 500 m<sup>2</sup>/día. Aguas debajo de San Fernando hasta el encuentro con el Valle de Chimbarongo, las transmisibilidades están comprendidas entre 1.000 y 5.000 m<sup>2</sup>/día en la parte central y entre 500 y 1.000 m<sup>2</sup>/día en los costados. Desde este último sector hasta la desembocadura al Lago Rapel, las mayores transmisibilidades se presentan en una franja paralela al río ubicada en la parte central del valle con valores comprendidos entre 500 y 1.000 m<sup>2</sup>/día y disminuyendo hacia los costados a menos de 500 m<sup>2</sup>/día.

Hidrogeológicamente, se pueden distinguir tres unidades principales:

La primera es la que abarca un área mayor y corresponde a depósitos, tanto aluviales, coluviales y de remoción en masa, siendo la litología más joven (Holoceno). Hay otra unidad de rocas volcánicas y sedimentarias, con edades inferiores a los 10 Ma, compuesta por rocas piroclásticas riolíticas y lavas andesíticas y basálticas (entre 45-63% de sílice en su estructura) con intercalaciones de rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas). Finalmente, la última unidad está compuesta por rocas ígneas. En su mayoría, granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, además de monzodioritas, monzogranitos y monzonitas. Tanto los granitos, granodioritas como tonalitas tienen en su estructura un porcentaje entre 20-60% de cuarzo, siendo el granito más rico en feldespatos alcalinos y la tonalita más rica en plagioclasas. Las monzodioritas y monzogranitos cuentan con entre 5-20% de cuarzo, mientras que las dioritas poseen un 5% de cuarzo y 10% de feldespatos alcalinos, estando compuesta así principalmente por plagioclasas y minerales ferromagnesianos, siendo los principales de estos los mismo mencionados con anterioridad (piroxenos, hornblendas y biotitas).

La zona intermedia del acuífero tiene un régimen netamente pluvial, sin embargo, al igual que lo ya explicado para el Cachapoal, el régimen de los ríos que nacen en la alta cordillera, como es el caso del Tinguiririca, es de régimen pluvionival, donde el agua proveniente del deshielo se utiliza en riego por lo que la onda estacional de

deshielo se amortigua e incluso en algunos años secos, la onda de deshielo no se aprecia a la salida de la zona.

### 3.3 MEDIO FÍSICO Y NATURAL

El clima que presenta la zona de estudio corresponde a un clima Templado Cálido con estación seca prolongada (5 a 6 meses), con una temperatura media anual de 14°C. Las temperaturas del mes más frío son inferiores a 12°C y superiores a 2°C, aunque en invierno las temperaturas mínimas pueden ser inferiores a los 0°C, y en verano superiores a los 30°C.

Las precipitaciones de esta zona surgen de la inestabilidad aportada por los frentes de mal tiempo, que se estacionan en la Zona Central en época invernal. En estos meses se produce alrededor de un 75% del total de precipitaciones anual; por lo tanto, los demás meses son más secos descendiendo notablemente los montos de lluvias. Estas características de las precipitaciones son un elemento muy relevante para el funcionamiento de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, debido a su carácter pluvionival.

La precipitación se presenta acumulada en los meses invernales y particularmente en Mayo, Junio, Julio y Agosto. La precipitación anual supera los 450 mm (2012). Los vientos que acompañan a las lluvias vienen siempre desde el norte (N) y noroeste (NE), con influencia marítima. Los dominantes son los vientos que vienen desde el sur (S) y del suroeste (SW), con los cuales se observa buen viento.

En las siguientes figuras, se muestran las precipitaciones mensuales en mm del año 2012 de las estaciones Santa Brisilla (Pichidegua) y San Fernando.

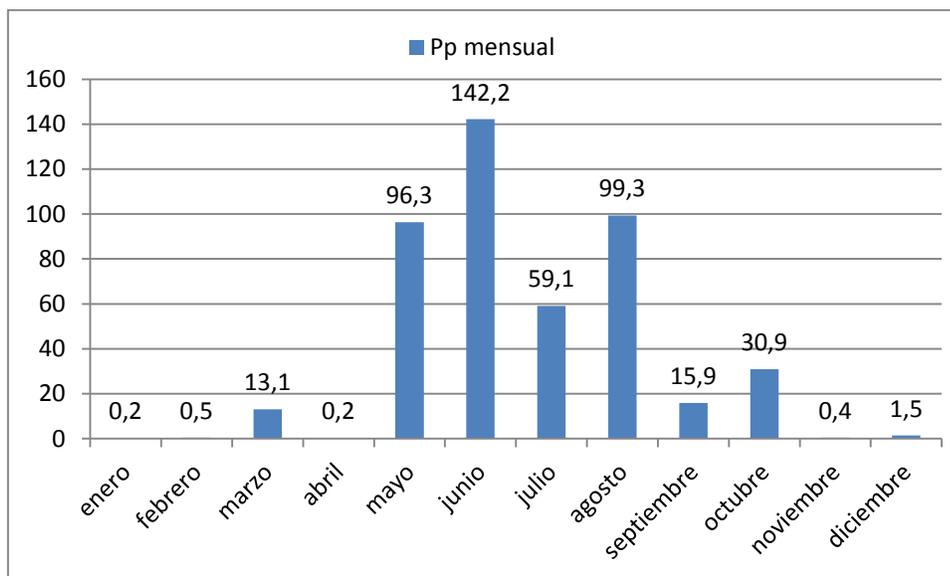


Figura 8: Precipitaciones mensuales (mm) del año 2012 en Pichidegua (estación meteorológica Santa Brisilla).  
Elaboración propia con datos tomados de <http://www.agromet.cl/>.

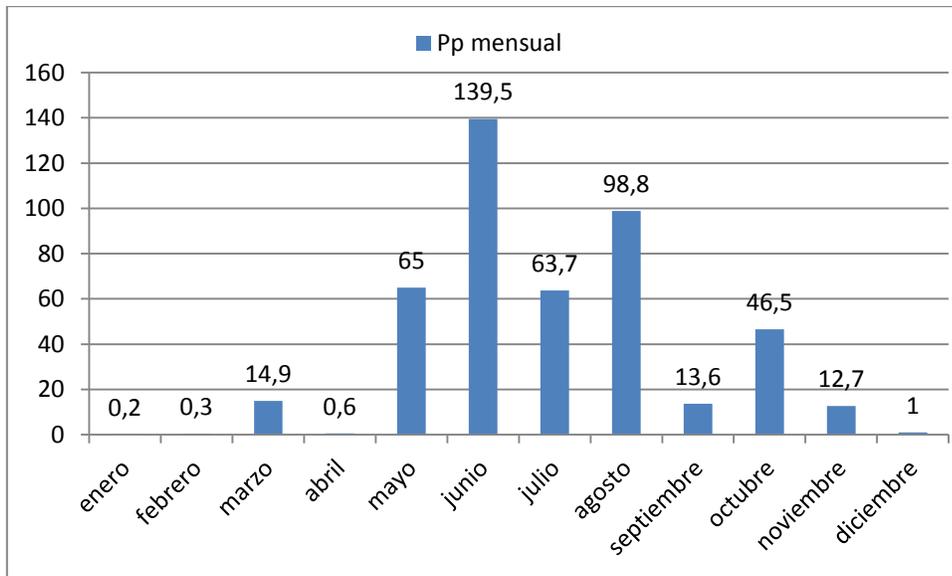


Figura 9: Precipitaciones mensuales (mm) del año 2012 en San Fernando (estación meteorológica San Fernando).  
Elaboración propia con datos tomados de <http://www.agromet.cl/>.

Como ya se explicó, tanto el río Cachapoal como el Tinguiririca son ríos de alimentación pluvionival, por lo que su caudal se incrementa en los meses de lluvia (mayo-agosto) y en el período de deshielo (noviembre a marzo).

## 4 METODOLOGÍA

---

A continuación, se presenta la metodología empleada, que consta de 3 etapas principales: recopilación de antecedentes previa a terreno, trabajo en terreno, y trabajo de gabinete para el tratamiento y análisis de datos.

### 4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se procedió a realizar una revisión bibliográfica con el objetivo de recopilar información relacionada al marco geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, con el fin de contextualizar este trabajo.

También, se investigaron antecedentes de la construcción de pozos ubicados en la zona de estudio solicitados a la Dirección General de Aguas (DGA). Dentro de los antecedentes de construcción se consideraron los siguientes datos:

- Ubicación geográfica y altitud topográfica.
- Nivel estático.
- Profundidad del pozo
- Caudales asignados

Además, se recopiló información acerca de las potencias demandadas por invernaderos, y por distintas tipologías de viviendas.

También, se buscó conocer el estado actual del desarrollo y aplicación de tecnologías, tanto convencionales como renovables (en este caso la Geotermia), en torno a la climatización de ambientes. Se obtuvo que las eficiencias (COP) de las bombas de calor geotérmicas son mejores que las asociadas a tecnologías convencionales, destacando sus características que las hacen amigables con el medio ambiente, como sus bajas emisiones de  $CO_2$  y su bajo uso de combustibles fósiles.

### 4.2 TRABAJO EN TERRENO

En este trabajo se cuenta con datos de 3 campañas de terreno, realizadas en Mayo y Agosto de 2017, y en Febrero-Marzo de 2018. El trabajo en terreno tuvo como objetivo medir el nivel estático, la temperatura y la conductividad eléctrica en pozos de extracción de agua disponibles en la zona de estudio. Estos datos han permitido realizar perfiles verticales de conductividad eléctrica y temperatura.

Para identificar la geometría de los acuíferos estudiados, se realizaron mediciones geofísicas: Transiente Electro Magnético (TEM) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (ERT, por sus siglas del inglés *Electric Resistivity Tomography*),

con el fin de conocer las características eléctricas de las rocas y sedimentos del subsuelo, para poder interpretar la geometría del acuífero.

A continuación, se describen los aspectos más relevantes de cada metodología.

#### 4.2.1 Medición del nivel estático, la temperatura y la conductividad eléctrica

Para realizar las mediciones al interior de pozos se utilizó el freatómetro Solinst TLC 107 (Figura 10). La sonda del equipo se introduce al pozo a través de una tubería, la cual se encuentra ranurada a lo largo de toda su longitud. Se tomaron medidas sistemáticas en función de las variaciones que se registraron en los valores medidos.



Figura 10: Izquierda: Freatómetro Solinst TLC 107. Derecha: Medición de nivel estático, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea en un pozo. Elaboración propia.

El equipo registra temperatura entre  $-15^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$  con un error de  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , y conductividad eléctrica en el rango comprendido entre 0 y  $80.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , con una precisión del 5%. Antes de las jornadas de terreno, el equipo se calibra con una solución de calibración de  $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Con los valores obtenidos se creó una base de datos con el propósito de importar los resultados a un software GIS (*Geographic Information System*). A partir de

los valores de nivel estático medidos y la altura topográfica<sup>1</sup>, se infirieron cotas hidráulicas para una mejor representación de las direcciones de flujo.

## 4.2.2 Mediciones geofísicas

### 4.2.2.1 Transiente Electromagnético (ABEM-WalkTEM-Manual, 2015).

El método Transiente Electro Magnético (TEM), consiste en la circulación de corriente por un *loop* de cable, denominado transmisor. Luego se deja de inducir la corriente abruptamente, lo que genera una inducción electromagnética en el subsuelo, llamada *corrientes de Eddie*, que se registra en una bobina receptora (Figura 11).

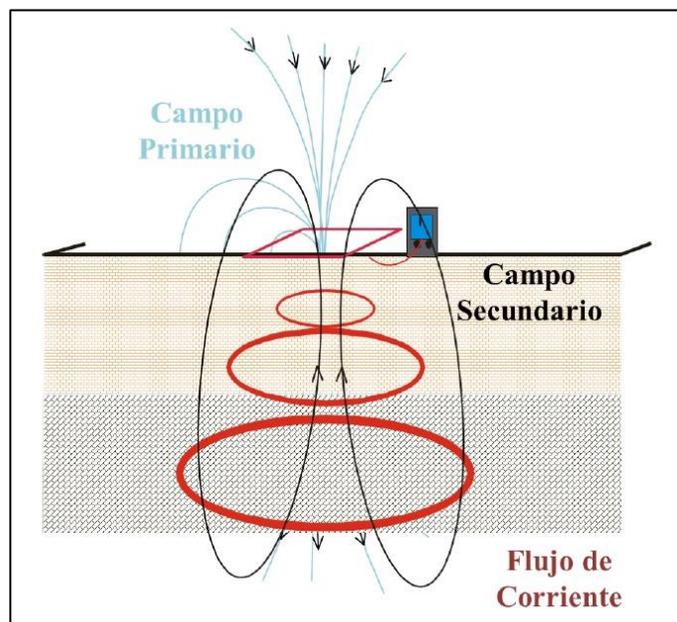


Figura 11: Diagrama del funcionamiento del TEM (modificado de ABEM-WalkTEM-Manual, 2015).

La corriente que se hace circular por el transmisor, tiene forma de onda específica, lo que genera un campo magnético variable en el tiempo (Figura 12a). Las *corrientes de Eddie* generadas fluyen en una trayectoria cerrada, migrando en profundidad y de forma lateral, disminuyendo su intensidad con el tiempo. Durante esto, disminuye rápidamente la corriente transmitida, por lo que el campo electromagnético primario induce una fuerza electromotriz al subsuelo (Figura 12b). Estos cortes de la

<sup>1</sup> La altura topográfica en este trabajo fue tomada de un modelo de elevación numérico (DEM, por sus siglas en inglés *Digital Elevation Model*). En particular, para este trabajo se ocupa el Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2), disponible en <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

corriente generan un campo magnético secundario transitorio que disminuye con la profundidad. Este campo magnético, induce un voltaje que varía en el tiempo, que corresponde a la medición registrada en la bobina receptora, y la forma del decaimiento de este voltaje contiene información acerca de la resistividad del subsuelo. Esto se debe a que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas, dependen de las propiedades eléctricas de las distintas unidades geológicas en profundidad (Figura 12c). Por último, se procesan y modelan las curvas de resistividad aparente, con lo que se obtiene la resistividad eléctrica. La interpretación de este parámetro permite la identificación y distinción de las diferentes unidades geológicas, así como la saturación de agua los sedimentos en profundidad.

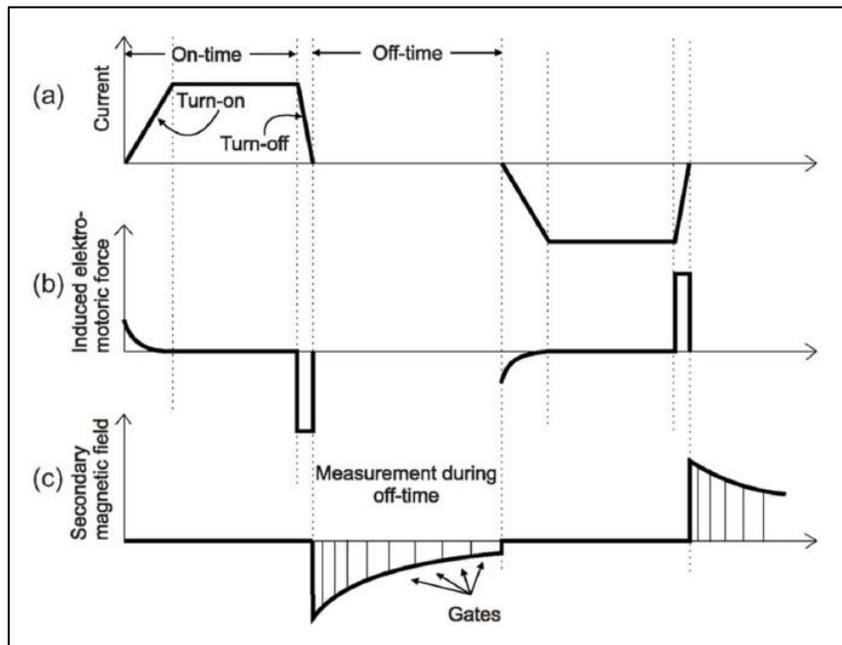


Figura 12: Etapas de medición en TEM: (a) Pulso de transmisión, (b) inducción electromagnética y (c) campo magnético secundario (Tomado de ABEM-WalkTEM-Manual 2015).

En el terreno realizado, se usaron 2 bobinas receptoras y un transmisor. El tamaño del loop del transmisor es de 40x40m<sup>2</sup>. La configuración que se utilizó en terreno fue de circuito coincidente, lo que significa que el arreglo de la bobina transmisora y la receptora coinciden en el tendido, y se instalan de manera concéntrica, conectándose al receptor y al transmisor del equipo, respectivamente (Figura 13). Para determinar la solución de resistividad eléctrica se utiliza el programa para Windows X1D v.3 desarrollado por Interplex Limited.

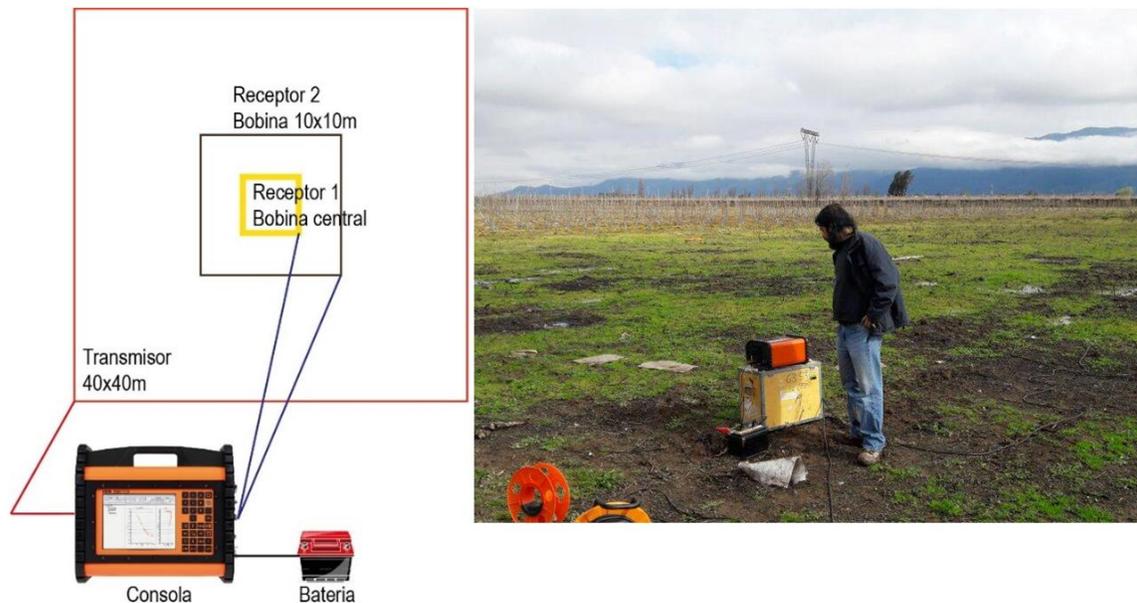


Figura 13: Izquierda: vista en planta de la disposición para la medición de TEM, con la antena receptora central, la antena receptora de 10x10m y el loop del transmisor dispuestos de manera concéntrica. Derecha: medición TEM en San Fernando. Elaboración propia

#### 4.2.2.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica (Zhdanov, 2009).

El ERT es un método activo, que consiste en la aplicación de una corriente continua a la tierra, por medio de dos electrodos, y que mide la distribución de la diferencia de potencial (voltaje) con otro par de electrodos, los que no inyectan corriente, (ver Figura 15). Esta diferencia de potencial se usa para estimar la distribución espacial de la resistividad eléctrica del subsuelo. Cada tipo de roca o sedimento tiene un rango de valores de resistividad eléctrica característicos, por lo que los distintos valores de resistividad eléctrica obtenida en los perfiles se relacionan con diferentes tipos de rocas y sedimentos. La resistividad eléctrica disminuye cuando las rocas se encuentran saturadas en agua, y disminuye aún más cuando esa agua tiene un contenido significativo de sólidos disueltos, lo que se muestra en la Figura 14.

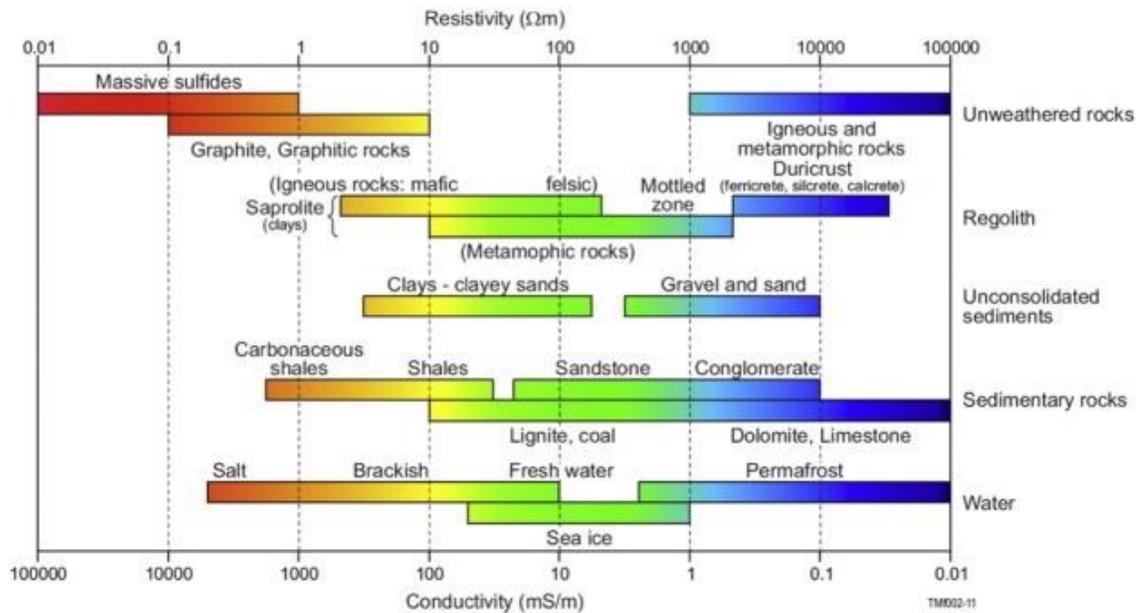


Figura 14: Valores de resistividad y conductividad eléctrica de rocas y sedimentos no consolidados, modificado de Palacky (1987).

La teoría detrás de este método se basa en el principio que la distribución del potencial eléctrico medido en superficie depende de los valores de resistividad eléctrica de las capas subterráneas. Se puede llegar a la ecuación de resistividad aparente en términos de la corriente aplicada, distribución del potencial y el arreglo entre los electrodos a través del estudio de la distribución del potencial debido a un único electrodo porta-corriente.

Un arreglo tendrá un par de electrodos de corriente y un par de electrodos para medir la diferencia de potencial:

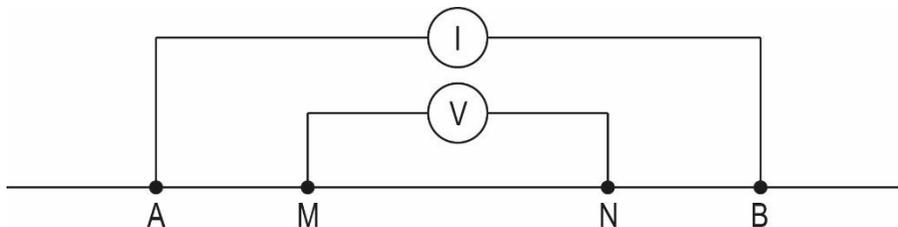


Figura 15: Esquema de la disposición de electrodos en un arreglo de la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Las letras A, M, N y B representan electrodos, mientras que I es la corriente continua que se transmite al suelo y V es la diferencia de voltaje registrada.

La diferencia de potencial se calcula a partir del uso de la siguiente fórmula:

$$V = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_{MA}} - \frac{1}{r_{MB}} - \frac{1}{r_{NA}} + \frac{1}{r_{NB}} \right]$$

Donde,  $U_M$  es el potencial eléctrico en el electrodo M,  $U_N$  es el potencial eléctrico en el electrodo N,  $\rho$  es la resistividad del medio,  $I$  la corriente eléctrica y  $r$  la distancia al electrodo, siendo  $r_{MA}$  la distancia en los electrodos M y A,  $r_{MB}$  la distancia en los electrodos M y B,  $r_{NA}$  la distancia en los electrodos N y A, y  $r_{NB}$  la distancia en los electrodos N y B.

La presencia de agua subterránea implica un cambio en las propiedades térmicas de las unidades geológicas en profundidad, por lo que es importante detectar la ubicación del nivel freático y el espesor saturado. Las capas de arcillas tienen resistividad eléctrica baja y son importantes de detectar ya que a diferencia de otras litologías no tienen mucha permeabilidad.

La medición se realizó de forma diferente en San Fernando y en Pichidegua, ya que en este último sector el espacio era limitado. En San Fernando, la medición se realizó usando 45 electrodos separados entre ellos por 5m logrando un perfil de 225m. Por su parte, en Pichidegua la medición se realizó usando 2m de separación, logrando así un perfil de 88m. Estos electrodos funcionan de forma automática como transmisor (para inyectar corriente), como receptor (para medir voltaje) y amplificador. Esta configuración y la calidad de los datos determinaron alcanzar profundidades de estudio de 40m y 17m en San Fernando y Pichidegua, respectivamente. En la Figura 16 se observa el trabajo de terreno para realizar los ERT en San Fernando.

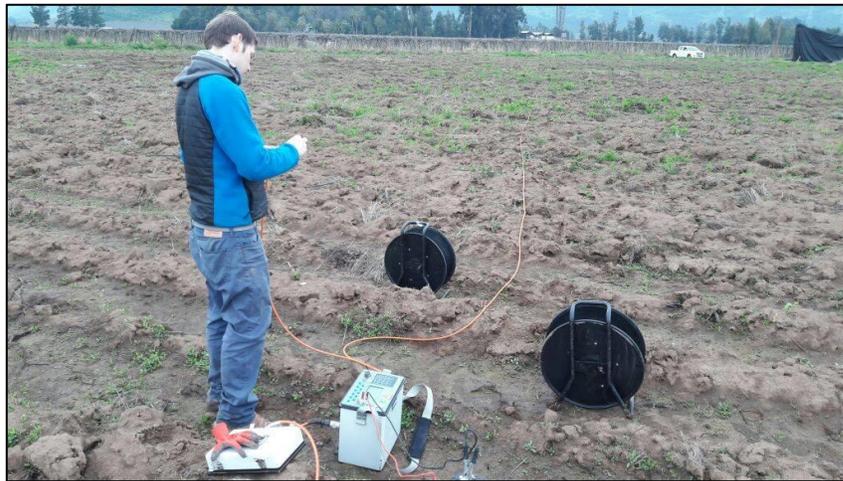


Figura 16: Medición de Tomografía de Resistividad Eléctrica. Elaboración propia.

## 4.3 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Con los antecedentes recopilados de los pozos (ubicación, caudales y niveles estáticos, datos de construcción y pruebas de bombeo) se derivaron los parámetros elásticos a partir de las pruebas a caudal constante. Estos datos fueron empleados para calcular la energía extraíble del subsuelo y la Transmisividad Hidráulica.

### 4.3.1 Estimación de los parámetros elásticos

El análisis de pruebas de bombeo con el método de Cooper & Jacob implica determinar la asíntota que representa los últimos datos del abatimiento de agua al interior del pozo durante la prueba de gasto constante (Figura 17). Con la pendiente de la asíntota antes descrita se puede determinar la Transmisividad Hidráulica del medio (Cooper and Jacob, 1946).

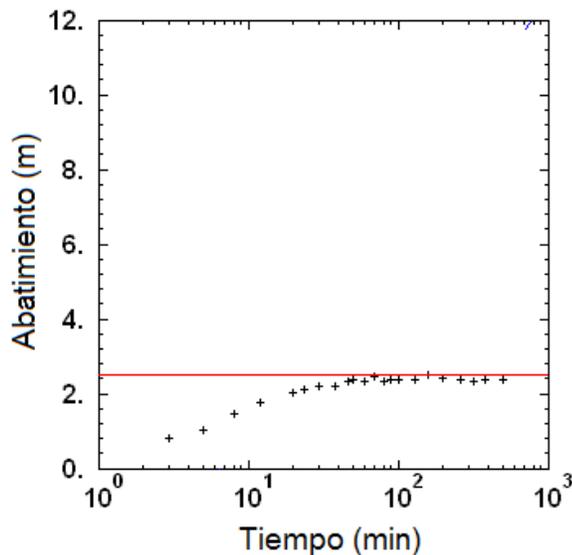


Figura 17: Ejemplo demostrativo para la solución del método estimativo de transiividad hidráulica Recuperación de Cooper & Jacob en un acuífero.

El análisis con el método Recuperación de Theis consiste en determinar la asíntota que representa el abatimiento residual (*residual drawdown*). Este abatimiento residual corresponde a la recuperación del nivel estático al interior del pozo, una vez terminada la prueba de gasto constante, con respecto al tiempo que toma la recuperación del nivel estático dividido por el tiempo que ha transcurrido desde el inicio de la prueba de gasto constante (Figura 18). La solución supone una fuente lineal para el pozo bombeado y, por lo tanto, solo permite determinar la transmisividad del medio, pero no permite estimar el almacenamiento del pozo (Theis, 1935).

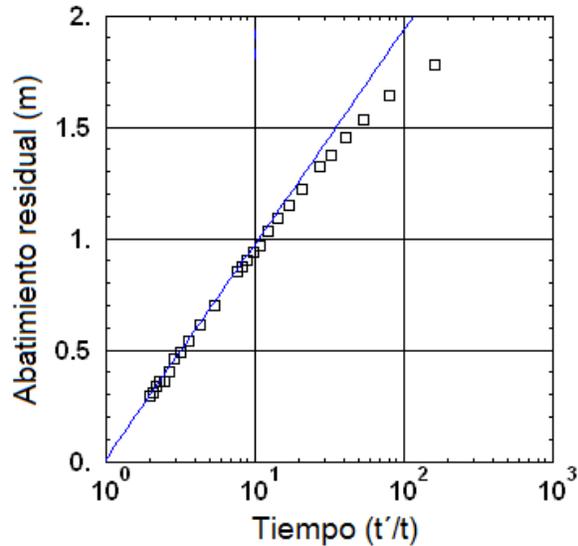


Figura 18: Ejemplo demostrativo para la solución del método estimativo de transividad hidráulica Recuperación de Theis (1935).

### 4.3.2 Estimación de la demanda térmica asociada a cultivos y viviendas

Para obtener la cantidad de calor extraíble con un caudal  $Q$  (l/s), es necesario considerar algunas propiedades físicas del agua ( $C_p$ , y  $\rho$ ), y la diferencia entre el agua que entra y que sale del circuito de la bomba de calor ( $\Delta T$ ). Para este parámetro se usa un valor de 5K (Muñoz et al., 2015), y la siguiente ecuación modificada de Arola et al., 2014:

$$Q_{SUELO} = Q \cdot \Delta T \cdot C_p \cdot \rho$$

$Q_{SUELO}$  = Energía extraíble desde un caudal de agua [W].

$Q$  = Caudal extraído desde un pozo [l/s].

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la bomba de calor [K].

$C_p$  = Capacidad calórica del agua [J/kg K].

$\rho$  = Densidad del agua [kg/L].

La potencia total será la suma entre la potencia térmica entregada por el agua subterránea y la añadida por el suministro eléctrico de una bomba de calor. Se usa la siguiente relación (tomada de Schor, 2017):

$$Q_{TOTAL} = Q_{SUELO} \cdot (COP_{TEO} / COP_{TEO} - 1)$$

Luego, este valor se comparó con las siguientes tablas, las que muestran las demandas energéticas de invernaderos de 150 m<sup>2</sup>, destinados al cultivo de tomates y lechugas (Hurtado, 2017), y de distintas tipologías de viviendas (UNTEC, 2014):

Tabla 1: Valores mensuales de demanda energética para el tomate. Tomado de Hurtado, 2017.

Mes	Demanda energética mensual [kWh]			Demanda promedio [kW]			Demanda máxima [kW]	
	Día	Noche	Total	Día	Noche	Total	Día	Noche
Enero	4.310,30	2.241,70	6.552,00	12,53	7,81	10,38	28,98	15,14
Febrero	4.213,50	2.654,10	6.867,60	13,55	9,06	11,37	33,49	14,95
Marzo	5.784,00	3.629,90	9.413,90	15,59	9,84	12,72	34,02	16,57
Abril	6.232,20	4.682,80	10.915,00	20,1	11,42	15,16	35,95	18,37
Mayo	6.633,50	5.755,70	12.389,10	24,39	12,19	16,65	38,06	19,07
Junio	6.951,70	7.533,80	14.485,60	29,21	15,63	20,12	40,5	25,06
Julio	7.410,30	7.480,30	14.890,60	28,28	15,52	20,01	41,99	22,4
Agosto	8.340,40	6.818,70	15.159,10	27,35	15,53	20,38	39,47	21,82
Septiembre	8.789,90	5.745,80	14.535,70	24,69	15,79	20,19	42,72	22,06
Octubre	8.392,10	4.892,00	13.284,10	23,31	13,63	17,63	38,77	22,28
Noviembre	6.386,20	3.364,70	9.750,90	16,25	11,6	14,28	36,15	17,85
Diciembre	6.710,00	2.718,80	9.428,80	15,75	10	13,51	34,37	15,66

Tabla 2: Valores mensuales de demanda energética para la lechuga. Tomado de Hurtado, 2017.

Mes	Demanda energética mensual [kWh]			Demanda promedio [kW]			Demanda máxima [kW]	
	Día	Noche	Total	Día	Noche	Total	Día	Noche
Enero	550,70	187,8	738,50	5,56	1,71	3,53	14,70	5,50
Febrero	617,9	358,1	976,00	6,37	1,96	3,49	18,16	5,51
Marzo	986,5	647	1.633,50	6,53	2,38	3,86	19,49	6,93
Abril	1.385,20	1.188,5	2.573,80	7,29	3,23	4,61	21,72	9,13
Mayo	2.110,60	1.582,7	3.693,20	9,06	3,45	5,34	24,66	9,93
Junio	2.832,90	2.860,0	5.692,90	12,32	5,93	8	27,01	14,7
Julio	2.865,30	2.883,9	5.749,20	11,89	5,98	7,95	27,7	12,74
Agosto	2.894,10	2.678,2	5.572,30	10,92	6,1	7,92	24,9	11,31
Septiembre	2382,4	2.213,2	4.595,70	10,98	6,08	7,91	26,92	11,88
Octubre	1.955,50	1.742,3	3.697,80	10,05	4,85	6,66	24,12	11,44
Noviembre	1.254,40	852,0	2.106,40	8,53	3,12	5,02	21,1	7,48
Diciembre	1.195,40	504,9	1.700,30	7,81	2,66	4,96	18,25	5,45

Con estos datos se procedió a verificar la factibilidad de climatizar distintas situaciones tipo: a partir de la energía extraíble de un caudal dado, se procede a

calcular la cantidad de tomates o lechugas que se pueden cultivar en invernaderos de 150 m<sup>2</sup>. Para esto se usaron los valores de potencia demandada máxima de ambos casos.

En la Tabla 1, se evidencia que la potencia energética demandada máxima, diurna y nocturna, asociada al cultivo de tomates es de 42,72 kW y de 22,28 kW, correspondiente al mes de Septiembre y de Octubre respectivamente. Mientras que en la Tabla 2, la potencia demandada máxima asociada al cultivo de lechuga corresponde a 27,7 kW para el día (julio) y por la noche a 14,7 kW para el mes de Junio.

*Tabla 3: Demanda de calefacción anual y Potencia instantánea viviendas, período pre 2000, según las distintas tipologías de viviendas. Tomado de Untec (2014).*

Ciudad	Parámetros	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Rengo	Potencia [W/m <sup>2</sup> ]	260,5	128,5	150,6	94,2	169,9	120,4	169	99,8	169,5
	Potencia [kW]	14,71	28,41	15,51	4,897	11,50	10,19	5,481	3,993	6,738
	Demanda [kWh]	21424	36743	19364	7022	19070	14844	8550	5849	9220
	Demanda [kWh/m <sup>2</sup> ]	379,2	166,1	188	135,1	281,7	175,3	263,7	146,2	231,9
San Fernando	Potencia [W/m <sup>2</sup> ]	239,3	118	138,3	86,2	156	110,4	154,9	91,3	155,4
	Potencia [kW]	13,52	26,09	14,24	4,480	10,55	9,352	5,023	3,651	6,178
	Demanda [kWh]	25294	44294	23497	8270	22032	17487	9956	6859	10979
	Demanda [kWh/m <sup>2</sup> ]	447,7	200,2	228,1	159,1	325,4	206,5	307	171,5	276,1

Luego, se procedió verificar si es posible suplir la potencia energética demandada de una vivienda. Para esto, se usaron los valores de potencia demandada máximos, los que corresponden a las viviendas de tipología T2. Además se usaron los valores de potencia demandada de las viviendas más abundantes en cada zona. Los datos usados se pueden ver en la Tabla 8 y la Tabla 9 de los anexos.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 PARÁMETROS ELÁSTICOS

Para tener un contexto de las captaciones de agua subterránea en las áreas de interés, se hace un análisis de los caudales asignados por la Dirección General de Aguas (DGA) para captaciones cercanas a las zonas de estudio.

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los detalles más importantes de los expedientes técnicos de construcción de pozos obtenidos de la DGA para el sector de Pichidegua. Se muestran los valores del nivel estático, la cota hidráulica, el diámetro y la profundidad del pozo, obtenido todo esto de los expedientes de la DGA. Además, se muestran los valores obtenidos para la Transmisividad Hidráulica (T) según los métodos de Cooper&Jacob (C&J), y Recuperación de Theis (TR). Se usan estos métodos debido a que el acuífero estudiado se encuentra en sedimentos detríticos. También se muestran los valores del caudal con el que se realizó la prueba de gasto constante (Q g cte).

*Tabla 4: Captaciones de agua subterránea con información detallada de construcción y pruebas de gasto en Pichidegua.*

ID	Año_p bombeo	UTM_N	UTM_E	Altura	N_est	Cota_hid	Diam	Prof	T_C&J	T_TR	Q_g_cte
Unidades		m	m	m	m	m	pulg	m	m <sup>2</sup> /dia	m <sup>2</sup> /dia	l/s
ND-0601-1046	1997	6194777	292467	159	3,82	155,2	10	55	1370	2050	32
ND-0601-1501	1997	6203562	284856	128	4,38	123,6	12	60	6010	1460	87
ND-0601-1605	1997	6202369	285432	130	2,04	128,0	12		576	885	80
ND-0601-1690	1998	6195310	287651	175	10,00	165,0	8	32	103		6
ND-0601-2049	1998	6200457	292137	154	3,15	150,9	10	40	1880	2980	38,2
ND-0601-2080	2002	6199172	292237	151	2,61	148,4	10	30	7370	1980	18
ND-0601-2123	1998	6204209	283865	130	10,60	119,4	10	49	781		36
ND-0601-2143	1997	6195911	288333	161	7,10	153,9	10	58	194	58,1	15
ND-0601-2170	1998	6196270	294439	159	2,15	156,9	10	34	680	745	63
ND-0601-2194	2003	6199024	294323	157	2,60	154,4	10	25	235	197	20
ND-0601-2215	2002	6195775	287907	162	2,70	159,3	8	32	141	110	15
ND-0601-2375	2005	6194027	291729	169	14,87	154,1	8	61	73,7	35,3	12
ND-0601-2504	1997	6203727	284792	132	6,67	125,3	10	35	2100	382	20
ND-0601-2565	1997	6205110	283363	135	14,69	120,3	12	60	297	375	36
ND-0601-4194	2007	6195961	290699	152	3,49	148,5	10	40	848	1960	36,5
ND-0601-4253	2008	6197298	287770	146	4,00	142,0	10	30	198	85,3	46,5
VCP-0601-2058	2013	6198462	284016	136	2,54	133,5	11	50	149	119	18,5
VCP-0601-2059	2003	6200737	281773	126	2,94	123,1	12	35	1480	400	28
VCP-0601-2507	1967	6201736	279442	127	6,95	120,1	8	35	963		28
VCP-0601-4250		6199109	285596	137	1,20	135,8			636		55

Considerando las captaciones de agua subterránea con información detallada de construcción y pruebas de bombeo (Tabla 4) en Pichidegua se puede destacar que los pozos tienen una profundidad entre 25 m y 61 m y que el diámetro típico de los pozos es 10 pulgadas. De acuerdo a los niveles estáticos reportados en los expedientes y los niveles estáticos medidos en los terrenos realizados en 2017-2018, se infiere una dirección de agua subterránea paralela al río Cachapoal hacia el noroeste (Figura 24).

En la Tabla 5, se reportan los detalles más importantes de los expedientes técnicos de construcción de pozos obtenidos de la DGA para el sector de San Fernando. Además, se muestran los resultados obtenidos para la Transmisividad Hidráulica (T) según los métodos de Cooper&Jacob (C&J), y Recuperación de Theis (TR). También se muestran los valores del caudal registrado en los antecedentes usado para realizar la prueba de gasto constante (Q g cte).

*Tabla 5: Captaciones de agua subterránea con información detallada de construcción y pruebas de gasto en San Fernando.*

ID	Año_p bombeo	UTM_N	UTM_E	Altura	N_est	Cota_hid	Diam	Prof	T_C&J	T_TR	Q_g_cte
Unidades		m	m	m	m	m	pulg	m	m <sup>2</sup> / dia	m <sup>2</sup> /dia	l/s
ND-0602-1329	1998	6172399	319420	342	22,74	319,3	10	40	1150	753	14
ND-0602-1345	1998	6172279	321032	384	17,39	366,6	10	40	778		20
ND-0602-1355	2000	6174901	320628	321	1,76	319,2	5	25	8760		4,6
ND-0602-1539	1998	6173640	319714	333	12,75	320,3	7	80	996	3640	54
ND-0602-1540	1997	6173970	318684	326	6,18	319,8	12	60	1840	774	60
ND-0602-1632	1999	6173512	321191	335	8,56	326,4	8	50	712	975	22
ND-0602-2133	1998	6170284	320116	363	22,74	340,3	8	41	430	412	14
ND-0602-2164	1998	6172714	315032	317	4,23	312,8	8	53	248	117	15
ND-0602-2221	2003	6176111	321420	316	4,00	312,0	10	71	555	163	25
ND-0602-2229	1999	6174896	323887	334	5,00	329,0	12	88	2450		47
ND-0602-2568	1996	6177141	325533	336	10,00	326,0	8	70	244	286	14,6
ND-0602-375	1989	6172487	322197	351	10,77	340,2	10	50	1800	2680	40
ND-0602-4105	2006	6172141	318986	344	14,74	329,3	10	50	1390	1250	31,5
ND-0602-5073	2001	6159932	315784	343	8,50	334,5	8	31	3730	507	20,7
ND-0602-5129	2008	6172436	320852	346	14,22	331,8	8	52	8940		36
ND-0602-5248	2008	6175600	322999	325	1,60	323,4	7	25	177	84,1	24
ND-0602-5277	2008	6175881	321181	316	3,71	312,3	8	40	197	92,9	25

Considerando las captaciones de agua subterránea con información detallada de construcción y pruebas de bombeo (Tabla 5), los principales antecedentes para San Fernando se describen a continuación. La profundidad de los pozos está entre 25 y 88 m y el diámetro típico de los pozos es 10 pulgadas. De acuerdo a los niveles estáticos reportados en los expedientes y los niveles estáticos medidos, se deduce una dirección general, para el agua subterránea, paralela al estero Roma, hacia el noroeste.

Usando los datos de las pruebas de bombeo obtenidas en los expedientes proporcionados por la DGA, se calculó la Transmisividad usando el software *AquiferTest*. Se procedió a generar mapas de la distribución de estos valores en ArcGis, como se muestra en la Figura 19 y Figura 20:

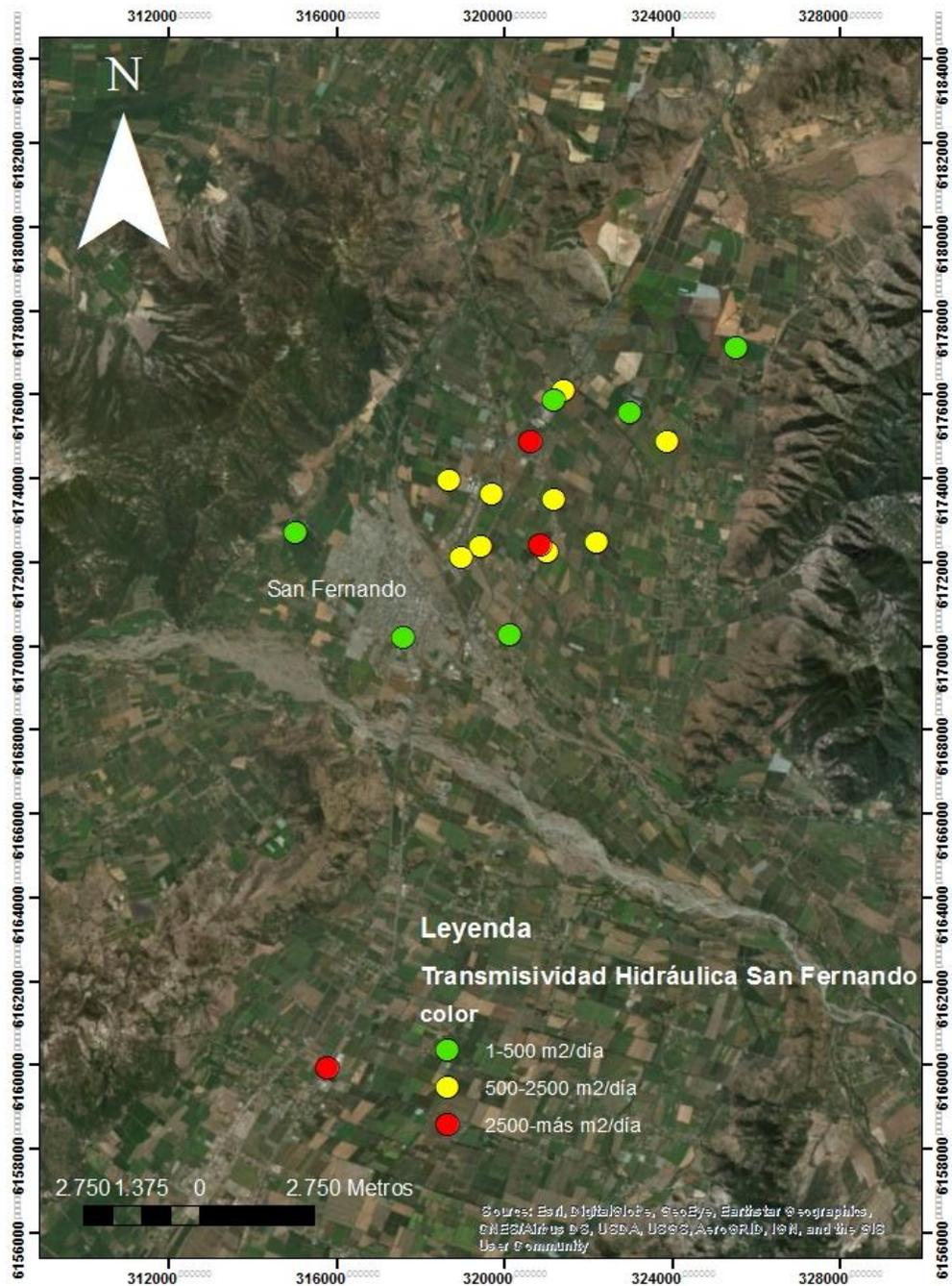


Figura 19: Distribución de la Transmisividad Hidráulica en San Fernando. Método Cooper & Jacob. Elaboración Propia.

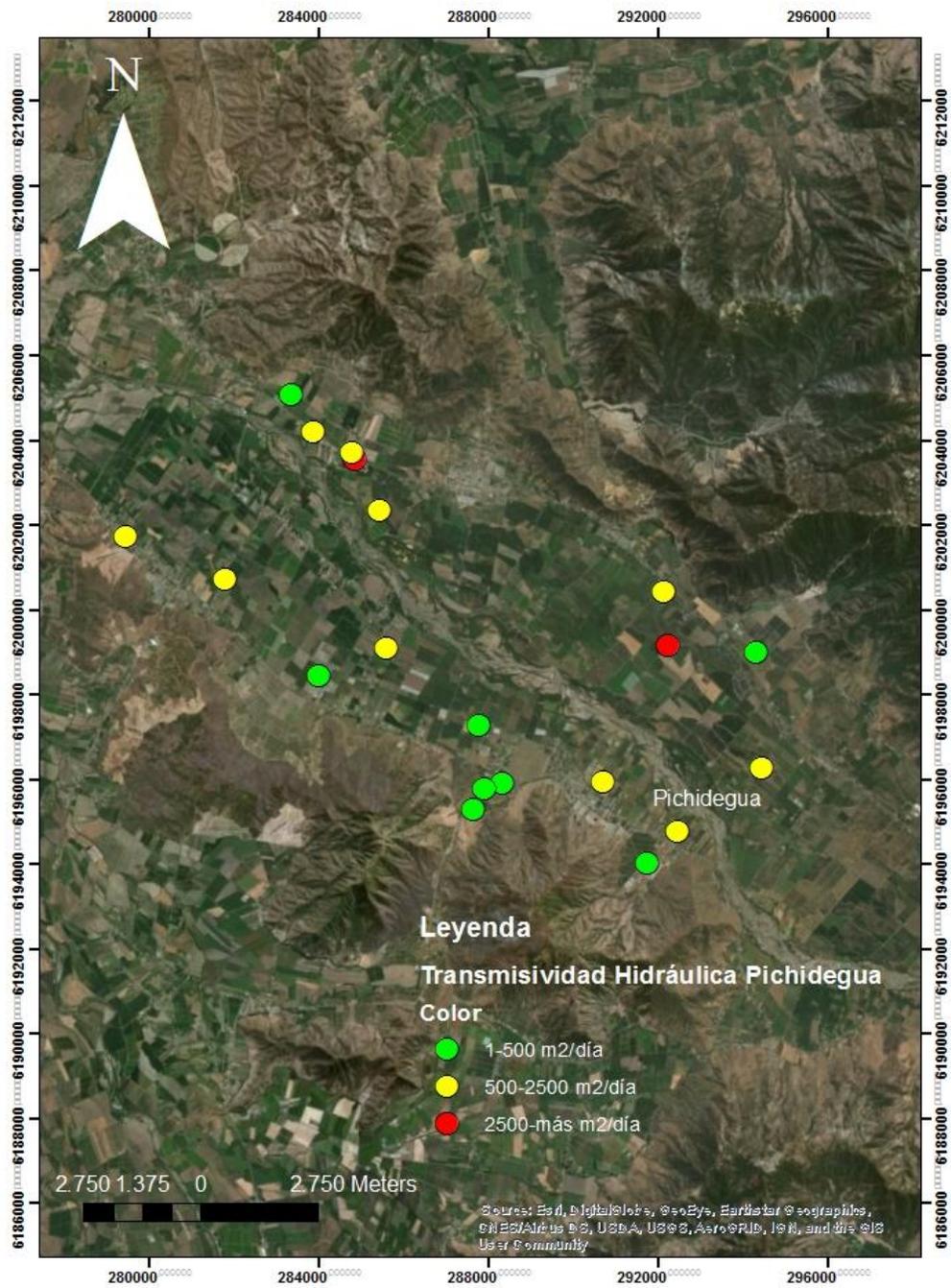


Figura 20: Distribución de la Transmisividad Hidráulica en Pichidegua. Método Cooper & Jacob. Elaboración Propia.

A pesar de no contar con la información detallada de todas las captaciones de agua subterránea, se realizaron histogramas con la distribución de los caudales asignados por la DGA para las dos zonas de estudio (Figura 21 y Figura 22).

Del histograma realizado para Pichidegua, se desprende que los caudales otorgados por la DGA son menores a 10 l/s en un 25% de los casos (14 pozos), un 42,9% de los casos (24 pozos) está entre 10 y 30 l/s, un 19,6% de los casos (11 pozos) está entre 30 y 50 l/s, un 7,1% de los casos (4 pozos) está entre 50 y 70 l/s, y un 5,4% (3 pozos) mayor a 70 l/s.

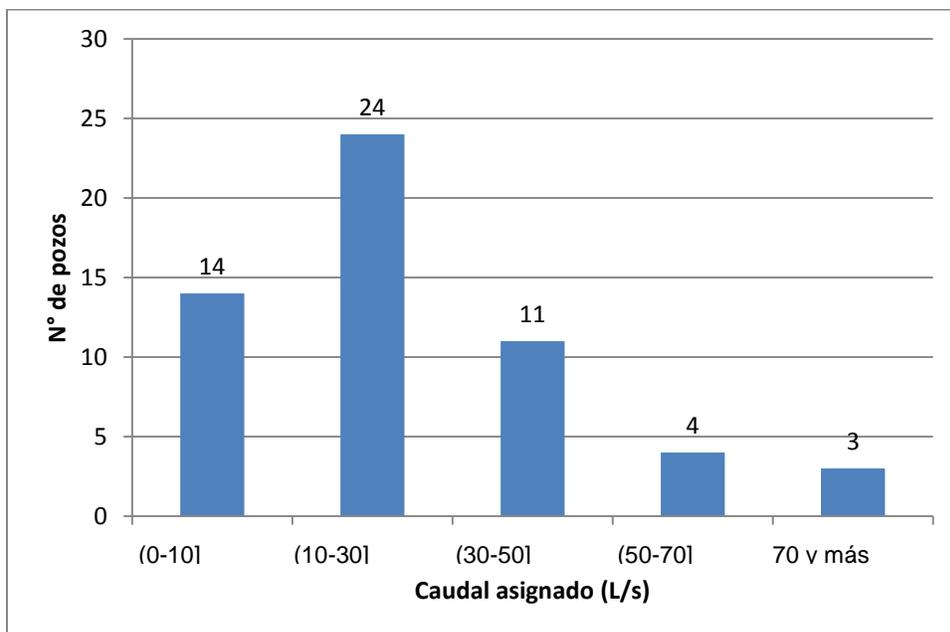


Figura 21: Histograma de caudales asignados por la DGA en Pichidegua. Elaboración propia.

Del histograma realizado para San Fernando, se desprende que los caudales otorgados por la DGA son menores a 10 l/s en un 24,6% de los casos (16 pozos), un 44,6% de los casos (29 pozos) está entre 10 y 30 l/s, un 23,1% de los casos (15 pozos) está entre 30 y 50 l/s, un 6,2% de los casos (4 pozos) está entre 50 y 70 l/s, y un 1,5% (1 pozo) mayor a 70 l/s.

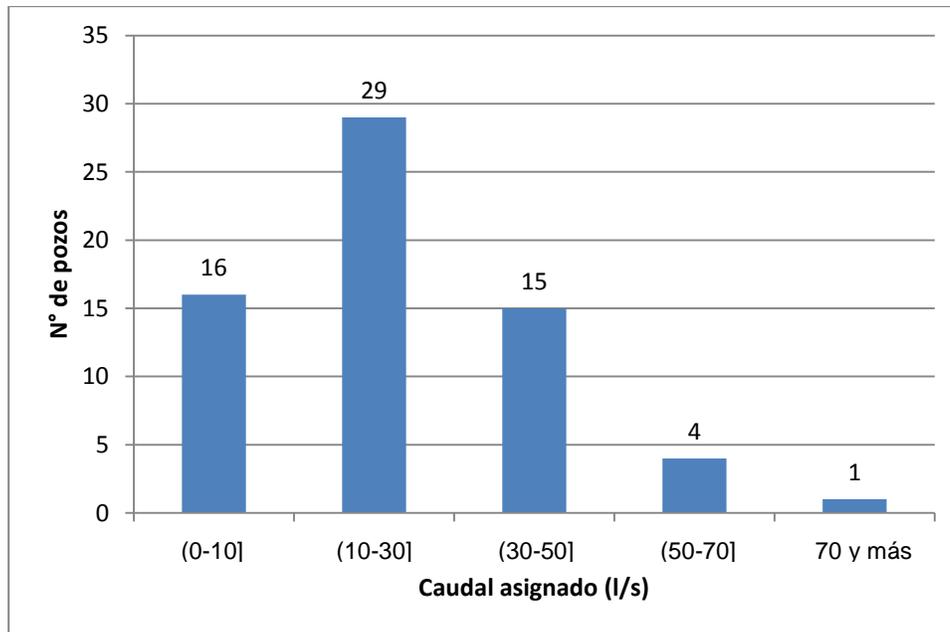
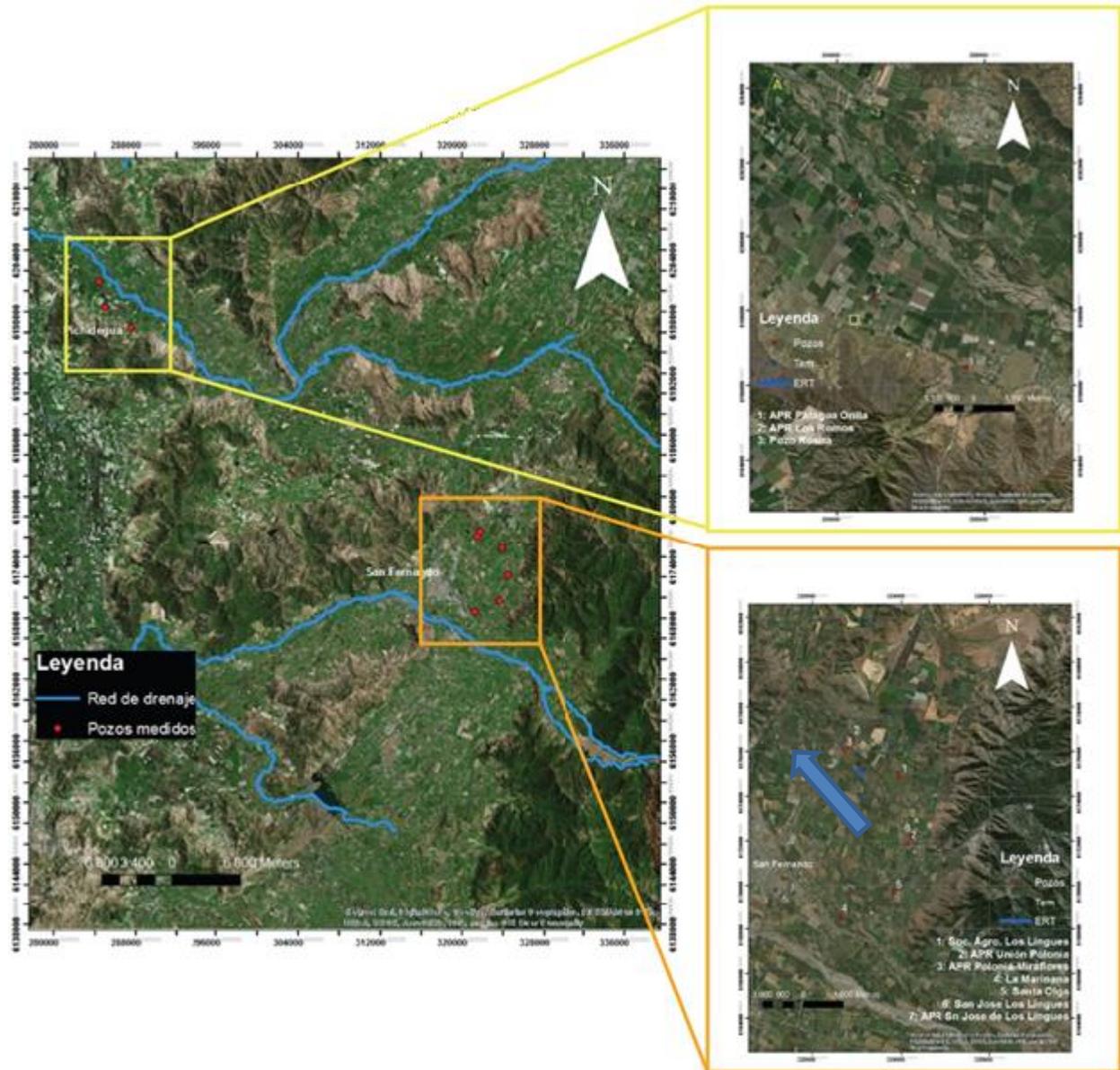


Figura 22: Histograma de caudales asignados por la DGA en San Fernando. Elaboración propia.

Los trabajos de terreno se realizaron en base a la disponibilidad de acceso a los pozos y predios que autorizaron el acceso. La ubicación de los pozos en los cuales se realizaron los registros verticales de T y CE se presenta en la Figura 23:



*Figura 23: Ubicación zona de estudio. Además se muestra la ubicación de los pozos con perfil de temperatura, tomografías de resistividad eléctrica y sondajes de Transiente Electromagnético en San Fernando. La línea celeste indica la dirección del flujo de aguas subterráneas.*

En la Figura 24, se muestra la ubicación de los pozos con perfil de temperatura, tomografías de resistividad eléctrica y sondajes de Transiente Electromagnético en Pichidegua.



Figura 24: A) Ubicación de pozos donde se realizaron perfiles de temperatura, B) Acercamiento al área de estudio con ubicación de Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético realizado en Pichidegua. La flecha azul indica la dirección inferida de agua subterránea. Elaboración propia.

En resumen, la siguiente tabla muestra el código de identificación de cada pozo, código que se usará en el resto del informe:

Tabla 6: Códigos de identificación de los pozos medidos.

Pichidegua		San Fernando	
Pozo	ID	Pozo	ID
APR Los Romos	1	Soc. Agro. Los Lingues	1
APR Patagua Orilla	2	APR Unión Polonia	2
Rosita	3	APR Polonia-Miraflores	3
		La Marinana	4
		Santa Olga	5
		San José de Los Lingues	6
		APR San José de los Lingues	7

## 5.2 NIVEL ESTÁTICO

A continuación, en la

Figura 25 se presentan los niveles estáticos medidos en Pichidegua, y en la Figura 26 se muestran los medidos en San Fernando.

Ubicación de los pozos medidos y de la geofísica, Pichidegua

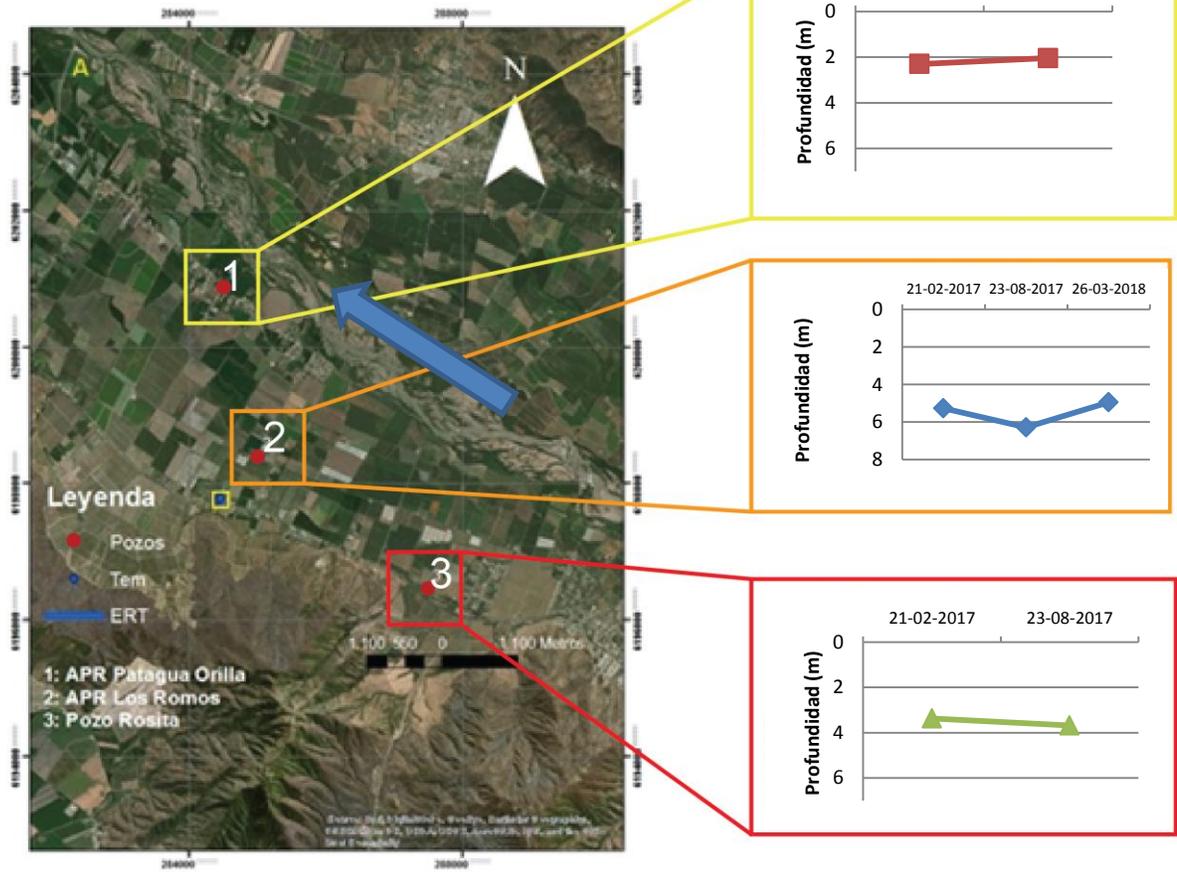


Figura 25: Niveles estáticos medidos en Pichidegua. La flecha azul indica la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.

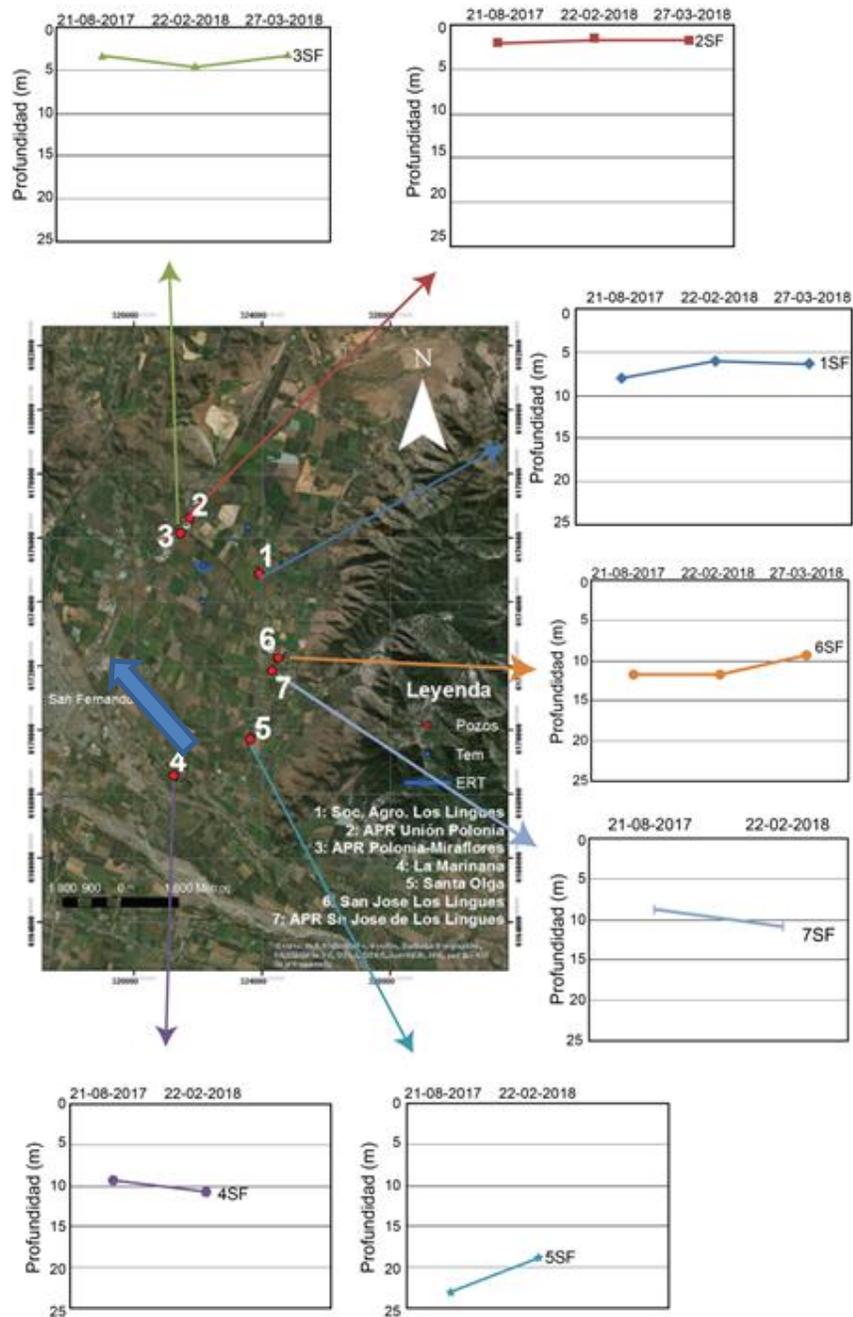


Figura 26: Niveles estáticos medidos en San Fernando. La flecha azul indica la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.

### **5.3 TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

Las siguientes figuras muestran los resultados de los registros de perfiles de temperatura medidos en pozos de Pichidegua. Los datos se presentan con respecto a la profundidad (m), considerando la temperatura en profundidad registrada en el trabajo de campo.

Con los datos de la conductividad eléctrica medida, se construyó un mapa de distribución de ésta.

En Pichidegua los pozos 1PI, 2PI y 3PI fueron medidos en fechas distintas. En la

Figura 27, en azul se muestran las mediciones realizadas en invierno, mientras que en rojo las realizadas en verano.

Ubicación de los pozos medidos y de la geofísica, Pichidegua

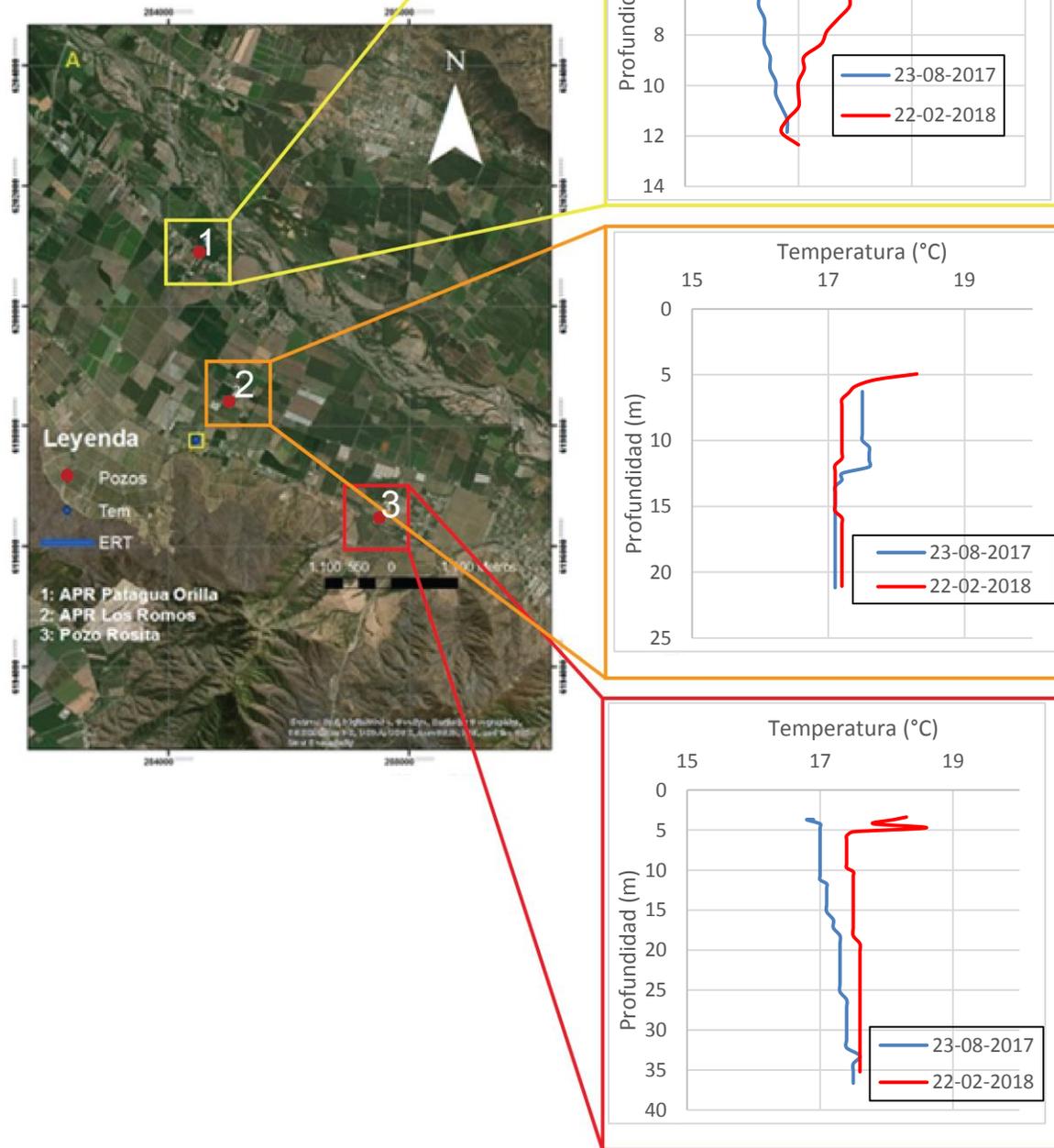


Figura 27: Perfiles de temperatura medidos en Pichidegua. Elaboración propia.

De los perfiles mostrados, se puede observar que tanto en el pozo 1PI como en el pozo 3PI, se registran diferencias en las temperaturas medidas, aunque éstas son inferiores a  $0.5^{\circ}\text{C}$ . En el pozo 1PI se observa que hasta los 12 m la temperatura en profundidad no es la misma. Sin embargo, justo a los 12 m se observa una convergencia a  $17,7^{\circ}\text{C}$ . En el pozo 3PI, los perfiles de temperatura en profundidad no coinciden, siendo la temperatura de invierno  $17,4^{\circ}\text{C}$ , y en verano  $17,6^{\circ}\text{C}$ . En el pozo 2PI se observa que, si bien los perfiles no tienen la misma temperatura en profundidad, la diferencia es de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , siendo la temperatura de invierno  $17,1^{\circ}\text{C}$ , y la de verano  $17,2^{\circ}\text{C}$ .

Entonces, a pesar de no poder definir una profundidad de homotermia, ni establecer una temperatura para el acuífero, se puede afirmar que a partir de los 5 m de profundidad, la temperatura del agua subterránea es superior a los  $17^{\circ}\text{C}$ .

Al igual que para Pichidegua se presentan los resultados de los registros verticales de temperatura de San Fernando donde los pozos 1SF, 2SF, 3SF, 4SF, 5SF y 6SF, fueron medidos en días distintos. En la

Figura 28, en azul se muestran las medidas realizadas en invierno, mientras que en rojo las realizadas en verano.

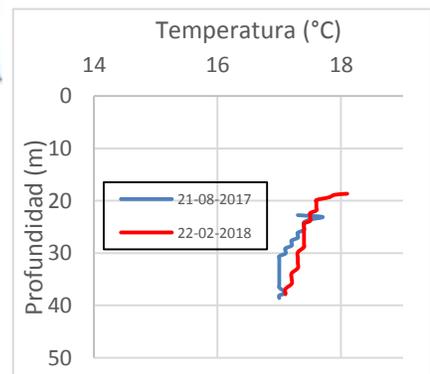
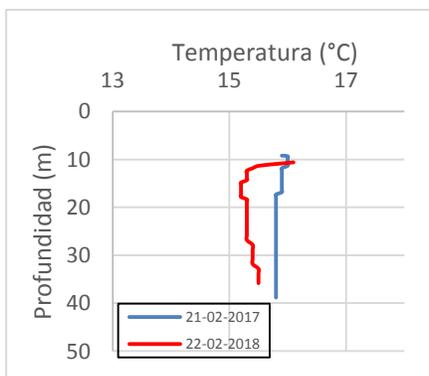
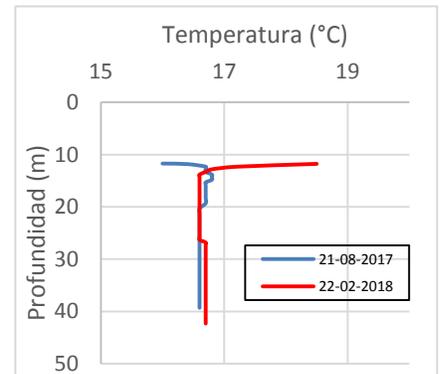
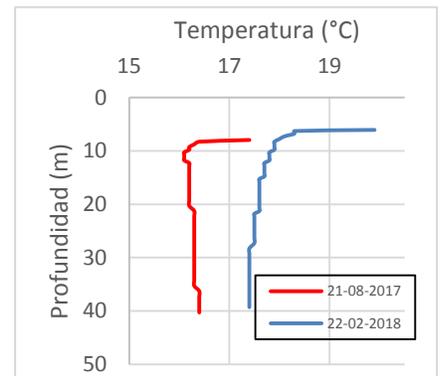
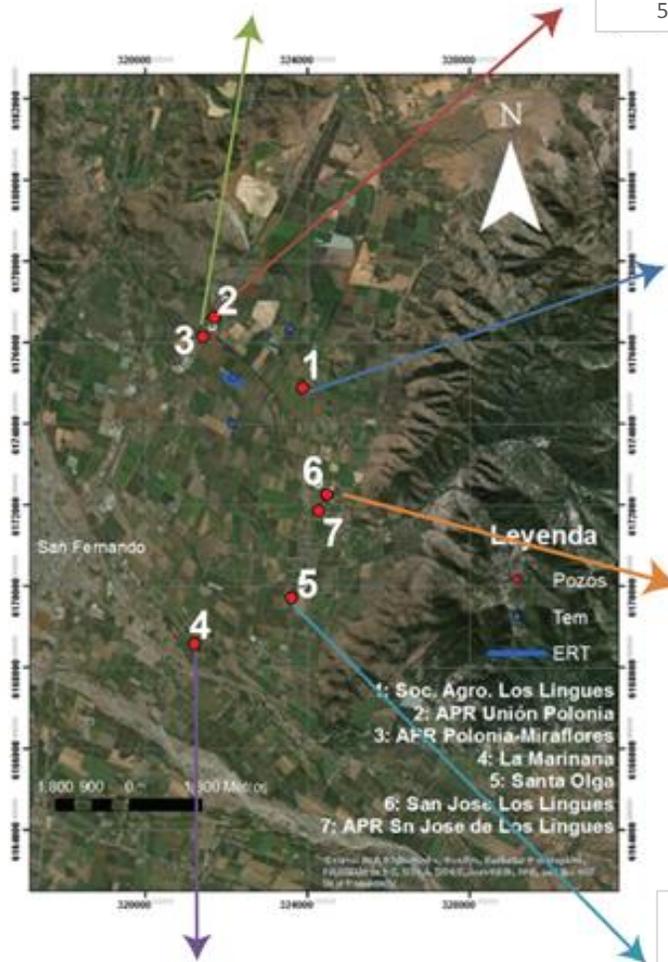
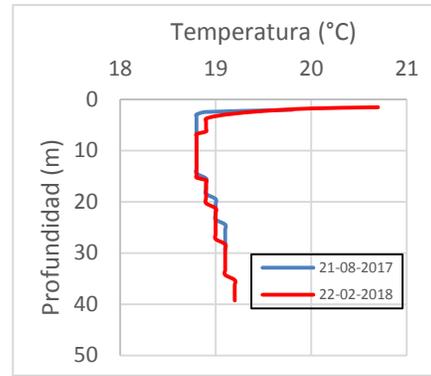
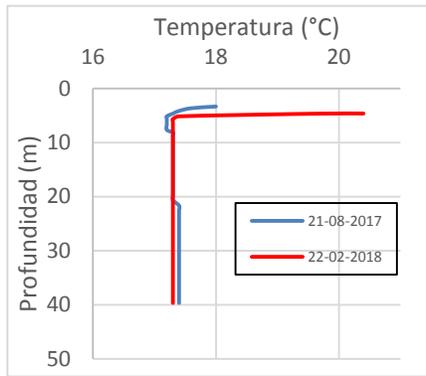


Figura 28: Perfiles de temperatura medidos en San Fernando. Elaboración propia.

En el caso de San Fernando, se observa que los pozos 1SF y 4SF presentan temperaturas en profundidad distintas en invierno y verano. Las temperaturas del pozo 1SF son 16,3 en invierno y 17,4°C en verano, mientras que las del 4SF son 15,8 en invierno y 15,5 en verano. Con respecto a los pozos 2SF y 5SF se observa que, si bien la temperatura en profundidad es similar entre las mediciones de invierno y verano, existe una fuerte variabilidad en los perfiles. Se registra en profundidad una temperatura de 18,7°C en el pozo 2SF, y 17,1 en el pozo 5SF para invierno y verano. En los pozos 3SF y 6SF no se observa tanta variabilidad como en los pozos 2SF y 5SF, registrándose temperaturas en profundidad muy similares tanto para invierno como en verano. El pozo 3SF registra una temperatura de 17,3°C y el pozo 6SF una de 16,7°C.

Entonces, a pesar de no poder definir una profundidad de homotermia, ni establecer la temperatura del acuífero, se puede afirmar que a partir de los 5 m de profundidad, la temperatura del agua subterránea es superior a los 16°C, excepto en el pozo 4SF.

A continuación se presentan los registros de conductividad eléctrica medidos en Pichidegua y San Fernando en pozos disponibles:

Ubicación de los pozos medidos y de la geofísica, Pichidegua

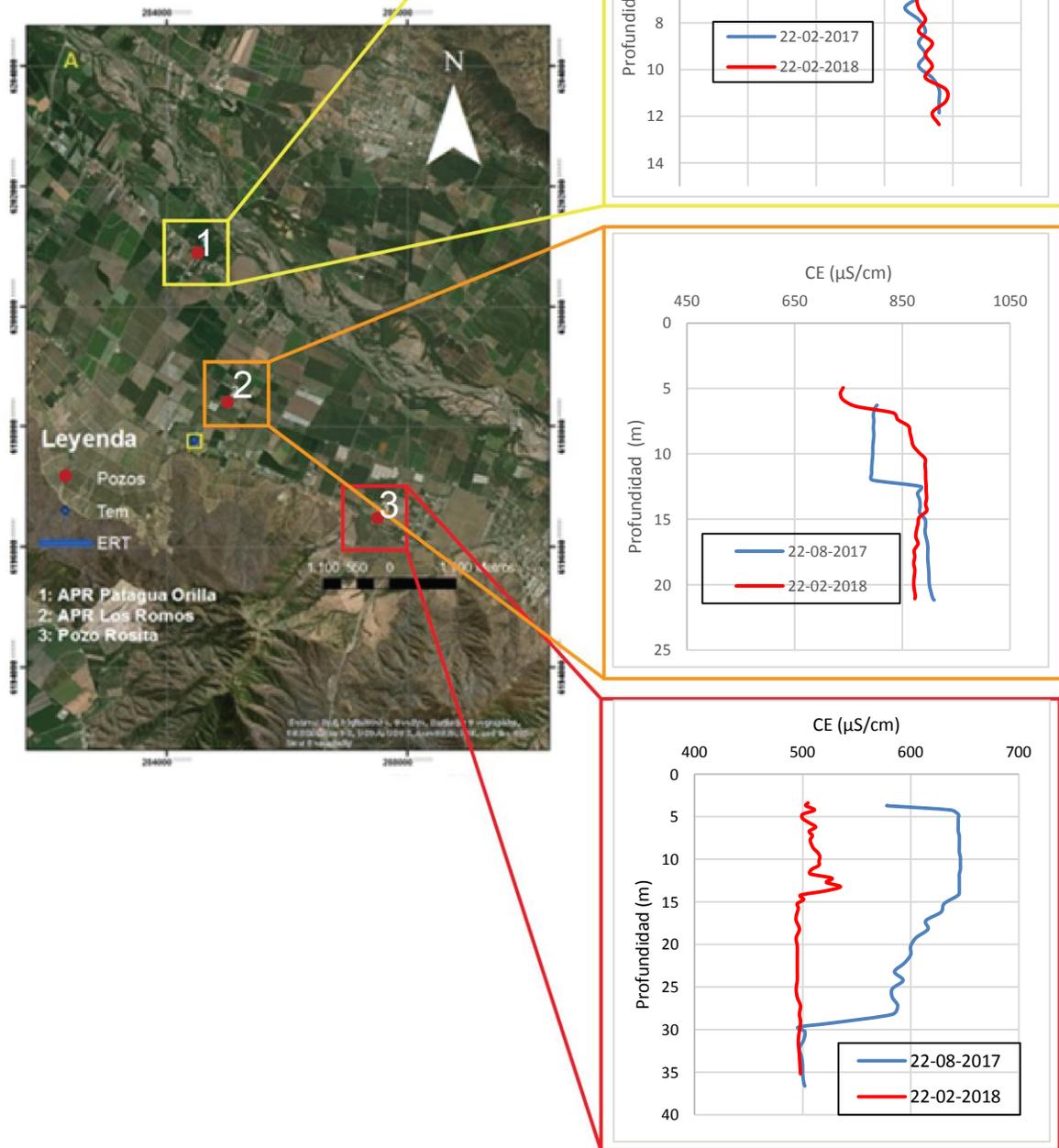


Figura 29: Perfiles de Conductividad Eléctrica medidos en Pichidegua. Elaboración propia.

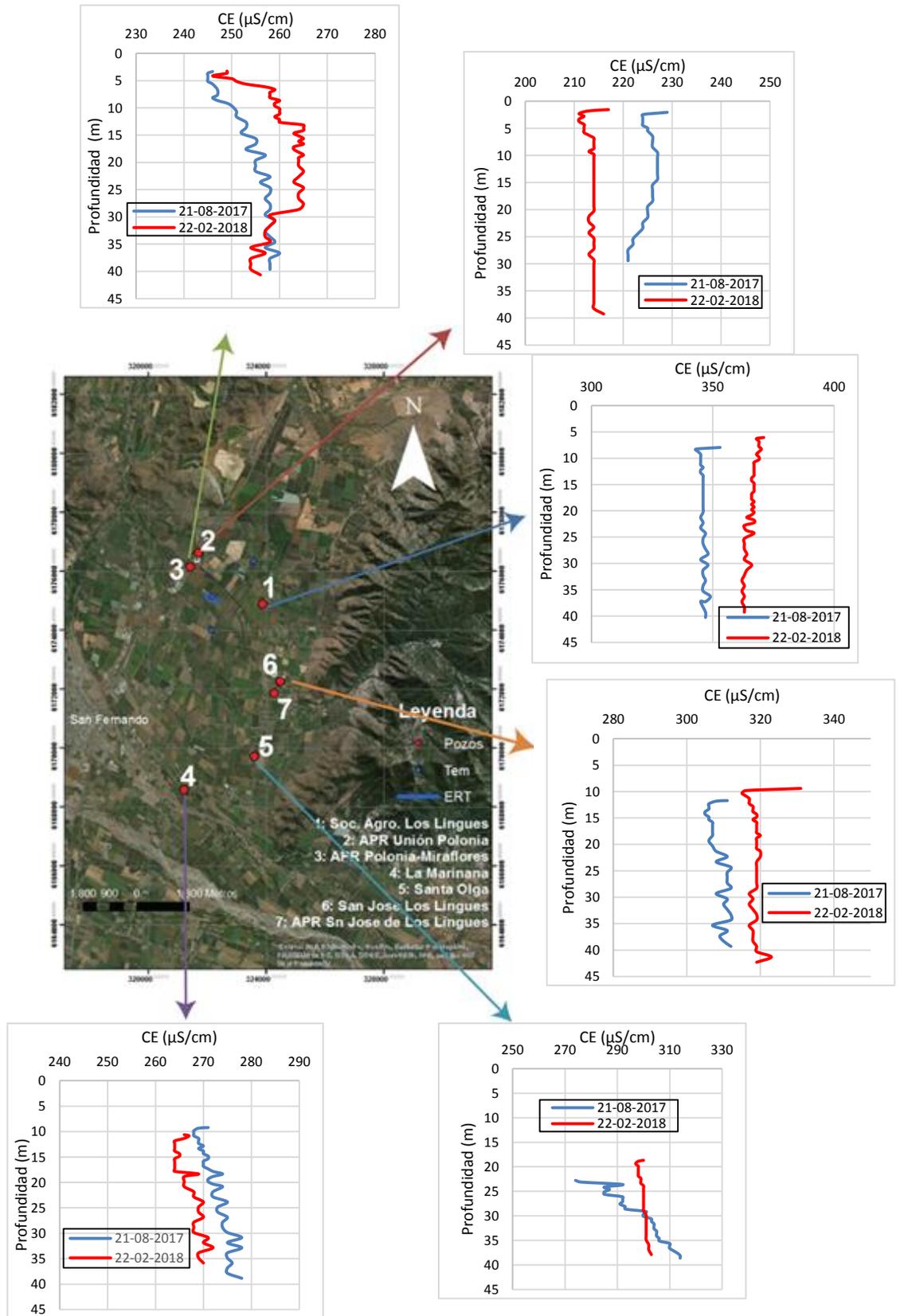


Figura 30: Perfiles de Conductividad Eléctrica medidos en San Fernando. Elaboración propia.

A continuación, se muestra un mapa con la distribución del promedio de la conductividad eléctrica medida en cada pozo:

### Mapa de la distribución de la CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

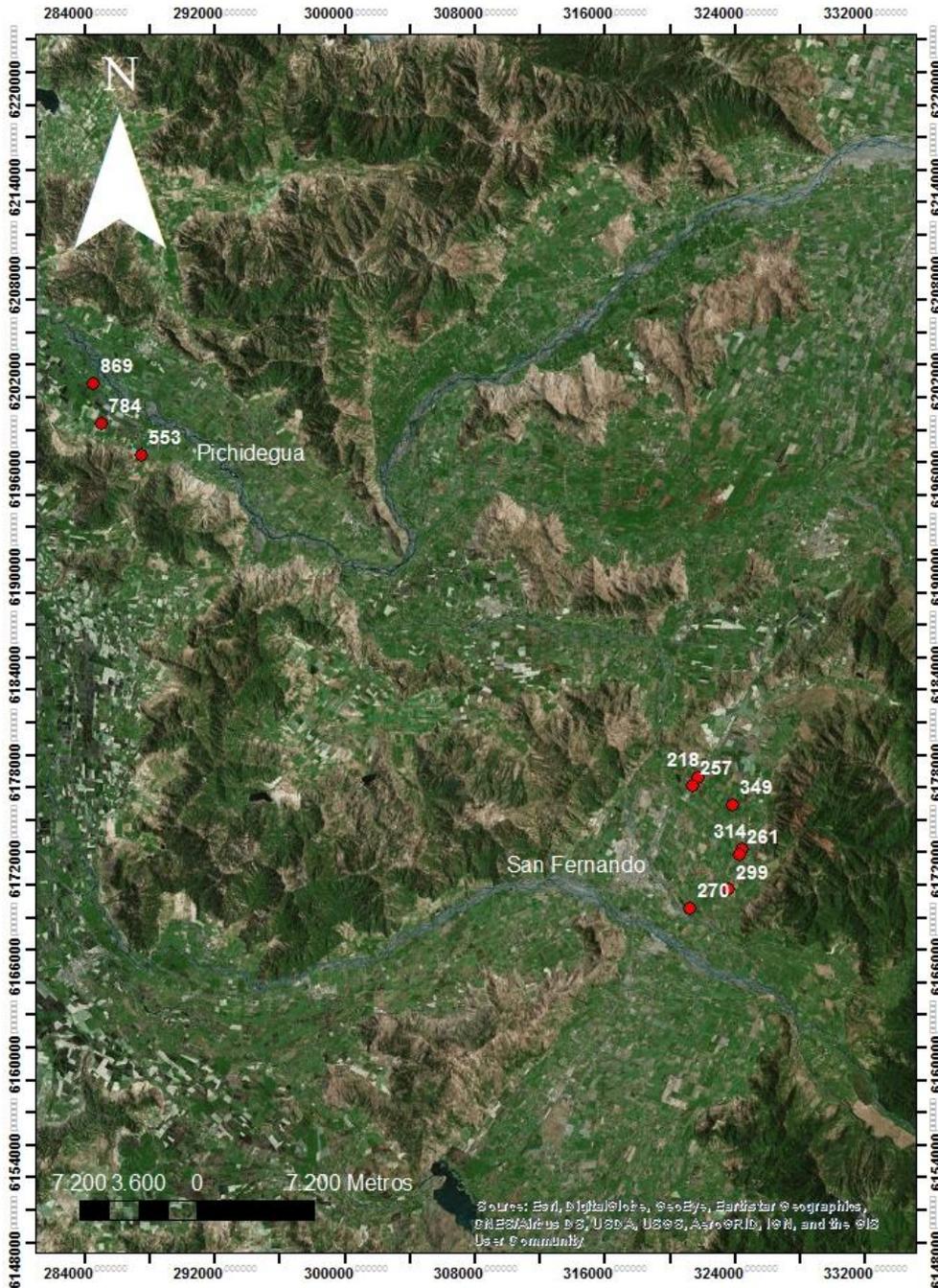


Figura 31: CE promedio de cada pozo, medida en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

## 5.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

El resultado del Transiente Electromagnético TEM, es un sondaje 1-D con distintas resistividades eléctricas en profundidad. Los resultados del ERT corresponden a una Tomografía de Resistividad Eléctrica medida en función del tiempo y una inversión que corresponde a un perfil de resistividad eléctrica en profundidad. Esta última, cuenta con una serie de modelos equivalentes (líneas segmentadas) y una inversión que integra todos los modelos equivalentes (línea roja). A los segmentos de cada perfil TEM definidos por cambios marcados en sus valores de resistividad se les comparó con la Figura 14, y se interpretó la litología asociada a cada uno de estos segmentos.

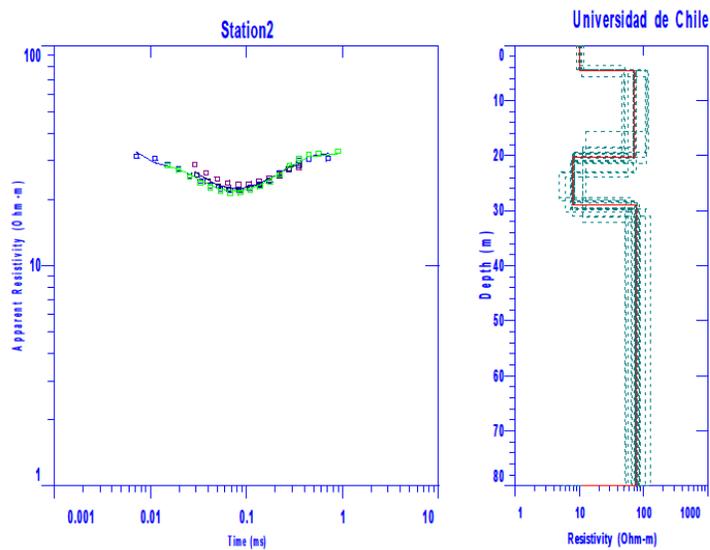


Figura 32: Transiente electro magnético 1 medido en Pichidegua.

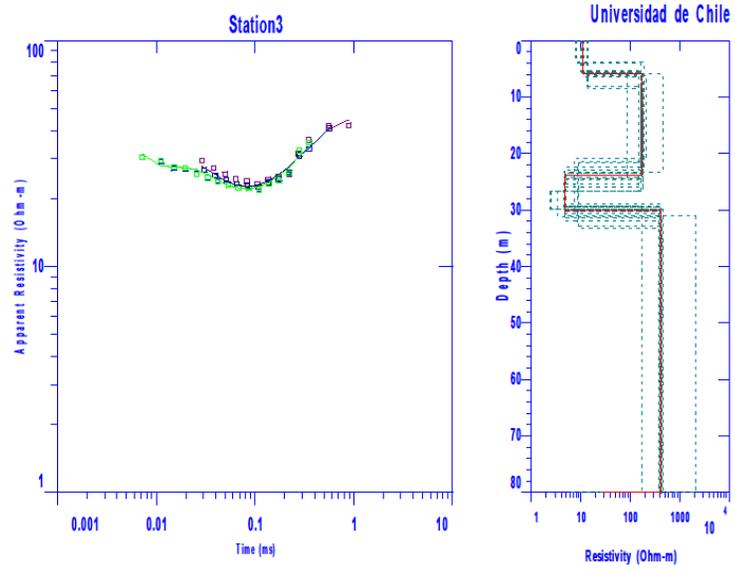


Figura 33: Transiente electro magnético 2 medido en Pichidegua.

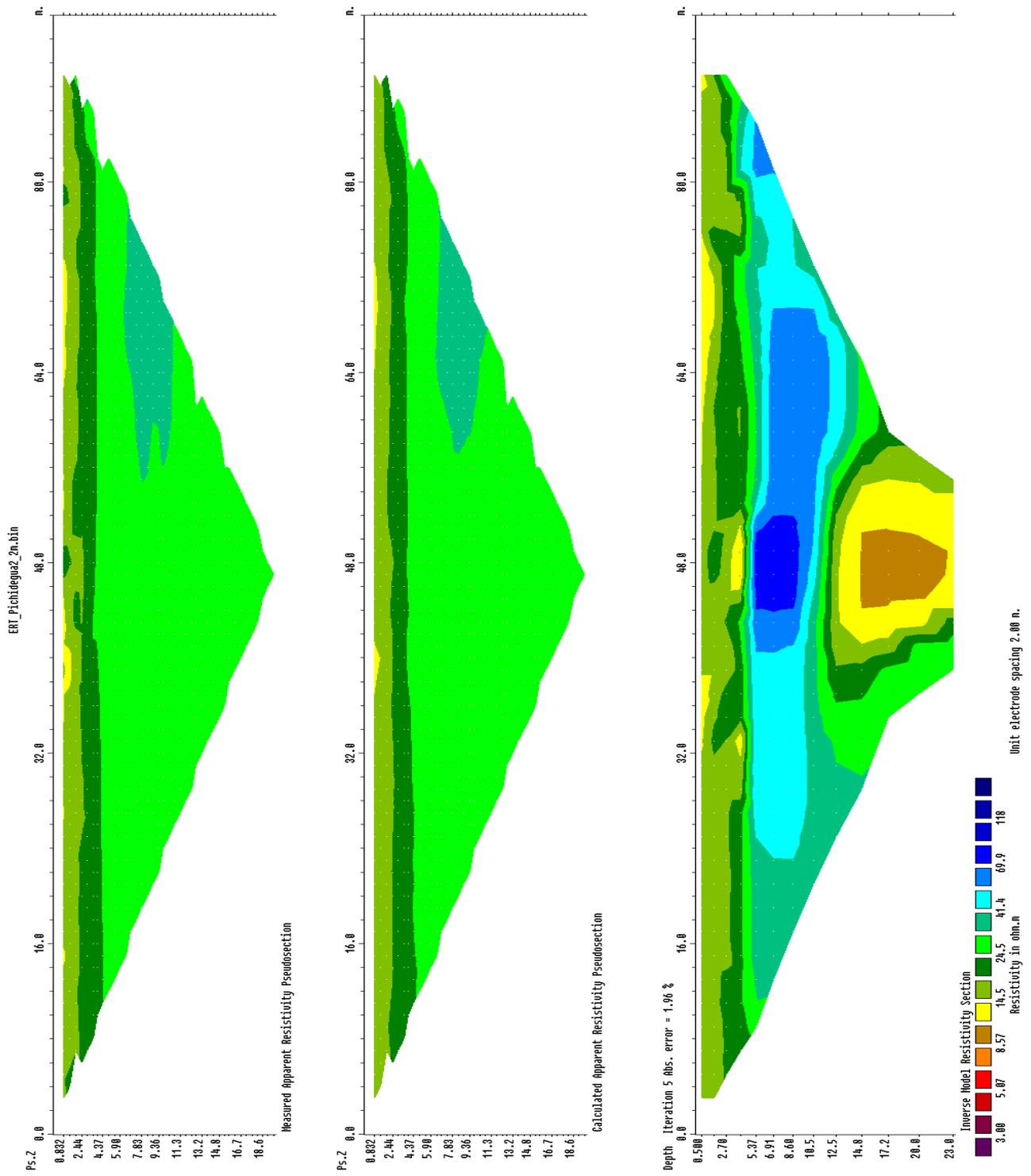


Figura 34: Resistividad aparente medida (arriba), resistividad aparente calculada (medio) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (abajo) construida en Pichidegua.

En Pichidegua, se realizaron 2 perfiles de TEM, los que alcanzaron 80m de profundidad, y un ERT de 88m de largo (Figura 32, Figura 33, y Figura 34). Es posible distinguir 4 segmentos distintos de resistividad eléctrica en los perfiles obtenidos. El primer segmento va desde la superficie hasta los ~5m de profundidad con una resistividad eléctrica de 10 ohm·m. Este segmento se puede interpretar como una zona con alta permeabilidad y saturada de agua. El segundo segmento entre 5m y 20-25m de profundidad se caracteriza por un valor de resistividad en el rango (80-100) ohm·m que se puede interpretar como un estrato compuesto principalmente por arena de grano medio. El tercer segmento se extiende desde los 20-25m hasta los 30 m de profundidad y se caracteriza por una resistividad en el rango de 4-12 (ohm·m) que se puede interpretar como un estrato compuesto por sedimentos más finos, tales como arcillas y/o limo. El cuarto segmento, en la base de los perfiles, se caracteriza por un valor de resistividad en el rango 90-200 (ohm·m) que se puede interpretar como un estrato compuesto principalmente por arena de grano medio.

Considerando la profundidad de los pozos (Tabla 4) y los resultados de las mediciones geofísicas en el área de interés en Pichidegua, se puede afirmar que no se observa la base del acuífero de manera certera.

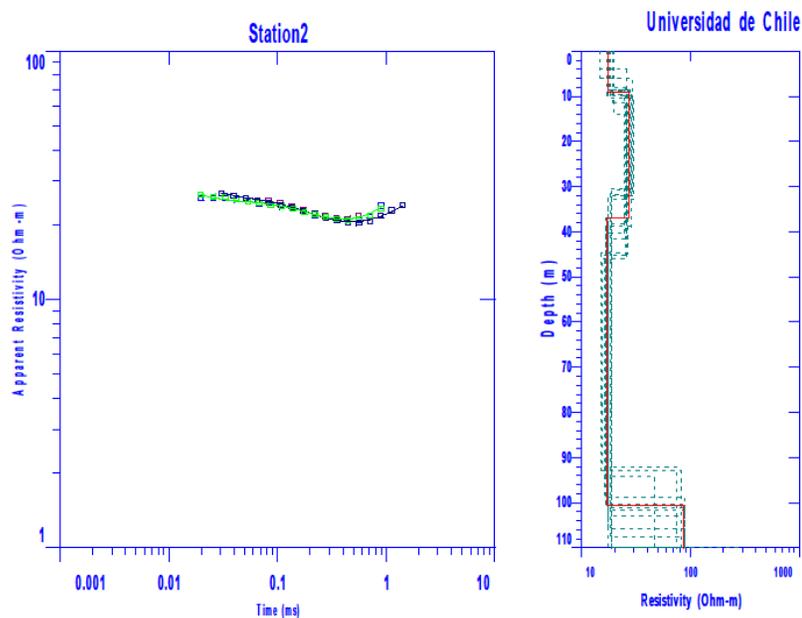


Figura 35: Transiente electro magnético 1 medido en San Fernando.

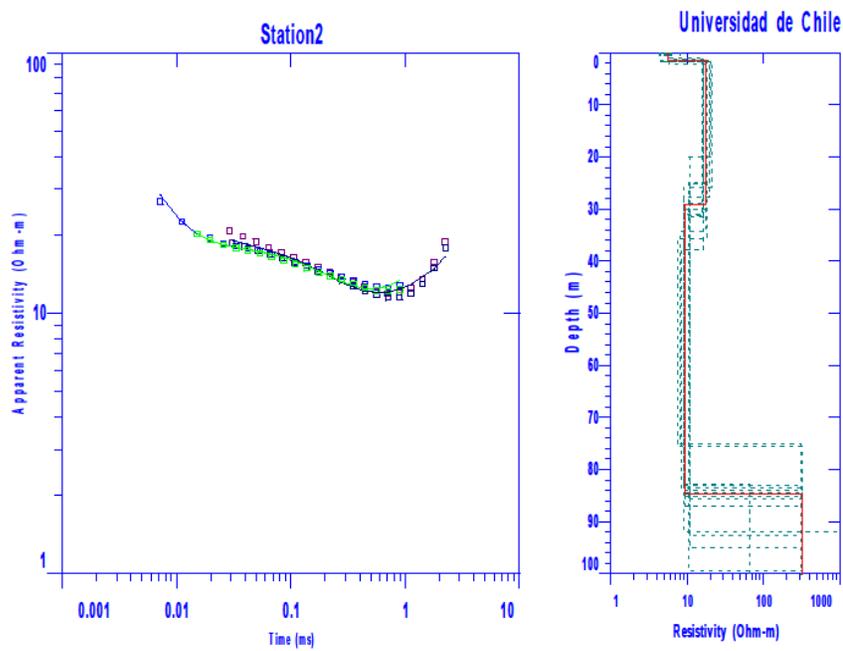


Figura 36: Transiente electro magnético 2 medido en San Fernando.

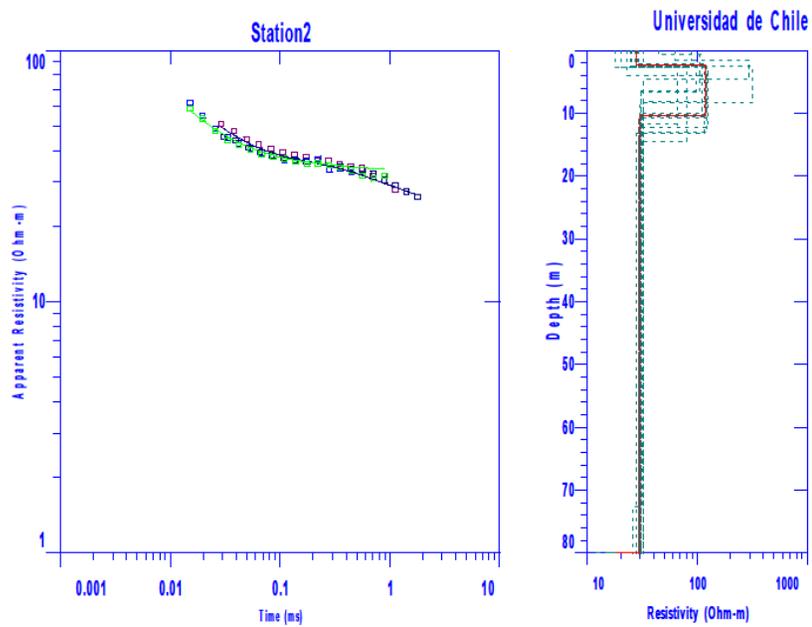


Figura 37: Transiente electro magnético 3 medido en San Fernando.

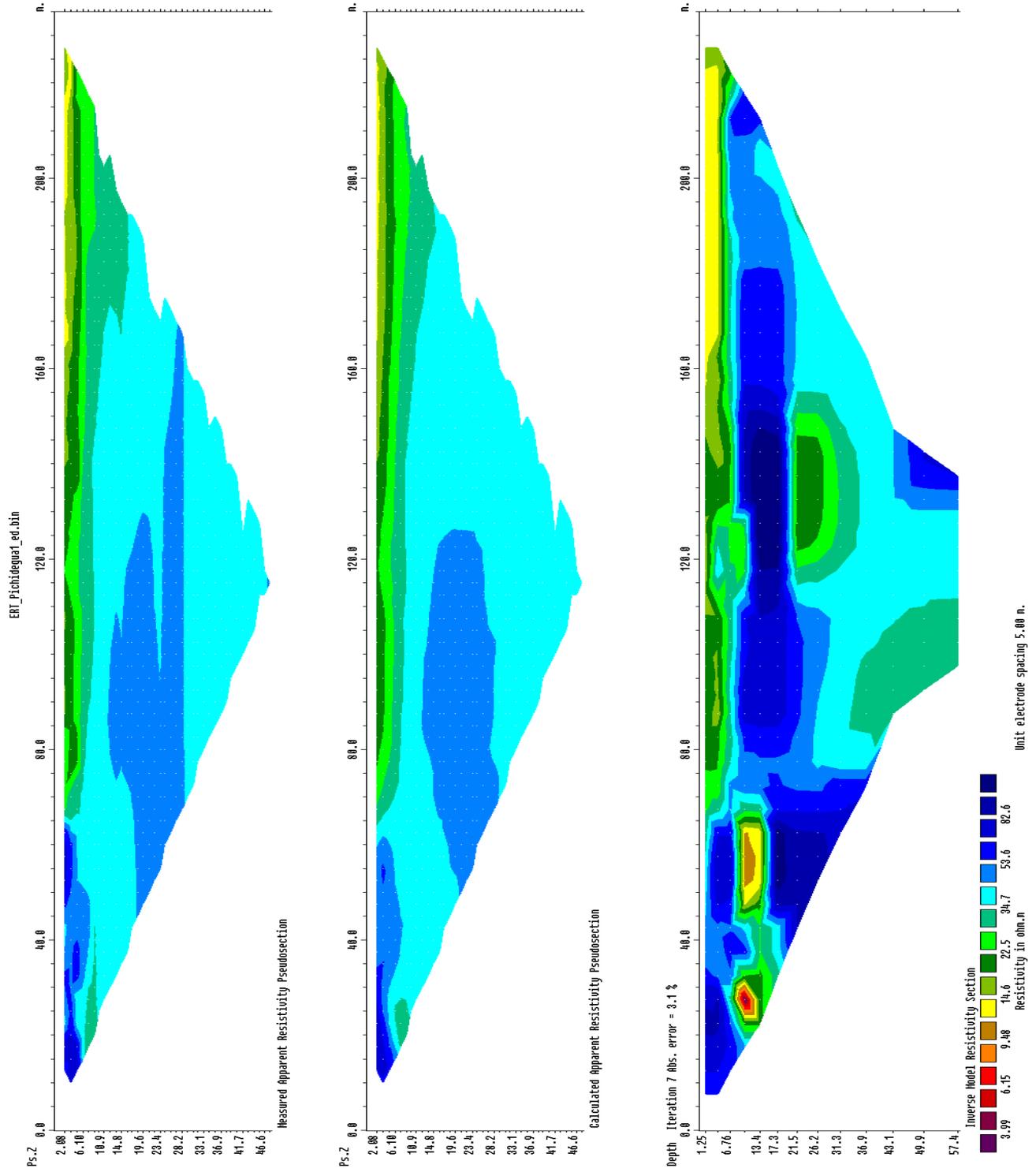


Figura 38: Resistividad aparente medida (arriba), resistividad aparente calculada (medio) y Tomografía de Resistividad Eléctrica (abajo) construida en San Fernando.

En San Fernando, se realizaron 3 mediciones de TEM, los que alcanzaron 100m de profundidad, con loops del transmisor de 40x40m y un ERT de 225m de largo (Figura 35, Figura 36, Figura 37, y Figura 38). Los TEM 1 y TEM 2, tienen perfiles de resistividad eléctrica en los que se pueden distinguir 4 zonas de distinta resistividad. El TEM 1 presenta un primer segmento que va desde la superficie y se extiende hasta los 10m, mientras que en el TEM 2 y TEM 3 llega hasta los 2m, con una resistividad de 8 ohm·m. Se interpreta como una zona de alta permeabilidad y saturada de agua. El segundo segmento va desde los 10m hasta los 38m en el TEM 1, mientras que en el TEM 2 desde los 2m hasta los 30m. Se caracteriza por una resistividad de 20 ohm·m, que se interpreta como un estrato compuesto por arena de grano fino. El tercer segmento va desde los 38 a los 100m en el TEM 1, mientras que en el TEM 2 se observa entre los 30 y los 88m. Presenta un valor de resistividad cercano a los 8 ohm·m, lo que se interpreta como una capa de arena con sedimentos más finos, tales como arcillas y/o limo. El cuarto segmento va desde los 100m en el TEM 1, mientras que en el TEM 2 comienza a los 88m, y no se observa su término. Tiene una resistividad de 100 ohm·m en el TEM 1, mientras que en TEM 2 es cercana a los 500 ohm·m. Éste segmento se interpreta como gravas y gravas arenosas.

A continuación se muestra la correlación para cada zona, de los TEM y ERT realizados.

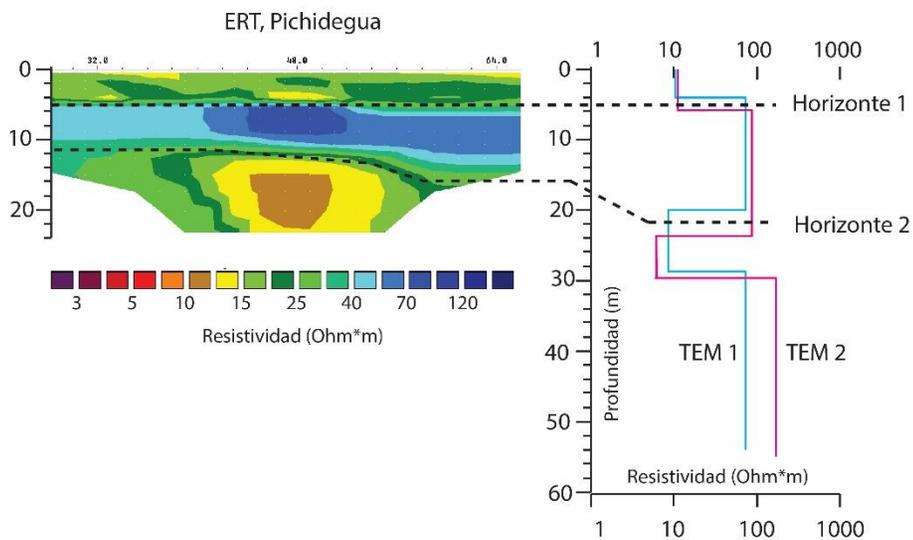


Figura 39: Comparación entre la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético (TEM) en Pichidegua. Ubicación de pozos, sección y sondaje en la Figura 18. Elaboración propia.

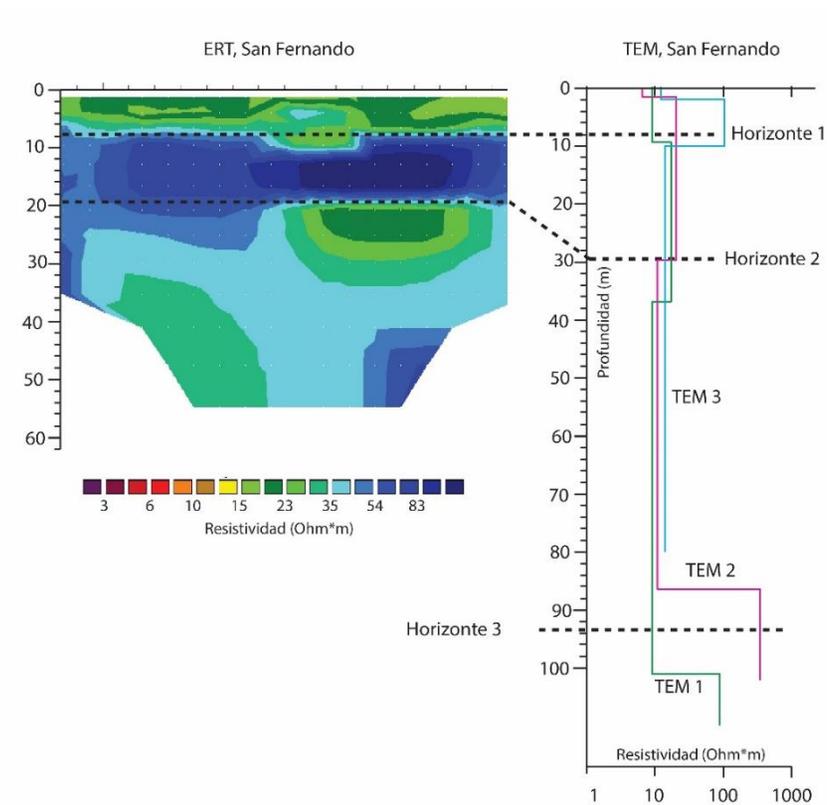


Figura 40: Comparación entre la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) y sondajes de Transiente Electromagnético (TEM) en San Fernando. Ubicación de pozos, sección y sondaje en la Figura 15. Elaboración propia.

## Evaluación del potencial geotérmico

Usando  $Q = 10$  l/s (75% de los pozos construidos en ambas zonas de estudio presentan caudales mayores),  $\Delta T = 5$  K (Muñoz et al., 2015),  $C_p = 4186$  (J/Kg\*L) y  $\rho = 1$  (Kg/L), y reemplazando en la siguiente ecuación, se obtiene que la energía/calor extraíble del recurso es 209,3 kW.

$$Q_{SUELO} = Q \cdot \Delta T \cdot C_p \cdot \rho$$

Luego, el resultado obtenido se reemplaza en la siguiente ecuación:

$$Q_{TOTAL} = Q_{SUELO} \cdot (COP_{TEO} / COP_{TEO} - 1)$$

En la literatura se consideran valores de COP entre 3 y 5 (Muñoz, 2015; Gaínza, 2014), con soluciones existentes en el mercado que operan bajo un COP de 4, siendo este el valor más comúnmente obtenido al sopesar las variables de temperatura y eficiencia. Con esto, se obtiene una potencia total ( $Q_{TOTAL}$ ) de 279,1 kW.

Con el fin de evaluar la factibilidad de cultivo con los resultados obtenidos se consideran los tomates y las lechugas como dos vegetales tipo.

En la Tabla 1, se evidencia que la potencia energética demandada máxima, diurna y nocturna, asociada al cultivo de tomates es de 42,72 kW y de 22,28 kW, correspondiente al mes de Septiembre y de Octubre respectivamente. Mientras que en la Tabla 2, la potencia demandada máxima asociada al cultivo de lechuga corresponde a 27,7 kW para el día (julio) y por la noche a 14,7 kW para el mes de Junio. Con estos datos, es posible calcular la cantidad de invernaderos de cultivo de tomates y lechugas a los que se les puede suplir su demanda máxima. Si se tiene un pozo que bombea 10 l/s, y considerando el uso de una bomba de calor, se obtienen 279,1 kW. Dividiendo la energía extraíble por la potencia demandada por cada tipo de cultivo, se obtiene que se puede suplir la demanda máxima de día del mes de Septiembre a máximo 6,5 invernaderos de 150 m<sup>2</sup> destinados al cultivo de tomates, y a 10 destinados al cultivo de lechugas en el mes de Julio.

Además, al comparar con la Tabla 3 y la Tabla 8, es posible calcular la cantidad viviendas a las que se les puede suplir su demanda energética instantánea máxima. Dividiendo los 279,1 kW obtenidos (como energía extraíble de un pozo que extrae 10 l/s) por la potencia demandada por una vivienda, el número de viviendas tipología T2 cuya demanda es factible suplir en Rengo (cercañas de Pichidegua) es de 9,8, mientras que en San Fernando es de 10,6. Se calcula usando las viviendas T2, debido a que son éstas las que presentan la mayor demanda instantánea máxima. Si usamos la tipología más abundante posterior al 2016 para cada zona de estudio (T5 para Rengo-Pichidegua y T8 para San Fernando), se obtiene que se puede suplir la demanda de 129,2 viviendas T5 en Rengo-Pichidegua, y 206,7 en San Fernando. Debido a que el caudal asignado por la DGA es 10 l/s, se puede extraer continuamente esta cantidad de agua durante todos los instantes en que la potencia demandada sea máxima (la que se usó para el cálculo), por lo que se puede suplir la demanda al número calculado de invernaderos y casas durante el tiempo que se requiera. Es importante mencionar que la potencia demandada no siempre es máxima, por lo que no se necesitará extraer continuamente 10 l/s.

Para calcular el período de retorno de una inversión inicial, se usa el escenario de implementar invernaderos de lechugas. Las utilidades butas de un invernadero de este cultivo alcanzan los \$2,5 MMCLP (Hurtado, 2017). Usando la ecuación que se muestra a continuación (Aguasol, 2016), se obtiene la inversión específica en \$MMCLP/kW:

$$y = -0,153 \ln(x) + 1,037$$

Donde  $x$  corresponde a la Potencia Térmica en kW. En este caso,  $x$  es 279,1 l/s. Con este valor se obtiene una inversión específica de \$0,175 MMCLP/kW. Al multiplicar este valor por los mismos 279,1 kW, se obtiene una inversión inicial de \$48,9 MMCLP. Debido a que se suple la demanda de 10 invernaderos, las utilidades anuales ascienden a \$25 MMCLP anuales, por lo que en dos años se recupera la inversión.

## 6 DISCUSIONES

---

Con respecto a los niveles estáticos medidos en Pichidegua y San Fernando (Figura 25 y Figura 26), se puede afirmar que las variaciones observadas a lo largo de un año, contemplando mediciones tanto en invierno como en verano, son menores a 2m, excepto en los pozos 4SF, 5SF, y 6SF ubicados en San Fernando. Las variaciones observadas en estos pozos llegan a los 4m. La razón de esta diferencia en San Fernando puede deberse a la naturaleza de los depósitos en los que se encuentran los pozos, estando los pozos 1SF, 2SF, y 3SF ubicados en las facies distales de un abanico aluvial antiguo, mientras que los pozos 4SF, 5SF y 6SF se encuentran en las facies proximales. Las facies distales se caracterizan por presentar granulometrías más finas que las facies proximales, lo que influye negativamente en la permeabilidad de los sedimentos. El control que ejerce la litología sobre el comportamiento del nivel estático parece ser importante.

Aparte del control litológico y sedimentario es necesario destacar que la intensa actividad agrícola en el área puede afectar localmente el comportamiento de los pozos, hecho que se traduce en un diferente comportamiento en relación a la misma litología. Para explicar esto, se hace necesario contextualizar el área en la que se realizó este estudio. Ésta corresponde a una zona de intensa actividad agrícola, en la que se desarrollan una gran diversidad de cultivos, para lo que se usa una alta cantidad de agua subterránea destinada al riego. La dificultad para obtener información acerca del uso de agua para esta actividad, la gran diversidad de técnicas de riego, y la amplia gama de tipos de cultivos (que necesitan distintas cantidades de agua a distintas horas del día), hacen que no sea fácil estimar la cantidad total de agua destinada a cada riego, y las horas o días en que se riega más.

Sin embargo, las fluctuaciones del nivel estático en Pichidegua, y en los pozos 1SF, 2SF, y 3SF medidos en San Fernando, son menores a 2m y esto induce a pensar que el acuífero tiene cierta estabilidad a lo largo del año. No se observa una relación entre la ubicación de los pozos y el comportamiento del nivel estático medido en ellos.

*A partir del análisis de los perfiles de temperatura medidos (*

Figura 27 y Figura 28), se define en los sedimentos detríticos un acuífero cuya influencia externa no desaparece a los 10-15 m como es usual, sino que se observan variaciones de temperaturas, en invierno y verano, hasta los 40 m de profundidad.

El análisis conjunto de los niveles y de la temperatura sugiere que el acuífero es variable en cuanto a los flujos y a la temperatura debido, muy probablemente, a eventuales procesos de recarga y/o a flujos rápidos que ocurren durante todo el año. Estos pueden consistir en flujos rápidos de agua con temperatura menor debido a influencia externa (ambiental), que ocurren todo el año, por lo que no permiten que la temperatura del acuífero se equilibre, lo que impide definir una zona de homotermia.

En San Fernando, se observa una pauta similar entre los pozos 1SF, 2SF Y 3SF. En estos 3 pozos, los perfiles medidos en invierno, la parte somera presenta mayor temperatura que el agua subterránea en profundidad. Esto se puede explicar debido a que los pozos 1SF, 2SF, y 3SF se encuentran sobre facies distales de un abanico aluvial antiguo, mientras que los pozos 4SF, 5SF, y 6SF en las facies proximales. En las facies distales de los abanicos aluviales, los flujos que recargan el acuífero tienen menor velocidad que en las facies proximales, por lo que su influencia es menor en cuanto a la temperatura del agua.

Los mecanismos que pueden cambiar la forma de los perfiles de temperatura pueden ser: (1) diferencias en la temperatura ambiente y (2) diferencias en el tiempo desde que el motor de extracción estaba apagado, dando pie a un perfil más suave si la perturbación del motor homogeniza la temperatura en el acuífero.

Con respecto a la conductividad eléctrica, se puede afirmar que, en los primeros metros de espesor saturado hay pequeñas variaciones probablemente asociadas a la influencia del agua lluvia y del riego. En profundidad la conductividad eléctrica es similar en ambos sectores. En Pichidegua, la conductividad eléctrica en los pozos varía de 440 a 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y, en San Fernando varía de 200 a 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Al comparar estos valores con los medidos por Méndez (2018) en aguas superficiales más cercanas a la cabecera del río Tinguiririca, se observa que son muy similares indicando que hay una estrecha relación entre la CE del agua subterránea y la CE del agua superficial.

Con respecto a la distribución de la CE en toda la zona estudiada, la Figura 31, que muestra la distribución del promedio de la CE, se puede destacar que se observa una clara diferencia entre los valores obtenidos para los pozos medidos en San Fernando y los medidos en Pichidegua. El agua subterránea del acuífero de San Fernando presenta valores que varían entre los 200 y los 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en Pichidegua, los valores varían entre 440 y 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta diferencia se debe a varios factores y al hecho que los valores medidos en ambas zonas se encuentran en diferentes posiciones con respecto a las principales áreas de recarga y, por tanto se puede pensar en diferentes tiempos de residencia y de interacción agua-roca.

Los datos obtenidos de los expedientes de la DGA permitieron estimar los caudales más probables en las zonas de interés, identificar las características de construcción de los pozos, y calcular la conductividad hidráulica y la transmisividad en los pozos de los que se disponía de pruebas de bombeo.

Al observar la distribución de la transmisividad en la Figura 20, en Pichidegua, se distingue que los menores valores (en verde), se encuentran más alejados del lecho del río, mientras que los valores en rojo y amarillo están ubicados más cerca del cauce principal. Como es de esperar, la zona del acuífero que está cerca del lecho del río tiene más flujo de agua subterránea que las zonas que están más alejadas del río y más cercanas al basamento rocoso. En San Fernando (Figura 19), al contrario que en Pichidegua, no se observa una distribución clara de los valores de Transmisividad. Esta

distribución tan heterogénea de los valores de la Transmisividad Hidráulica está asociada al ambiente sedimentario en el que se encuentran ubicados los pozos analizados, el que consiste en un abanico aluvial antiguo. Los depósitos de abanicos aluviales son más caóticos con respecto a los depósitos aluviales de valle, lo que influye en la presencia de lentes de litologías más finas, y en la heterogeneidad de la distribución de las distintas unidades litológicas.

Los distintos valores de resistividad eléctrica obtenidos de la geofísica fueron útiles para interpretar las diferentes capas de sedimentos presentes en el área de estudio a partir de marcadas diferencias de resistividad.

Los primeros metros se interpretaron como zonas muy permeables y saturadas en agua, lo que concuerda con el contexto en el que se encuentran las zonas medidas. Estas zonas se encuentran en sectores de una intensa actividad agrícola, por lo que los riegos sucesivos generan saturación de las primeras capas. Las diferencias de la resistividad eléctrica en los segmentos más profundos se deben a cambios litológicos.

En Pichidegua, los perfiles TEM son muy similares entre sí, distinguiéndose 4 segmentos. Se interpretan estas litologías como depósitos de un ambiente sedimentario aluvial de valle. El lugar en el que se realizó el terreno de geofísica podría corresponder con una paleo llanura de inundación del río Cachapoal, debido a las intercalaciones de arenas de grano medio, arenas de grano fino y arcillas interpretadas en el perfil.

En San Fernando, los TEM 1 y 2 (Figura 35 y Figura 36) presentan 4 segmentos de distintas resistividades, mientras que en el TEM 3 (Figura 37), se observan solo 3 de estos segmentos. Otra diferencia es que los límites entre los segmentos no se encuentran a la misma profundidad. Sin embargo, los valores de resistividad observados para cada uno de estos segmentos son muy similares, lo que indica que corresponden a las mismas capas, o a capas distintas pero asociadas a los mismos eventos deposicionales. Se observa una distribución más heterogénea de la resistividad que en Pichidegua, que ha sido interpretada como intercalaciones de arena de grano medio, arenas arcillosas, gravas y gravas arenosas.

Debido a que no se observa un nivel impermeable en los perfiles realizados se supone que el espesor de los acuíferos supera la profundidad de medición de las técnicas de geofísicas utilizadas. En particular, se puede asegurar que, en Pichidegua, el espesor del acuífero Cachapoal supera los 50 m, mientras que en San Fernando supera los 100 m. El ambiente sedimentario predominante en esta zona es un ambiente de abanico aluvial, lo que concuerda con la distribución más diversa de las distintas litologías.

Todo lo anteriormente expuesto ha permitido definir mejor los sistemas de agua subterránea y poder calcular la energía extraíble. Considerando las características acuíferas, la potencia térmica entregada por el agua subterránea resultó ser de 209,3 kW. Si se considera la instalación de una bomba de calor, este valor aumenta a 279,1 kW. Debido a que este caudal (10 l/s) puede ser extraído en todo momento, se puede suplir la demanda en todo momento. Estos resultados indican que considerando unas

dimensiones de 150 m<sup>2</sup> se pueden climatizar 6,5 invernaderos de destinados al cultivo de tomates, y 10 de lechugas.

Se obtuvo que se puede suplir la potencia demandada de 9,8 viviendas tipología T2 en Rengo (zona cercana a Pichidegua), y 10,6 en San Fernando. Además, se obtuvo que se puede suplir la demanda de 129,2 viviendas T5 en Rengo-Pichidegua, y 206,7 en San Fernando. Al comparar estos escenarios (el primero es el peor caso, mientras que el segundo el más común), se observa que hay una notable diferencia en la cantidad de viviendas a las que se les puede suplir su potencia demandada. Es importante mencionar que, para aplicar y desarrollar la climatización de ambientes en base a geotermia, se debe contar con viviendas aisladas. Es por esto que el peor escenario es descartable, ya que considera viviendas construidas antes del año 2000, período en el cual no existían normativas orientadas a la aislación de las viviendas. El caso más común corresponde al período posterior al año 2016, cuando la normativa de aislación y construcción de casas ya se había desarrollado.

Con respecto al período de retorno de la inversión calculado para el caso de invernaderos con lechugas, es importante destacar que no se consideraron las depreciaciones de los pozos ni de la bomba de calor geotérmica, no se realizó este cálculo aplicando criterios como el VAN o la TIR, los que habían permitido conocer de manera más exacta el período de retorno. Sin embargo, el uso de estos criterios se vuelve más importante en casos donde el período de retorno es mayor, o el análisis de factibilidad se realiza mes a mes.

Considerando los resultados hay que discutir que el número de perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en cada área no fue suficiente para poder interpolar mapas de temperatura, o superficies de isoterperatura e isoconductividad en profundidad.

Igualmente, los datos hidrogeológicos disponibles y generados en esta memoria no han permitido generar mapas piezométricos ya que los expedientes de construcción de pozos de la DGA, son relativos a pozos construidos desde 1965, en diferentes épocas del año.

## 7 CONCLUSIONES

---

Los antecedentes recopilados y los datos de terreno permitieron identificar diferentes sectores hidrogeológicos con variaciones de los parámetros hidrológicos y térmicos del agua subterránea en los acuíferos estudiados. En Pichidegua se registraron variaciones del nivel estático entre 25 cms (3PI) y 1,3 m (2PI) y, en San Fernando entre 35cms (2SF) y 4 m (5SF) lo que permite evidenciar la variabilidad de los sectores estudiados. Sin embargo, en la zona de estudio, que es un área de intensa actividad agrícola, es necesario estimar el continuo uso del agua subterránea para riego. Estas incertidumbres generan inconvenientes y desafíos a la hora de considerar un balance y/o el real uso del recurso en el tiempo.

Se definió en los sedimentos detríticos un acuífero cuya influencia externa de temperatura no desaparece a los 10-15 m como es usual, sino que se observan variaciones, en invierno y verano, hasta los 40 m de profundidad. El análisis conjunto de los niveles y de la temperatura sugiere que el acuífero es variable en cuanto a los flujos y a la temperatura debido, muy probablemente, a eventuales procesos de recarga y/o a flujos rápidos que ocurren durante todo el año.

No se observaron grandes variaciones de la conductividad eléctrica en profundidad, por lo que se puede afirmar que los flujos de agua que recargan el acuífero no presentan composiciones químicas tan diferentes a las del acuífero.

Se logró inferir la geometría del acuífero a partir de las interpretaciones de las distintas resistividades eléctricas obtenidas de las mediciones geofísicas. Se definieron distintas capas delimitadas por cambios importantes en los valores de las resistividades, los que se asociaron a distintas litologías. Las resistividades eléctricas medidas en Pichidegua concuerdan con valores asociados a depósitos tipo arenas intercaladas con arcillas, lo que es consistente con el contexto hidrogeológico de depósitos aluviales de valle. Las resistividades eléctricas obtenidas para San Fernando, coinciden con depósitos tipo arena con intercalaciones de gravas y niveles más finos tamaño arcilla y limo, lo que es consistente con un ambiente de abanico aluvial.

Estas litologías interpretadas permitieron explicar las distribuciones de los distintos valores de permeabilidad y, por tanto, Transmisividad Hidráulica obtenidas para los distintos sectores estudiados de los acuíferos detríticos. En Pichidegua, estos valores están distribuidos de manera homogénea, concordando con el ambiente sedimentario aluvial de valle en el que se enmarca la zona. En San Fernando, la distribución es más heterogénea, respondiendo a un ambiente sedimentario correspondiente a un abanico aluvial, en el que se mezclan depósitos antiguos, como se explicó en las discusiones, y depósitos más recientes.

En función de que no se observó la base de los acuíferos en los TEM's realizados en ambas zonas de estudio, se puede afirmar que el espesor de los acuíferos supera su profundidad de medición. En particular, se puede asegurar que, en Pichidegua, el espesor del acuífero Cachapoal supera los 50 m, mientras que en San Fernando supera los 100 m. Con esto se puede afirmar que el espesor saturado del acuífero Cachapoal interpretado alcanza los 38 m, mientras que el espesor interpretado para el Tinguiririca presenta un valor de 85 m.

A partir de la revisión de antecedentes de construcción de pozos, se obtuvieron datos de pruebas de bombeo, caudales asignados y distribución de cribas lo que permitió llevar a cabo una mejor interpretación con respecto a las características del acuífero, como por ejemplo entender de mejor manera dónde se encuentra el agua, si ésta se asocia a alguna litología concreta, que rendimientos se han obtenido, y las características de los pozos ya construidos en la zona.

Se logró valorar el potencial geotérmico de las zonas de estudio, a partir de la energía extraíble de un pozo que bombea 10 l/s (75% de los casos de ambas zonas de estudio), a partir del cálculo del número de invernaderos de 150 m<sup>2</sup> destinados al cultivo de tomates y lechugas, y del cálculo del número de viviendas de tipología T2 (peor escenario). El número de invernaderos de tomates cuya demanda se puede suplir es 6,5 mientras que de lechugas es 10. El número de viviendas tipología T2 cuya demanda es factible suplir en Rengo (cercañas de Pichidegua) es de 9,8, mientras que en San Fernando es de 10,6 (peor escenario). Con respecto a las viviendas más comunes, se obtuvo que en Rengo-Pichidegua se puede suplir la demanda de 129,2 viviendas T5, y 206,7 viviendas T8 en San Fernando.

Es importante mencionar que, para aplicar y desarrollar la climatización de ambientes en base a geotermia, se debe contar con viviendas correctamente aisladas, por lo que el cálculo del número de viviendas para el período posterior al 2016 es más correcto y pertinente que el realizado para el período pre 2000.

Se logró establecer un período de retorno de la inversión necesaria para implementar invernaderos destinados al cultivo de lechugas, obteniéndose un período de retorno de dos años. Es importante mencionar que el estudio de factibilidad económica queda propuesto, así como el análisis de las distintas tecnologías que se pudiesen aplicar. Además queda propuesta la comparación con otras energías renovables, como la biomasa, la energía solar y la energía eólica.

Se deben realizar mediciones de forma más distribuidas, con el objetivo identificar las distintas zonas del acuífero (recarga y descarga), interpretar de mejor manera la distribución la temperatura del agua subterránea y de la CE, para así relacionarlas a las distintas litologías y a los distintos ambientes sedimentarios y eventos deposicionales que generan los depósitos en los que se realizaron las mediciones.

Se recomienda realizar un estudio de las características de los distintos cultivos, para así conocer el uso del agua subterránea en más detalle, las distintas tasas de riego usadas para los diferentes cultivos, para así poder discernir e identificar el efecto del riego en los perfiles de temperatura obtenidos.

Para estudios futuros se recomienda realizar campañas de mediciones que tomen datos de manera más dispersa, ya que, al concentrar los datos en solo unos lugares, los resultados presentan un sesgo asociado a la distribución de las mediciones. Al no tener datos de manera más dispersa, el sesgo implica no interpretar de manera correcta la influencia de la geomorfología en el comportamiento del acuífero, tanto con respecto al flujo del agua subterránea, como a la temperatura de ésta. Esto provoca que la determinación de la estabilidad de la temperatura del agua subterránea y la variación del nivel estático se vea afectada por el ambiente sedimentario en el que se concentraron las mediciones.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- Abele, G. 1982. El lahar Tinguiririca: su significado entre los lahares chilenos= The Tinguiririca lahar: it's significance among Chilean lahars. *Informaciones Geográficas, Chile* (N° 29): 21-34.
- ABEM, Manual. ABEM WalkTEM Transient ElectroMagnetic User's Guide. 33 8000 97 v. 1.01 edn. ABEM Part of the Guideline Geo Group.
- Aguirre, L. 1960. Geología de los Andes de Chile Central, provincial de Aconcagua. Instituto de Investigaciones geológicas, Boletín 9: 70 p. Santiago.
- Agromet.cl, 2018. *Agromet*. [online] Available at: <https://www.agromet.cl/> Accessed 5 Aug. 2018].
- Aiguasol (2016) Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile. Estudio para CIFES y el Ministerio de Energía, 216 páginas.
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J., & Korkka-Niemi, K. 2014. Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2(1), 1.
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gana, P., Kay, S.M., Muñoz, N., Wyss, A. R., Zurita, E. 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°-36°S.L.). *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 15, p. 117-139.
- Charrier, R., Wyss, A.R., Flynn, J.J., Swisher III, C.C., Norell, M.A., Zapatta, F., Mckenna, M.C., Novacek, M.J. 1996. New evidence for Late Mesozoic-Early Cenozoic evolution of the Central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 9, p. 393-422.
- Clark, M. K., House, M. A., Royden, L. H., Whipple, K. X., Burchfiel, B. C., Zhang, X., & Tang, W. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 33(6), 525-528.
- Contreras J. P.; Schilling, M. 2012. Geología del Área San Fernando – Curicó, Regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins y del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica XXX: XX p. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Copper, H. J. & Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation and summarizing well-field history: *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 27, no. 4, p. 526-534 (Vol. 27).
- DARH, D. d. 2003. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VIª Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Santiago.

- DCPRH, D. d. 2015. Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'higgins. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA), Santiago.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2007. Actualización de la oferta del recurso hídrico subterráneo en el sector acuífero de Codegua, VI Región. SDT N° 245, Agosto 2007.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Diagnóstico de Aguas Subterráneas VI Región.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2005. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VIa Región. SDT N°209.
- Drake, R.; Munizaga, F.; Padilla, H.; Vergara, M. 1982. Distribución y edades K/Ar de volcánicas post-Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32 y 36°S: Implicaciones estratigráficas y tectónicas para el Meso-Cenozoico de Chile Central. En Congreso Geológico Chileno, 3., Concepción, 8-14 noviembre 1982: pp D41-D78.
- El Mercurio. (s.f.). *emol.com*. Obtenido de <http://www.emol.com/noticias/economia/2013/09/17/620353/crean-primer-invernadero-climatizado-con-energia-geotermica-para-mejorar-cultivos.html>
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., Comte, D. 2008. Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°-35°S). *Tectonics*, vol. 27, TC1005, 22 p.
- Fitterman, D., & Stewart, M. 1986. Transient electromagnetic sounding for groundwater. *GEOPHYSICS*, 995-1005.
- Fitts, C.R., 2013, 3 - Principles of Flow BT - Groundwater Science (Second Edition), in Academic Press, Boston, p. 47–96.
- Fock, A. 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con Mención Geología, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 179 p.
- Harry, M. 2008. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. *Elsevier*, 544.
- Hauser, A. 1990. Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua, VI Región. Sernageomin. Escala 1:250.000.

- Hayashi, M. 2004. Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1-3), 119-128.
- Huntley, D. 1986. Relations Between Permeability and Electrical Resistivity in Granular Aquifers. *Ground Water*, 24(4).
- Hurtado, N, Valencia, A., Morata, D., & Maripanguí, R. 2017. Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos.
- Instrucciones de operación del Solinst TLC 107(2017).
- Jaupart, C., & Mareschal, J. C. 1999. The thermal structure and thickness of continental roots. *Lithos*, 48(1-4), 93-114.
- Klohn, C. 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín N°8, 95 p.
- Lund, J. & Boyd, T. 2015. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Elsevier*.
- Manual del Operador del KD2Pro Analizador de propiedades termales, 2017.
- Marcé, J. Comparación de diferentes sistemas de climatización aplicados a un. *estudios*, 2(15), 3.
- Martínez, J. B.-A. 2009. Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion–extrusion effects: The river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain). *Elsevier*, 108(3-4), 161-168.
- Morrone, B. C. 2014. Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different. *Elsevier*.
- Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S. & Parada, M. Á. 2015. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin–Chile (33.5° S). *Renewable Energy*, 76, 186-195.
- Omer, A. M. 2016. Performance, modeling, measurements and simulation of energy efficient for heat exchanger, refrigeration and air conditioning. *African Journal of Agricultural Science and Technology (AJAST)*, 4(5), 692-704.
- Paksoy, H. Ö., & Beyhan, B. (2015). Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology. In *Advances in thermal energy storage systems* (pp. 533-548).
- Palacky, G.J., 1987, Resistivity characteristics of geologic targets, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Theory*: M.N. Nabighian, Ed., Society of Exploration Geophysicists

- Persico, M. 2016. La Unidad Guanaco en el Valle del Río Tinguiririca (34°55'S): Características estratigráficas y geoquímicas e implicancias tectónicas para el Cretácico Tardío en el Margen Andino. Memoria de Título, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago.
- Plastic Technology MEXICO. (s.f.). *pt-mexico.com*. Recuperado el 6 de Agosto de 2018, de <https://www.pt-mexico.com/productos/chillers-con-eficiencia-energetica>
- Radio Agricultura. (s.f.). *elagro.radioagricultura.cl*. Obtenido de <http://elagro.radioagricultura.cl/2016/01/25/fdf-presenta-primera-bomba-de-calor-fabricada-en-chile-para-la-industria-fruticola/>
- Rauld, R. 2002. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile Central (33°S). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 444 p.
- Self S., Reddy B. y Rosen M. 2013. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy* 101. P 341-348.
- Sellés, D.; Gana, P.. Geología del area Talagante-San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. Santiago : SERNAGEOMIN, 2001. 30p.: 1 mapa..
- SERNAGEOMIN. Mapa Geológico de Chile 1:1000000. AUTOR: Servicio Nacional de Geología y Minería - SERNAGEOMIN, 2003.
- Schorr Rubio, J. 2017. Cuantificación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante sistemas de información geográfica, para la implementación de bombas de calor geotérmicas para calefacción en la ciudad de Talca. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146739>
- Tapia, F. 2010. Análisis estructural del sector occidental de la faja plegada y corrida de Malargüe en el curso superior del río Colorado de Lontué (35°18' y 35°23'S), región del Maule, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Tapia, F. 2015. Evolución tectónica de los Andes Centrales del Sur durante el Cenozoico Superior. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, mención Geología, Universidad de Chile, Departamento de Geología, 340 p.
- Theis, C. 1935. The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage (Vol. 16). Eos, Transactions American Geophysical Union.
- Thiele, R. 1980. Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana, SERNAGEOMIN, Mapas geológicos N°8, escala 1:250.000, 51 p.

- UNTEC, 2014. Alternativas tecnológicas para calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena. Programa de gestión y economía ambiental. 210 pp.
- Wall, R.; Gana, P.; Gutiérrez, A.; SERNAGEOMIN. Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla: regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Escala 1:100.000. Santiago : SERNAGEOMIN, 1996. 20 p.: 1 mapa
- Wall, R.; Sellés, D., Gana, P. 1999. Área Til Til-Santiago, Región Metropolitana. SERNAGEOMIN, Mapas geológicos N° 11, escala 1:100.000, Santiago.
- Walton, N. 1989. Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids—What is Their Precise Relationship? *Elsevier*, 72(3), 275-292.
- Zapatta, F., 1995. Nuevos antecedentes estratigráficos y estructura del área de Termas del Flaco, valle del río Tinguiririca, VI Región, Chile. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 122 p.
- Zenteno, A. 2013. Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpía. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago.
- Zhdanov, M. S. 2009. *Geophysical electromagnetic theory and methods* (Vol. 43). Elsevier.

## 9 ANEXO

### INTERPOLACIÓN DE COTAS HIDRÁULICAS

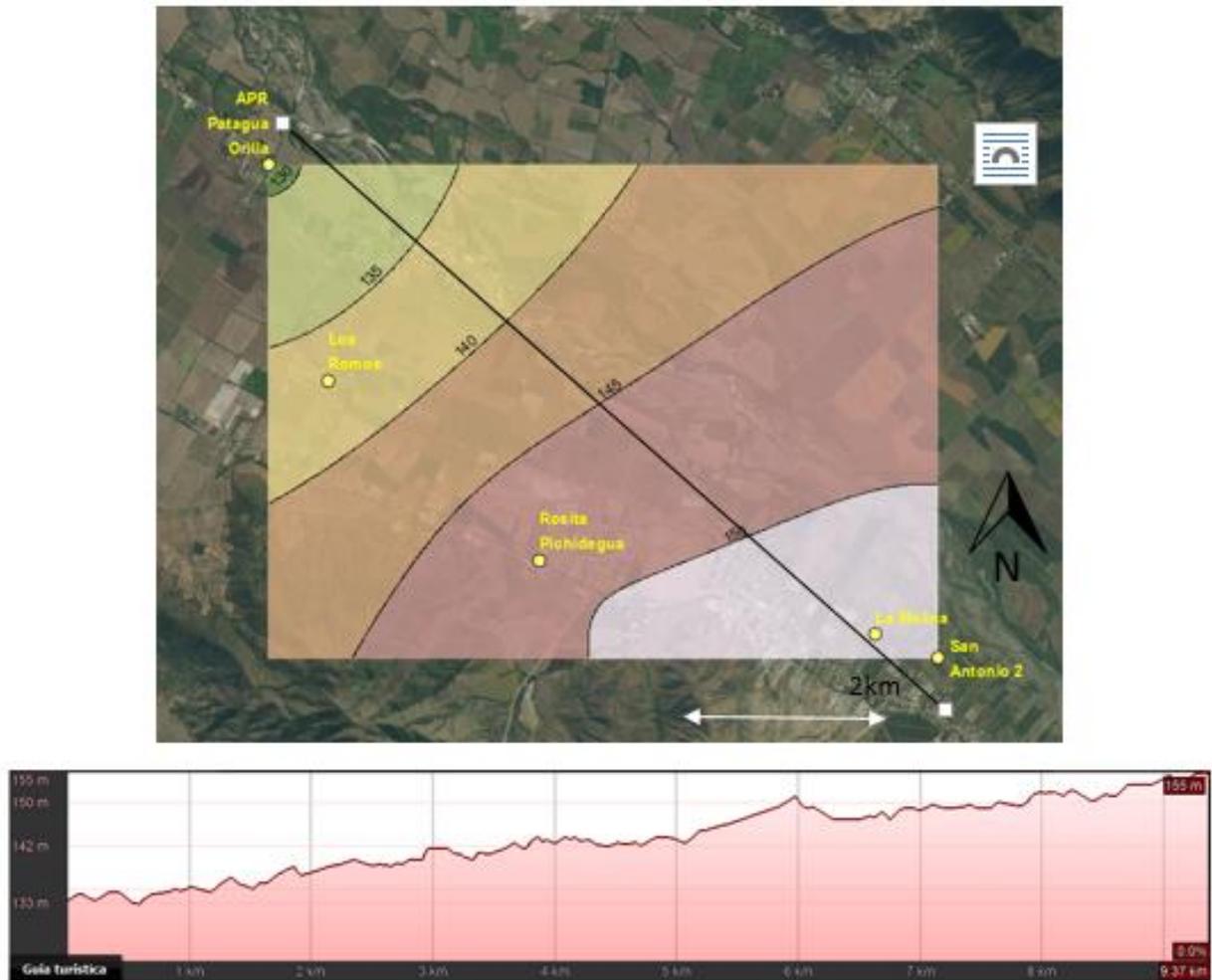


Figura 41: Cotas hidráulicas en el área de interés en Pichidegua. Los puntos amarillos indican la posición de los pozos medidos. Además, se presenta un perfil topográfico.

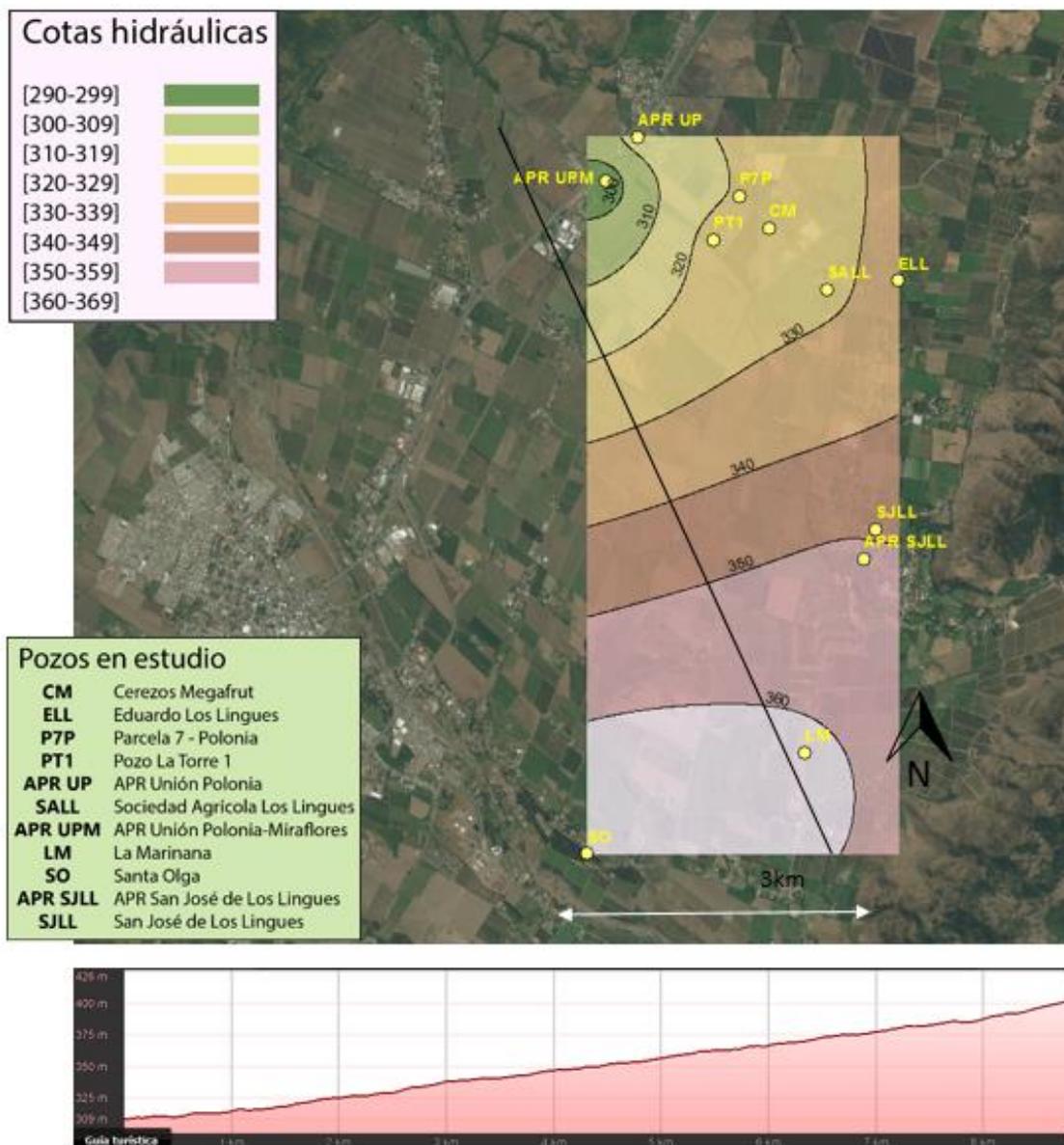


Tabla 7: Potencia máxima para distintos períodos. Tomado de UNTEC, 2014.

Período	Ciudades	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5	Tip 6	Tip 7	Tip 8	Tip 9
Pre 2000	Rancagua	242,6	119,6	140,2	87,4	158,1	112,0	157,1	92,6	157,6
	Rengo	260,5	128,5	150,6	94,2	169,9	120,4	169,0	99,8	169,5
	Sn. Fdo.	239,3	118,0	138,3	86,2	156,0	110,4	154,9	91,3	155,4
	Talca	223,9	110,3	129,3	80,4	145,8	103,2	144,6	85,0	145,2
	Chillán	255,8	126,1	147,8	92,4	166,8	118,2	165,9	97,9	166,3
	Concepción	206,2	101,5	118,9	73,6	134,1	94,8	132,8	77,9	133,3
	Temuco	244,7	120,7	141,4	88,2	159,5	113,0	158,5	93,5	159,0
	Osorno	264,2	130,3	152,8	95,6	172,4	122,2	171,5	101,3	171,9
	Pto. Montt	210,9	103,8	121,7	75,4	137,2	97,0	135,9	79,8	136,5
Coyhaique	322,0	159,0	186,5	117,5	210,5	149,4	210,1	124,7	210,4	
2000-2007	Rancagua	110,6	76,3	89,5	57,7	61,6	67,3	73,4	65,3	75,9
	Rengo	119,0	82,1	96,3	62,3	66,5	72,6	79,3	70,6	81,9
	Sn. Fdo.	109,1	75,2	88,3	56,8	60,7	66,4	72,3	64,3	74,8
	Talca	100,2	69,4	81,5	52,4	54,7	61,0	65,7	59,2	68,1
	Chillán	115,0	79,6	93,5	60,6	63,2	70,3	76,1	68,5	78,6
	Concepción	92,0	63,8	74,8	47,8	50,0	55,9	59,9	54,0	62,2
	Temuco	109,0	75,6	88,8	57,3	59,2	66,4	71,6	64,8	74,1
	Osorno	117,9	81,8	96,1	62,3	64,2	72,0	77,9	70,5	80,4
	Pto. Montt	92,5	64,4	75,7	48,2	49,4	56,3	59,9	54,6	62,2
Coyhaique	142,5	99,1	116,6	76,2	77,0	87,5	94,6	86,3	97,5	
2007-2016	Rancagua	101,9	65,5	86,5	57,7	55,2	65,2	64,9	65,3	74,7
2016	Rengo	109,8	70,5	93,1	62,3	59,6	70,3	70,2	70,6	80,7
	Sn. Fdo.	100,5	64,5	85,3	56,8	54,4	64,3	63,9	64,3	73,6
	Talca	76,2	56,5	74,9	52,4	46,3	55,9	54,5	59,2	57,6
	Chillán	87,6	64,8	86,0	60,6	53,6	64,4	63,4	68,5	66,7
	Concepción	69,8	51,8	68,7	47,8	42,3	51,2	49,6	54,0	52,5
	Temuco	80,1	59,8	70,5	57,3	48,6	59,1	57,6	63,4	62,7
	Osorno	86,8	64,8	76,3	62,3	52,9	64,1	62,8	68,9	68,2
	Pto. Montt	56,1	43,8	50,7	48,0	34,5	37,6	40,1	43,9	45,8
	Coyhaique	70,1	57,4	65,2	57,2	45,7	47,9	46,1	55,9	58,7
Post 2016	Rancagua	69,2	45,7	61,1	46,2	37,5	44,1	42,3	44,1	57,6
	Rengo	60,8	41,0	55,4	36,7	31,9	38,7	36,0	37,4	50,7
	Sn. Fdo.	55,4	37,5	50,6	33,2	28,9	35,2	32,4	33,7	46,0
	Talca	52,4	41,9	56,1	42,2	34,2	40,3	38,5	40,2	43,2
	Chillán	56,5	46,0	61,6	45,3	37,1	44,0	42,1	43,9	46,9
	Concepción	40,6	34,1	46,0	31,6	26,4	32,2	29,5	31,1	33,2
	Temuco	49,2	41,1	46,2	38,7	32,4	39,0	36,5	38,2	40,7
	Osorno	53,5	44,6	50,2	42,2	35,3	42,5	40,1	41,8	44,5
	Pto. Montt	40,5	34,3	38,4	31,3	26,6	27,4	29,6	31,0	33,2
Coyhaique	62,5	52,7	59,2	49,0	41,8	42,9	41,0	49,6	52,6	

Tabla 8: Cantidad de viviendas por tipología en distintas ciudades, para distintos períodos. Tomado de UNTEC, 2014.

Ciudades	Tipologías	<2000	2000-2007	2008-2013	Total
Rancagua	T1	8.382	1.649	1.414	11.445
	T2	2.023	398	341	2.763
	T3	2.312	455	390	3.157
	T4	1.048	206	177	1.431
	T5	10.478	2.062	1.767	14.306
	T6	6.250	1.230	1.054	8.534
	T7	1.346	265	227	1.837
	T8	4.645	914	783	6.343
	T9	4.645	914	783	6.343
	Total	41.130	8.093	6.937	56.159
Rengo	T1	1.826	614	527	2.967
	T2	441	148	127	716
	T3	504	169	145	818
	T4	228	77	66	371
	T5	2.282	768	658	3.708
	T6	1.361	458	393	2.212
	T7	786	264	227	1.277
	T8	581	195	168	944
	T9	581	195	168	944
	Total	8.589	2.890	2.477	13.957
San Fernando	T1	1.636	506	434	2.575
	T2	395	122	105	622
	T3	451	140	120	710
	T4	204	63	54	322
	T5	2.044	632	542	3.219
	T6	1.220	377	323	1.920
	T7	368	114	98	579
	T8	2.609	807	692	4.107
	T9	2.609	807	692	4.107
	Total	11.536	3.568	3.058	18.162
Talca	T1	10.986	1.002	859	12.846
	T2	2.652	242	207	3.101
	T3	3.031	276	237	3.544
	T4	1.373	125	107	1.606
	T5	13.732	1.252	1.073	16.057
	T6	8.192	747	640	9.579
	T7	6.062	553	474	7.088
	T8	1.978	180	155	2.313
	T9	1.978	180	155	2.313
	Total	49.983	4.558	3.907	58.447
Chillán	T1	8.408	1.395	1.196	10.998
	T2	2.029	337	289	2.655
	T3	2.319	385	330	3.034
	T4	1.051	174	149	1.375
	T5	10.509	1.744	1.495	13.748
	T6	6.269	1.040	892	8.201
	T7	1.562	259	222	2.043
	T8	2.767	459	394	3.620
	T9	2.767	459	394	3.620
	Total	37.682	6.253	5.360	49.295

Concepción	T1	10.104	479	411	10.994
	T2	2.439	116	99	2.654
	T3	2.787	132	113	3.033
	T4	1.263	60	51	1.374
	T5	12.630	599	513	13.742
	T6	7.534	357	306	8.198
	T7	1.429	68	58	1.555
	T8	2.101	100	85	2.286
	T9	2.101	100	85	2.286
	Total	42.389	2.010	1.723	46.122
Temuco	T1	9.947	2.439	2.091	14.477
	T2	2.401	589	505	3.494
	T3	2.744	673	577	3.994
	T4	1.243	305	261	1.810
	T5	12.434	3.049	2.614	18.096
	T6	7.417	1.819	1.559	10.795
	T7	2.518	617	529	3.665
	T8	6.004	1.472	1.262	8.738
	T9	6.004	1.472	1.262	8.738
	Total	50.712	12.436	10.659	73.807
Osorno	T1	4.041	1.238	1.062	6.341
	T2	975	299	256	1.531
	T3	1.115	342	293	1.749
	T4	505	155	133	793
	T5	5.051	1.548	1.327	7.926
	T6	3.013	923	792	4.728
	T7	3.743	1.147	983	5.873
	T8	5.752	1.763	1.511	9.025
	T9	5.752	1.763	1.511	9.025
	Total	29.948	9.178	7.867	46.992
Puerto Montt	T1	4.761	3.299	2.828	10.888
	T2	1.149	796	683	2.628
	T3	1.313	910	780	3.004
	T4	595	412	353	1.361
	T5	5.952	4.124	3.535	13.610
	T6	3.550	2.460	2.109	8.119
	T7	2.606	1.806	1.548	5.960
	T8	5.461	3.784	3.243	12.488
	T9	5.461	3.784	3.243	12.488
	Total	30.849	21.375	18.322	70.546
Coyhaique	T1	3.656	1.393	1.194	6.243
	T2	889	339	290	1.517
	T3	1.659	632	542	2.832
	T4	59	23	19	101
	T5	1.016	387	332	1.734
	T6	990	377	323	1.691
	T7	973	371	318	1.662
	T8	843	321	275	1.439
	T9	843	321	275	1.439
	Total	10.927	4.163	3.568	18.658

Tabla 9: Demanda de calefacción y potencia viviendas período post 2016. Tomado de UNTEC, 2014.

Ciudades	Parámetros	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Rancagua	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	69,2	45,7	61,1	46,2	37,5	44,1	42,3	44,1	57,6
	P [W]	3.911,3	10.105,3	6.288,5	2.403,7	2.538,6	3.731,8	1.373,3	1.765,9	2.288,4
	Dneta [kWh]	2.462,2	5.452,1	3.545,8	2.210,5	2.563,7	3.021,3	1.129,4	1.622,6	1.422,8
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	43,6	24,6	34,4	42,5	37,9	35,7	34,8	40,6	35,8
Rengo	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	60,8	41,0	55,4	36,7	31,9	38,7	36,0	37,4	50,7
	P [W]	3.434,5	9.080,2	5.706,4	1.907,8	2.162,2	3.276,9	1.167,3	1.494,4	2.016,6
	Dneta [kWh]	2.547,9	6.021,6	3.962,6	1.893,9	2.453,2	3.032,9	1.074,3	1.530,1	1.483,7
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	45,1	27,2	38,5	36,4	36,2	35,8	33,1	38,3	37,3
San Fernando	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	55,4	37,5	50,6	33,2	28,9	35,2	32,4	33,7	46,0
	P [W]	3.131,9	8.286,4	5.211,5	1.727,2	1.957,2	2.979,1	1.050,6	1.349,7	1.830,6
	Dneta [kWh]	3.252,8	7.914,8	5.154,1	2.308,0	2.968,6	3.773,8	1.318,1	1.854,6	1.884,2
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	57,6	35,8	50,0	44,4	43,8	44,6	40,6	46,4	47,4
Talca	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	52,4	41,9	56,1	42,2	34,2	40,3	38,5	40,2	43,2
	P [W]	2.958,3	9.278,8	5.777,5	2.196,0	2.316,8	3.416,5	1.247,6	1.609,0	1.718,0
	Dneta [kWh]	2.345,2	7.628,9	4.884,8	2.714,7	3.147,1	3.769,8	1.387,2	1.985,0	1.338,1
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	41,5	34,5	47,4	52,2	46,5	44,5	42,8	49,6	33,7
Chillán	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	56,5	46,0	61,6	45,3	37,1	44,0	42,1	43,9	46,9
	P [W]	3.191,6	10.164,9	6.342,6	2.355,4	2.514,1	3.729,0	1.365,1	1.757,2	1.865,8
	Dneta [kWh]	3.522,7	11.717,2	7.504,7	3.871,6	4.447,2	5.596,7	2.068,0	2.903,2	2.037,0
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	62,3	53,0	72,9	74,5	65,7	66,1	63,8	72,6	51,2
Concepción	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	40,6	34,1	46,0	31,6	26,4	32,2	29,5	31,1	33,2
	P [W]	2.292,3	7.551,4	4.738,4	1.644,3	1.788,8	2.725,2	955,9	1.243,3	1.319,7
	Dneta [kWh]	1.109,4	4.222,8	2.810,1	1.567,9	2.028,7	2.331,4	801,9	1.206,2	605,7
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	19,6	19,1	27,3	30,2	30,0	27,5	24,7	30,2	15,2
Temuco	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	49,2	41,1	46,2	38,7	32,4	39,0	36,5	38,2	40,7
	P [W]	2.777,9	9.090,2	4.763,2	2.009,8	2.190,1	3.306,5	1.184,8	1.528,8	1.618,9
	Dneta [kWh]	2.500,2	8.737,3	4.127,9	2.860,2	3.464,6	4.352,5	1.557,1	2.210,7	1.436,3
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	44,3	39,5	40,1	55,0	51,2	51,4	48,0	55,3	36,1
Osorno	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	53,5	44,6	50,2	42,2	35,3	42,5	40,1	41,8	44,5
	P [W]	3.022,8	9.866,4	5.173,9	2.194,2	2.392,6	3.599,7	1.300,2	1.672,8	1.769,8
	Dneta [kWh]	4.409,2	15.130,2	7.320,4	4.454,9	5.202,2	6.868,6	2.485,9	3.434,9	2.560,5
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	78,0	68,4	71,1	85,7	76,8	81,1	76,7	85,9	64,4
Puerto Montt	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	40,5	34,3	38,4	31,3	26,6	27,4	29,6	31,0	33,2
	P [W]	2.286,5	7.583,7	3.954,6	1.624,6	1.798,1	2.319,5	958,6	1.240,1	1.319,2
	Dneta [kWh]	2.023,5	7.313,0	3.391,9	2.378,6	2.996,2	2.805,2	1.274,2	1.854,4	1.140,4
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	35,8	33,1	32,9	45,8	44,3	33,1	39,3	46,4	28,7
Coyhaique	Pi [W/m <sup>2</sup> ]	62,5	52,7	59,2	49,0	41,8	42,9	41,0	49,6	52,6
	P [W]	3.532,1	11.667,3	6.095,9	2.549,0	2.829,5	3.633,8	1.328,1	1.983,4	2.090,2
	Dneta [kWh]	5.527,3	19.265,4	9.347,0	5.263,6	6.238,2	6.787,1	2.494,3	4.161,2	3.267,0
	Dneta [kWh/m <sup>2</sup> ]	97,8	87,1	90,7	101,3	92,1	80,1	76,9	104,0	82,2