



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA EN LA
SUBCUENCA DEL MAIPO MEDIO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CAMILA FRANCISCA VEGA ALVARADO

PROFESOR GUÍA

JUVENAL LETELIER VILLALÓN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MAURICIO MUÑOZ MORALES
DOLORINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil
POR: Camila Vega Alvarado
FECHA: Enero 2020
PROFESOR GUÍA: Juvenal Letelier

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA EN LA SUBCUENCA DEL MAIPO MEDIO

La energía geotérmica es una fuente inagotable de energía que puede ser extraída de la tierra por medio del bombeo de fluidos calentados en su interior, aprovechando la gran inercia térmica que se da en el subsuelo. Este intercambio de calor se realiza para proyectos geotérmicos de baja entalpía en pozos de energía o bien por medio del uso de aguas subterráneas.

Este estudio evalúa el uso de geotermia somera a través de la estimación de parámetros hidrogeológicos, que permitan estudiar los distintos sistemas de intercambio para bombas geotérmicas en la subcuenca del Maipo Medio.

Estos sistemas de intercambios consideran bombas de calor de tipo vertical cerrado y abierto, así como sistema horizontal cerrado, para la calefacción de invernadero típico de la zona para cultivo de tomates.

La metodología considera un análisis hidrogeológico con información de la Dirección General de Aguas (DGA), una estimación de parámetros hidráulicos y su interpretación, además se estudia la profundidad del agua subterránea y su temperatura, para evaluar la factibilidad de los sistemas verticales abiertos. Se realizan secciones estratigráficas y un estudio del calor extraíble de los sedimentos con el fin de estimar la capacidad de los sistemas verticales cerrados. Además de la estimación de potencia extraíble para sistemas horizontales.

Los resultados muestran que el factor determinante más importante en la instalación de bombas de calor geotermiales del tipo colector vertical será la profundidad del nivel estático. Zonas con niveles freáticos someros serán más convenientes para la instalación tanto de bombas con intercambiadores cerrados verticales (BHE), como bombas de calor de agua subterránea (GWHP). Otro factor determinante es la conductividad hidráulica, que aumenta la eficiencia de los intercambiadores de calor (BHE) y controla los abatimientos que sufrirá la napa en el caso de los sistemas abiertos (GWHP).

En las zonas convenientes para la instalación de bombas geotérmicas, será más favorable instalar sistemas abiertos que ocupen el agua del acuífero (GWHP), en los sectores menos convenientes se deberá privilegiar la instalación de sistemas de intercambiadores cerrados.

*A todas las mujeres que vinieron antes de mí, por hacer de esta facultad un lugar mejor
A todas las mujeres que vendrán, espero haber dejado mi contribución para ustedes
Ser ingeniera en un mundo machista, es un acto de revolución ♥*

AGRADECIMIENTOS

De las certezas que me llevo de este lugar y este trabajo que está en tus manos (virtuales probablemente) es que no hubiese podido hacerlo sin el apoyo incondicional de los que me rodean.

GRACIAS mamá, has sido y serás mi pilar durante toda mi vida, sin tu apoyo de madre leona no hubiese llegado ni siquiera a esta facultad, gracias por no dejarme caer en los momentos más duros, y como solo nosotras lo sabemos, fueron muchos. A mis abuelos, este trabajo es por y para ustedes, les agradezco todos sus pensamientos y cariños que me han dado con tanta ternura durante todos estos años, gracias familia por solo apoyarme y sentirse orgullosos de mí.

Vine a esta facultad a mucho más que estudiar, por lo que todas las personas que me encontré en el camino forman parte fundamental de mi formación. A todos mis amigas y amigos, gracias por reírse fuerte, por bailar, por hablar sin parar, por estudiar de noche, criticar y rabiarme conmigo. Gracias por su apoyo, lo sentí muy fuerte y sincero sobre todo en esta última etapa.

Gracias a todas las personas que tuvieron una palabra de ánimo durante esta y todas las etapas, no saben cómo se los agradezco, el apoyo desinteresado ha sido lo más lindo que me llevo de esta facultad.

Y sin duda, gracias Chile por despertar este 2019, me hacen salir con más ganas a poder transformar este país, ahora ya no como estudiante organizada si no como profesional, espero aportar todo mi conocimiento a un nuevo país justo y feminista.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Formulación del estudio	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. ANTECEDENTES GENERALES.....	4
2.1. Área de estudio	4
2.2. Hidrología	7
2.2.1. Red Hidrográfica.....	7
2.2.2. Cuerpos de Agua.....	9
2.2.3. Precipitaciones	10
2.3. Invernaderos y cultivos.....	13
2.3.1. Demanda térmica del tomate.....	14
2.4. Caracterización geomorfológica	16
2.5. Caracterización geológica	18
2.6. Hidrogeología.....	20
2.6.1. Acuífero Maipo-Mapocho.....	20
2.6.2. Propiedades hidráulicas	21
2.6.3. Pruebas de bombeo	23
2.6.4. Temperatura en aguas subterráneas.....	28
2.7. Comportamiento termal del suelo	29
2.7.1. Difusividad Térmica	29
2.7.2. Temperatura del subsuelo	30
2.8. Bombas de Calor Geotérmicas	32
2.8.1. Coeficiente de rendimiento	37
3. METODOLOGÍA	39
3.1. Propiedades Hidrogeológicas	39
3.1.1. Variación del nivel estático	39
3.1.2. Abatimiento.....	40
3.1.3. Transmisividad.....	40
3.1.4. Conductividad.....	40

3.1.5.	Distribución de sedimentos.....	41
3.2.	Sistemas horizontales cerrados	42
3.2.1.	Temperatura	42
3.2.2.	Cálculo de la evolución de temperatura en terreno	42
3.2.3.	Cálculo Coeficiente de Rendimiento (COP).....	42
3.2.4.	Determinación del área de los intercambiadores de calor	42
3.3.	Sistemas verticales abiertos.....	43
3.3.1.	Determinación de caudales	44
3.3.2.	Temperatura del agua subterránea.	44
3.3.3.	Coeficiente de rendimiento (COP)	44
3.3.4.	Cálculo potencia generada	44
3.3.5.	Profundidad pozos y dirección del flujo	45
3.4.	Sistemas verticales cerrados	45
3.4.1.	Potencial de extracción del suelo	45
4.	RESULTADOS	47
4.1.	Propiedades hidrogeológicas	47
4.1.1.	Variación del nivel estático	47
4.1.2.	Cotas hidráulicas	48
4.1.3.	Abatimiento.....	49
4.1.4.	Transmisividad.....	49
4.1.5.	Conductividad.....	50
4.1.6.	Distribución de sedimentos.....	51
4.2.	Intercambiadores horizontales	57
4.2.1.	Evolución de temperatura en terreno.....	57
4.2.2.	Estimación del COP	58
4.2.3.	Área intercambiadores.....	60
4.3.	Intercambiadores verticales abiertos.....	61
4.3.1.	Caudales	61
4.3.2.	Temperatura agua subterránea	62
4.3.3.	COP y potencia generada	63
4.3.4.	Profundidad de perforación	64
4.4.	Intercambiadores verticales cerrados.....	67
5.	DISCUSIONES	68

5.1.	Sistemas intercambiadores horizontales cerrados	73
5.2.	Sistemas intercambiadores verticales abiertos	73
5.3.	Sistemas intercambiadores verticales cerrados	75
6.	CONCLUSIONES.....	76
7.	BIBLIOGRAFÍA	77
8.	ANEXOS	79
8.1.	ANEXO 1: Cálculo cota hidráulica	79
8.2.	ANEXO 2: Pozos con información estratigráfica.....	81
8.3.	ANEXO 3: Perfiles estratigráficos.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de recursos geotérmicos [°C]. Fuente: Autores señalados. ..	2
Tabla 2: Subcuencas de la cuenca del Río Maipo. Fuente: Dirección General de Aguas.....	4
Tabla 3. Cantidad de habitantes en las comunas de la subcuenca. Fuente: CENSO 2017.	5
Tabla 4: Estaciones Fluviométricas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: DGA 2019.	7
Tabla 5: Estaciones Meteorológicas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: DGA 2019.	11
Tabla 6: Requerimiento energético invernadero para cultivo de tomate en distintas temperaturas ambientales. Fuente Hurtado 2017.....	16
Tabla 7: Influencia de la conductividad hidráulica en parámetros termales de diferentes tipos de suelos. Fuente: Sarbu y Sebarchievici (2015).	21
Tabla 8: Valores para difusividad térmica en distintos tipos de materiales (Andújar 2016).....	30
Tabla 9:Valores típicos de extracción de calor de una superficie para diferentes tipos de suelo. Fuente: Pipelife (2015).....	43
Tabla 10: Valores típicos de extracción de calor en litologías. Modificado de Ondreka et al 2007.	46
Tabla 11: Parámetros para el cálculo de la temperatura en el subsuelo.	57
Tabla 12:Temperatura mínima, máxima y promedio a 1,5m y 3m de profundidad	58
Tabla 13: COP mínimo, máximo y promedio de intercambiadores enterrados a 1,5m y 3m	59
Tabla 14. Resultados para el análisis de sensibilidad del COP a 1.5 m de profundidad.	60
Tabla 15: Cálculo calor a extraer del suelo. Fuente: Elaboración propia.	61
Tabla 16. Estimación del área de la superficie para intercambiadores horizontales. Fuente: Elaboración propia	61
Tabla 17: Resultados para COP a distintas Temperaturas de agua subterránea. .	63
Tabla 18: Potencia Agua subterránea. Fuente: Elaboración Propia.	64
Tabla 19: Potencia Bomba GWHP. Fuente: Elaboración Propia.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Capacidad total instalada en Chile [24088,69 MW] distribuida en distintas fuentes de energía para los principales sistemas eléctricos del país hasta agosto 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la Comisión Nacional de Energía, iniciativa Energía Abierta.....	1
Figura 2: Delimitación subcuencas cuenca Río Maipo. Fuente: Elaboración propia con datos oficiales DGA (2018).....	5
Figura 3: Comunas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: Elaboración propia con datos IDE CHILE.	6
Figura 4: Red hidrográfica principal y estaciones fluviométricas en la subcuenca. Fuente: Elaboración propia con datos oficiales DGA 2018.	8
Figura 5. Registro del caudal promedio mensual en la estación Angostura en Valdivia de Paine, período 2007-2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos oficiales de la red fluviométrica nacional de la DGA 2019.....	9
Figura 6: Colección imágenes satelitales Landsat, para años seleccionados. Fuente: (CR)2. 2019.....	10
Figura 7:Estaciones fluviométrica en la subcuenca del Maipo Medio.	12
Figura 8. Registro de las precipitaciones promedio mensuales en la estación Angostura en Valdivia de Paine, período 2007-2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos oficiales de la red meteorológica nacional de la DGA 2019.	13
Figura 9. Temperaturas óptimas del tomate. Fuente: elaboración propia con datos de cultivo INIA 2017.	15
Figura 10:Caracterización Geomorfológica de la Subcuenca de la Laguna Aculeo. Fuente: Elaboración propia con información entregada por el SERGAGEOMIN. ..	17
Figura 11. Distribución superficial de los distintos sedimentos de la Cuenca de Santiago. Fuente: Modificado de Brantt, 2011; Rauld 2011 y Yañex et al., 2014. .	19
Figura 12: Gráfica semilogarítmica de tiempo-abatimiento teórico de acuíferos no consolidados. Fuente: Kruseman (1991).	24
Figura 13: Variaciones estaciones de perfiles de temperatura en aguas subterráneas. A la izquierda, perfiles correspondientes a zonas de recarga y en la derecha a zonas de descarga.	29
Figura 14: Comportamiento térmico del suelo para profundidades próximas a la superficie (entre 0 y 4 m). Fuente: Andújar et al. (2016).....	31
Figura 15: Comparativa de temperatura en: ambiente, suelo y agua subterránea (izquierda). Perfiles de temperaturas en profundidad para invierno y verano en suelos húmedos y secos (derecha). Fuente: RETScreen (2005).....	33
Figura 16: Ciclo de una bomba de calor. Fuente: Aguasol (2016).	34
Figura 17: Intercambiadores en sistemas horizontales cerrados (GCHPs). Fuente: RETScreen International (2005).....	35
Figura 18: Intercambiadores en sistemas verticales cerrados (GCHPs). Fuente: RETScreen International 2005.	35

Figura 19: Intercambiadores en sistemas verticales abiertos (GWHPs). Fuente: RETScreen 2005.	36
Figura 20: Sistema de clasificación de sedimentos de Shepard. (1954).....	41
Figura 21: Mapa de interpolación de niveles estáticos en la subcuenca. Fuente: Elaboración Propia	47
Figura 22: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección de flujo. Fuente: Elaboración Propia.	48
Figura 23: Mapa de abatimientos en pozos profundos. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 24: Mapa de transmisividades en la subcuenca. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 25: Mapa de conductividades hidráulicas en subcuenca. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 26: Mapa con la ubicación de los perfiles estratigráficos realizados. Fuente elaboración propia.	52
Figura 27: Sección geológica esquemática A. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 28: Sección geológica esquemática B. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 29: Sección geológica esquemática C. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 30: Sección geológica esquemática D. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 31: Estimación de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 32: Estimación del COP para distintas profundidades. Fuente: Elaboración Propia.	59
Figura 33: Análisis de sensibilidad para la estimación del COP a 1.5 m de profundidad.....	60
Figura 34: Percentiles y caudales asociados. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 35: Mapa de interpolación de aguas subterráneas. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Figura 36: Profundidad estimada QWHP, para un abatimiento de 30 m. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 37: Profundidad estimada QWHP, para un abatimiento de 20 m. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 38: Interpolación de los valores puntuales de sHE realizados sobre 25 pozos con información estratigráfica.	67
Figura 39: Ubicación estimada de acuíferos en la sección A. Fuente: Elaboración Propia.	69
Figura 40: Ubicación estimada de acuíferos en la sección B. Fuente: Elaboración Propia.	70
Figura 41: Ubicación estimada de acuíferos en la sección C. Fuente: Elaboración Propia.	71
Figura 42: Ubicación estimada de acuíferos en la sección D. Fuente: Elaboración Propia.	72

Figura 43: Profundidad estimada GWHP y dirección del flujo en la subcuenca. 74

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del estudio

El escenario de preocupación mundial por el cambio climático y la necesidad de disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera ha llevado a que se tomen diversos acuerdos y políticas universales de compromiso. (Protocolo de Kyoto en 1998 y el Acuerdo de París en 2015).

En Chile, una de las principales fuentes de emisión de gases efecto invernadero es el uso de combustibles fósiles para la generación de energía, representando un 77,4% de las emisiones totales (*Ministerio del Medio Ambiente, 2017*), lo que ha impulsado múltiples esfuerzos para transitar a una matriz descarbonizada, fomentando el uso de energías limpias y renovables, puesto que existe un importante recurso energético renovable aún no explotado (*Ministerio de Energía, 2017*).

A pesar del bajo porcentaje en capacidad instalada actualmente (Figura 1), la energía geotérmica es una fuente energética renovable muy versátil que puede ser utilizada de forma directa o para la generación de electricidad. Además, es una energía limpia, con niveles muy bajos, casi nulos de liberación de gases contaminante.

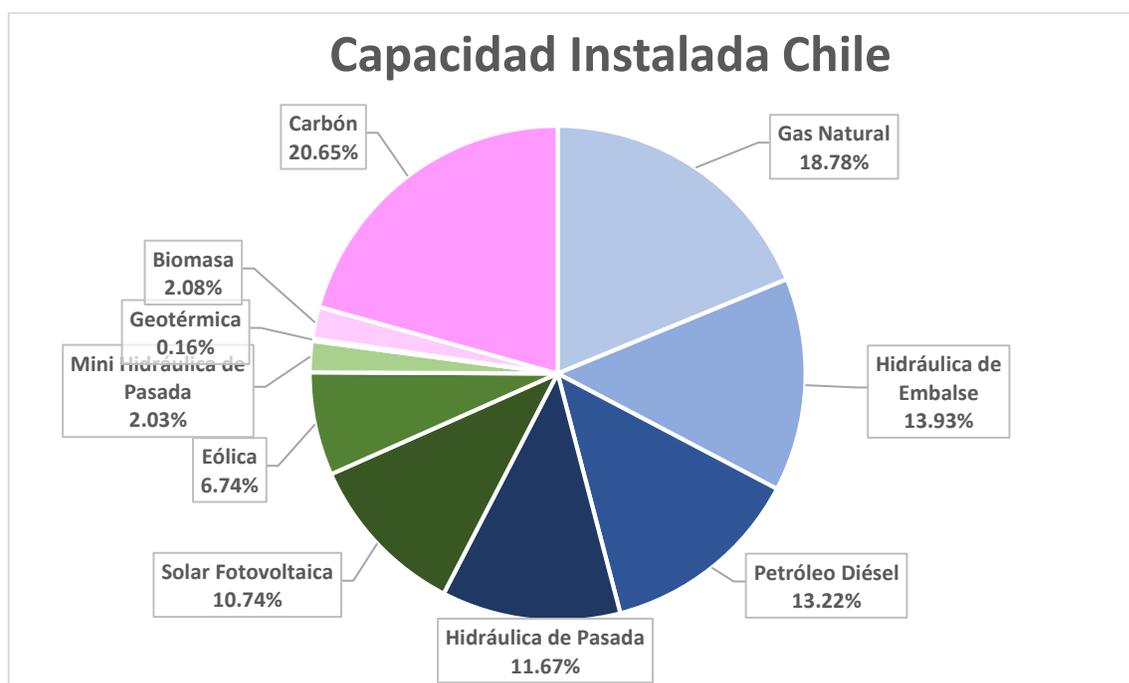


Figura 1: Capacidad total instalada en Chile [24088,69 MW] distribuida en distintas fuentes de energía para los principales sistemas eléctricos del país hasta agosto 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la Comisión Nacional de Energía, iniciativa Energía Abierta.

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es el basado en la entalpía de los fluidos geotermales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. Es decir, a la cantidad de energía que un sistema termodinámico (suelo) intercambia con su medio ambiente. Existen numerosas propuestas por diversos autores que clasifican la energía geotérmica. (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de recursos geotérmicos [°C]. Fuente: Autores señalados.

	Muffler and Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter and Cormy (1993)	Nicholson (1993)	Axelsson and Gunnlaugsson (2000)
Baja Entalpía	< 90	<125	<100	<150	<190
Media Entalpía	90 - 150	125 - 225	100 - 200	-	-
Alta Entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

Este trabajo se enfoca en la energía geotérmica de baja entalpía, la cual basa sus aplicaciones en la gran inercia térmica del suelo y, por lo tanto, su capacidad de mantener una temperatura constante a lo largo del año.

Esta energía térmica puede ser extraída por medio de bombas de calor geotérmicas (Ground Source Heat Pump, GSHP en sus siglas en inglés) que no producen emisiones locales de material particulado ni gases efecto invernadero y que permiten utilizar la energía de forma directa. Según el recuento de la industria, en el 2015 Chile contaba con 8.6 MWth de sistemas de GHP, el 83% estaba distribuido en el sector servicios, industrias y edificios públicos, y únicamente el 17% en el sector residencial. (Ministerio de Energía 2016).

Dentro de los múltiples usos de la energía geotérmica de baja entalpía se estudiará el uso para climatización de invernaderos en la subcuenca del Maipo Medio. Esto dado que la principal actividad de la zona es la agricultura, en la que según los registros más actuales se contabilizan 814 invernaderos en las comunas pertenecientes a la subcuenca señalada (CENSO Agropecuario 2007). Además, una de las principales ventajas del invernadero climatizado con energía geotérmica es que permite el cultivo durante todo el año, especialmente en los meses invernales.

Particularmente, por el contexto de escasez hídrica de la zona, se puede presentar como un lugar de especial interés para desarrollar estudios complementarios que puedan en un futuro beneficiar un desarrollo sostenible en el sector.

En esta memoria, se pretende realizar un análisis de las características hidrogeológicas de la zona de estudio que permitan estudiar el potencial uso de

bombas de calor geotérmicas en la subcuenca. Este trabajo entrega una hoja de ruta para implementar GHP que se espera sirva para la divulgación de la energía geotérmica de baja entalpía, abarcando el potencial térmico que son capaces de generar las bombas de calor, los requerimientos para su implementación y cómo éstas funcionan como una real herramienta de mitigación de la contaminación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar el uso de geotermia somera a través de la estimación de parámetros hidrogeológicos, que permitan estudiar los distintos sistemas de intercambio para bombas geotérmicas en la subcuenca del Maipo Medio.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar invernadero típico de la zona y su demanda térmica para las condiciones de temperatura de la subcuenca.
- Determinar los parámetros hidrogeológicos de la subcuenca del Maipo Medio.
- Definir las condiciones para el uso de intercambiadores de calor geotérmico de baja temperatura en el área de estudio.
- Para instalaciones GWHP, establecer la profundidad, temperatura, dirección del agua subterránea almacenada en la cuenca y abatimientos esperables de acuerdo a un escenario de extracción de agua base.
- Para instalaciones BHE, establecer la extracción específica de calor (sHE) equivalente y potencia extraíble en profundidad
- Para instalaciones de intercambiadores horizontales cerrados establecer el área de estos.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Área de estudio

Se ha determinado tomar como zona de estudio la subcuenca del Maipo Medio, señalada en la Figura 2. En particular este tipo de estudio se podría realizar en cualquier área seleccionada del país, pero se escoge ésta en vista que no existen estudios particulares en la zona, y dada la relevancia que toma la cuenca del Maipo (por consiguiente, sus subcuencas) y sus estudios a nivel nacional, considerando las actividades productivas que allí se realizan y la gran cantidad de habitantes que alberga.

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Cuenca del Maipo, la cual abarca prácticamente la totalidad del territorio de la Región Metropolitana, parte de la V y VI regiones extendiéndose entre los paralelos 32°55'-34°15' latitud sur y meridianos 69°55'-71°33' longitud oeste. Drena una superficie de 15.304 Km². La superficie de la cuenca cubre prácticamente el 100% de la Región Metropolitana y una mínima superficie de las Regiones de Valparaíso (Provincia de San Antonio y Valparaíso) y del Libertador Bernardo O'Higgins (Provincia de Cachapoal).

La cuenca se encuentra dividida en 5 subcuencas (Tabla 2), se tomará la división y codificación que define la Dirección General de Aguas (DGA) por temas prácticos de uso y división de la información recopilada. Esta definición está asociada a criterios administrativos y está dada principalmente por la ubicación de las estaciones fluviométricas dentro de la subcuenca principal.

Tabla 2: Subcuencas de la cuenca del Río Maipo. Fuente: Dirección General de Aguas.

Cuenca Río Maipo		
Código Subcuenca	Sub Cuencas	Área [km ²]
0570	Río Maipo Alto	4.858,7
0571	Río Maipo Medio	2.574,1
0572	Mapocho Alto	1.022,4
0573	Mapocho Bajo	3.455,7
0574	Río Maipo Bajo (Entre río Mapocho y desembocadura).	3.363,3
Área Total Cuenca		15.274,2

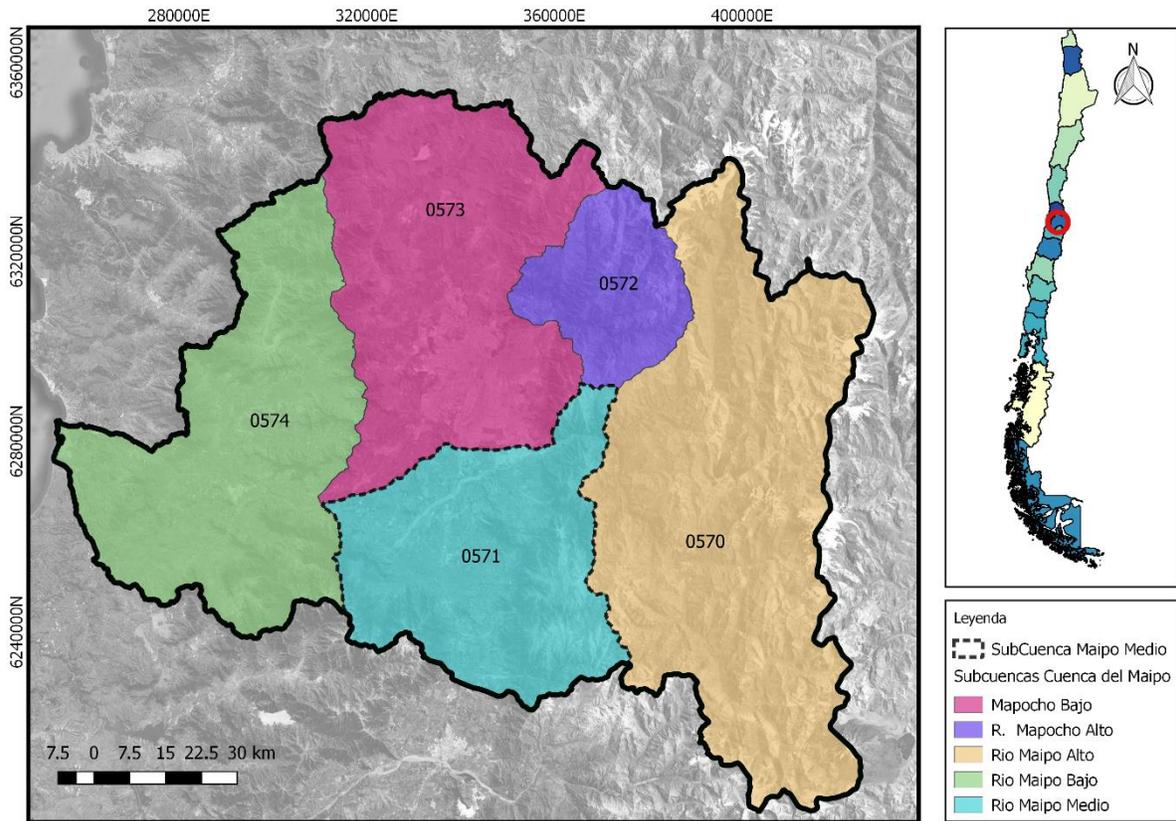


Figura 2: Delimitación subcuencas cuenca Río Maipo. Fuente: Elaboración propia con datos oficiales DGA (2018).

La subcuenca del Maipo Medio, la componen principalmente 7 comunas (Figura 3).

Tabla 3. Cantidad de habitantes en las comunas de la subcuenca. Fuente: CENSO 2017.

Comunas	Habitantes
Isla de Maipo	36.219
San Bernardo	301.313
Paine	72.759
Pirque	26.521
Buin	96.614
Mostazal	25.343
Codegua	12.988
Total, estimado para la subcuenca	571.757

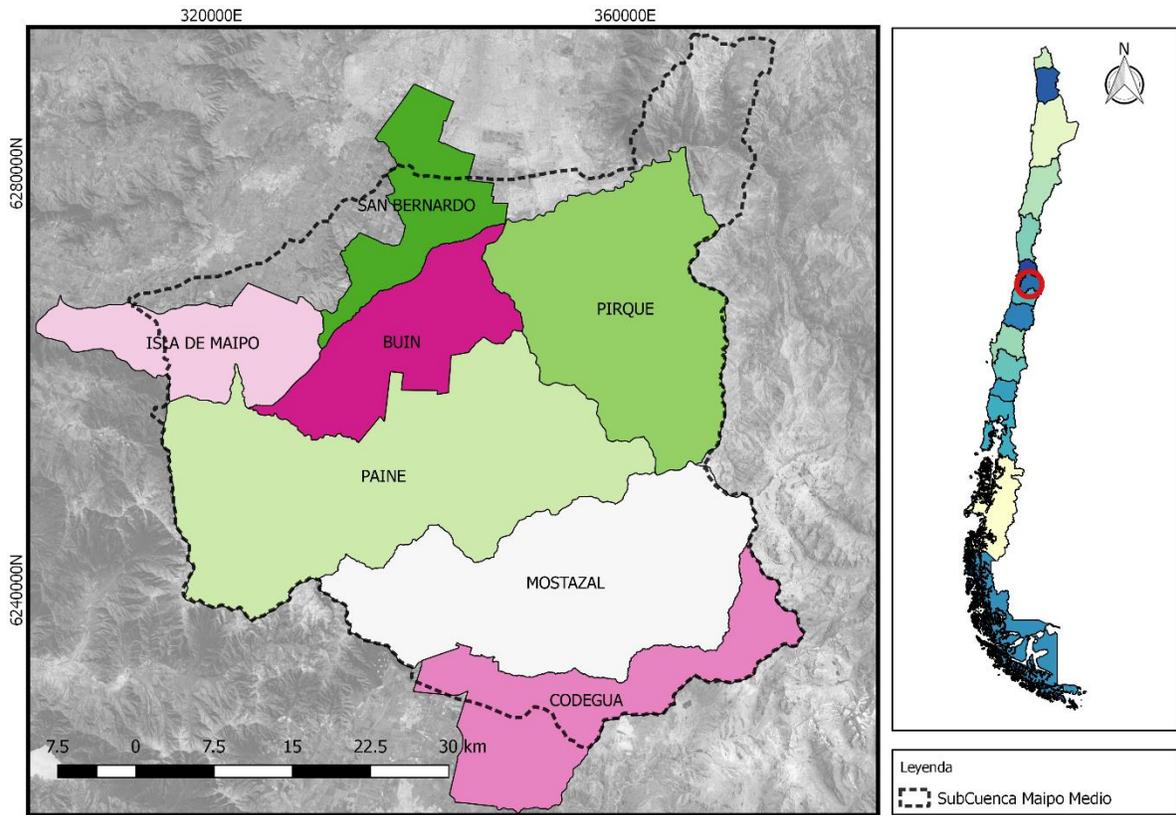


Figura 3: Comunas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: Elaboración propia con datos IDE CHILE.

2.2. Hidrología

2.2.1. Red Hidrográfica

El Río Maipo nace en el extremo sur de la Cordillera de Los Andes, en las laderas del volcán Maipo (5.323 m s.n.m.). La altura considerable que presenta la cordillera de Los Andes en esta zona permite una glaciación importante y una nivación estacional considerable que contribuye a fijar las características hidrológicas del río (CONAMA, 2006).

Luego, y cerca de la Cordillera de la Costa, adentrándose al sector de estudio (Figura 4), recibe desde el sur los aportes provenientes del río Clarillo y a escasos kilómetros de la laguna Aculeo se encuentra la confluencia con el río Angostura. Al iniciar su recorrido a través de la Cordillera de Costa, recibe por su ribera derecha, los aportes del río Mapocho (al norte de la Laguna). Este es su principal afluente tanto por la cuantía de sus aportes como por la superficie agrícola que beneficia.

Tabla 4: Estaciones Fluviométricas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: DGA 2019.

Número	Nombre	UTM WGS 84 H19		Estado
		Este [m]	Norte [m]	
I	Río Maipo en el Manzano	372.019	6.281.633	Vigente
II	Río Angostura en Valdivia de Paine	325.665	6.257.179	Vigente
III	Estero Pintue en Puente Pintue	326.050	6.250.016	Vigente

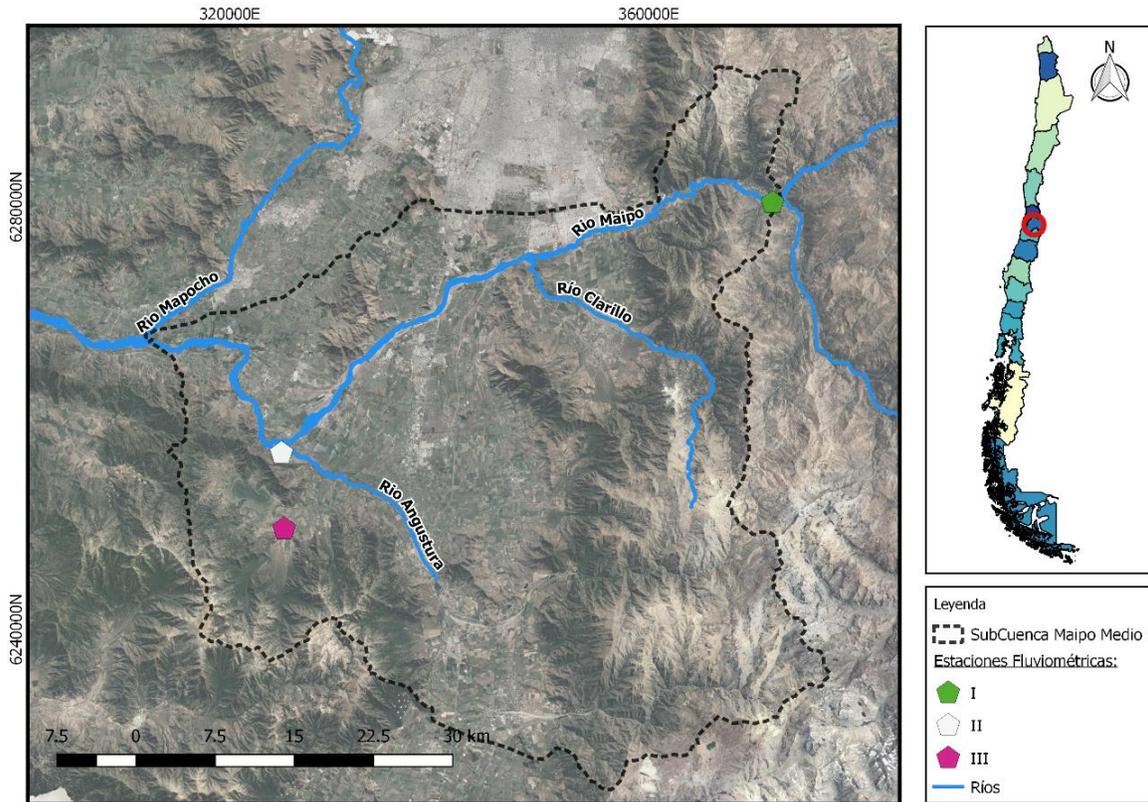


Figura 4: Red hidrográfica principal y estaciones fluviométricas en la subcuenca. Fuente: Elaboración propia con datos oficiales DGA 2018.

La subcuenca Maipo Medio corresponde a la hoya hidrográfica de la parte media del río Maipo, desde la estación fluviométrica Maipo en El Manzano hasta la junta del río Mapocho, incluyendo el río Angostura y Clarillo. En su cauce principal no hay estaciones fluviométricas, pero se advierte un uso intensivo del agua para el riego, de manera que el período de estiaje debe ocurrir en meses de verano, tal como se observa del análisis de los datos de caudales mensuales para la estación Angostura en Valdivia de Paine, entre diciembre y marzo (Figura 5), durante el período comprendido entre los años 2007-2018.

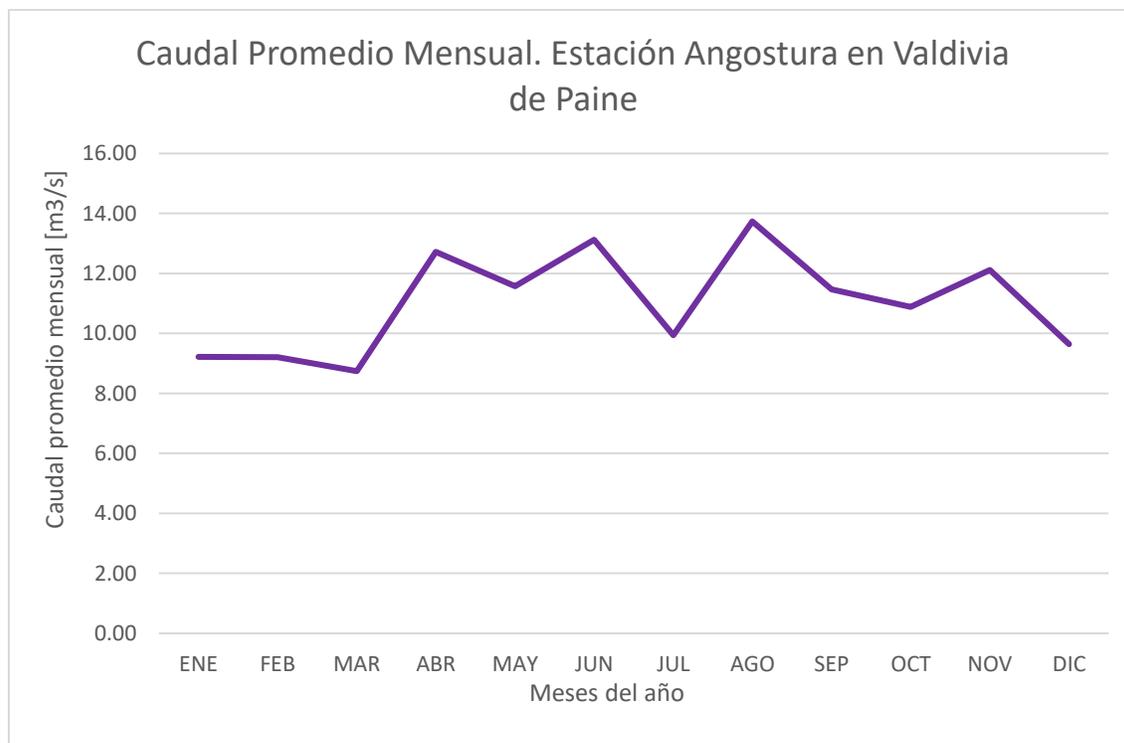


Figura 5. Registro del caudal promedio mensual en la estación Angostura en Valdivia de Paine, período 2007-2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos oficiales de la red fluviométrica nacional de la DGA 2019.

2.2.2. Cuerpos de Agua

Es posible encontrar pequeñas lagunas en la zona de la subcuenca, pero la laguna Aculeo fue sin duda el cuerpo de agua principal en la zona, alcanzando un área de 12 [km²] en épocas anteriores a la sequía actual. (DGA 2015).

En el año 2018 la Laguna de Acuelo se declaró oficialmente seca. Los motivos son variados, y van desde causas naturales, sobreconsumo, tanto para uso humano, como animal, además de la megasequía que ha asolado a la zona desde hace una década.

El “Estudio de Balance Hídrico de la Cuenca de Aculeo”, realizado por la Universidad de Chile 2019, señala que la agricultura es el principal consumidor de agua en la cuenca, alcanzando un 70 por ciento; sin embargo, su consumo no ha aumentado significativamente en las últimas décadas. Por otra parte, el consumo de agua asociado al crecimiento de la población en Aculeo, específicamente una mayor cantidad de parcelas de agrado y condominios aumentó en un 14 por ciento.

En la siguiente imagen se puede observar, por medio de imágenes satelitales, el descenso progresivo del nivel de agua de la laguna a través del tiempo y como en la actualidad se encuentra totalmente seca.

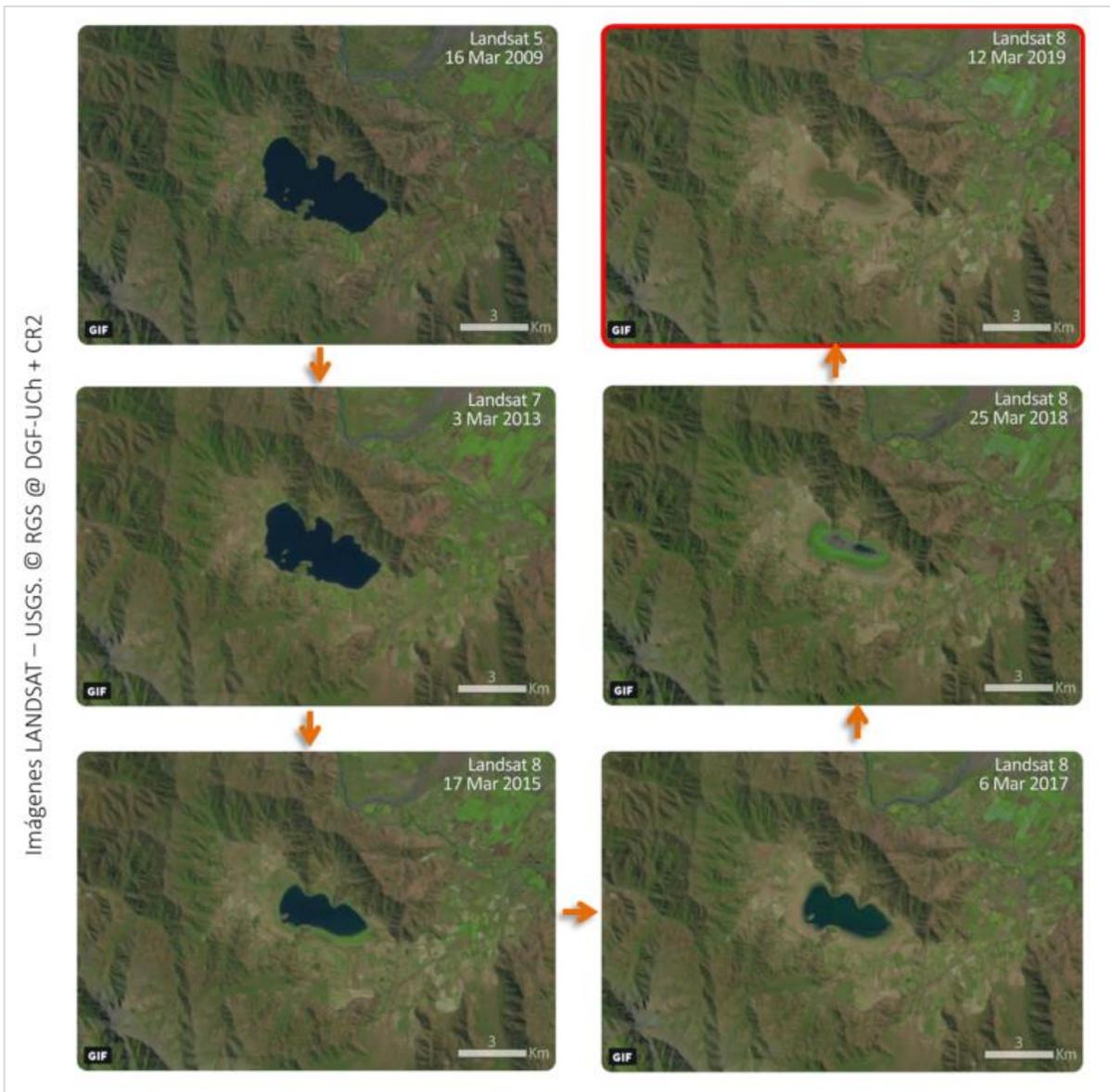


Figura 6: Colección imágenes satelitales Landsat, para años seleccionados. Fuente: (CR)2. 2019.

2.2.3. Precipitaciones

La variabilidad interanual de las precipitaciones en Chile Central está en gran medida asociada con la alternancia de la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña (Rutllant y Fuenzalida, 1991). Esta información es confirmada por Montecinos y Aceituno (2003), quienes señalan que esta fluctuación de las precipitaciones se relaciona con la ocurrencia de los fenómenos ENSO (El Niño/Southern Oscillation). Además, Garreaud y Aceituno (2001) señalan que durante los años húmedos o “Niño”, el número de días con precipitación aumenta —en términos de frecuencia de tormentas—, particularmente las de intensidad moderada y extrema (10-20 mm/día y 50 mm/día, respectivamente).

La cuenca de Santiago se caracteriza por presentar lluvias que se concentran en un 80% aproximadamente, entre los meses de mayo a agosto. Como se puede analizar para el período 2017-2018 el gráfico (Figura 8) en la estación Río Angostura en Valdivia de Paine (señalada en la Figura 7), en la subcuenca también se presenta este comportamiento.

Dentro de la subcuenca se encuentran 8 estaciones meteorológicas.

Tabla 5: Estaciones Meteorológicas en la subcuenca del Maipo Medio. Fuente: DGA 2019.

Estaciones Meteorológicas	UTM WGS 84 H19		Estado
	Este [m]	Norte [m]	
Río Maipo e el Manzano	372.019	6.281.633	Vigente
La Obra Recinto	362.190	6.282.161	Vigente
Río Angostura en Valdivia de Paine	325.665	6.257.179	Vigente
Laguna Aculeo	326.369	6.248.925	Vigente
Laguna Aculeo Los Castaños	323.587	6.251.765	Vigente
El Vergel	321.707	6.269.904	Vigente
Pirque	352.897	6.272.884	Vigente

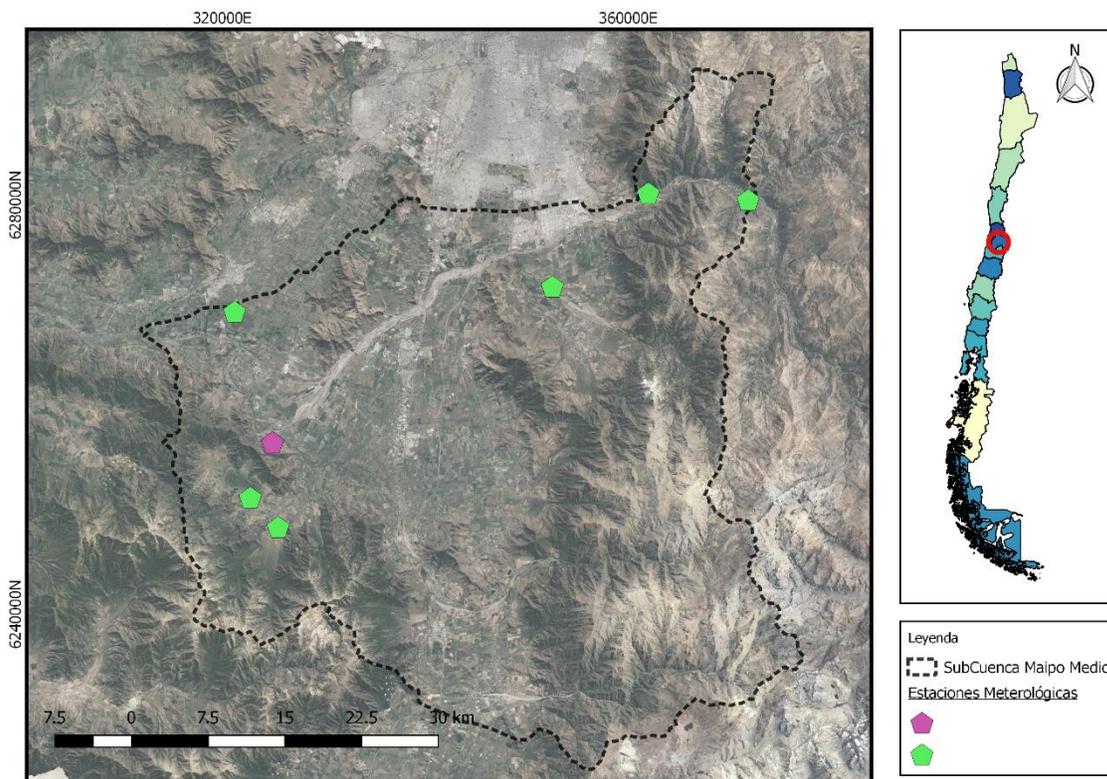


Figura 7: Estaciones fluviométrica en la subcuenca del Maipo Medio.

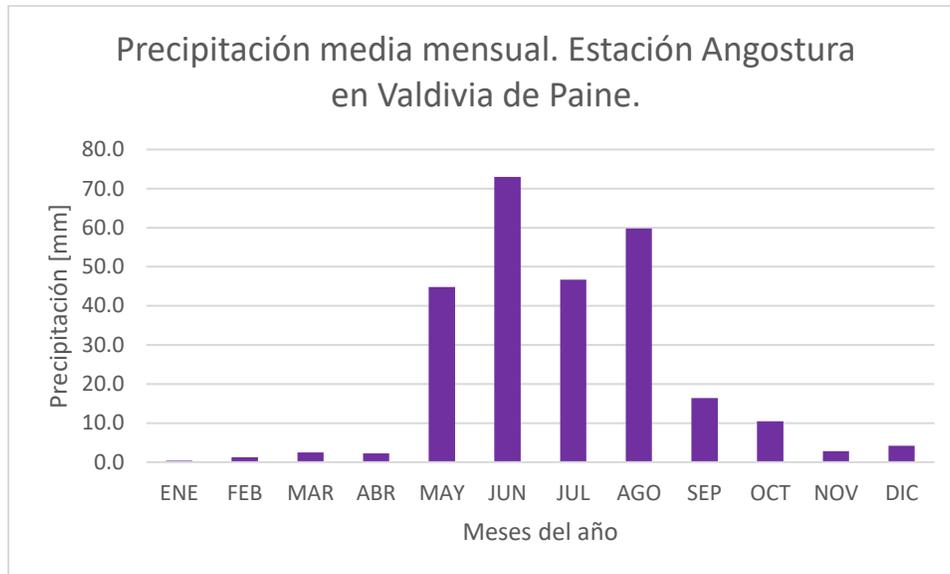


Figura 8. Registro de las precipitaciones promedio mensuales en la estación Angostura en Valdivia de Paine, período 2007-2018. Fuente: Elaboración propia a partir de datos oficiales de la red meteorológica nacional de la DGA 2019.

2.3. Invernaderos y cultivos

Un invernadero es una estructura cerrada destinada a la horticultura, con la capacidad de generar condiciones de temperatura y humedad ideales para el cultivo de plantas. Son de diversas formas y tamaños, y poseen generalmente una cubierta exterior translúcida que permite el ingreso de radiación solar al recinto, vital para el desarrollo de cualquier vegetal, que a su vez aumenta la temperatura del lugar debido a su aislación.

Dependiendo de la zona, las plantas cultivadas, la cobertura del invernadero y el nivel de control ambiental, hacen que la energía necesaria para calentar 1 m² de superficie de invernadero, vaya desde 500 a 2.700 MJ/(m²·año) (Hurtado 2017).

Para el correcto desempeño de un invernadero, el conocimiento del cultivo es esencial para saber la temperatura que se debe tener dentro de la estructura para un óptimo desarrollo de las plantas. Para este caso se analizarán las condiciones y características del tomate y su producción en la subcuenca.

En Chile, el tomate es una de las principales hortalizas cultivadas en términos de superficie y producción, ocupando el 40to lugar en superficie mundial. El cultivo de tomate presenta alta rentabilidad, lo que ha permitido hace más de una década que experimente un sostenido desarrollo. (INIA 2017).

Se planta, dependiendo de la zona, desde mediados de septiembre a fines de noviembre, ya que es un cultivo que requiere que no haya heladas ni lluvias en la cosecha. Esto genera la limitación de su cultivo hacia el sur, donde las ventanas de

producción son más cortas, pues para escapar de las bajas temperaturas se debe plantar desde fines de octubre en adelante. Por esta razón, resulta interesante estudiar su producción en invernaderos, donde se mantiene alejado de lluvias y bajas temperaturas (regulando esta mediante energía geotérmica).

2.3.1. Demanda térmica del tomate.

Aunque se produce a una amplia gama de condiciones de clima suelo, el tomate prospera mejor en climas secos con temperaturas moderadas. Es una especie de estación cálida y su rango de temperaturas óptimas es de 18 y 30°C, temperaturas extremas pueden ocasionar diversos trastornos en la planta.

No obstante, se deben considerar más factores para el cultivo, como la humedad.

El clima de la región quedará representado por la temperatura ambiental medida en los últimos años en la subcuenca. La cual será estudiada en la estación climática "Los Tilos", localizada en Buin, perteneciente a la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), del Ministerio de Agricultura. Se utilizan estos datos para caracterizar la zona de estudio, pues es la más cercana a la subcuenca y son los datos más actuales a la realización del presente trabajo, por lo que pueden representar de mejor manera la actualidad.

En la Figura 9 se logra apreciar, que la temperatura óptima máxima no es alcanzada por la temperatura ambiente, por lo que no se requiere de un sistema de refrigeración. En cambio, la temperatura óptima mínima no es suficiente a partir del mes de abril hasta finales de septiembre, por lo que se evidencia la necesidad de calefacción en el recinto, esto implica que la bomba no requerirá de una válvula inversora.

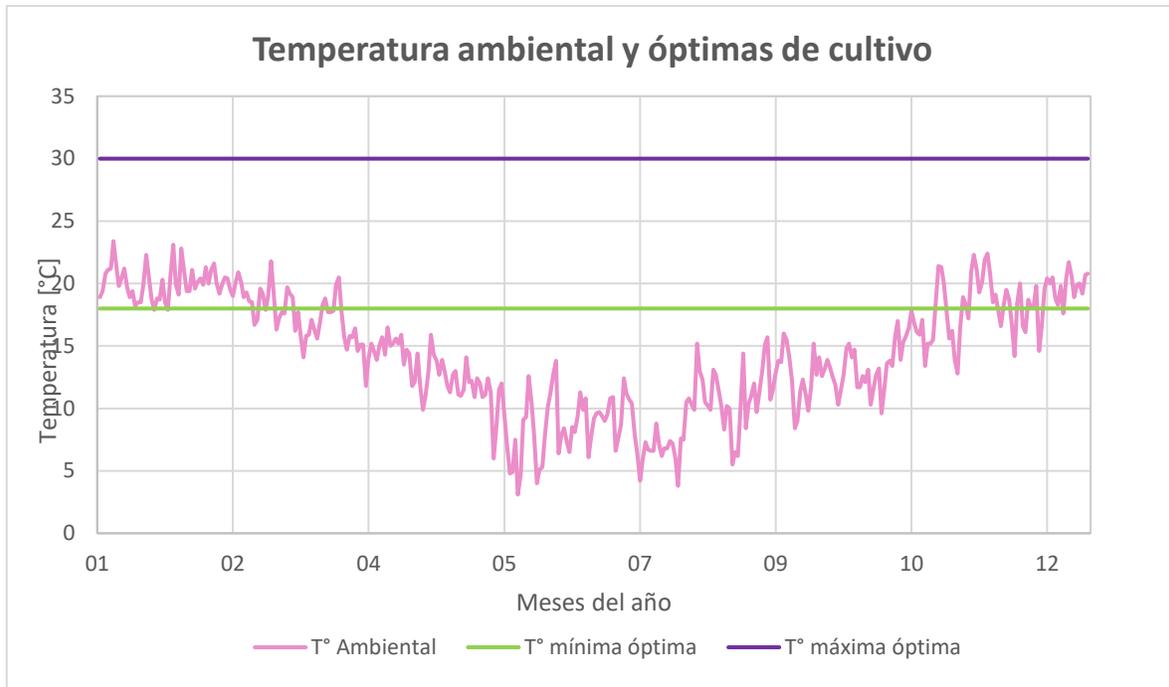


Figura 9. Temperaturas óptimas del tomate. Fuente: elaboración propia con datos de cultivo INIA 2017.

Se tomará como referencia el estudio “Evaluación del uso de bombas de calor geotérmica en invernaderos” (Hurtado Nicolás, 2017), en el cual se estudia el requerimiento energético de un invernadero tipo en la zona de puerto Aysén, para el estudio técnico-económico de un sistema geotérmico con un colector horizontal, considerando un cultivo de tomates y una estructura que tiene una superficie del suelo igual a 150 m².

Si bien las condiciones climáticas en Aysén distan mucho de la realidad estudiada, se pueden comparar las temperaturas máximas observadas en esa zona que son similares a las temperaturas mínimas presentadas en la subcuenca del Maipo Medio, por lo que se obtiene un promedio representativo de demanda energética del periodo mensual diciembre-marzo, mostrado en la Tabla 6 lo que luego será utilizado para el dimensionamiento de los colectores.

Tabla 6: Requerimiento energético invernadero para cultivo de tomate en distintas temperaturas ambientales. Fuente Hurtado 2017.

Mes	Demanda Máxima [kW]	Demanda Promedio [kW]
Diciembre	15.66	13.51
Enero	15.14	10.38
Febrero	14.95	11.37
Marzo	16.57	12.72
Promedio	15.58	12.00

2.4. Caracterización geomorfológica

En la zona de la subcuenca del Maipo Medio, al igual que en gran parte de Chile, se reconocen tres grandes dominios morfoestructurales mayores: Cordillera de la Costa, Cordillera de los Andes y Depresión Intermedia, cada una de ellas con particulares características estructurales.

En la superficie de la Cuenca del Maipo se distinguen 4 sistemas geomorfológicos principales: Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicie Litoral.

La primera es un imponente macizo cordón montañoso joven, con volcanes extinguidos, activos e inactivos. En ella se dispone la cabecera de la hoya del Maipo. Las rocas de la cordillera de los Andes corresponden a rocas estratificadas mesozoicas, volcánicas y sedimentarias, marinas y continentales, y su edad varía desde el Jurásico Superior al Cuaternario.

La Depresión Intermedia constituye un plano suavemente inclinado hacia el oeste y hacia el sur, excepto en su extremo meridional donde escurre el Estero Angostura. Esta limitada hacia el norte por el Cordón de Chacabuco y hacia el Sur por los cerros de Angostura de Paine.

Esta depresión, se encuentra topográficamente como el escalón más bajo de varias superficies sucesivamente más altas hacia el norte y que se reconocen por: Santiago, Polpaico, Rungue y Montenegro, siendo esta última la más alta por lo que el drenaje entre estas superficies tiene también un sentido general norte a sur. El relieve, por otro lado, va haciéndose más uniforme en sentido Norte a Sur. Los depósitos sedimentarios no consolidados de esta unidad son numerosos y variados. Entre ellos destacan los depósitos de abanico aluvial, depósitos fluviales, depósitos coluviales y depósitos lacustres.

Entre las tres primeras unidades se encuentran los valles fluviales de los ríos Maipo y Mapocho, cuyos cursos de agua transportan la mayoría de los sedimentos que rellenan la depresión intermedia. Entre estos el Maipo por su envergadura es el de mayor importancia.

La zona de estudio presenta en general (ver Figura 10), características similares en su paisaje, en cuanto a la gran componente de “Llano Central” caracterizado por lomas suaves lo que privilegia al sector para actividades agrícolas, como se ha mencionado anteriormente.

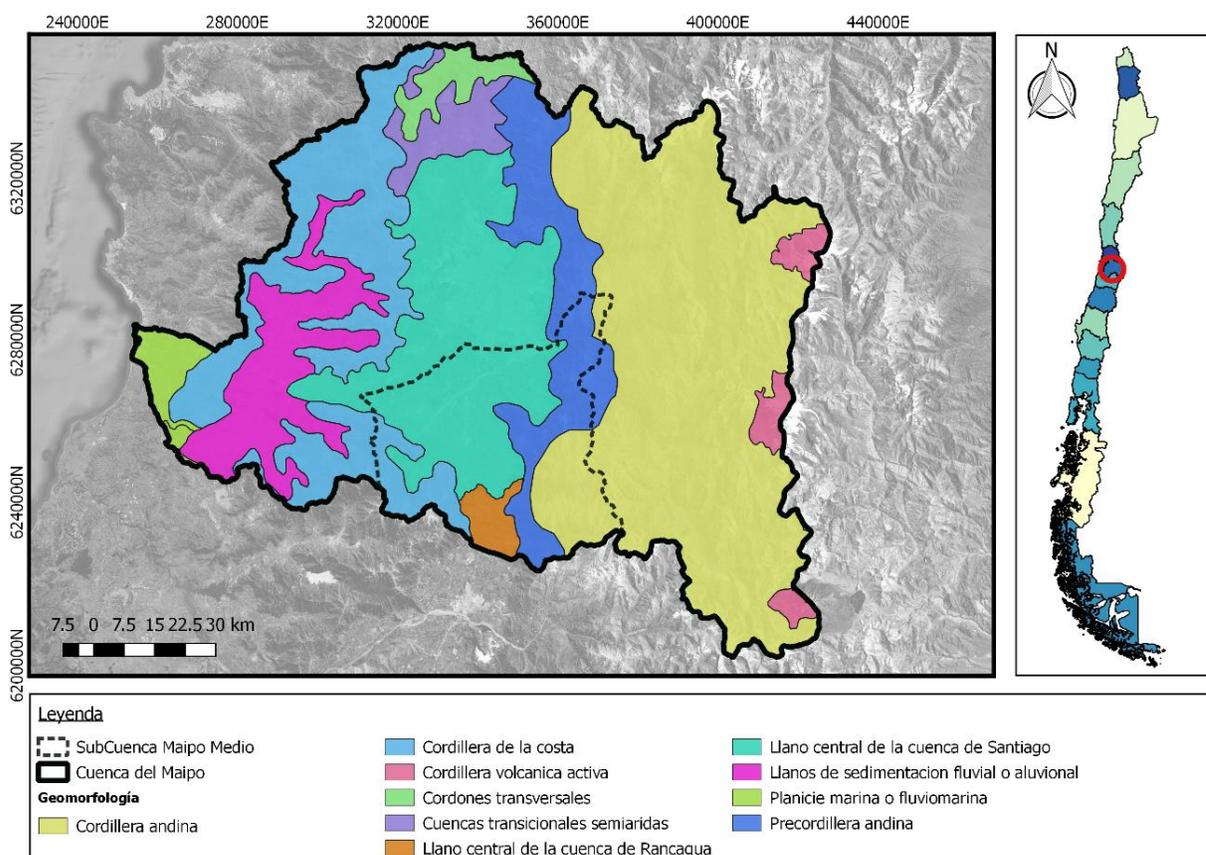


Figura 10: Caracterización Geomorfológica de la Subcuenca de la Laguna Aculeo. Fuente: Elaboración propia con información entregada por el SERGAGEOMIN

2.5. Caracterización geológica

La cuenca de Santiago está conformada por formaciones rocosas y sedimentos de origen fluvial, coluvial y aluvial. El basamento de la cuenca está formado por rocas intrusivas de origen Paleozoico (540 – 250 Ma) sobre el cual se depositan secuencias volcano sedimentarias Mesozoicas (250 – 65 Ma) y Cenozoicas (65 – 0 Ma) (Sallés y Gana, 2001).

Entre las formaciones más antiguas de la Cordillera de la Costa y las formaciones más jóvenes de la Cordillera de los Andes, se han ido depositando sedimentos de origen fluvial y aluvial desde por lo menos el Plioceno inferior (5 millones de años) (Rauld, 2011).

Estos depósitos cubren el área de estudio y contienen la mayoría de los acuíferos de la zona. Múltiples procesos sedimentarios han contribuido la formación del relleno de la Cuenca, que alcanza profundidades de hasta 500 m. (Kausel, 1957; Dragicevic, 1982; Bravo, 1992; Avendaño and Araneda, 1994; Araneda *et al*, 2000).

El origen de estos sedimentos está relacionado con el sistema fluvial conformado por el Río Mapocho y el Río Maipo que traen sedimentos desde la Cordillera de los Andes. En la cuenca también se han acumulado, en menor medida, sedimentos de origen coluvial en los bordes de la cuenca. También en menor cantidad se pueden encontrar cenizas de erupciones piroclásticas del Pleistoceno (1,4 a 2,3 Ma) (Wall *et al.*, 2001). (Figura 11).

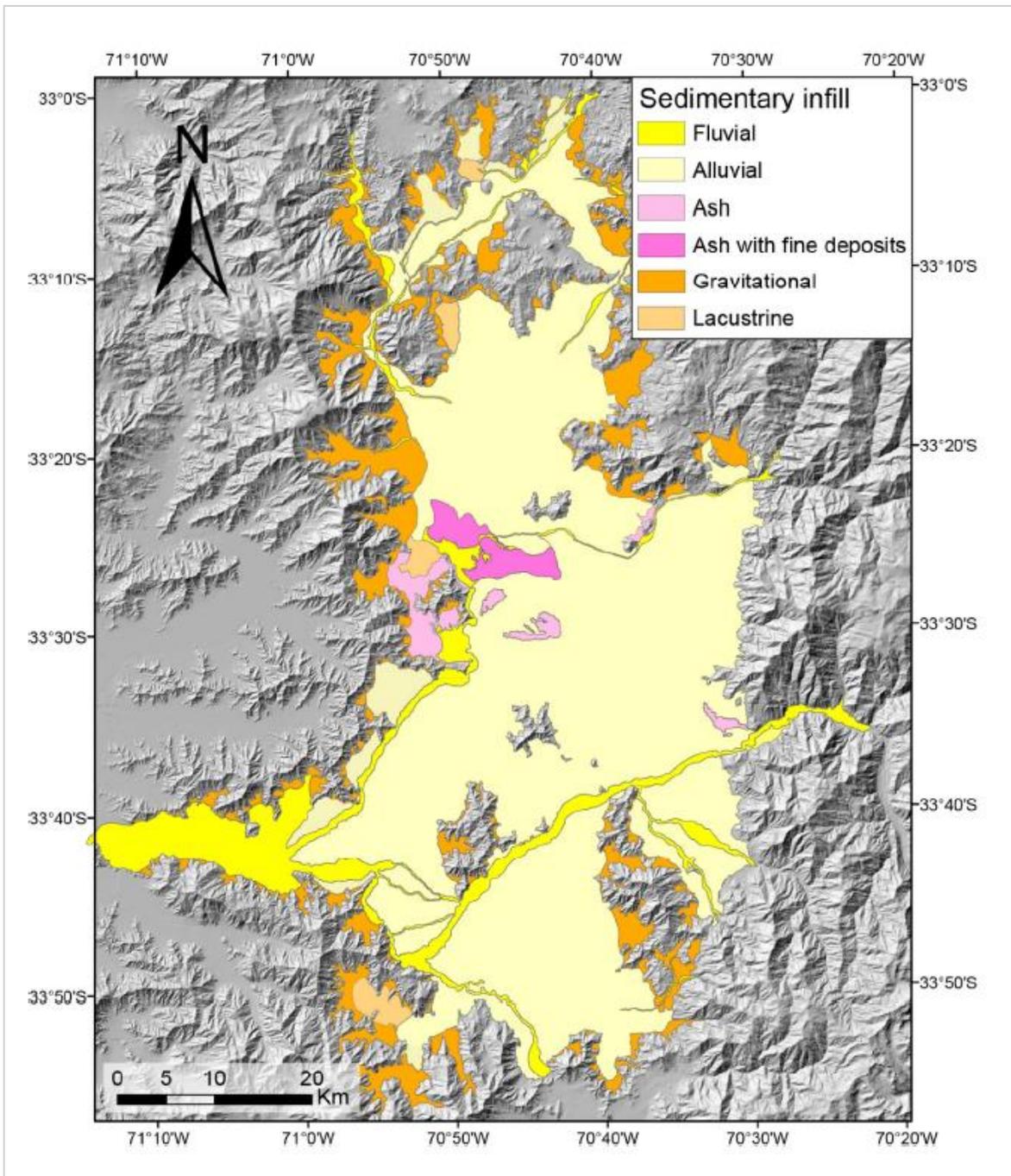


Figura 11. Distribución superficial de los distintos sedimentos de la Cuenca de Santiago.
Fuente: Modificado de Brantt, 2011; Rauld 2011 y Yañex et al., 2014.

2.6. Hidrogeología

2.6.1. Acuífero Maipo-Mapocho

El acuífero del Maipo - Mapocho, conforma uno de los principales embalses subterráneos del país, esto tanto por su extensión y volumen almacenado como por su situación geográfica, ya que se localiza bajo un gran centro de demanda tanto para usos domésticos como industriales y también agrícolas, aunque en menor grado.

La mayor cantidad de acuíferos de la cuenca en estudio están relacionados a depósitos no consolidados. Aunque la definición de un acuífero es difícil debido a la heterogeneidad del relleno de la cuenca, se pueden definir tres unidades hidrogeológicas (Falcon *et al* ,1970; Morales, 2003). Estas unidades han sido clasificadas, de más antigua a más joven, en unidades A, B y C. La mayoría de los acuíferos explotados en la zona corresponden a la unidad B. Por su parte, la mayoría de los pozos más profundos (sobre 150m) de los pozos más productivos están asociados a la unidad A. La unidad C presenta muy baja producción y representa un porcentaje insignificante en cuanto a cantidad y producción.

Unidad A

Localizada en la base de la secuencia sedimentaria, se caracteriza por la dominancia de depósitos de grano fino. Aunque estos depósitos son usualmente heterogéneos, mantienen alta proporción arcillas. La fracción de grano grueso promedio son de arenas medias y finas con abundante matriz arcillosa (Morales, 2003). Granos más gruesos son encontrados localmente asociadas a facies de canal. Cercana al frente montañoso está formada por abundantes bloques angulares con matriz limo-arcillosa, mientras que en el sector oeste es preferencialmente de grano fino. Estas unidades pueden estar geológicamente relacionadas a depósitos lacustres, glacio-lacustres, fluviales y flujos de barro (Falcon *et al*, 1970). Aunque la cantidad de material fino hace de esta unidad hidrogeológicamente no favorable, la presencia de unidades de grano grueso de tipo canal definen acuíferos finos de muy buena productividad.

Unidad B

Esta unidad sobreyace a la unidad A y está caracterizada por su granulometría más gruesa. Se compone principalmente de gravas, arenas gruesas, con una matriz de arenas medias a finas con baja cantidad de limo y arcillas (Morales, 2003). Los sedimentos de esta unidad están distribuidos en lentes de distintos tamaños de grano, lo que determina su fuerte anisotropía. Estos lentes presentan dimensiones variables y una distribución dispersa. Los lentes de alta conductividad se constituyen de arenas y gravas con baja cantidad de arcillas. Esta unidad está relacionada a depósitos fluviales y glacio-fluviales (Falcon *et al.*, 1970).

Unidad C

Esta unidad sobreyace a la unidad B, sin embargo, no es tan extensa como las otras unidades. Se caracteriza por la predominancia de sedimentos de grano fino. Las principales fracciones de grano son limos y arcillas limosas con cantidades variables de arenas y gravas. La alta presencia de granos finos y discontinuidades hacen que esta unidad se considere hidrogeológicamente poco productiva.

2.6.2. Propiedades hidráulicas

2.6.4.1. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K) determina la capacidad de transmitir agua por un medio poroso condicionado por factores intrínsecos y extrínsecos. Los factores intrínsecos son propios del acuífero y se relacionan al tamaño de los poros; mientras que los factores extrínsecos dependen del fluido, principalmente de su viscosidad como función de la temperatura.

La conductividad hidráulica de un medio respecto a un fluido dependerá del grado de saturación de este fluido en el medio. La máxima conductividad hidráulica de un suelo se obtiene cuando todo el volumen de poros de este está en condición saturada, y para este caso es también referida como permeabilidad.

En hidrogeología, K es uno de los factores más variables a considerar, debido a los múltiples parámetros que la condicionan (influencia granulométrica del material, la presencia de intercalaciones finas y las variaciones sedimentológicas del medio.) De acuerdo con Sarbu y Sebarchievici (2015) hay rangos de K según el tipo de suelo, su saturación y la influencia que tendría en parámetros termales tales como la conductividad termal (λ) y la capacidad calórica (C). (Tabla 3)

Tabla 7: Influencia de la conductividad hidráulica en parámetros termales de diferentes tipos de suelos. Fuente: Sarbu y Sebarchievici (2015).

Tipo de Suelo	K [m/s]	λ [W/(mK)]		C [MJ/(M3k)]	
		Suelo Seco	Suelo Saturado	Suelo Seco	Suelo Saturado
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-10}$	0.2 - 0.3	1.1 - 1.6	0.3 - 0.6	2.1 - 3.2
Limo	$10^{-5} - 10^{-8}$	0.2 - 0.4	1.2 - 2.5	0.6 - 1	2.1 - 2.4
Arena	$10^{-3} - 10^{-4}$	0.3 - 0.4	1.7 - 3.2	1 - 1.3	2.2 - 2.4
Grava	$10^{-1} - 10^{-3}$	0.3 - 0.5	1.8 - 3.3	1.2 - 1.5	2.2 - 2.4

2.6.4.2. Transmisividad

La transmisividad es una propiedad que ha tenido relevancia práctica en la evaluación de los acuíferos. A través de ella se pueden calcular la cantidad de agua que puede proporcionar un acuífero en una sección de interés determinada o estimar el rendimiento probable de una captación. Sin embargo esta propiedad no describe satisfactoriamente la velocidad real de movimiento del agua subterránea.

La transmisividad hidráulica, es el caudal que pasa por unidad de ancho del acuífero bajo un gradiente unitario de potencial. Representa la capacidad que tiene el acuífero de ceder agua, y depende de su espesor, de las propiedades del agua y el medio poroso. Está definida en función de la conductividad hidráulica como se ve en la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$T = b * K$$

Donde:

T: Transmisividad [m²/día]

b: Espesor saturado del acuífero [m]

K: Conductividad hidráulica [m/día]

El valor de la transmisividad es uno de los resultados de las pruebas de bombeo, del cual puede estimarse una conductividad hidráulica media del acuífero. Sin embargo, el concepto de transmisividad aporta información limitada sobre valores "promedio" de conductividad hidráulica y porosidad (en el caso de acuíferos confinados) necesarios para tratar problemas de contaminación de agua subterránea. Si la información geológica básica no se conoce, los valores de transmisividad representan un significado acotado y restringido para un manejo eficiente de los recursos hidráulicos subterráneos a mediano y largo plazos.

2.6.4.3. Variación del nivel estático

Se define como nivel estático (NE) a la profundidad a la que se encuentra el agua de un acuífero. Es necesario conocer dónde se encuentra este límite y ver cómo varía en el tiempo para analizar la disponibilidad de las aguas tanto para riego, consumo humano o para el bombeo de agua subterránea necesario para los sistemas de intercambiadores abiertos. Si se perfora hasta el nivel estático en un momento de recarga del acuífero es probable que el agua subterránea descienda en el tiempo y no permitiría el uso de la bomba de calor, pero si se sobre dimensiona la profundidad del nivel incurriría en gastos innecesarios dado los altos costos de perforación.

Las oscilaciones en el nivel estático pueden ser grandes, debido a estacionalidad de los bombeos, recarga, variaciones de explotación o efectos climáticos. Son consideradas pequeñas cuando son menores a 1 metro y se pueden deber a cambios en la presión atmosférica, sobrecargas o evapotranspiración. Además, estas variaciones se pueden clasificar como rápidas si se producen en menos de un día, medias en un ciclo de una semana, generalmente producidas por paros en el bombeo durante ese tiempo, o lentas si su duración son semi-anales o en mayores períodos de tiempo provocadas por variaciones estacionales o períodos de sequía.

2.6.4.4. Abatimiento

El abatimiento se define como aquel descenso en el nivel del espejo de agua provocado por el bombeo sostenido en el tiempo. Corresponde a la diferencia entre el vértice del “cono del bombeo” y el nivel estático. Esta diferencia depende del caudal con el cual se extrae el agua subterránea y la conductividad hidráulica, la cual a su vez varía dependiendo de la transmisividad del acuífero.

Para calcular el abatimiento se tiene la Ecuación 2

Ecuación 2

$$S_w = NE - ND$$

Donde:

NE: Profundidad del nivel estático

ND: Nivel dinámico, el cual se produce cuando se ha llegado a un nivel de estabilización luego de realizado el bombeo.

2.6.3. Pruebas de bombeo

Son una herramienta para describir el flujo de agua subterránea mediante pozos hidráulicos. Es posible con ellas determinar los parámetros asociados al medio.

Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y aún regionales sobre el flujo del agua subterránea.

Consisten en bombear agua de un pozo (pozo de bombeo). A medida que se extrae agua, se miden las variaciones del nivel del agua en el pozo de bombeo y en un segundo pozo llamado pozo de observación. Una vez que se registran los datos en función del tiempo, se realiza un ensayo de recuperación donde se deja de bombear para registrar el ascenso de los niveles del agua. La prueba más habitual se realiza

a caudal constante, es decir que el caudal extraído no varía durante toda la prueba (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), 2009).

A partir del comportamiento de los abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación y el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características del acuífero, como son: su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas, así como de recarga y definir y confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero.

El comportamiento del abatimiento con el tiempo en pozos ubicados en acuíferos confinados, libres y semiconfinados son como los mostrados en las Figura 12. En la parte A' se observa que el abatimiento en el periodo inicial no es lineal, sin embargo con el transcurrir del tiempo se vuelve lineal, lo que caracteriza el comportamiento del abatimiento versus el tiempo en un acuífero confinado. En la parte B', se muestra la curva de un acuífero libre, homogéneo e isotrópico, en la cual se observa el abatimiento para un periodo inicial, intermedio de estabilización y posteriormente de descenso debido al drenaje del acuífero. En la parte C', se muestra la curva de abatimiento-tiempo para un acuífero semiconfinado con periodo inicial de abatimiento continuo hasta lograr su estabilización y aporte del acuitardo hacia dicho acuífero.

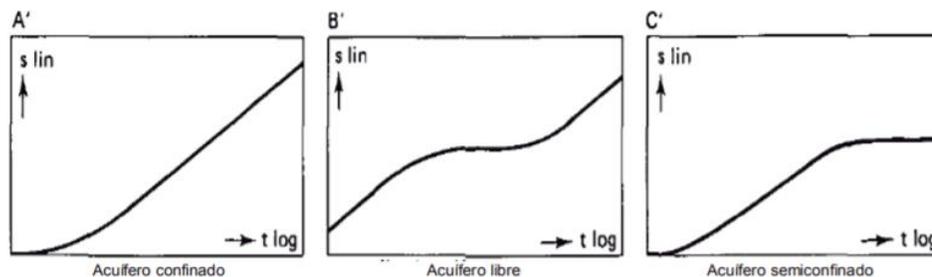


Figura 12: Gráfica semilogarítmica de tiempo-abatimiento teórico de acuíferos no consolidados. Fuente: Kruseman (1991).

Dependiendo del tipo de captación, del tipo de acuífero y de la forma de extraer el agua (caudal constante o variable), se han derivado una serie de relaciones que permiten el cálculo de los parámetros representativos del medio acuífero.

Existen numerosos métodos de análisis de pruebas de bombeo en la literatura. A continuación, se comentan los métodos utilizados para acuífero confinado, libre y semiconfinado, respectivamente:

Theis

Theis (1935) desarrolló una fórmula para régimen de flujo transitorio, en la cual, se introduce el factor tiempo y el coeficiente de almacenamiento.

En el trabajo de Theis se considera que el caudal de descarga de un pozo en un acuífero confinado es directamente proporcional a los abatimientos multiplicados por el coeficiente de almacenamiento y esto sumado sobre el área de influencia. Debido a que el agua bombeada de un acuífero confinado proviene de la reducción de su almacenamiento, el nivel piezométrico descenderá continuamente, siempre y cuando el acuífero sea de extensión infinita. Por lo tanto, no existen condiciones de flujo permanente. Sin embargo, los abatimientos son menores a mayores distancias del pozo de bombeo y eventualmente llegan a ser tan pequeños, que para fines prácticos se consideran despreciables como para suponer flujo estable.

La ecuación siguiente representa la expresión de Theis para flujo transitorio.

Ecuación 3

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T} \right) \int_u^{\infty} e^{-y} \frac{dy}{x} = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Donde

$$u = r^2 S / 4Tt$$

Por lo tanto

$$S = 4Ttu/r^2$$

Donde:

s : Abatimiento medido en el piezómetro [m]

r : Distancias del piezómetro al pozo de bombeo [m]

Q : Caudal constante de descarga en el pozo de bombeo [m³/día]

S : Coeficiente de almacenamiento del acuífero [adimensional]

T : Transmisividad del acuífero [m²/día]

t : Tiempo bombeo [días]

$W(u)$: Función de pozo de Theis

El método estudiado se basa en las siguientes hipótesis:

- El acuífero es de extensión infinita
- El acuífero es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme en el área de influencia de la prueba; esto es, la conductividad hidráulica del acuífero tiene el mismo valor en toda la profundidad
- Antes del bombeo, la superficie piezométrica es casi horizontal en el área que será influenciada por el bombeo

- El caudal que extrae el pozo por bombeo del acuífero es constante
- El pozo penetra totalmente el acuífero
- El diámetro del pozo de bombeo es pequeño, es decir, que el almacenamiento en el pozo puede ser despreciado
- El agua removida del almacenamiento es descargada instantáneamente al decrecer la carga hidráulica (nivel piezométrico) en el acuífero
- Las pérdidas de carga en el pozo-acuífero son despreciables.

Es importante señalar que las ecuaciones teóricas del método de Theis (1935) se basan principalmente en las hipótesis de que el caudal es constante y que el agua bombeada provoca un abatimiento instantáneo del nivel piezométrico.

Esto no sucede en la realidad, sino hasta unos minutos después de haber comenzado el bombeo, lo cual provoca que la curva teórica difiera de la curva observada en su primera porción.

Neuman

Neuman (1975) desarrolló una teoría sobre la respuesta tardía del nivel freático al bombear un pozo, la cual se basa en parámetros físicos bien definidos de un acuífero libre. El autor considera al acuífero como un sistema compresible y al nivel freático como un límite de dicho sistema, pero en movimiento. Reconoce la existencia de componentes de flujo en sentido vertical y establece que la solución del descenso del nivel es una función de la distancia (r) al pozo de bombeo.

Los supuestos que se consideran en el ajuste para este tipo de acuíferos consideran:

- El acuífero es libre.
- Se considera de extensión infinita
- El acuífero es homogéneo y de espesor uniforme, principalmente en el área de prueba.
- La superficie freática se encuentra en forma horizontal antes del bombeo
- El acuífero es bombeado a caudal constante
- El pozo es de penetración total y recibe agua de todo el espesor del acuífero
- El agua entra al pozo debido a los gradientes hidráulicos provocados por el bombeo.
- El acuífero puede ser isótropo o anisótropo.
- La influencia de la zona no saturada sobre el área de abatimiento es despreciable
- No existen pérdidas de carga en el pozo de bombeo

En la práctica, el efecto de flujo en la zona no saturada en la respuesta tardía del nivel freático se considera despreciable. Se supone que un acuífero libre presenta un espesor constante en la vecindad del pozo durante el bombeo, condición que es en muchos casos difícilmente cierta.

Matemáticamente, se simula la respuesta tardía del nivel freático, considera al coeficiente de almacenamiento SA y al rendimiento específico Sy como constantes.

La ecuación de abatimiento de Neuman (1975) es la siguiente:

Ecuación 4

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(\mu_A, \mu_B, \beta)$$

Hantush

En la naturaleza, los acuíferos perfectamente confinados o libres son menos frecuentes que los semiconfinados. Cuando se somete a bombeo un acuífero semiconfinado, el agua extraída no proviene únicamente del acuífero, sino también de la capa suprayacente, la cual es semipermeable (acuitardo). Como resultado del bombeo, el nivel piezométrico del acuífero desciende, creando una diferencia de carga hidráulica entre el acuífero y la capa semipermeable. Por consecuencia, el agua del acuitardo comenzará a moverse hacia abajo, en dirección vertical hacia el acuífero. Hantush (1960) presentó un método de análisis que considera este comportamiento.

Hantush presentó un método de análisis, el cual toma en cuenta el cambio de almacenamiento en el acuitardo sobreyacente al acuífero semiconfinado. Para pequeños valores de tiempo de bombeo, propuso la siguiente ecuación para el cálculo del abatimiento en flujo transitorio:

$$S = \frac{Q}{4\pi KD} W(u, \beta)$$

Donde:

$$u = r^2 S / 4KDt$$

$$\beta = \frac{r}{4} \sqrt{\frac{K'}{D'}} * \frac{S'}{S}$$

Donde:

K' : Conductividad hidráulica del acuitardo [m/s].

D' : Espesor del acuitardo [m/s].

S' : Coeficiente de almacenamiento del acuitardo.

Es importante mencionar que, como paso previo a la realización de una prueba de bombeo, hay que contar con información sobre la geología e hidrología superficial, a fin de conocer las características del acuífero, como son la litología, el espesor y sus límites horizontales, así como las características geológicas y comportamiento de las rocas que lo limitan.

Es deseable contar con información sobre el comportamiento de los niveles potenciométricos anteriores a la prueba y un conocimiento básico de los sistemas de flujo existentes.

Muchos de los métodos utilizados para la interpretación de los datos en las pruebas de bombeo, se basan en la hipótesis de que el acuífero es de extensión infinita.

Aunque estos acuíferos no existen, la mayoría tienen tal extensión lateral, que para fines prácticos puede considerarse como infinita. Existen otros acuíferos que tienen poca extensión, limitada por un material impermeable, como pueden ser las rocas que limitan a un valle, fallas o cambios litológicos en el acuífero. Otros rasgos importantes son los límites de recarga, como puede ser el caso de un acuífero conectado, en la vecindad del pozo de bombeo, con un río o lago. La característica principal de estas pruebas es que, al bombear un pozo ubicado en estos límites, el abatimiento del nivel dinámico es constante.

Es necesario tener presente si el acuífero que se está estudiando se encuentra cerca de una barrera impermeable o de recarga al momento de analizar los datos de la prueba. También es necesario definir la base del acuífero y su relación con la profundidad del pozo.

El conocimiento de la geología de la zona permite optimar el número y localización de las pruebas, es de gran importancia tomar en cuenta las condiciones de frontera para analizar los datos de las pruebas.

2.6.4. Temperatura en aguas subterráneas

La temperatura de fluidos en acuíferos no termales se ha utilizado para identificar zonas de recarga, almacenamiento y descarga, entendiendo que no varía como en acuíferos de tipo termales (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), 2009). Es posible detectar un intercambio de fluidos entre acuíferos y corrientes efímeras por variaciones de temperatura entre 5 a 10 [°C]. Estas variaciones, también se observan cuando la recarga es relativamente rápida y no se logra estabilizar la temperatura del agua con la temperatura de la unidad que alberga al fluido. También pueden delimitar los flujos en las zonas de mezcla

La temperatura almacenada se ve fuertemente afectada por las interacciones con la superficie, una envolvente térmica a lo largo del año (Figura 13). La amplitud de la temperatura disminuye hasta los 10-15 [m] de profundidad. Desde este punto, la

temperatura tiende a la temperatura media anual de la superficie, permaneciendo constante a lo largo del año (Anderson, 2005).

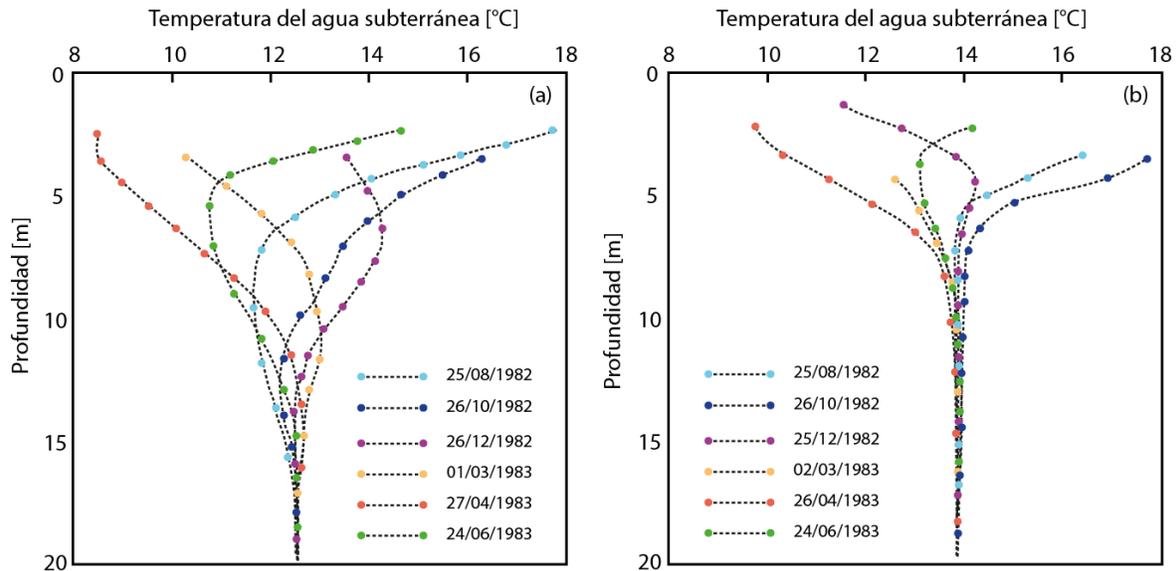


Figura 13: Variaciones estacionales de perfiles de temperatura en aguas subterráneas. A la izquierda, perfiles correspondientes a zonas de recarga y en la derecha a zonas de descarga.

2.7. Comportamiento termal del suelo

2.7.1. Difusividad Térmica

La difusividad térmica es un índice que expresa la velocidad de cambio, y flujo de temperaturas, en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. Se obtiene como la conductividad térmica de un cierto material dividida entre el producto del valor de su densidad y la capacidad calorífica específica del mismo.

En general, las rocas y sedimentos poseen una alta capacidad calorífica en comparación a los valores de conductividad, lo que hace que sus difusividades termales sean bajas y es por esta razón que las variaciones diarias estacionales de temperatura no penetran más de unos metros de profundidad en los suelos. Se presentan a continuación, los valores para distintos tipos de material en suelos.

Tabla 8: Valores para difusividad térmica en distintos tipos de materiales (Andújar 2016).

Tipo de Suelo	Difusividad Termal [$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$]		
	Mínimo	Valor Típico	Máximo
Grava seca	0.25	0.25	0.31
Grava saturada	0.75	0.75	0.75
Arena Seca	0.19	0.25	0.34
Arena Saturada	0.59	0.83	1.72
Arcilla/limo seco	0.25	0.31	0.62
Arcilla/limo saturado	0.26	0.5	0.68

2.7.2. Temperatura del subsuelo

La radiación solar y otros agentes atmosféricos transfieren continuamente energía hacia la superficie terrestre, perturbando la temperatura del suelo más superficial. De acuerdo con Andújar *et al.* (2016), la temperatura del suelo se comporta según la Ecuación 5, esta describe la conductividad termal del suelo. Menciona que, a mayor profundidad, la temperatura del suelo tiende a la temperatura media ambiente anual, en consecuencia, la amplitud entre la temperatura máxima y mínima anual tiende a cero. Este fenómeno se evidencia en la Figura 14, donde también se observa que cuando varía la profundidad se genera un desfase de onda.

Ecuación 5

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \nabla [k \nabla T(x, t)]$$

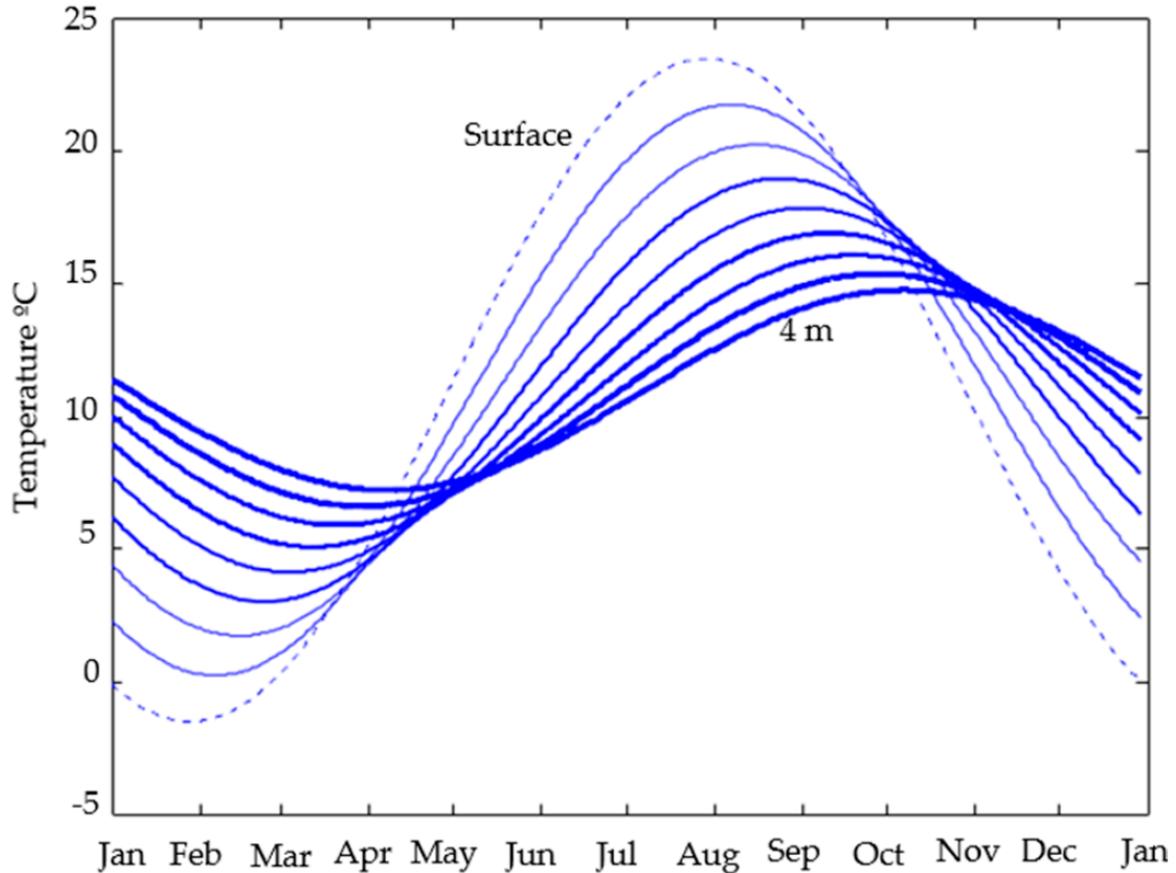


Figura 14: Comportamiento térmico del suelo para profundidades próximas a la superficie (entre 0 y 4 m). Fuente: Andújar et al. (2016).

Andújar (2016) propuso el ajuste de una función armónica mostrado en la Ecuación 6, la cual es utilizada para calcular la temperatura del suelo a una determinada profundidad, donde se supone un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes.

Ecuación 6

$$T_{suelo}(z, t) = T_m - A_s e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos\left(\omega t - \varphi - z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}\right)$$

Donde:

$T_{suelo}(z, t)$: Temperatura del suelo (°C). Se calcula en base un tiempo en días (t) y a una profundidad en metros (z).

T_m : Temperatura promedio del suelo anual (°C). Comúnmente se utiliza la temperatura promedio anual del aire en la zona, además de constante hasta para profundidades de 100 metros.

A_s : Amplitud (°C): Semidiferencia entre el valor máximo y mínima de la temperatura media diaria registrada en el año.

ω : Frecuencia angular (rad/día). Se calcula como $\omega = 2\pi/T$, donde T como corresponde al periodo sinusoide.

φ : Fase (rad). Expresa el desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad.

α : Difusividad Térmica del suelo ($m^2/día$). En términos generales, este valor depende del tipo de suelo y su contenido de agua. Refleja la tasa y extensión a la cual se propaga a través de un medio.

Se desprende de la ecuación propuesta que la temperatura del suelo tiende a la temperatura media anual T_m , y que la amplitud de la variación de la temperatura decrece exponencialmente.

2.8. Bombas de Calor Geotérmicas

Dado que el suelo tiene una gran capacidad calórica y una baja difusividad térmica, cambia de temperatura muy lentamente, del orden de meses o incluso años. Este ciclo anual entre la temperatura del aire y la del suelo resulta en un potencial que puede ser aprovechado para climatizar un compartimento, idealmente bien aislado. Otra característica del suelo es que, bajo unos pocos metros de la superficie, este aísla a las capas de más abajo y al agua subterránea, minimizando la oscilación térmica entre el ambiente y dicha zona (Figura 15) (RetScreen, 2005).

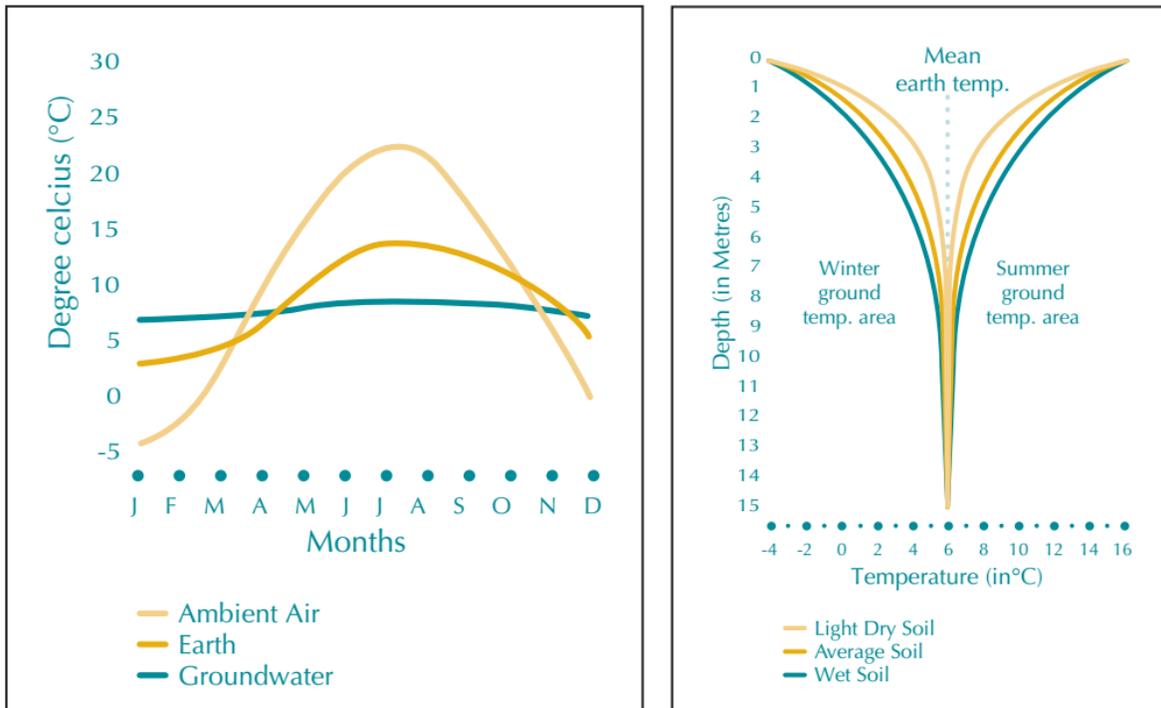


Figura 15: Comparativa de temperatura en: ambiente, suelo y agua subterránea (izquierda). Perfiles de temperaturas en profundidad para invierno y verano en suelos húmedos y secos (derecha). Fuente: RETScreen (2005).

Una bomba de calor es una máquina encargada de tomar energía térmica de un reservorio, y liberarla en un ambiente específico. Para que una de estas máquinas sea considerada geotérmica (es decir una Ground Source Heat Pump (GSHP)), el reservorio de calor utilizado debe ser el subsuelo. Para conseguir lo anterior es que estos sistemas están compuestos por 3 subsistemas:

1. Un colector, que es el que estará en contacto directo con la tierra.
2. La bomba de calor geotérmica, que se encargará de transferir el calor en la dirección deseada.
3. Un sistema de distribución o intercambio de calor con la estructura de interés.

El funcionamiento del subsistema de la bomba de calor propiamente consiste en el transporte de energía que se realiza por medio de un sistema de expansión-compresión del fluido calor-portador que circula a través de la bomba, tomando el calor desde la fuente y retransmitiéndolo hacia un ambiente determinado. El fluido calor-portador o refrigerante interactúa con la fuente térmica y le extrae el calor, pasando luego a un compresor que eleva su presión y aumenta su entalpía.

Posteriormente, se hace circular el fluido en un intercambiador de calor llamado condensador, que está en contacto con el ambiente que se desea climatizar. A medida que el fluido circula por el condensador, y cede su calor, pasa a estado líquido. Saliendo del condensador, el fluido debe pasar por una válvula de expansión que hace pasar el fluido de líquido a vapor, aumentando su presión y disminuyendo

su entalpía, lo que favorece el intercambio de calor con la fuente térmica de calor que estaría entonces a mayor temperatura que el fluido refrigerante, cerrándose el ciclo. Lo que puede observarse gráficamente en la Figura 16

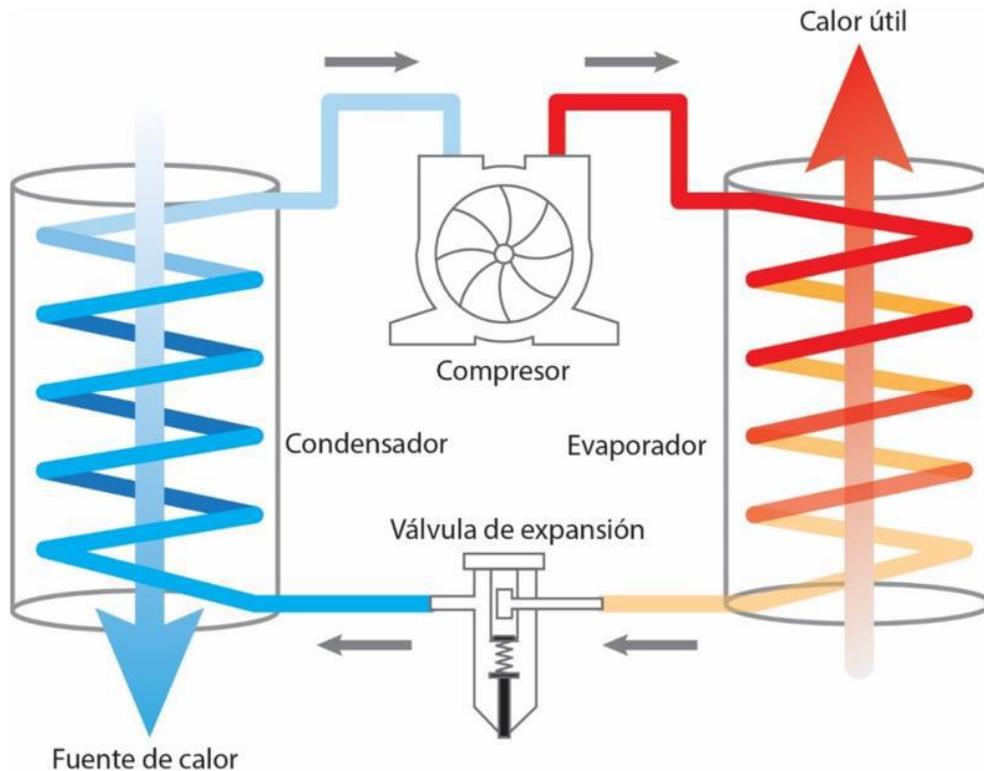


Figura 16: Ciclo de una bomba de calor. Fuente: Aguasol (2016).

Los sistemas de climatización mediante bombas de calor geotérmicas se pueden dividir en dos tipos, dependiendo del intercambiador de calor externo:

1. Intercambiadores cerrados, dentro de los cuales se encuentran horizontales y verticales.

En los sistemas cerrados, el fluido que circula entre la bomba de calor y la fuente corresponde a una mezcla de un anticongelante con agua u otro fluido y se transporta por una tubería intercambiando calor con algún medio.

Horizontales

Consiste en una serie de tuberías que yacen horizontalmente dentro de trincheras con profundidades de entre 1 y 2 [m] (Figura 17). Las tuberías pueden estar configuradas de diferentes maneras, pueden ser singulares, múltiples o en espiral. Es importante que la superficie del suelo no sea cubierta porque la mayor recarga termal proviene de la radiación solar que impacta en esta.

Son los circuitos más simples y económicos para instalar, sobre todo cuando la instalación es previa a la construcción de una edificación. Sin embargo, son más

susceptibles a fluctuaciones de temperatura y se debe disponer de un área suficiente para implementar el sistema y conseguir el potencial energético deseado.

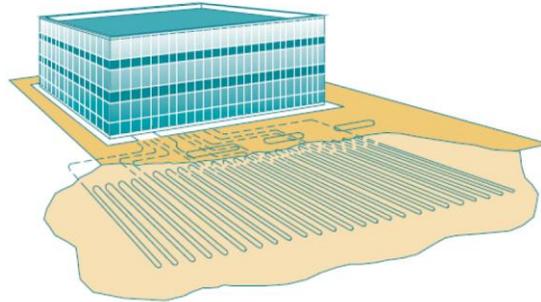


Figura 17: Intercambiadores en sistemas horizontales cerrados (GCHPs). Fuente: RETScreen International (2005).

Verticales

Básicamente hay dos tipos de configuraciones verticales, un tubo en forma de U y tuberías coaxiales o concéntricas. Los pozos normalmente son perforados entre 45 y 150 [m] y el espacio entre los pozos debe ser rellenado para prevenir la contaminación con aguas subterráneas.

Esta configuración es usualmente instalada donde el suelo cercano a la superficie se encuentra confinado o no hay suficiente superficie para instalar un colector horizontal. Como la temperatura a mayor profundidad tiende a ser constante en el año, su configuración es más eficiente en rendimiento; sin embargo, es más costosa. En la Figura 18 se muestra un intercambiador tipo GCHP vertical.

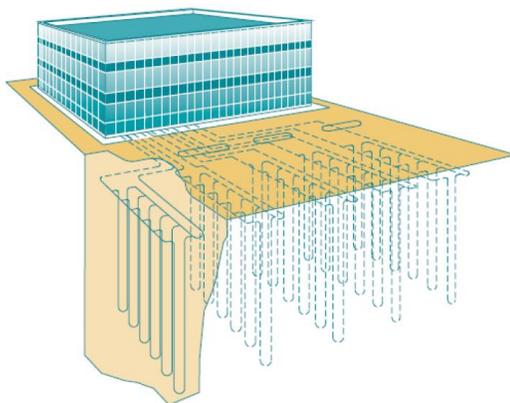


Figura 18: Intercambiadores en sistemas verticales cerrados (GCHPs). Fuente: RETScreen International 2005.

2. Intercambiadores abiertos

Los sistemas abiertos usan como fuente de calor tanto aguas subterráneas como superficiales y, además, funcionan como medio de transporte de calor.

Este tipo de intercambiador es de circulación abierta, ya que se considera al agua subterránea como fuente de calor. Esta es bombeada desde el acuífero hacia la bomba de calor mediante un pozo (Figura 19). Este transporte puede ser directo, pero generalmente, previo a la bomba de calor, el fluido debe circular por un intercambiador intermedio, el que transfiere el calor hacia un circuito cerrado y, finalmente, hacia la bomba de calor. Esto para proteger al intercambiador de la bomba de calor de fenómenos como corrosión, abrasión o incrustación.

Luego de cumplir su propósito, el agua debe ser inyectada al mismo acuífero mediante un pozo de reinyección. Este pozo debe estar localizado entre 10-15 [m] en la dirección del flujo del acuífero corriente abajo. La tasa de flujo de agua subterránea deberá ser capaz de repartir energía según la capacidad requerida y dependerá del poder de enfriamiento del evaporador y de la temperatura del agua de enfriamiento.

Una de las principales limitaciones que presenta el sistema es la disponibilidad del recurso hídrico, esto dependerá del estado de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades. Otra limitante es el alto valor asociado a la construcción de dos pozos.

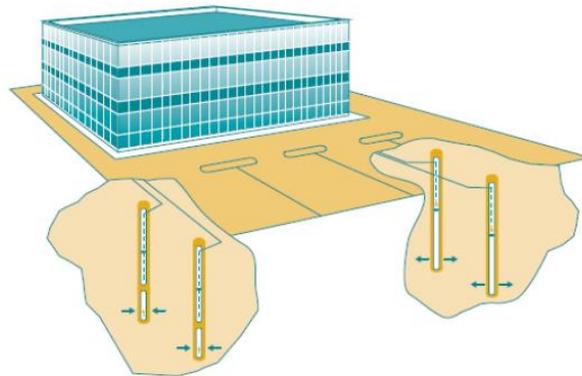


Figura 19: Intercambiadores en sistemas verticales abiertos (GWHPs). Fuente: RETScreen 2005.

2.8.1. Coeficiente de rendimiento

El coeficiente de rendimiento o COP (*Coefficient Of Performance*) corresponde a la razón entre la energía entregada por la bomba de calor para calentar o enfriar, y la energía necesaria para hacerla funcionar. Su valor se puede extraer de la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$COP = \frac{Q_t}{W} = \frac{Q_f + W}{W}$$

Donde:

Q_t : Potencia total generada por la bomba

Q_f : Potencia entregada por la fuente

W : Potencia generada por la bomba.

Otra forma de estimar el COP es según el ciclo de Carnot, que se produce en un equipo o máquina cuando trabaja absorbiendo una cantidad determinada de calor Q_1 de una determinada fuente de mayor temperatura y cediendo un calor Q_2 a la de menor temperatura produciendo un trabajo sobre el exterior. La Ecuación 8 define cómo obtener el COP teniendo en cuenta el ciclo de Carnot.

Ecuación 8

$$COP = \alpha * \epsilon_c$$

Donde:

α : Factor de eficiencia, depende del diseño y manufactura de la máquina. Generalmente toma valores de 0.3 – 0.7 (Oschener 2007).

ϵ_c : Eficiencia de Carnot de calefacción; se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 9

$$\epsilon_c = \frac{T_{cc} + 273}{T_{cc} - T_{ec}}$$

Donde:

T_{cc} : Temperatura absoluta del condensador en caso de calefacción [K], este valor debe ser mayor a la temperatura de confort T_c ente 15° a 20° (ASHRAE 2008).

Ecuación 10

$$T_{cc} = T_c + 18^\circ C$$

T_{ec} : Temperatura absoluta del evaporador en caso de calefacción [K]. Esta depende del tipo de sistema a utilizar.

Para el caso de los intercambiadores horizontales cerrados, este parámetro se define en la siguiente ecuación, ya que se recomienda al menos una diferencia de 5°C para que exista una transferencia de calor entre el agua y refrigerante (ASHRAE, 2008).

$$T_{ec} = T_{w,og} - 5^{\circ}C$$

Donde:

$$T_{w,og} = T_{suelo} - 10^{\circ}C$$

Para el caso de los intercambiadores verticales abiertos:

$$T_{w,og} = T_{gw} - 2^{\circ}C$$

Donde:

T_{gw} : Temperatura del agua en el acuífero.

3. METODOLOGÍA

3.1. Propiedades Hidrogeológicas

Para la realización de este estudio se generó una base de datos con la información de la zona, la cual incluye datos de ubicación de pozos, estratigrafía de pozos, pruebas de bombeo, niveles estáticos y dinámicos los cuales fueron obtenidos desde Dirección General de aguas (DGA). A través desde su servicio online y mediante el portal para transparencia del Gobierno de Chile (para los casos donde no se contaba con registro online).

Todas las interpolaciones mencionadas se realizan en el programa QGIS (Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License), utilizando la herramienta *kriging* ordinario con modelo circular y anisotropía. Este corresponde a un método de interpolación que utiliza una media de la población de datos que es desconocida y que se asume constante. El método permite describir y modelar patrones espaciales, predecir valores no medidos en ciertos lugares y evaluar la incertidumbre asociada.

Además, los mapas generados se presentan en coordenadas geográficas en el datum WGS84.

3.1.1. Variación del nivel estático

La DGA posee 5 pozos de niveles estático en la zona de estudio, con datos desde 1960 hasta el actual año. Considerando que la cantidad de pozos es insuficiente para poder hacer una interpolación de calidad, se toman pozos que rodeen la zona de estudio, pertenecientes a las cuencas aledañas.

Se realiza un mapa de niveles freáticos y cotas hidráulicas en la zona de estudio. Para el caso de los niveles estáticos (NE) la interpolación es directa, mientras que las cotas hidráulicas se calculan mediante la Ecuación 11. La información topográfica de altitud se obtiene mediante imágenes satelitales de modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos del satélite Alos Palsar.

Ecuación 11

$$Cota\ hidráulica = Altitud\ geográfica\ [m.s.n.m] - NE\ [m]$$

El año que se analiza corresponde al 2018, ya que es el que reúne los criterios de cantidad de información y actualidad de la mejor forma. Se utilizan 49 estaciones de la DGA que tienen información para ese año.

Luego, la dirección de flujo de las aguas subterráneas se determina a partir del resultado obtenido para las cotas hidráulicas, de las cuales se obtienen las equipotenciales del sector.

3.1.2. Abatimiento

Con la información recabada de los expendieros de la de DGA y utilizando la Ecuación 2 se presenta un mapa de los abatimientos en la subcuenca analizando también cuales son los máximos y mínimos.

3.1.3. Transmisividad

Se recopila la información de los derechos de agua otorgados por la DGA en la zona de estudio, a través de estos se obtiene los datos de las pruebas de bombeo para gasto constante, se trabajan en el programa AcuíferTest, en el que se obtiene la transmisividad según los métodos de Theis, Hantush y Neuman.

Es importante mencionar que el programa señalado está desarrollado para acuíferos con las siguientes características:

- El acuífero es homogéneo e isótropo
- El acuífero es infinito
- El pozo atraviesa completamente la formación permeable
- El flujo es radial y horizontal

Además, se toman los valores observados de descenso medidos en el mismo pozo donde se bombea, lo que debería ser corregido por perdidas en este. Asimismo, correcciones por no poder asegurar en todos los pozos la penetración total del acuífero.

Considerando lo anterior, los valores presentados corresponden a valores estimados y pueden presentar errores, se asume de esta manera ya que la información de las pruebas de bombeos existente es precaria y es lo único con lo que se cuenta. De todas formas, es buena aproximación de lo que ocurre en el acuífero sur, tal como se ha hecho en otros estudios de análisis de parámetros hidráulicos.

Se realizaron las simulaciones en AquiferTest individualmente para cada prueba de bombeo, comparando los gráficos de descenso en el tiempo con los gráficos teóricos (Figura 12) tal como se detalla en la sección 2.6.3. Durante el proceso de interpretación se han realizado distintos ajustes y en este trabajo sólo quedan reflejados los mejores ajustes.

3.1.4. Conductividad

Se obtuvo mediante la Ecuación 1, tomando el espesor saturado correspondiente para cada pozo donde fue obtenida la transmisividad.

Los datos se muestran en mapas generados donde se indica la transmisividad y conductividad en el lugar donde se ubica el pozo del que se obtuvo la información para calcularla.

3.1.5. Distribución de sedimentos

La información estratigráfica se obtuvo, al igual que las pruebas de bombeo, de los expedientes entregados por la DGA. Los sedimentos registrados no poseen una nomenclatura en común. La información de los expedientes se homogenizará tomando como referencia el triángulo de Shepard (1954) para clasificar sedimentos de acuerdo a su granulometría. Hay que mencionar que, en lugar de limos, este trabajo ocupa arcillas para mantener la congruencia con las descripciones estratigráficas de los expedientes de la DGA.

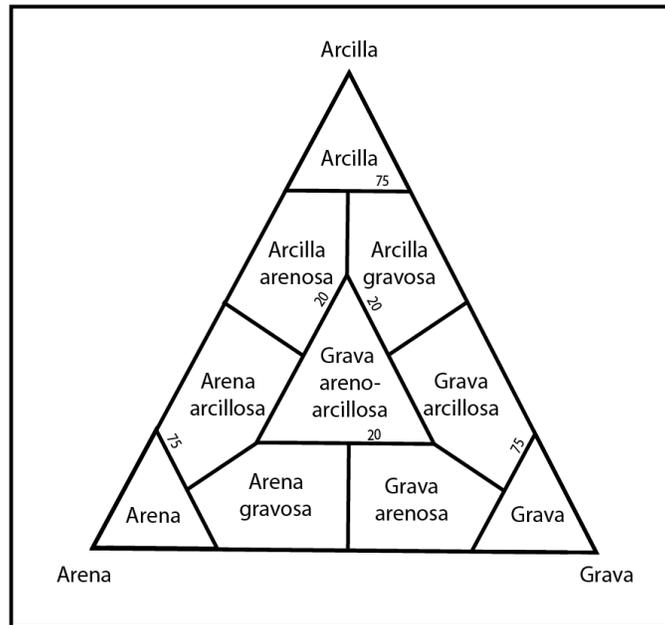


Figura 20: Sistema de clasificación de sedimentos de Shepard. (1954).

Con el fin de definir, si los distintos tipos de bombas de calor geotérmicas son capaces de satisfacer las demandas térmicas de calefacción de invernaderos en la Subcuenca del Maipo Medio, se necesita una serie de procedimientos para los sistemas estudiados, los cuales serán detallados a continuación.

3.2. Sistemas horizontales cerrados

3.2.1. Temperatura

Para obtener el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor y los cálculos de temperatura en subsuelo se utilizarán las temperaturas del aire del último años en la estación climática “Los Tilos”, localizada en Buin, perteneciente a la Red Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), del Ministerio de Agricultura.

3.2.2. Cálculo de la evolución de temperatura en terreno

Entre la superficie y 10 metros hacia abajo, la temperatura del suelo varía dependiendo de la profundidad y cualquier evento que pueda perturbar la compactación y uniformidad del suelo, además de la humedad de este y el flujo de las aguas subterráneas presentes en la zona.

Para realizar el cálculo se utiliza la Ecuación 6.

3.2.3. Cálculo Coeficiente de Rendimiento (COP)

El coeficiente se obtiene mediante la Ecuación 8.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad, donde se estudia cómo varía el COP si la temperatura calculada en el punto anterior varía en 2°C. Por otro lado se estudia cómo se diferencia el COP si la profundidad a enterrar los intercambiadores es de 3 metros, el cual es un valor de excavación típico.

3.2.4. Determinación del área de los intercambiadores de calor

Una vez definida la potencia necesaria de los invernaderos para calefacción (Tabla 6) y conociendo el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor, se utiliza la Ecuación 12 para determinar la potencia a extraer desde el suelo y así definir los metros cuadrados de las cañerías que extraen el calor del suelo.

Con el COP calculado se puede obtener la potencia total (Q_T) que entrega la bomba de calor (que corresponde a la demanda máxima requerida por el invernadero), para esto es necesario conocer el potencial que es posible obtener desde la fuente (suelo) (Q_f) y la potencia eléctrica que consume la máquina (W).

Ecuación 12

$$Q_T = Q_f + W$$

Utilizando la Ecuación 7 se obtiene finalmente la fórmula que define la potencia total que puede entregar el suelo.

Ecuación 13

$$Q_s = Q_T \left(\frac{COP - 1}{COP} \right)$$

Con esta información, se puede determinar el área que deberá ocupar un colector horizontal para obtener la energía requerida para satisfacer la demanda térmica. Esta área, según el trabajo de Sarbu & Sebarchievici (2016), se calcula a partir de la Ecuación 14 donde q_E es el potencial de extracción específico del suelo y se obtiene de la Tabla 9.

Ecuación 14

$$\text{Área} = \frac{Q_s}{q_E}$$

Tabla 9: Valores típicos de extracción de calor de una superficie para diferentes tipos de suelo. Fuente: Pipelife (2015).

Tipo de suelo	Máxima energía específica de extracción [W/m ²]	
	A 1800 horas/año	A 2400 horas/año
Suelo seco	10	8
Suelo cohesivo, húmedo	20 – 30	16 - 24
Gravas o arenas saturadas	40	32

3.3. Sistemas verticales abiertos

Para obtener la energía que es capaz de generar este tipo de sistema se necesitan ciertas propiedades del agua subterránea, tales como su temperatura y el caudal que es permitido extraer debido a las propias características del acuífero. Luego, se determina la profundidad que deben tener los pozos.

El diseño de un GWHP debe considerar principalmente tres profundidades. La primera es la profundidad del nivel estático (NE). La segunda profundidad corresponde al abatimiento (Zw) esperable debido a la extracción de agua del acuífero. Por último y a modo de seguridad, la tercera es la profundidad de sequía (Zs), relacionada a las variaciones en el nivel estático, la cual se obtendrá del análisis en el tiempo de los niveles estativos en los últimos años en la zona.

El mapa de profundidades, considera también la instalación de un pozo de reinyección debido a que se reduce el impacto ambiental relacionado a la extracción de agua del pozo al no extraer agua del acuífero. Por este motivo, el mapa de profundidades también incluye las direcciones globales de flujo del agua subterránea, para evitar el quiebre térmico en la instalación.

3.3.1. Determinación de caudales

Se utiliza la información otorgado por los expedientes de la DGA, de las cuales se extraen los caudales otorgados en todas las comunas de la subcuenca. Se determina cual es caudal (Q) mínimo con que al menos un 90%, 75% y 50% de los pozos bombea agua. Para aquello, se realiza un histograma de los caudales y se señalan los percentiles de interés.

3.3.2. Temperatura del agua subterránea.

Para obtener las temperaturas de las aguas subterráneas presentes en la subcuenca del Maipo Medio se interpolan alrededor de 40 mediciones de temperatura en pozos de aguas potable obtenidos del proyecto “Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca y sus implicancias para el uso directo de la energía geotérmica”, realizado por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Se realiza una interpolación para finalmente mostrar como varía la temperatura del acuífero en el sector señalado.

3.3.3. Coeficiente de rendimiento (COP)

Para el cálculo del coeficiente de rendimiento se prosigue de la misma forma que para colectores horizontales, utilizando la Ecuación 8. En cambio, con esos sistemas, se considera que el valor de la temperatura absoluta del evaporador en caso de colección (T_{ec}) está en función de la temperatura del agua subterránea. En este caso, la potencia que se puede transferir con el subsuelo es mucho mayor que en los sistemas que utilizan intercambiadores horizontales.

3.3.4. Cálculo potencia generada

Primero, para calcular la potencia obtenida desde el suelo, se utiliza la Ecuación 15 (Muñoz *et al.*, 2015) que depende del caudal al que se bombea, las propiedades físicas del agua y las diferencias de temperaturas del agua subterránea de entrada y salida en la bomba de calor:

Ecuación 15

$$P_{as} = Q * \rho * C_p * \Delta T^{\circ}$$

Donde:

P_{as} : Potencia generada por el calor extraído del agua subterránea [KW]

Q : Caudal [m^3/s]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

C_p : Capacidad calórica específica del agua a una presión constante [$J/kg\cdot K$]

ΔT : Diferencia de temperatura del agua subterránea de entrada y salida en la bomba de calor [K].

3.3.5. Profundidad pozos y dirección del flujo

El diseño de un GWHP debe considerar principalmente tres profundidades. La primera es la profundidad del nivel estático (NE). La segunda profundidad corresponde al abatimiento (Z_w) esperable debido a la extracción de agua del acuífero. Por último y a modo de seguridad, la tercera es la profundidad de sequía (Z_s), relacionada a las variaciones en el nivel estático, la cual se obtendrá del análisis en el tiempo de los niveles estativos en los últimos años en la zona.

El mapa de profundidades considera también la instalación de un pozo de reinyección debido a que se reduce el impacto ambiental relacionado a la extracción de agua del pozo al no extraer agua del acuífero. Por este motivo, el mapa de profundidades también incluye las direcciones globales de flujo del agua subterránea, para evitar el quiebre térmico en la instalación.

Luego, eliminando los datos que se consideraron fuera de serie se presentan los resultados en un mapa de profundidades.

3.4. Sistemas verticales cerrados

Los sistemas verticales cerrados suelen ser una buena opción si la roca madre se encuentra cercana a la superficie, cuando se desea reducir al mínimo el espacio de instalación de colectores o cuando no se desea perturbar el entorno. Si bien son mucho más eficientes, la instalación generalmente es económicamente más costosa.

3.4.1. Potencial de extracción del suelo

De acuerdo con la metodología expuesta en el trabajo de Muñoz et al. (2015), se busca satisfacer una demanda a partir de la energía disponible. Entonces se utilizará la demanda térmica para estimar el potencial de extracción de calor del suelo mediante la Tabla 10, considerando que se debe realizar una estimación del sHE para suelo seco y saturado mediante las Ecuación 16 y Ecuación 17, respectivamente.

Ecuación 16

$$sHE_{seco} = \frac{1}{Th_{seco}} \sum_{k=1}^n (sHE_k * Th_i) < NE$$

Ecuación 17

$$sHE_{saturado} = \frac{1}{Th_{saturado}} \sum_{k=1}^n (sHE_k * Th_i) \geq NE$$

Tabla 10: Valores típicos de extracción de calor en litologías. Modificado de Ondreka et al 2007.

Tipo de roca	sHE [W/m] para 2400 hr
Gravas y arenas secas	<20
Gravas y arenas saturadas	55 – 65
Gravas y arenas saturadas con alto flujo de agua subterránea	80 – 100
Limos y arcillas	30 - 40

4. RESULTADOS

4.1. Propiedades hidrogeológicas

4.1.1. Variación del nivel estático

La superficie de niveles estáticos se realizó mediante *kriging* ordinario con anisotropía. Como se observa en la Figura 21, los niveles estáticos de aguas subterráneas registrados para el año 2018 en la subcuenca del Maipo Medio son variables. Se tiene que las mayores profundidades bordean los 35 [m], mientras que los menores se encuentran cercanos a los 5 [m]. El promedio es de 25 [m] y la desviación estándar corresponde a 19 [m].

Se puede observar que los mayores descensos se encuentran en la zona norte de la subcuenca, y serían los ubicados en la zona de centro de la cuenca del Río Maipo, mientras que los niveles más someros están ligados al sector oeste de la subcuenca, cercanos al sector de Paine y donde se encontraba la Laguna Aculeo.

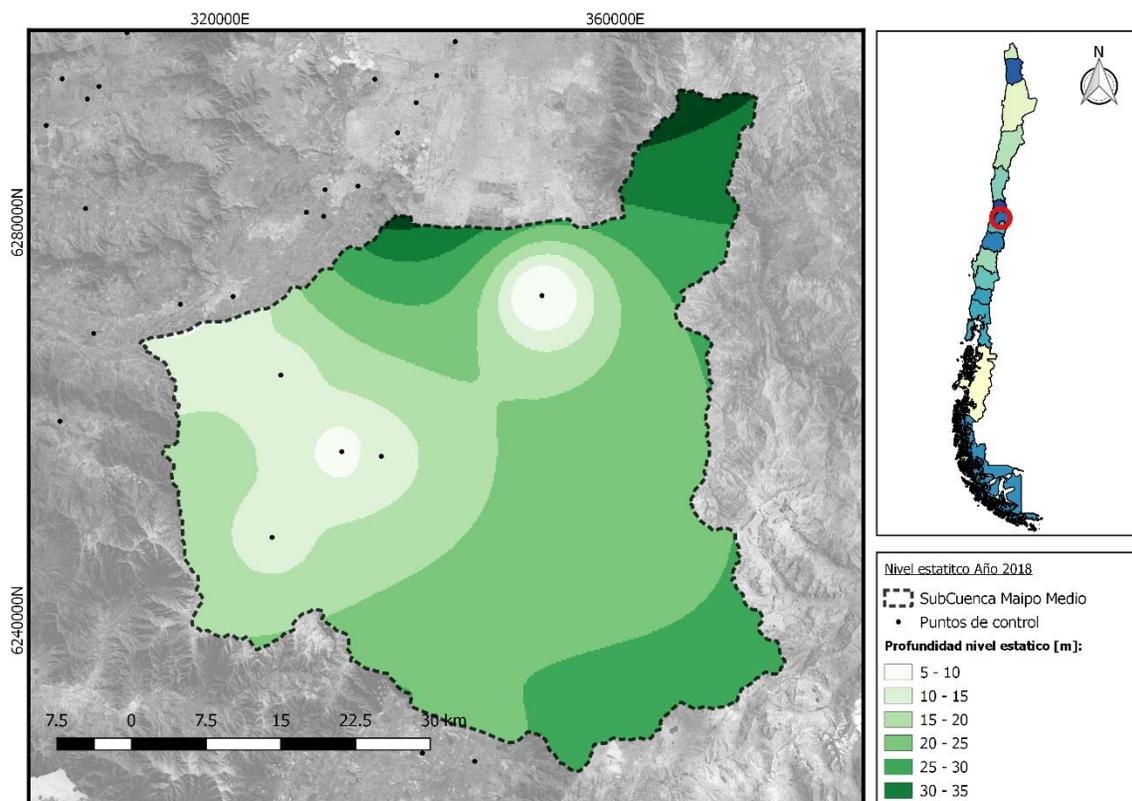


Figura 21: Mapa de interpolación de niveles estáticos en la subcuenca. Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Cotas hidráulicas

Se genera un mapa con las cotas hidráulicas que representan el nivel de agua subterránea en metros sobre el nivel del mar [m.s.n.m]. Los niveles piezométricos registrados para el año 2018 varían entre 300 a 450 [m.s.n.m], con un promedio de 354 [m.s.n.m] y desviación estándar de 168.5 [m.s.n.m].

Se observa en la figura Figura 22, que las mayores alturas, las que superan los 500 [m.s.n.m], se encuentran hacia el noreste de la subcuenca. En una segunda instancia, también se observan alturas importantes al sur de la zona. Las que comienzan a disminuir hacia el centro y luego hacia el oeste. Lo que indica flujos globales de agua subterránea que proviene desde el norte y sur, que luego se dirigen hacia la costa.

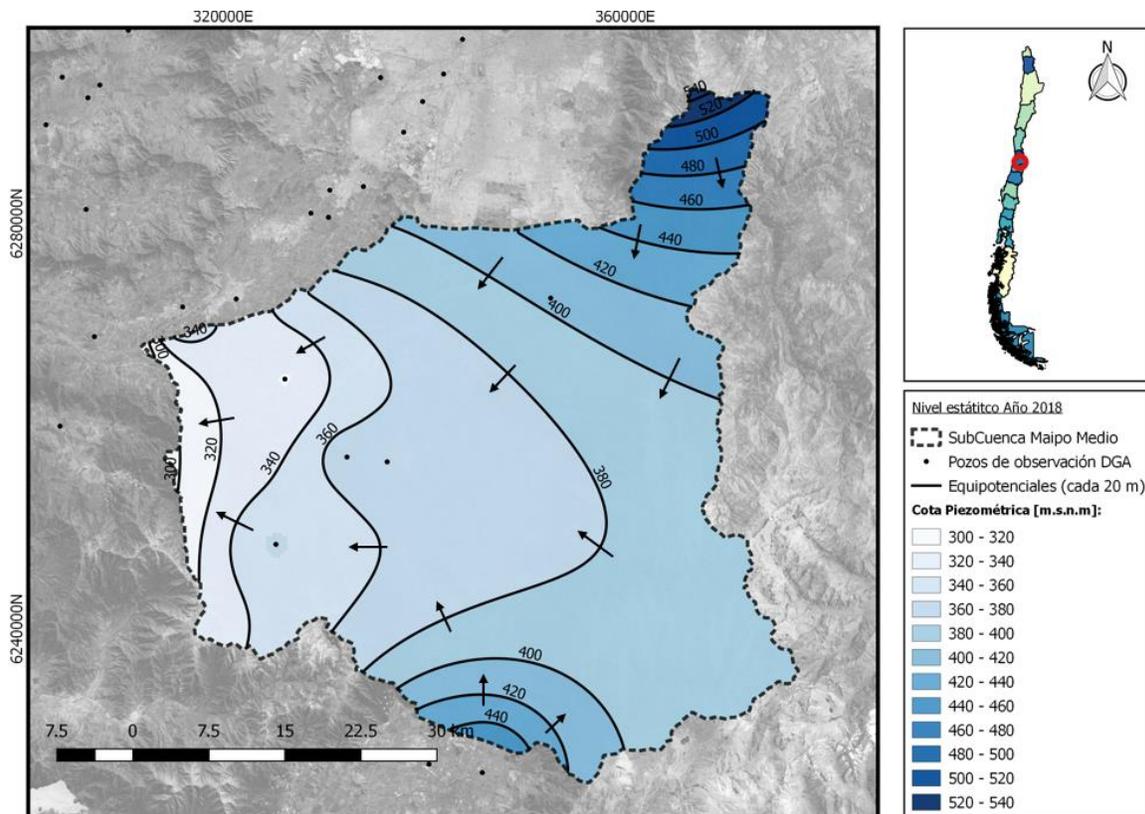


Figura 22: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección de flujo. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.3. Abatimiento

La Figura 23 presenta un mapa de abatimientos calculados a partir de los niveles estáticos y dinámicos recopilados de expedientes de pozos profundos. Estos se clasifican en tres rangos representados por el tamaño de círculo y color en cada caso. Los abatimientos varían su profundidad entre 0.2 [m] y 58 [m], se observa una concentración de abatimientos mayores hacia el centro de la zona de estudio.

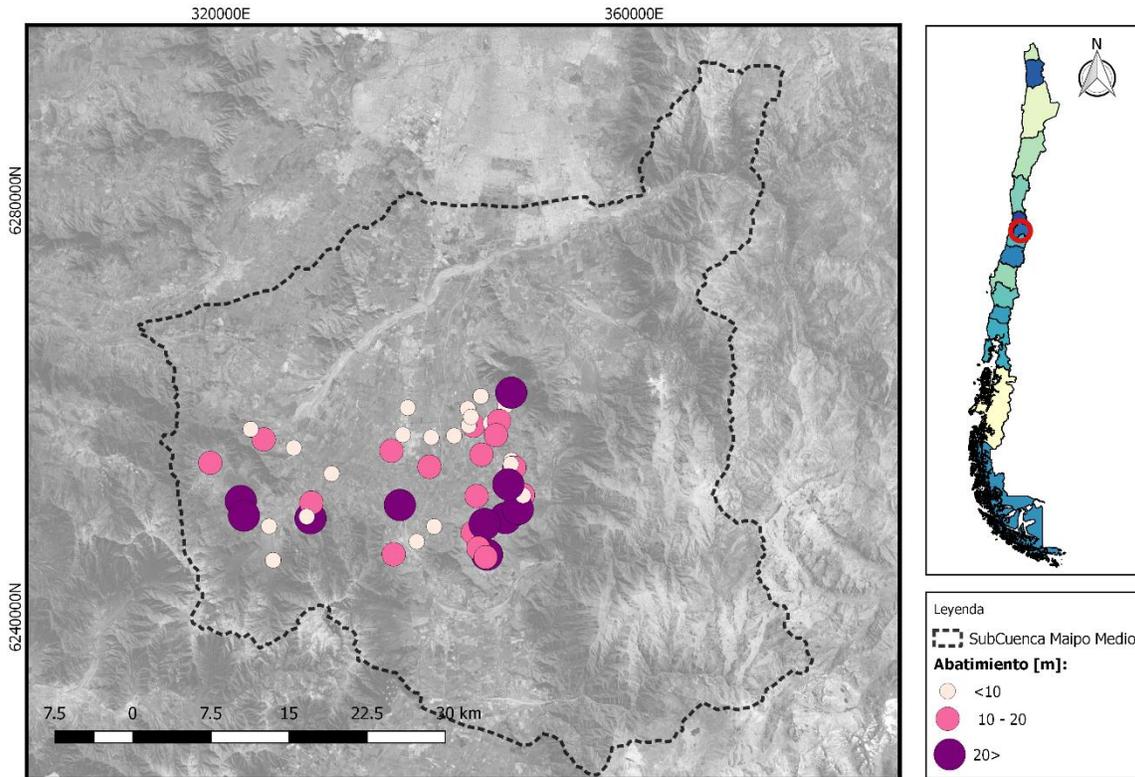


Figura 23: Mapa de abatimientos en pozos profundos. Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Transmisividad

Utilizando la metodología explicada para la obtención de transmisividad a través de 50 pruebas de bombeo procesadas, se simula el descenso del nivel de agua en el tiempo para una tasa de extracción de caudal constante.

Los resultados de transmisividad se muestran en la figura XXX. Estos datos se encuentran entre 1 y 6000 [m²/día], siendo separados en 4 rangos representados por tamaño y color de círculos para cada dato.

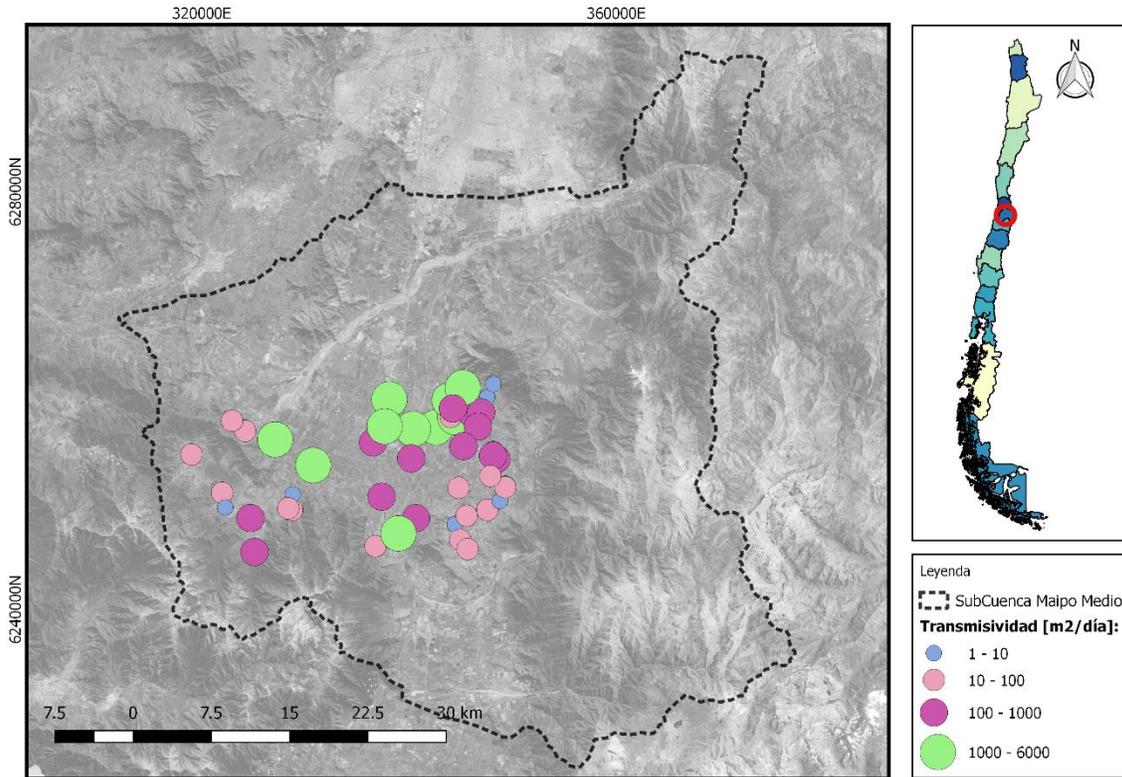


Figura 24: Mapa de transmisividades en la subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Conductividad

Utilizando los valores obtenidos para la transmisividad se muestran en la Figura 25 los resultados para la conductividad hidráulica. Estos datos se encuentran entre 10^{-4} y 10^0 [m/s]. Siendo separados en 4 rangos. Las mayores conductividades se encuentran distribuidas hacia la zona centro de la subcuenca, encontrándose un grupo de menos conductividades hacia el sector donde se encontraba la Laguna Aculeo, Paine.

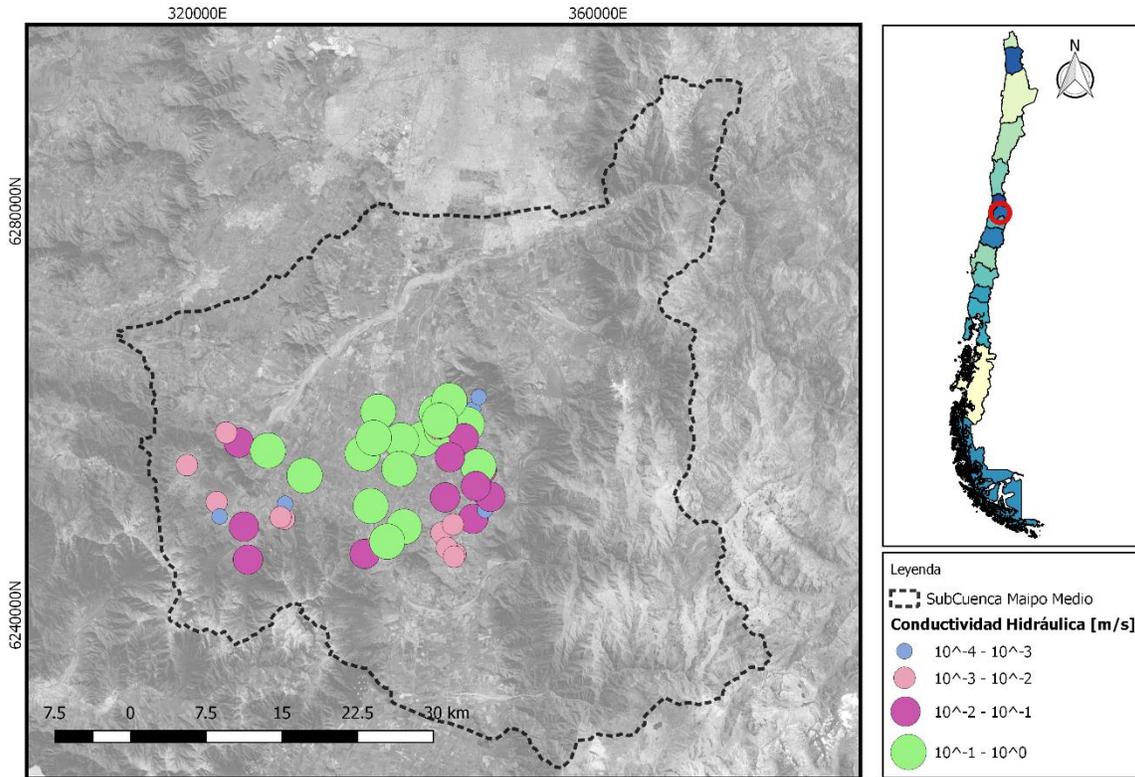


Figura 25: Mapa de conductividades hidráulicas en subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Distribución de sedimentos

De los expedientes de pozos publicados por la DGA, se extrae la información estratigráfica de 25 pozos para realizar 4 secciones geológicas esquemáticas. Las orientaciones de las secciones son:

- Perfil A: NE - SO
- Perfil B: NO – SE
- Perfil C: N – E
- Perfil: O – E

Los que buscan poder representar de la mejor forma la zona de estudio en profundidad, y que son fundamentales al obtener los espesores saturados del acuífero y por consiguiente las conductividades hidráulicas. Un análisis en más detalle sobre los niveles piezométricos se puede observar en anexos.

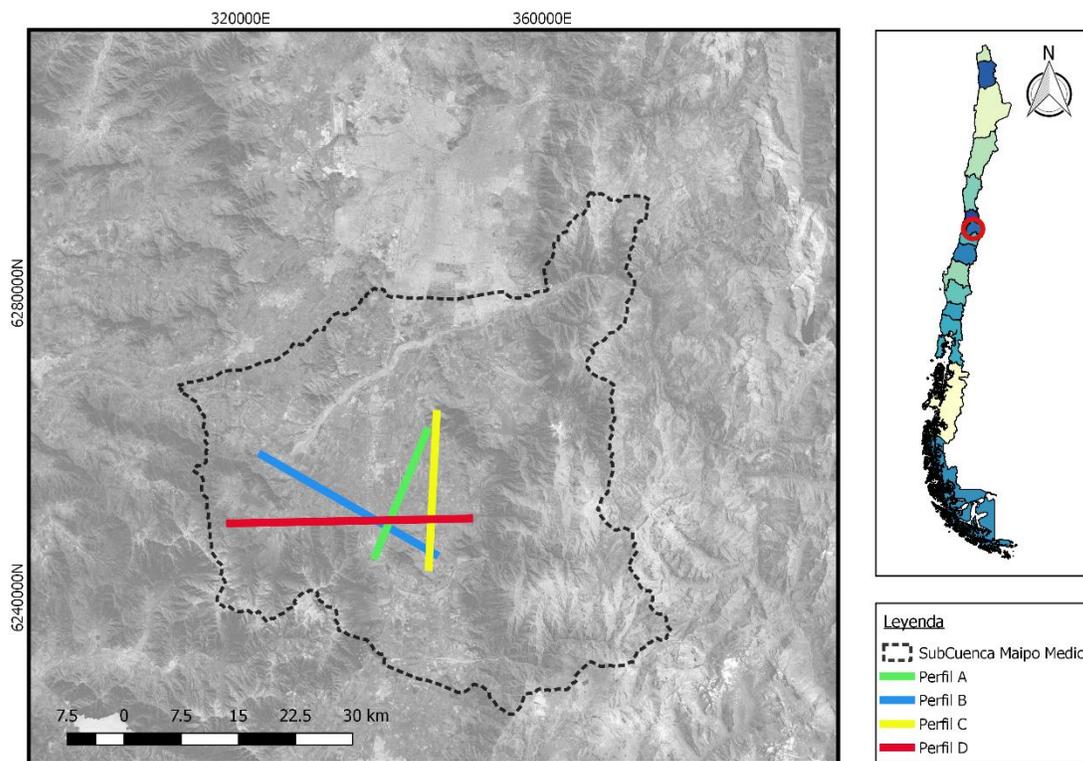


Figura 26: Mapa con la ubicación de los perfiles estratigráficos realizados. Fuente elaboración propia.

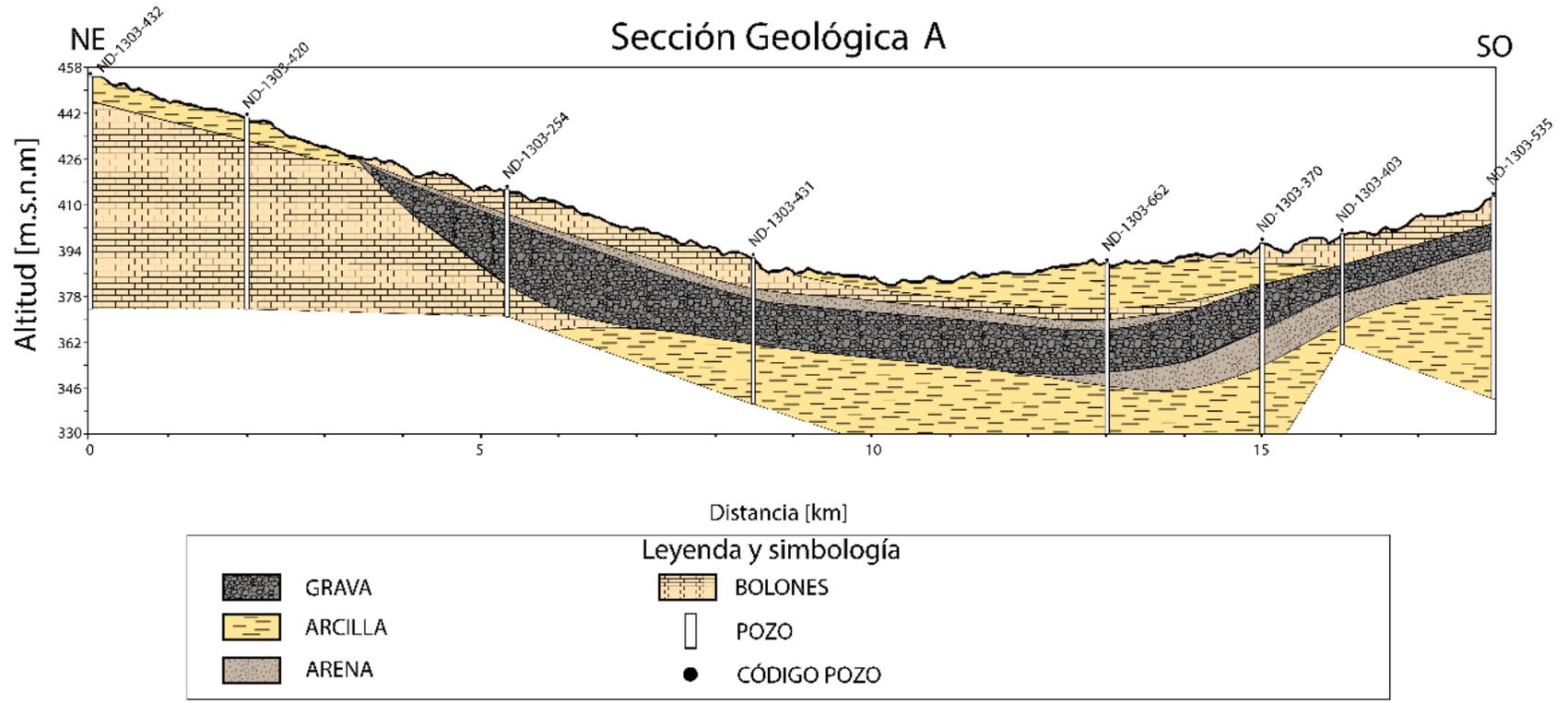


Figura 27: Sección geológica esquemática A. Fuente: Elaboración propia

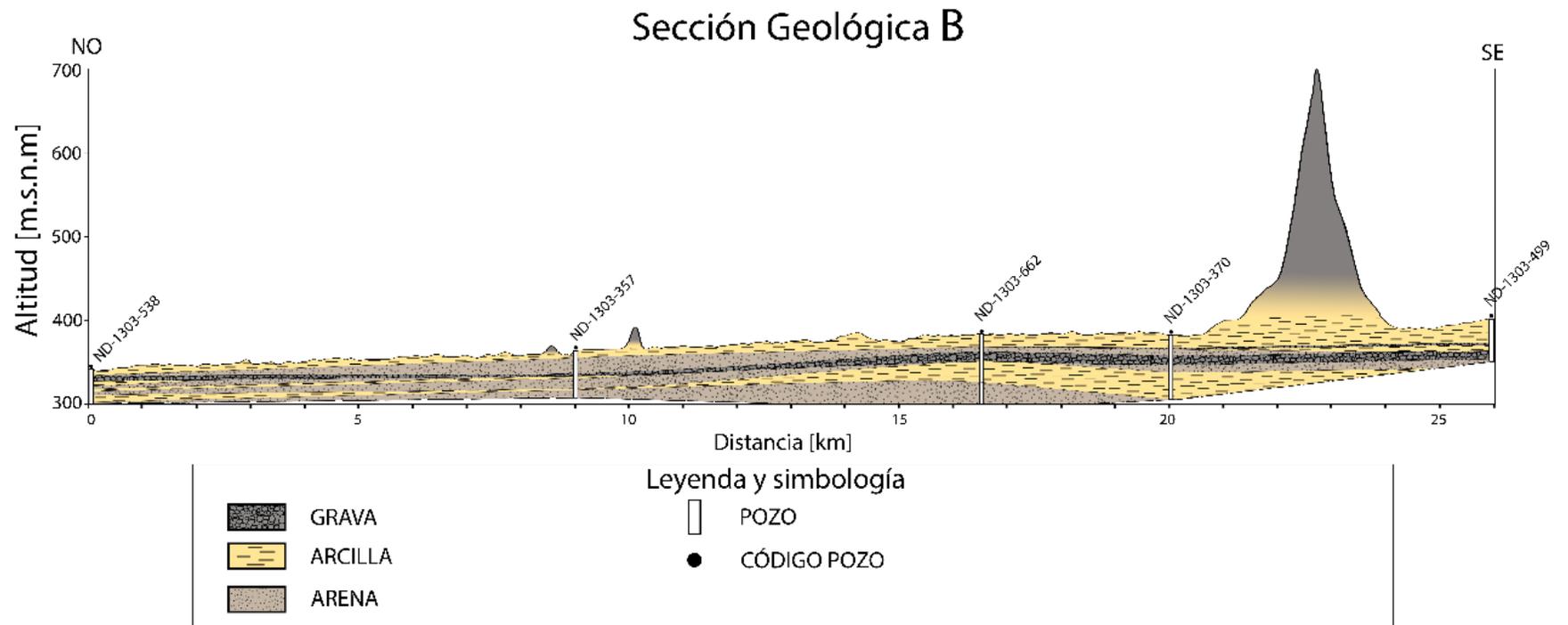


Figura 28: Sección geológica esquemática B. Fuente: Elaboración propia

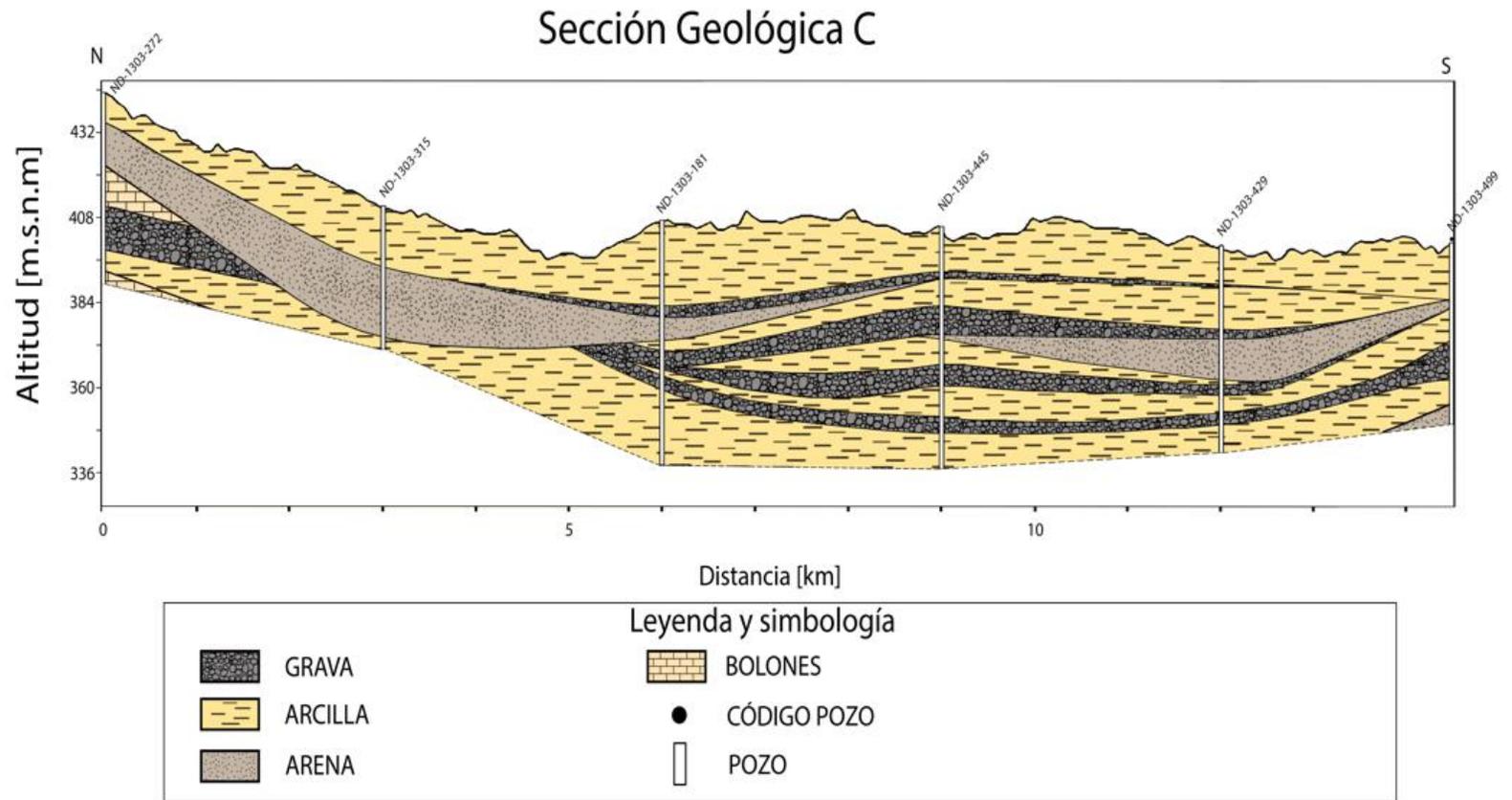


Figura 29: Sección geológica esquemática C. Fuente: Elaboración propia

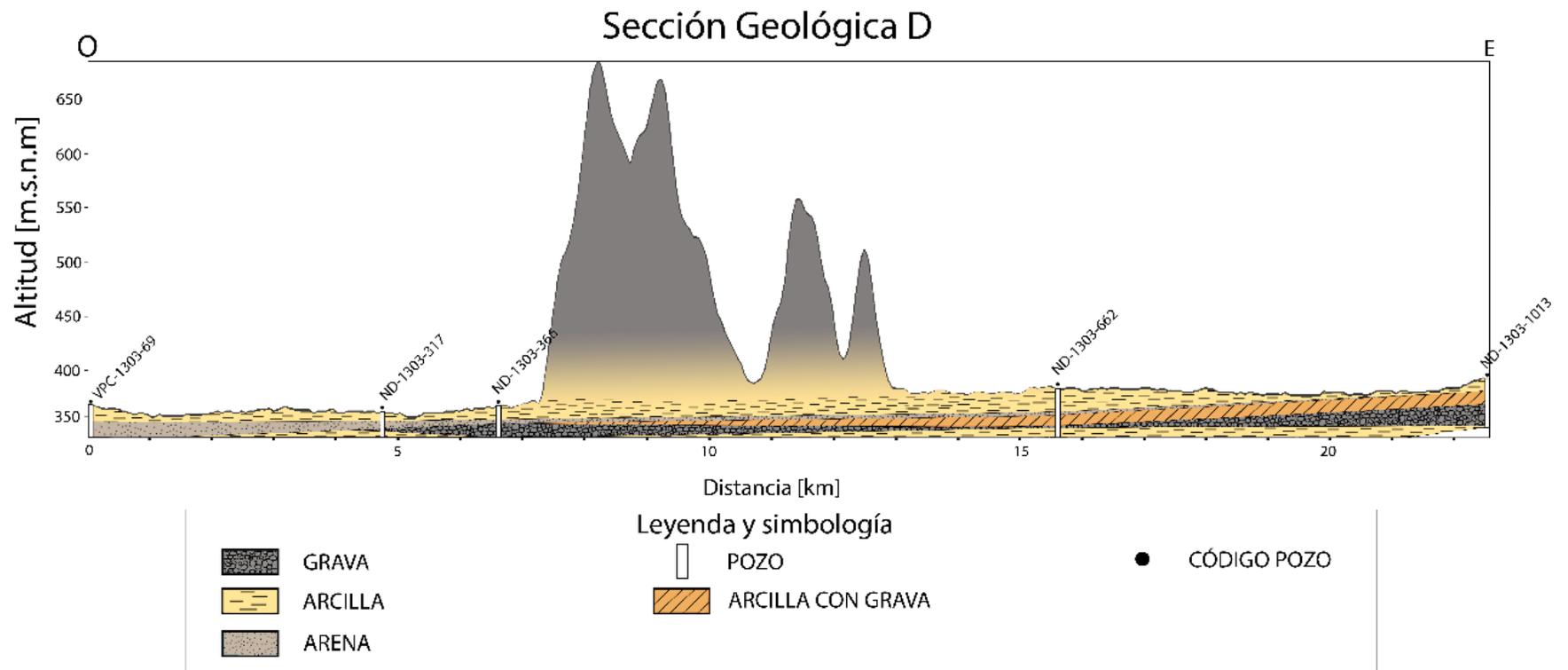


Figura 30: Sección geológica esquemática D. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Intercambiadores horizontales

4.2.1. Evolución de temperatura en terreno

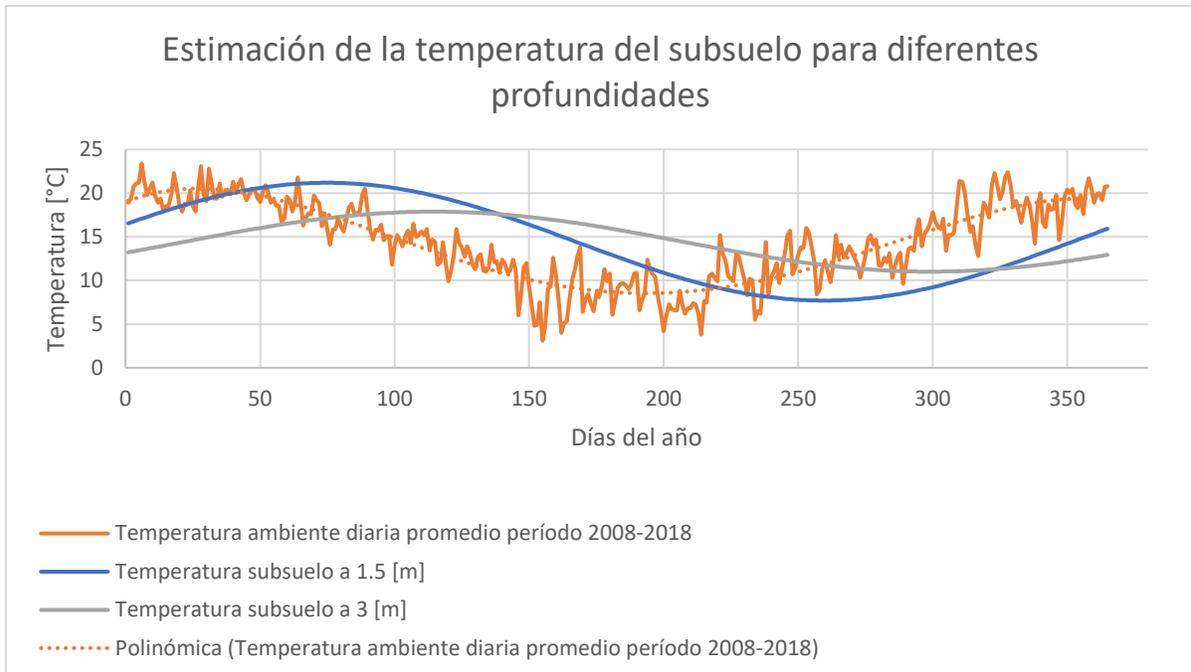
Para la modelación de la temperatura del suelo durante un año hay que considerar los parámetros (Tabla 11) de los cuales depende según la Ecuación 6.

La temperatura promedio anual se asume como la temperatura media del aire para los últimos 10 años.

La amplitud se calcula como el promedio entre la temperatura máxima y mínima promedio que se dio los últimos años en la estación considerada. Para la difusividad térmica se tomó un promedio de todas de las difusividades mostradas en la Tabla 8, dado que el suelo presenta un porcentaje variado de sedimentos. Además, cabe mencionar que la fase utilizada corresponde a 35 días y es transformada a radianes considerando la relación: $366 = 2\pi$ [rad], equivalente a una simplificación de órbita terrestre completa descrita en un año. Los diferentes datos de temperatura se encuentran registrados en el anexo.

Tabla 11: Parámetros para el cálculo de la temperatura en el subsuelo.

Parámetros Ecuación		Valor	Unidad
Temperatura promedio anual	T_m	14.45	[°C]
Amplitud	A_s	13.25	[°C]
Frecuencia Angular	ω	0.0017	[rad/día]
Fase	ϕ	3.74	[rad]
Difusividad térmica del suelo	α	0.042	[m ² /día]



*Figura 31: Estimación de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades.
Fuente: Elaboración propia.*

En la Tabla 12 se muestran los valores máximos, mínimos y promedios de las temperaturas calculadas:

Tabla 12: Temperatura mínima, máxima y promedio a 1,5m y 3m de profundidad

Profundidad intercambiador [m]	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura promedio [°C]
1.5	7.7	21.2	14.4
3	11.0	17.9	14.5

4.2.2. Estimación del COP

Se calcularon los coeficientes de rendimientos asociados a estas temperaturas, para distintas profundidades, además de un análisis de sensibilidad para los intercambiadores enterrados de 1.5 metros (que es lo más utilizados en intercambiadores horizontales).

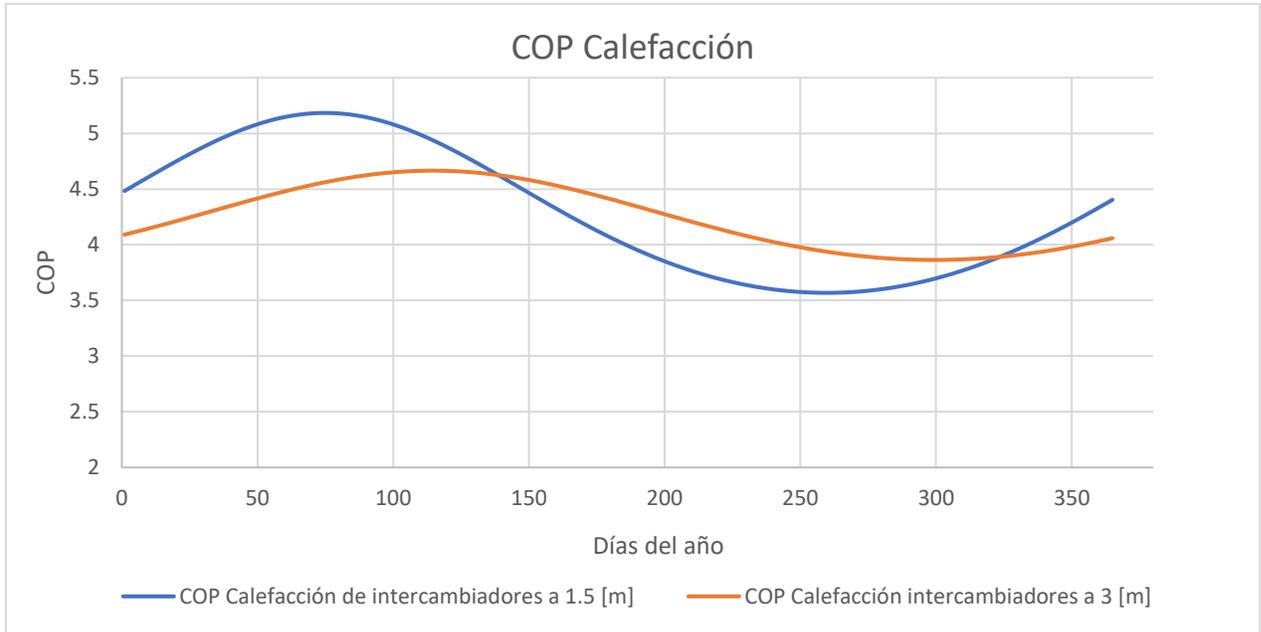


Figura 32: Estimación del COP para distintas profundidades. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13: COP mínimo, máximo y promedio de intercambiadores enterrados a 1,5m y 3m

Profundidad intercambiador [m]	COP Mínimo	COP Máximo	COP Promedio
1.5	3.6	5.1	4.3
3	3.9	4.6	4.25

Por último, se muestra en la Figura 33, cómo variaría el COP en el caso que la temperatura estimada a 1.5m de profundidad mayor o menos en 2°C. Los valores máximo, mínimo y promedio en estos casos se muestran en la Tabla 14.

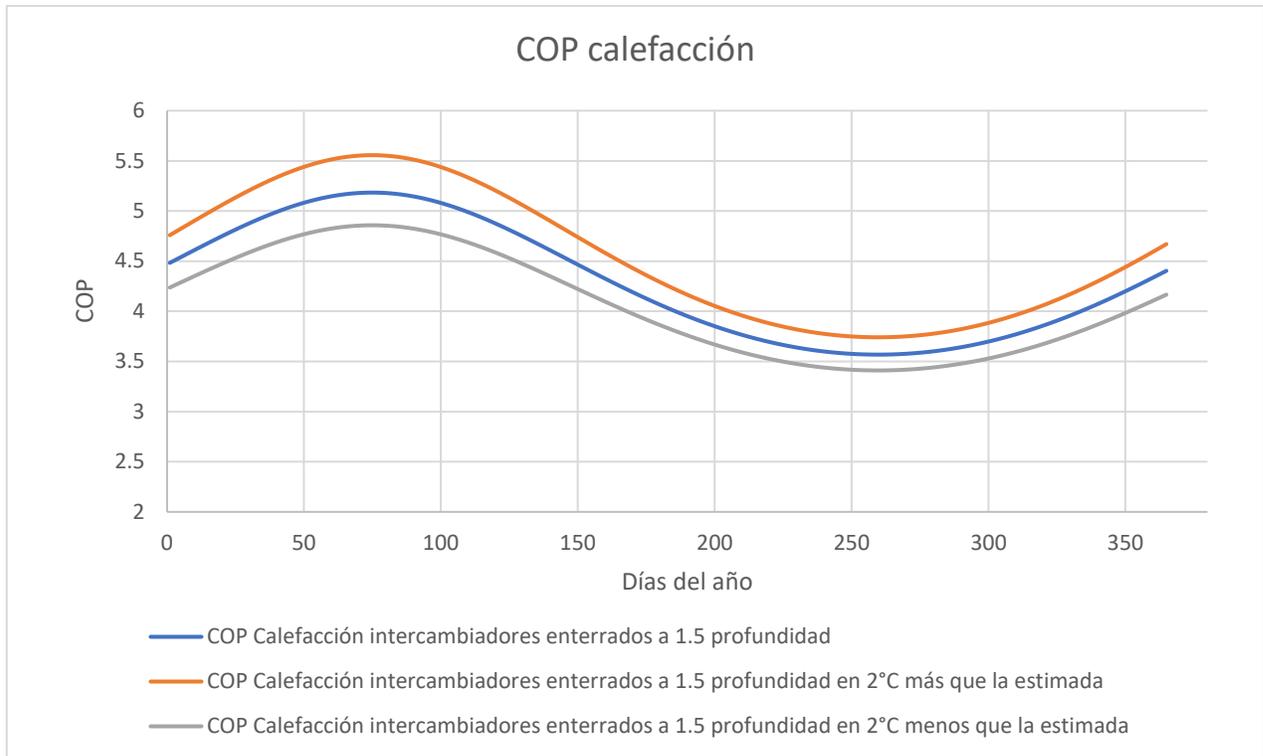


Figura 33: Análisis de sensibilidad para la estimación del COP a 1.5 m de profundidad

Tabla 14. Resultados para el análisis de sensibilidad del COP a 1.5 m de profundidad.

Temperatura	COP Mínimo	COP Máximo	COP Promedio
Temperatura estimada a 1.5m	3.6	5.1	4.3
Temperatura estimada a 1.5m + 2°C	3.7	5.5	4.6
Temperatura estimada a 1.5m - 2°C	3.4	4.9	4.1

En resumen, se observa que durante el invierno el COP tiende a un valor mínimo conforme avanzan los días de la estación, por lo que se considera sólo el COP mínimo para cálculos posteriores.

4.2.3. Área intercambiadores

Considerando que en las primeras capas de subsuelo se encuentran sedimentos finos, se asume un suelo cohesivo se determina 20 W/m² para extraer (qE). Con

este valor y el COP mínimo de 3.6 calculado previamente, se calcula el área de intercambiadores necesarios para satisfacer las demandas de un invernadero tipo.

Tabla 15: Cálculo calor a extraer del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Estructura a calefaccionar	Potencia Térmica calefacción [KW]	Calor a extraer del suelo [KW]	Calor a extraer del suelo 60%[KW]
Invernadero	15.6	11.3	6.8

Tabla 16. Estimación del área de la superficie para intercambiadores horizontales. Fuente: Elaboración propia

Superficie invernadero [m2]	Superficies Intercambiadores [m2]	
	Con una potencia máxima de calefacción	Con un 60% de potencia de calefacción
150	564	337

4.3. Intercambiadores verticales abiertos

4.3.1. Caudales

Para los caudales bombeados asociados a los derechos de agua otorgados en las comunas pertenecientes a la subcuenca del Maipo Medio se observa la Figura 34. El caudal permitirá determinar la potencia generada por una GWHP.

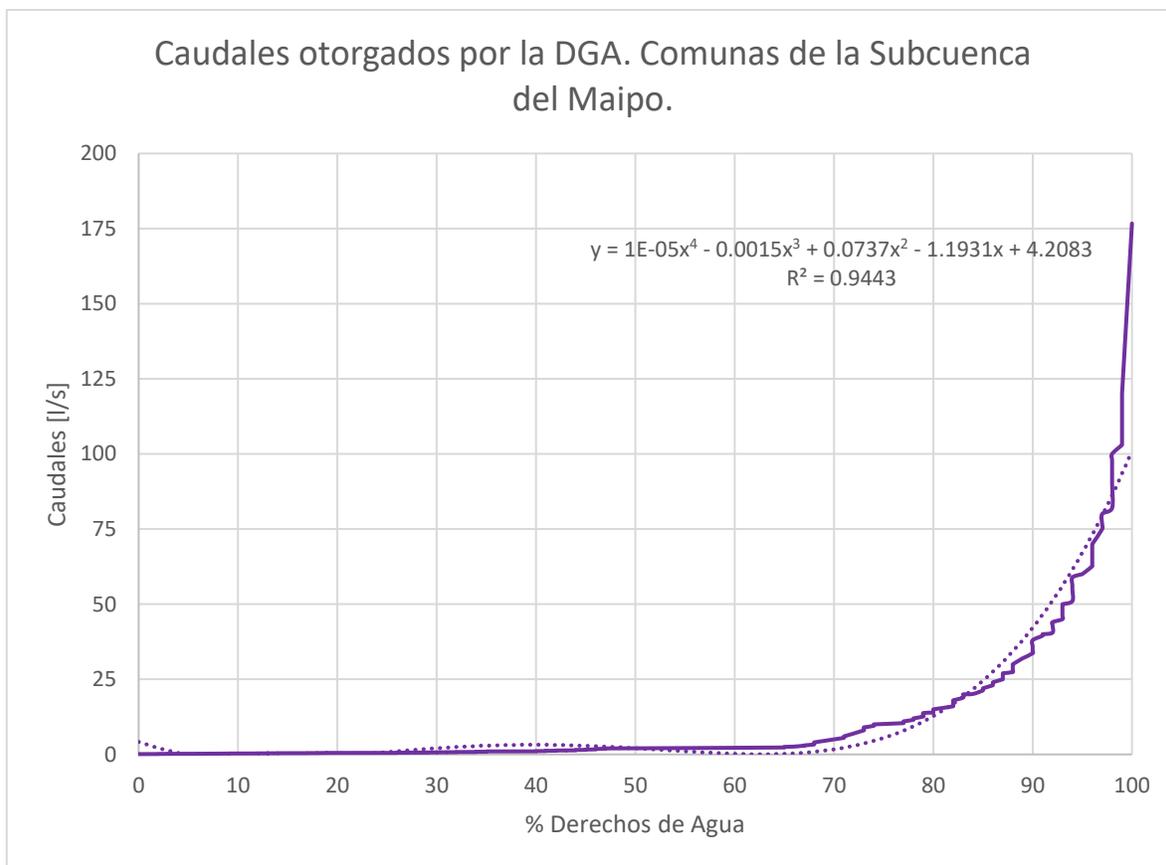


Figura 34: Percentiles y caudales asociados. Fuente: Elaboración propia.

Los caudales van desde los 0.1 hasta los 176 L/s. En el gráfico se observa que el 90% de los derechos otorgados son por lo menos 0.3 L/s, un 75% tienen al menos 0.5L/s y un 50% supera los 2.2 L/s. En base a estos a estos tres percentiles y los caudales respectivos se evaluará el potencial de un sistema GWHP.

4.3.2. Temperatura agua subterránea

En base a lo expuesto en la metodología, se realiza una interpolación con los datos para la temperatura del agua subterránea, las cuales se muestran en la Figura 35

A grandes rasgos se tiene que el promedio de la temperatura es de 16.6 °C, con una máxima temperatura de 18.1 y una mínima de 13.9 °C.

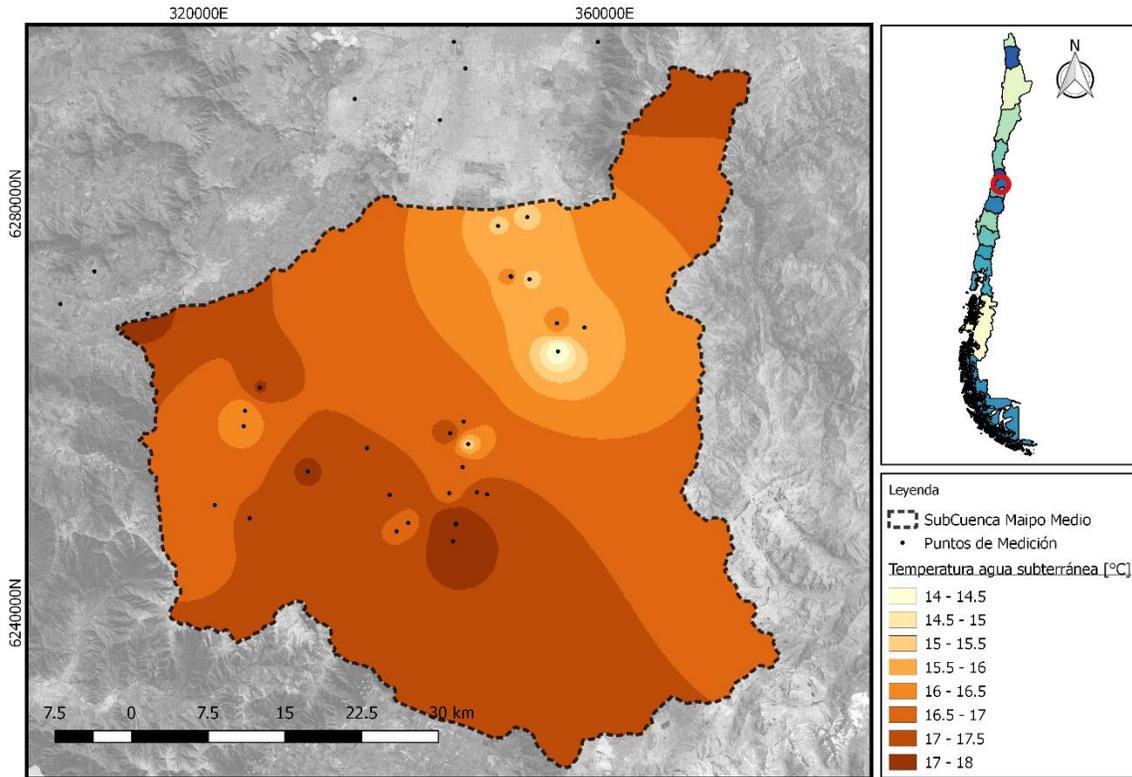


Figura 35: Mapa de interpolación de aguas subterráneas. Fuente: Elaboración Propia

4.3.3. COP y potencia generada

Considerando los datos del agua subterránea entregados previamente y el cálculo del coeficiente de rendimiento según la Ecuación 8, se obtiene lo siguiente:

Tabla 17: Resultados para COP a distintas Temperaturas de agua subterránea.

Temperaturas aguas subterráneas	COP
Mínima 13.8 °C	5.9
Promedio 16.6 °C	6.6
Máxima 18.1 °C	7.1

El cálculo para la potencia entregada para un determinado caudal se detallada en la metodología y queda expresado por la Ecuación 15. Se analizará la potencia obtenida para distintos deltas de temperatura. En la Tabla 18 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 18: Potencia Agua subterránea. Fuente: Elaboración Propia.

Percentil	Caudal [L/s]	Potencia Agua subterránea [kW]	
		$\Delta T=3$ [K]	$\Delta T=5$ [K]
50	2.2	3.7	6.3
75	0.5	6.3	10.5
90	0.3	27.7	46.1

Y por lo tanto se tendrán las siguientes potencias para el GWHP, considerando el menor COP obtenido, de esta manera se realiza un análisis conservador de la potencia, pudiendo esta ser mayor a la calculada.

Tabla 19: Potencia Bomba GWHP. Fuente: Elaboración Propia.

Percentil	Caudal [L/s]	Potencia GWHP [kW]	
		$\Delta T=3$ [K]	$\Delta T=3$ [K]
50	2.2	4.5	4.5
75	0.5	7.6	12.56
90	0.3	33.15	55.26

4.3.4. Profundidad de perforación

El mapa de profundidades necesaria para los pozos en el sistema de intercambiadores verticales abiertos para diferentes abatimientos se muestra en la Figura 36. Este mapa fue generado finalmente, sumando las máximas profundidades registradas en la Subcuenca más el abatimiento y la profundidad de seguridad que corresponde a la variación estacional de los últimos años en el sector, la cual fue promediada en 3 metros.

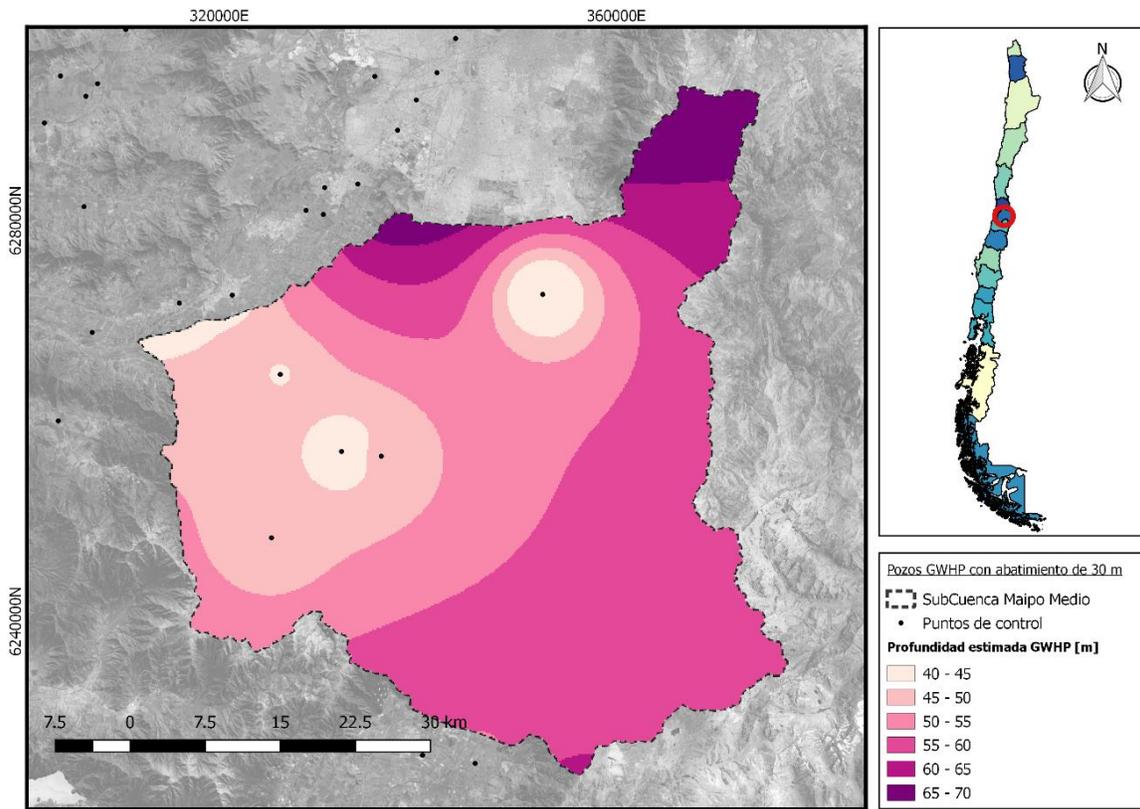


Figura 36: Profundidad estimada QWHP, para un abatimiento de 30 m. Fuente: Elaboración propia.

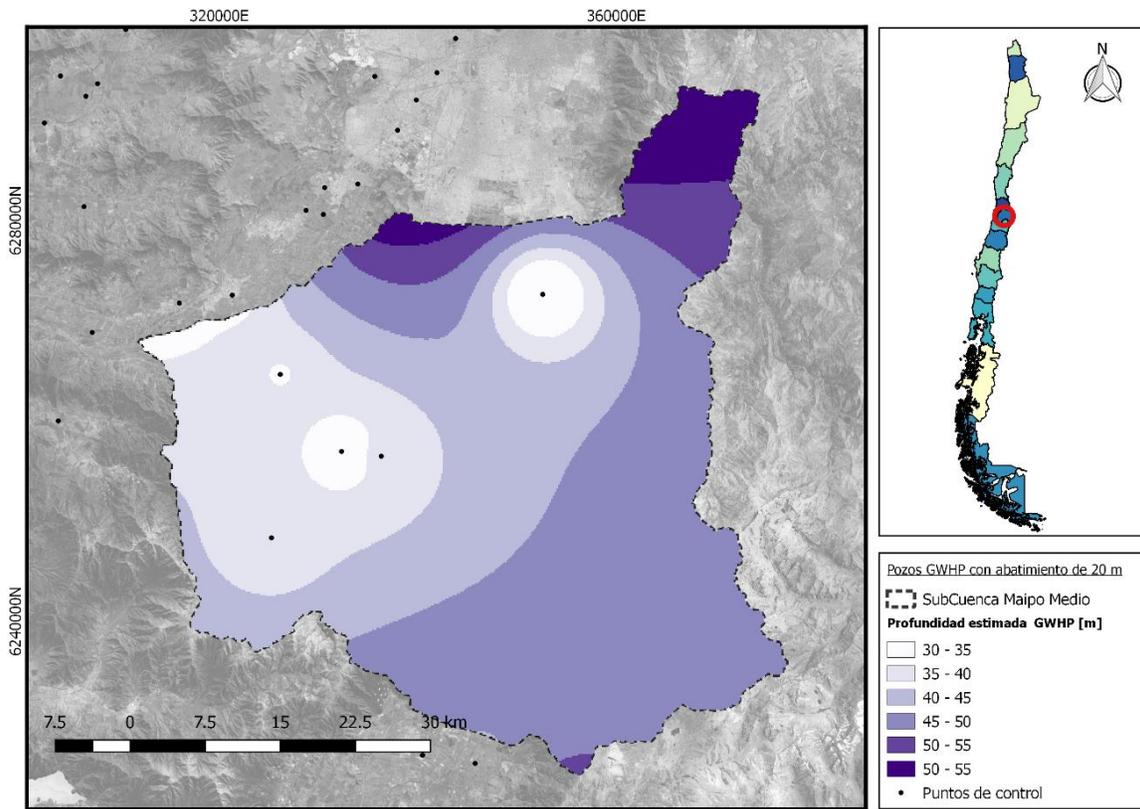


Figura 37: Profundidad estimada QWHP, para un abatimiento de 20 m. Fuente: Elaboración propia

4.4. Intercambiadores verticales cerrados

Los valores de tasa de extracción de calor para los pozos con información estratigráfica se han calculado mediante la metodología presentada en Figura 38. Dependerá de la saturación del suelo y su composición, para simplificar el análisis se ha distinguido solo entre granulometría fina (arcillas y limos) y gruesa (arcilla y gravas). También entre unidades saturadas y secas, utilizando los niveles de agua subterránea obtenidos previamente.

Los resultados de la interpolación se presentan en la Figura 38. Los valores de sHE/m varían entre 40 y 60 [W/m]. Se observa que el potencial de extracción en general no alcanza altos valores, sino que se distribuye desde los 50 [W/m] en el norte de la subcuenca disminuyendo al sur de esta, donde es posible encontrar los menores potenciales.

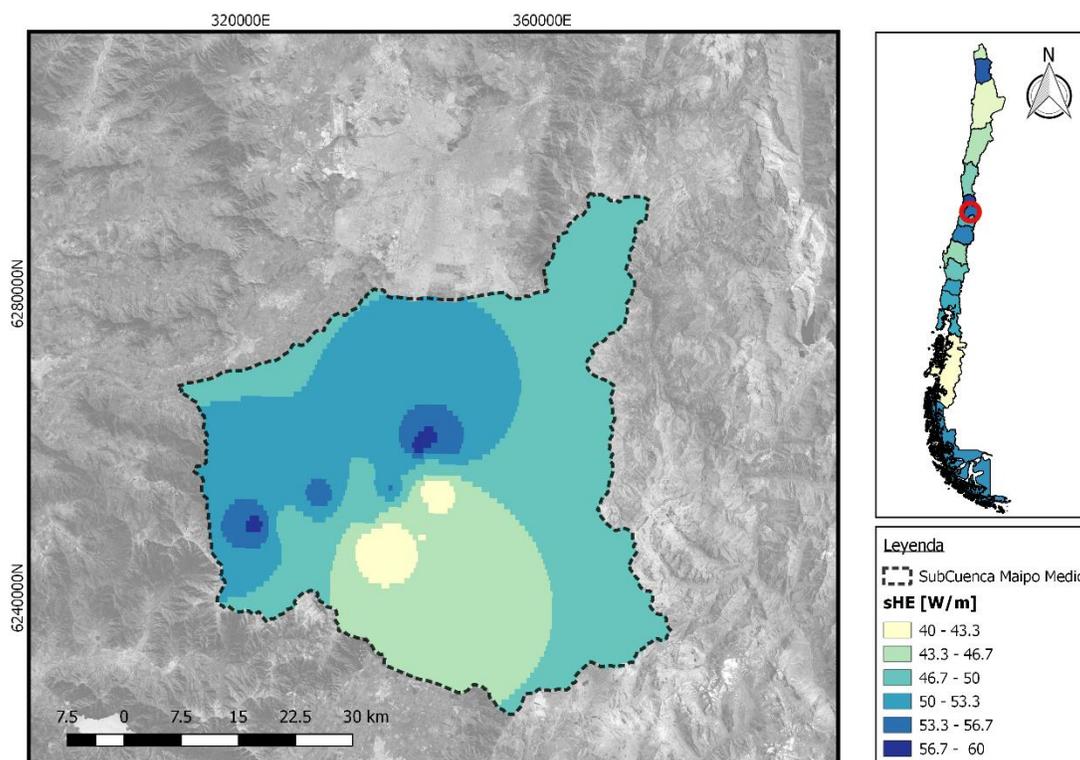


Figura 38: Interpolación de los valores puntuales de sHE realizados sobre 25 pozos con información estratigráfica.

5. DISCUSIONES

Se genera una base de datos que contiene información recopilada de expedientes de pozos profundos publicados por la Dirección General de Aguas (DGA), con parámetros tales como: ubicación del pozo, caudales concedidos, niveles estáticos y dinámicos, estratigrafía de pozos y pruebas de bombeo. Esta información se utiliza para analizar la hidrogeología y entender cómo se configuran el acuífero en la zona. Los datos se obtuvieron en diferentes épocas (entre la década del 90' y el 2017, y en distintos meses del año), lo que puede provocar errores cuando se generan resultados. Si se considera que un acuífero es una unidad dinámica, entonces estos datos no representarían fielmente sus condiciones en cierto momento ni su evolución temporal.

Para disminuir errores se hace una reducción de datos, excluyendo aquellos que son muy antiguos en fecha (menos a la década del 90), y los datos considerados atípicos. Si se hubiera seleccionado sólo datos posteriores al 2010, la distribución espacial de datos no habría permitido realizar un análisis espacialmente representativo del parámetro estudiado, ya que la información actual es muy escasa.

Luego, la transmisividad de los acuíferos estudiados ha resultado ser notablemente diferente dentro de un mismo acuífero. Esto ocurre porque a escala local los valores de la transmisividad varían de un lugar a otro, dependiendo de si predominan los poros, las fracturas o la roca compacta; y por la propia realización de la obra de captación, del sondeo. Sondeos, que se encontraban muy cercanos han dado valores de transmisividad muy dispares, demostrando la gran heterogeneidad hidráulica existente en la zona de estudio

Por otra parte, la estratigrafía se correlaciona para generar columnas estratigráficas (anexo). Existen pozos que contienen solamente la información estratigráfica o antecedentes técnicos relativos a la construcción de pozos. Para realizar análisis hidrogeológicos se ocupan aquellos pozos que contienen ambos datos, puesto que así se reconoce cuál es la unidad hidrogeológica caracterizada. Uno de los alcances de esta base de datos es que no hay una nomenclatura estándar en la clasificación de sedimentos de los expedientes, tampoco se detallan características como la granulometría o porcentajes relativos del tamaño de sedimentos. Es por esto que la información requiere ser homogenizada en una nomenclatura estandarizada, y se señala que la interpretación aquí mostrada podría contener errores y se recomienda actualizarla con datos reales en terreno, en el futuro.

Se construyen perfiles esquemáticos, que muestran tres potenciales unidades acuíferas. Los que son mostrados a continuación, señalando en azul la posible ubicación del embalse subterráneo.

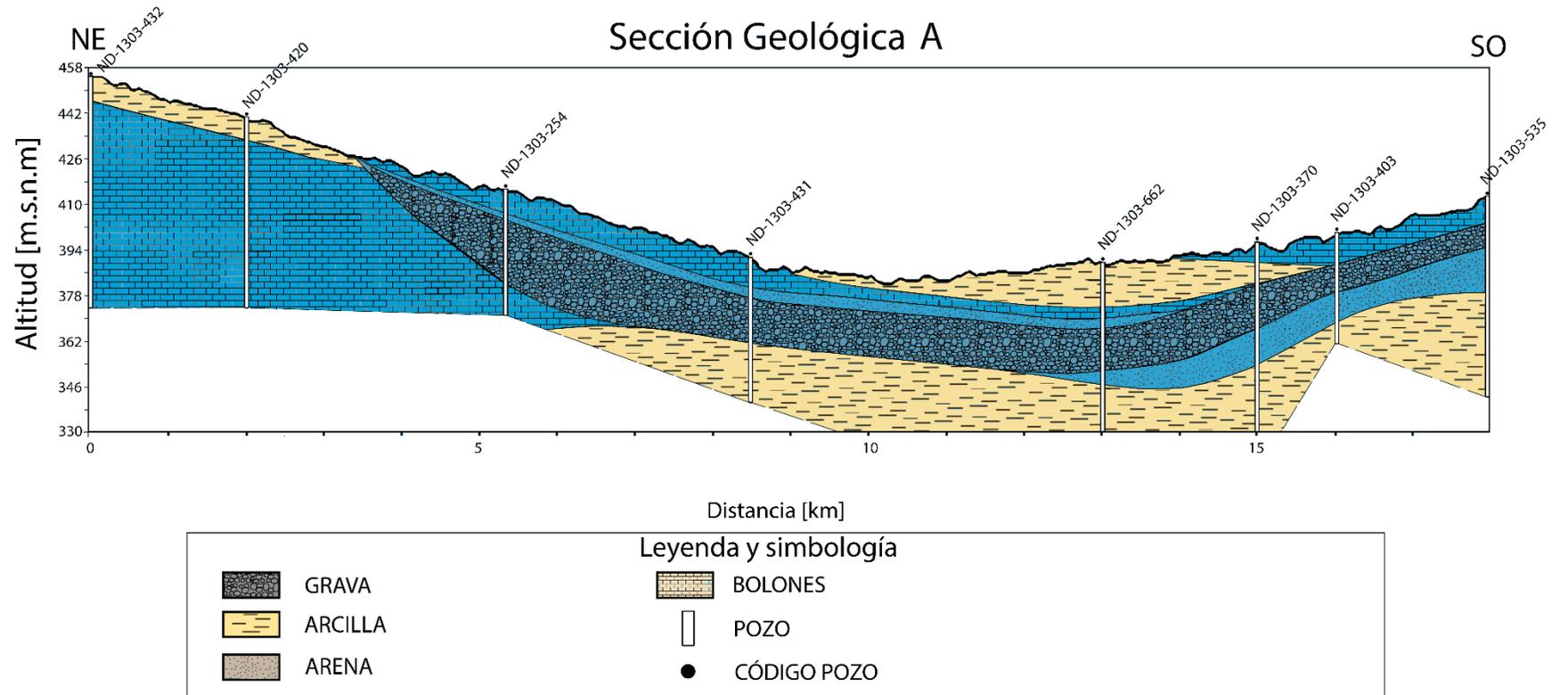


Figura 39: Ubicación estimada de acuíferos en la sección A. Fuente: Elaboración Propia.

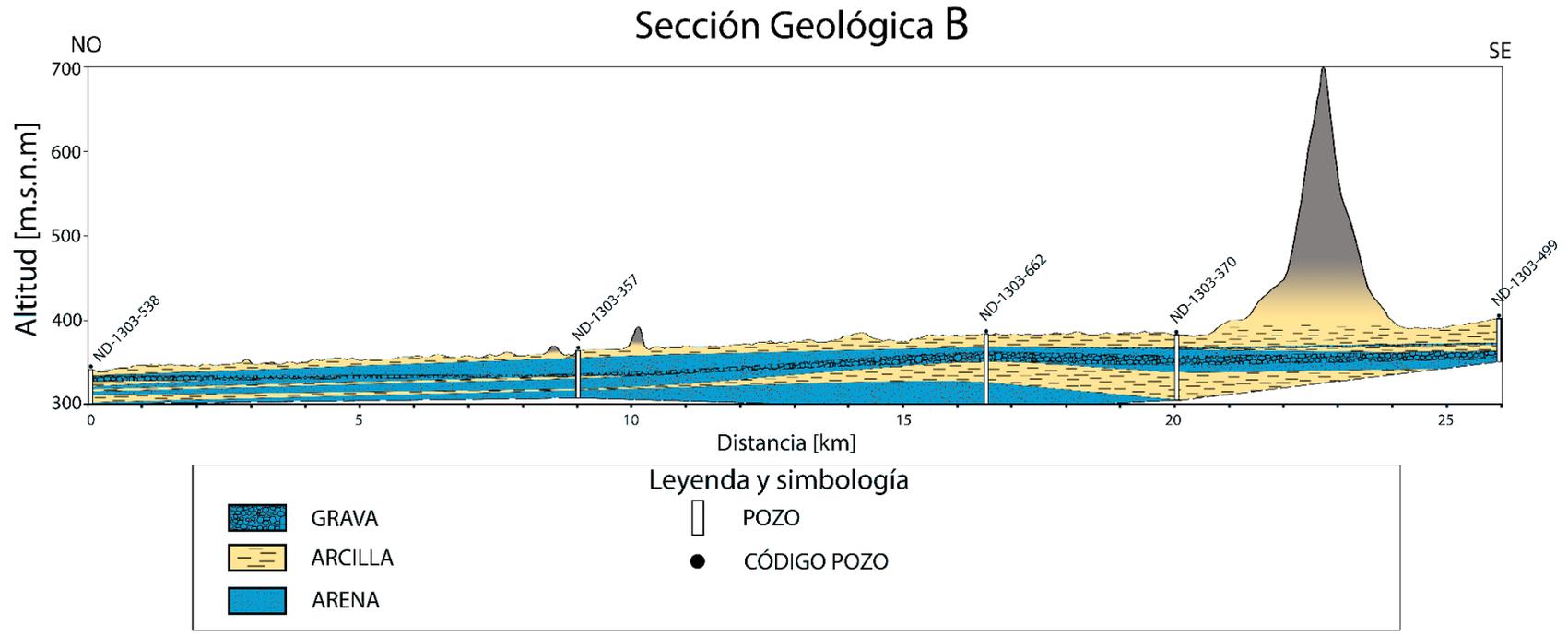


Figura 40: Ubicación estimada de acuíferos en la sección B. Fuente: Elaboración Propia.

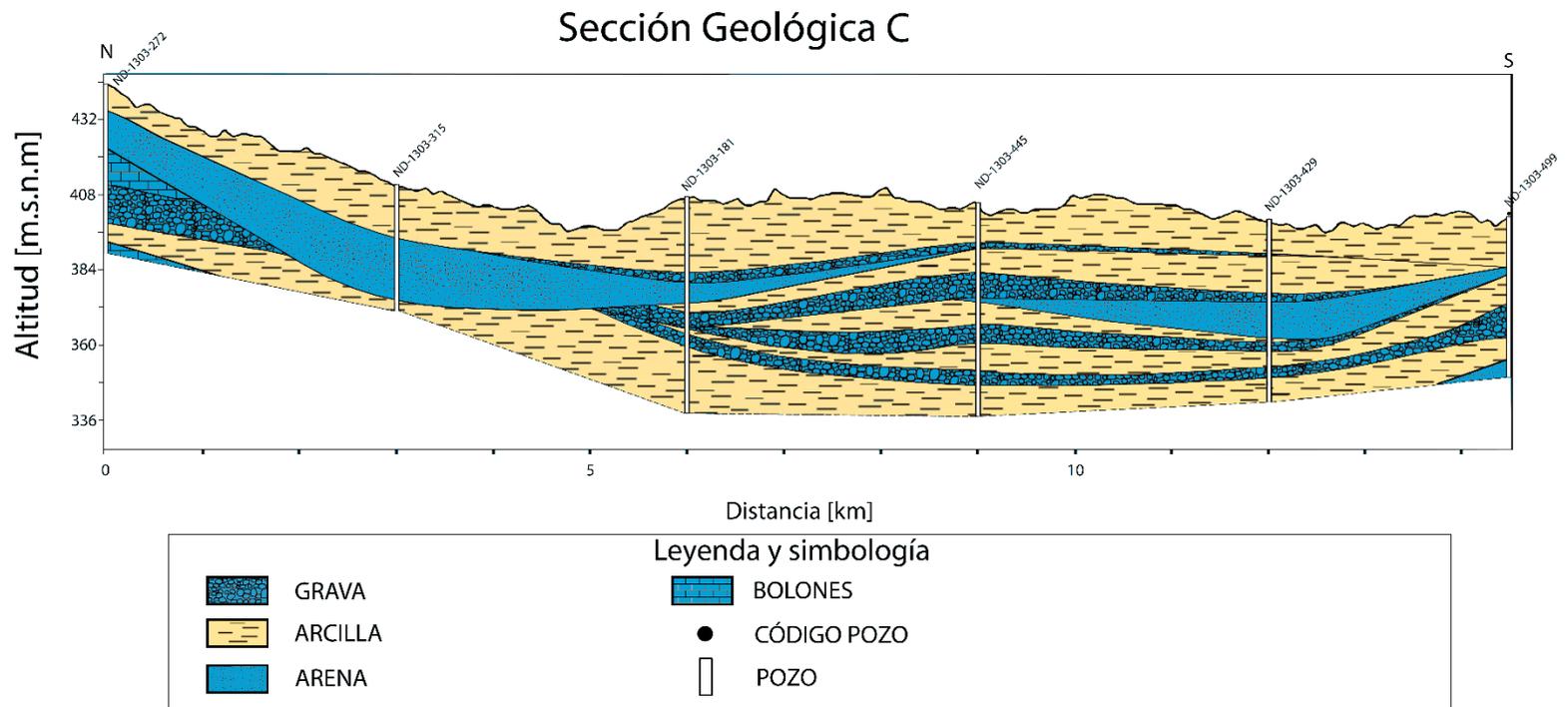


Figura 41: Ubicación estimada de acuíferos en la sección C. Fuente: Elaboración Propia.

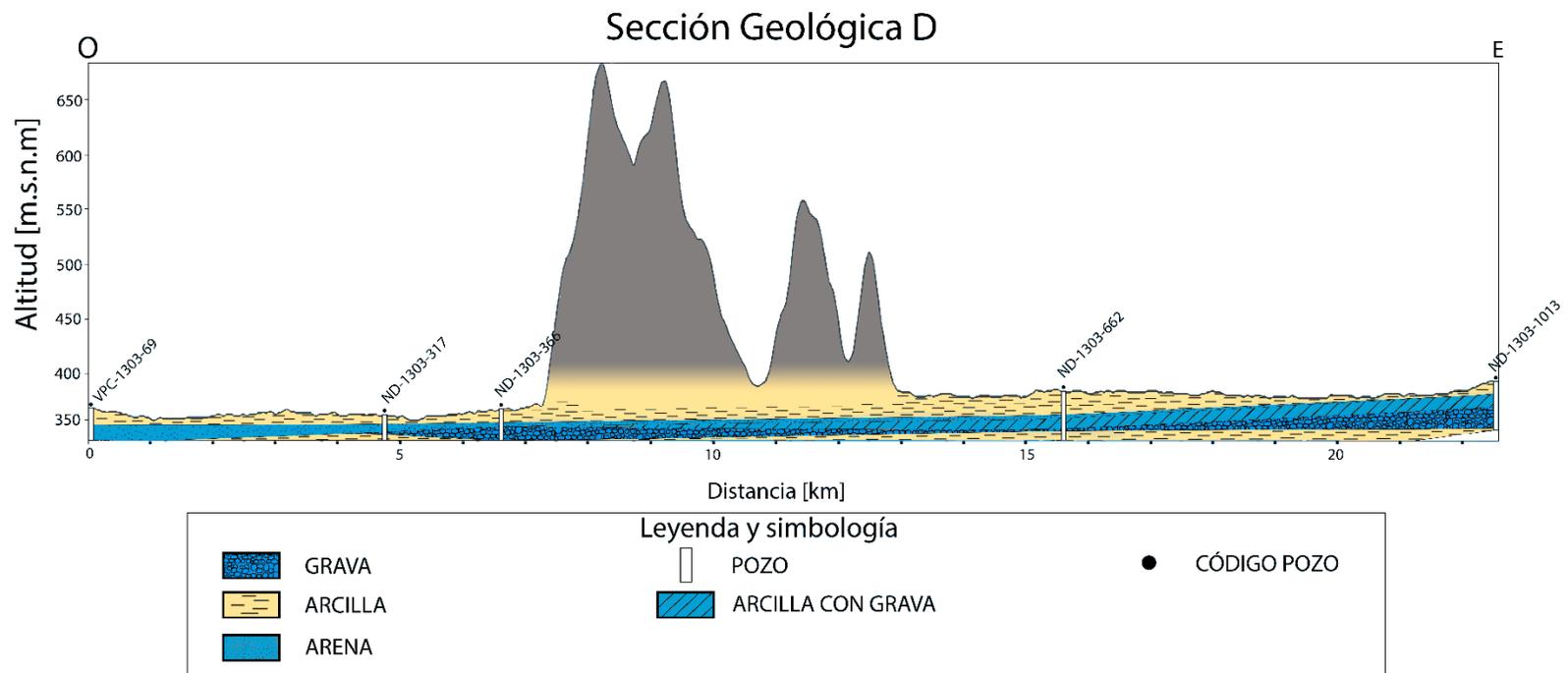


Figura 42: Ubicación estimada de acuíferos en la sección D. Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la temperatura en aguas subterráneas no se observan variaciones significativas respecto a la profundidad. Tampoco hay una variación importante en el mapa de interpolación de temperaturas de la Figura 35. Los leves cambios de temperatura pueden ser efecto de variaciones en la conductividad hidráulica o mezcla de fluidos provenientes de diferentes unidades, además del efecto generado por el gradiente geotermal.

A pesar de esto, la temperatura del agua subterránea en la subcuenca se mantiene relativamente constante. A pesar de que los valores para temperatura en agua subterránea no varían significativamente en el tiempo, se recomienda hacer una campaña en terreno para el cálculo localizado de temperatura para poder robustecer el modelo y actualizar los valores a la fecha.

5.1. Sistemas intercambiadores horizontales cerrados

La temperatura estimada a 1,5m de profundidad presenta grandes oscilaciones, variando desde los 7.7°C como temperatura mínima, hasta los 21.2°C como máxima. Esto se debe en gran parte las grandes diferencias de temperatura que se presentan en la Región Metropolitana dentro de un año, la que oscila entre los 3.1°C en los meses de invierno y los 25°C en épocas de verano.

Las temperaturas en el año a los 3m de profundidad van desde los 11,0°C a los 17,9°C, cumpliendo que las diferencias decrecen con la profundidad. Cuando se analiza el COP mínimo que estas temperaturas generan, se observa que este aumenta en un 8% al compararlo con el que se obtiene con intercambiadores instalados a 1,5m. No se justifica la instalación a 3m, debido a que el COP aumenta relativamente poco además de considerar que a esa profundidad la renovación de calor es menor, por lo que con el tiempo el sistema se volvería ineficiente, y también por que aumentarían los precios de instalación al tener que mover mayor cantidad de tierra.

Cuando se analiza cómo variaría el COP si la temperatura estimada a 1,5m de profundidad en realidad fuera 2°C más o 2°C menos, se ve que el COP mínimo va desde los 3,4 a los 3,7 y el promedio entre los 4.1 a 4.6, por lo que el COP no sería más de un 6% mayor o menor.

Finalmente, con el fin de constreñir la estimación del potencial geotérmico en sistemas horizontales cerrados, es deseable tener registros de temperatura del subsuelo durante, al menos, la época en la que se vaya a implementar el sistema (invierno).

5.2. Sistemas intercambiadores verticales abiertos

de vital importancia conocer la dirección del flujo(para la instalación correcta de los pozos de inyección y reinyección de modo de no generar un quiebre térmico y captar las aguas frías debido a la reinyección en una zona de superior piezometría que el pozo donde se desea bombear el agua subterránea.

Una de las mayores limitantes de una GWHP es la profundidad de perforación para asegurar la disponibilidad del recurso. Además, los elevados costos ligados a la perforación de pozos.

Es importante señalar que los mapas de profundidades mostrados corresponden a valores meramente estimativos, que intentan reflejar el comportamiento general de la subcuenca y no deben ser usados en una etapa de diseño. La realidad hidrogeológica de cada lugar debe ser estudiada a menor escala y con detalle en la zona donde se desea instalar este tipo de sistema y siempre considerando las direcciones de flujo para una correcta instalación de los intercambiadores.

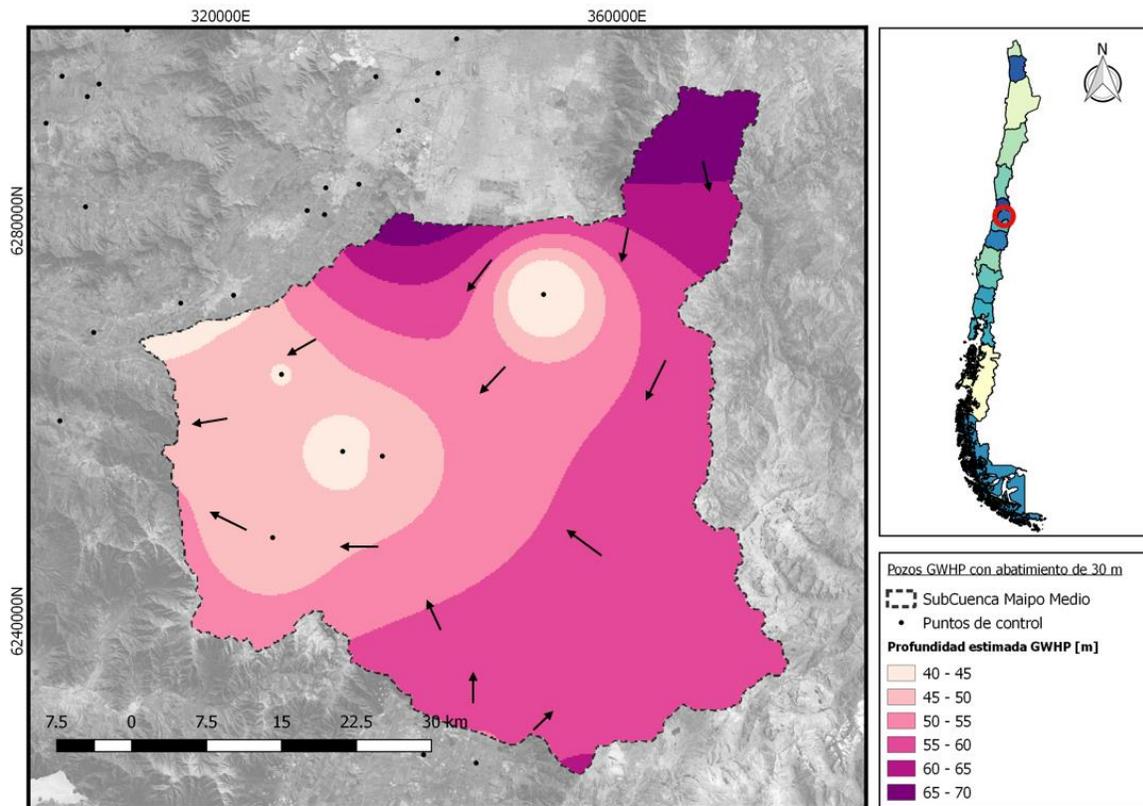


Figura 43: Profundidad estimada GWHP y dirección del flujo en la subcuenca.

5.3. Sistemas intercambiadores verticales cerrados

Es muy importante notar que el sHE promedio obtenido para cada pozo depende de la profundidad hasta la que ha sido registrada la estratigrafía, es decir, este promedio puede variar si se aumentan los metros de registro

A modo de finalizar, se propone, para estudios posteriores, el estudio del carácter geoquímico del agua en términos de dureza, principalmente. Aguas de carácter incrustante harán que los intercambiadores dentro de la bomba pierdan eficiencia al disminuir paulatinamente la superficie de intercambio calórico, por lo que se sugiere un análisis de dureza para cada pozo que vaya a utilizar un sistema abierto (GWHE). En general, durante la construcción de un pozo y al realizarse las pruebas de bombeo correspondientes, se toman muestras de agua con las cuales este análisis puede realizarse de manera fácil. La mantención asociada a un posible carácter incrustante del agua debe considerarse, entonces, en los parámetros de inversión y costo a largo plazo del sistema. Otra alternativa es la instalación de sistemas ablandadores previos al de intercambio de calor.

6. CONCLUSIONES

La investigación nace de la inquietud de buscar alternativas energéticas para la climatización de un invernadero. Los sistemas geotérmicos de baja entalpía son usados para esto en países desarrollados, siendo altamente eficientes, permitiendo un alto ahorro en consumo. Por ello, se evalúa un sistema de esta índole, de forma tal de determinar si es factible construir este sistema geotérmico de baja entalpía en el país, específicamente en la cuenca del Maipo Medio.

El estudio arroja como resultado que es técnicamente viable de implementar, necesitando únicamente el terreno suficiente en donde sea enterrado el colector para el caso de los sistemas horizontales cerrados. Este terreno no es menor, debido a que para el cultivo estudiados se presentan un gran metraje en área de colectores para cumplir la demanda.

El factor determinante más importante en la instalación de bombas de calor geotermiales del tipo colector vertical será la profundidad del nivel estático. Zonas con niveles freáticos someros serán más convenientes para la instalación tanto de bombas con intercambiadores cerrados verticales (BHE), como bombas de calor de agua subterránea (GWHP).

Otro factor determinante es la conductividad hidráulica, que aumenta la eficiencia de los intercambiadores de calor (BHE) y controla los abatimientos que sufrirá la napa en el caso de los sistemas abiertos (GWHP).

En las zonas convenientes para la instalación de bombas geotérmicas, será más favorable instalar sistemas abiertos que ocupen el agua del acuífero (GWHP), en los sectores menos convenientes se deberá privilegiar la instalación de sistemas de intercambiadores cerrados.

Las bombas de calor geotérmicas son una solución ideal para climatizar de manera eficiente invernaderos, reduciendo la contaminación atmosférica sobre todo durante los meses de invierno. Las barreras de entradas que presenta este sistema son la alta inversión inicial, trabas legales y desconocimiento de la gente respecto de los beneficios esta tecnología.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aiguasol. (2016). Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor Geotérmicas instalados en Chile. Informe Final. 217 p. Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M.

Á., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. *Sensors*, 16(3), 306.

Araneda, M., Avendaño, M.S., Díaz, G., 2010. Modelo estructural de la cuenca de Santiago, Chile y su relación con la hidrogeología. *Revista Geofísica* 62, pp. 29-48.

Barría, P. y colaboradores, 2018: Caracterización del consumo hídrico y del sistema hidrogeológico en la cuenca de Aculeo, determinación de posibles soluciones y campaña de educación ambiental. Proyecto FIC-R 2017 código BIP 40002646-0 "Modelación hidrológica superficial de la cuenca de la laguna Aculeo"

CEGA, 2015. Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes. Proyecto: "Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la CEGA, 2017. Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes. Información sobre Geotermia [online]. Disponible en <http://www.cega.ing.uchile.cl/informacion-sobre-geotermia/#material-de-divulgacion>

Censo, 2017. Resultados preliminares Censo 2017 [online]. Disponible en <http://www.censo2017.cl/wp-content/uploads/2017/08/Proceso-Censal-Resultados-preliminares-31-08-2017.pdf> [Visitado el 02 de Enero, 2018].

DGA, 2018. Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Aguas. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos [online]. Disponible en http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.asp

Dirección Meteorológica de Chile, 2001. Climatología Regional. Dirección Meteorológica de Chile, Departamento de Climatología y Meteorología.

Gaínza, V. (2014). Estimación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, en la cuenca del Maule, entre los 35, 2° y 35, 6° S. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). (2009). Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Barcelona: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea.

González-Mendizabal, D. (2000). Guía de Intercambiadores de Calor: Tipos Generales y Aplicaciones. Universidad Simón Bolívar, Caracas.

González, V.; Sepúlveda, R. y González, M. 2014. Mejoramiento de los sistemas de producción de tomate bajo malla antiáfido. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 293, 70 p.

Guidelines for Ground Source Heat Pump Wells,» Massachusetts Department of Environmen Protection, Massachusetts, 2013

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012. Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. Redactado por ATECYR, Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. Pp. 52. Madrid.

INE. Instituto Nacional de Estadísticas. VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Chile. Disponible en: www.censoagropecuario.cl . Consultado, Octubre 2019

Maripangui, R., Muñoz, M., Aravena, D., García, K., Daniele, L., & Morata, D. (2016). Assessment of geothermal heat pump heating systems in Coyhaique city, Chilean Patagonia. In Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop (Vol. 23, p. 25).

Ministerio de Energía, 2016. Solicitud N° AU002W-000048, Gobierno transparente, Subsecretaría Ministerio de Energía. 12 Diciembre.

Ministerio del Medio Ambiente, «Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile, Serie 1990-2013,» Santiago, 2017.

Ministerio de Energía. (2018). Ruta Energética 2018-2022. Liderando la modernización con sello ciudadano. Recuperado el 10 de Agosto de 201

Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L. Morata, D. 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.

PIZARRO, Roberto et al. Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones en la zona central de Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, [S.l.], v. 23, n. 2, p. 91-109, ene. 2008. ISSN 2007-2422. Disponible en: <<http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/148>>. Fecha de acceso: 13 ene. 2020

RETScreen, 2005. “Clean Energy Proyect Analysis: RETScreen Engineering & Cases”. *Ground-Source Heat Pump Proyect Analysis Chapter*. Ministerio de Recursos Naturales, Canadá.

Vielma, M. (2013). Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil. .

Waterloo Hydrogeologic (2016). *AquiferTest 2016.1 user’s manual. An easy-to-use pumping test and slug test data analysis package*. 438 pp.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO 1: Cálculo cota hidráulica

Estaciones RED DGA De medición de pozos					
Nombre Estaciones	Ubicación		Cota estación [m.s.n.m]	Nivel estático 2018 [m]	Cota hidraulica [m.s.n.m]
	ESTE_84	NORTE_84			
ASENTAMIENTO LAS VERTIENTES	333052	6257554	374	5.82	368.18
COLONIA DE PAINE	337045	6257152	387	13.19	373.81
POZO FUNDO LA CATOLICA	352988	6273575	666	1.99	664.01
VIGNA SANTA INES	326764	6265141	331	11.58	319.42
SAN FCO. ACULEO	326174	6248825	374	12.27	361.73
CURAMAVIDA 729	358073	6304942	800	40.53	759.47
ESTADIO SAN JORGE	357166	6304356	756	18.69	737.31
ESTADIO CORFO	358354	6306061	753	61.52	691.48
LIQUIDADORA CARBONES	342000	6295576	505	49.8	455.2
A.P. SANTA ROSA	334218	6284304	467	60.55	406.45
POZO AGRICOLA HERMANOS POBLETE	330891	6283889	435	22.69	412.31
HIJUELA EL OLIVO	335737	6295108	468	30.17	437.83
CAMINO A MELIPILLA 10803	338124	6289750	492	59.75	432.25
AP. CERRILLOS	339964	6292811	514	62.28	451.72
MATUCANA 741	343826	6299039	539	71.42	467.58
CHACRA ANDALUCIA	330809	6281204	426	27.64	398.36
ASENTAMIENTO MALLOCO	329053	6281575	413	12.59	400.41
PARCELA 62 NOVICIADO	324286	6302991	485	27.69	457.31
FUNDO EL PERAL	331479	6303365	476	16.06	459.94

AV. KENNEDY 6774	354623	6303785	705	55.11	649.89
A.P. EL MONTE	316494	6272077	396	5.25	390.75
POZO MISION CORAZON DE MARIA	321799	6272967	338	8.72	329.28
AS. SAN CARLOS CHOLQUI (2)	304575	6260064	182	13.19	168.81
FUNDO SAN PATRICIO	306726	6281529	192	6.06	185.94
A.P. BOLLENAL	294723	6283534	140	7.45	132.55
POZO INDUSTRIA BATA	297570	6271385	173	2.01	170.99
ASENTAMIENT O POPETA LAS MARIPOSAS	290608	6250322	106	27.31	78.69
AS. SAN MIGUEL POPETA (1)	291250	6249279	106	30.25	75.75
AS. SAN MIGUEL POPETA (2)	291584	6247940	106	33.57	72.43
ASENTAMIENT O TANTEHUE	294918	6248372	135	33.57	101.43
ASENTAMIENT O SANTA EMILIA	304097	6294558	164	7.84	156.16
FUNDO SANTA RITA	307842	6293856	167	6.21	160.79
FUNDO EL PARRON	306685	6292573	166	17.8	148.2
FUNDO BARACALDO	302570	6289815	152	10.65	141.35
FUNDO LOLENCO	310574	6299346	187	0.49	186.51
PARCELA 7 CHIÁ'IHUE	307799	6268974	221	2.25	218.75
POZO DOÁ'IHUE	320843	6211428	354	4.27	349.73
VIÁ'A EL MOLINO	314369	6207151	298	8.31	289.69
A.P. COINCO	320500	6206915	332	5.54	326.46
PUEBLO COPEQUEN	323542	6209006	364	7.01	356.99
ASENTAMIENT O C. CORTES	346958	6226715	503	16.45	486.55
INDURA GRANEROS	341681	6227451	475	20.25	454.75

BARRIO INDUSTRIAL	339711	6220776	478	51.44	426.56
MOLINOS QUEMADOS	343782	6220626	499	62.15	436.85
ALAMOS QUEMADOS	328443	6211704	418	31.68	386.32
FUNDO EL BOSQUE	326909	6213507	403	20.93	382.07
ASENTAMIENT O CHOAPINO	330976	6200387	367	33.43	333.57
PUEBLO EL ABRA	330675	6205132	404	44.28	359.72
ASENTAMIENT O SANTA ANITA	338586	6199596	380	14.54	365.46

8.2. ANEXO 2: Pozos con información estratigráfica.

codigo expediente	norte	este	Cota terreno [m.s.n.m]	T [m ² /día]	K [m/s]
ND-1303-177	6252602	349958	478	29	0.01
ND-1303-180	6246707	337588	403	62	0.023171296
ND-1303-222	6249185	325548	383	138	0.031944444
ND-1303-230	6260785	338698	433	3010	1.393518519
ND-1303-231	6257498	324882	345	82	0.018865741
ND-1303-253	6258175	343218	415	1620	0.478125
ND-1303-272	6261135	348098	451	2	0.000583333
ND-1303-295	6255906	348778	422	59	0.011909722
ND-1303-296	6245935	325998	434	192	0.057777778
ND-1303-312	6259173	345053	424	1047	0.484490741
ND-1303-320	6251559	322780	368	15	0.005153935
ND-1303-333	6259445	346728	417	325	0.112847222
ND-1303-341	6257985	341018	418	3125	1.627604167
ND-1303-347	6250356	348291	442	76	0.035046296
ND-1303-357	6254335	331488	367	1510	0.506828704

ND-1303-362	6251228	349480	471	3	0.000764323
ND-1303-364	6259667	347534	425	384	0.155555556
ND-1303-366	6250024	329528	384	39	0.011371528
ND-1303-370	6249445	341443	386	519	0.165190972
ND-1303-383	6252553	349967	478	75	0.025972222
ND-1303-401	6246822	346580	401	8	0.002186285
ND-1303-402	6258301	347260	410	319	0.129224537
ND-1303-403	6247965	339788	397	3950	0.822916667
ND-1303-411	6255205	349081	434	173	0.080092593
ND-1303-412	6255547	348744	423	339	0.156944444
ND-1303-419	6255159	319771	374	30	0.006231192
ND-1303-420	6260780	344489	441	1020	0.460416667
ND-1303-421	6251515	329584	366	4	0.0004864
ND-1303-429	6248920	345175	393	7	0.002355324
ND-1303-431	6255163	340894	389	781	0.212424769
ND-1303-432	6262006	345740	450	5010	2.319444444
ND-1303-441	6249759.635	346305.798	400	46	0.010717593
ND-1303-446	6262395	348668	569	1	0.001166377
ND-1303-456	6256627.5	337207.05	387	844	0.205138889
ND-1303-465	6250178	329161	374	52	0.011990741
ND-1303-499	6247442	345727	394	38	0.010624942
ND-1303-505	6253592	348525	435	36	0.016574074
ND-1303-533	6259186	344614	424	55	0.012685185
ND-1303-538	6258459	323611	338	64	0.014733796
ND-1303-662	6251441	338109	383	309	0.159149306
ND-1303-893	6256739	327791	355	1480	0.856481481

ND-1303-982	6256407	345898	397	145	0.041811343
ND-1303-1013	6252423	345482	400	93	0.026793981
ND-1303-1174	6258184	338290	409	1630	0.660300926
ND-1303-1246	6260011	344823	431	655	0.227430556
NR-1303-60	6246582	346454	399	31	0.00946412
VPC-1303-69	6250156	323111	372	3	0.001383333

8.3. ANEXO 3: Perfiles estratigráficos.

Se muestran a continuación el detalle estratigráfico de cada perfil construido.

Perfil B			
Pozo	Contenido	Largo Estrato	Profundidad Estrato
ND-1303-538	ARCILLA	6	6
	RIPIO Y GRAVA	7	13
	ARCILLA	7	20
	MAICILLO	3	23
	ARCILLA	3	26
	ARENA	5	31
	ARCILLA	8	39
ND-1303-357	ARCILLA	9	9
	ARENA GRUESA (CON GRAVA Y RIPIO)	23	32
	GRAVA	2	34
	ARENA GRUESA	16	50
	ARENA	5	55
ND-1303-662	ARCILLA	14	14
	ARENAS	3	17
	ARCILLA CON GRAVA	12	29
	ARCILLA CON GRAVA	24	53
	ARENAS	26	79
ND-1303-370	ARENA	13	13
	GRAVAS	2	15
	ARENAS	4	19

	GRAVAS	10	29
	ARENAS	12	41
	ARENA FINA	38	79
ND-1303-499	ARCILLA	14	14
	GRAVA	2	16
	ARCILLA	8	24
	GRAVA	9	33
	ARCILLA	6	39
	ARENA	6	45
	ARCILLA	3	48

PERFIL C			
Pozo	Contenido	Largo Estrato	Profundidad Estrato
ND-1303-272	ARCILLA (CON ARENA Y BOLONES)	4	4
	ARENA GRUESA CON RIPIO Y BOLONES	12	16
	BOLONES Y RIPIO CON ARCILLA	6	22
	RIPIO GRUESO CON ARENA Y ARCILLA	13	35
	ARCILLA	3	38
	RIPIO Y BOLONES CON ARCILLA Y ARENA	8	46
ND-1303-315	ARCILLA CON ARENAS	20	20
	ARENAS GRUESAS	22	42
ND-1303-181	ARCILLA CON ARENAS	19	19
	RIPIO GRAVA	2	21
	ARENA	4	25
	ARCILLA	5	30
	RIPIO CON ARENA	2	32
	ARCILLA	27	59
ND-1303-445	ARCILLA	9	9
	RIPIO GRAVA	2	11
	ARCILLA	5	16
	RIPIO GRAVA	2	18

	ARCILLA	3	21
	RIPIO GRAVA	3	24
	ARCILLA	8	32
	RIPIO GRAVA	7	39
	ARCILLA	8	47
	RIPIO GRAVA	4	51
	ARCILLA	14	65
ND-1303-429	ARCILLA	7	7
	ARENA Y ARCILLA	12	19
	ARENA ARCILLA Y BOLONES	12	31
	ARENA Y ARCILLA	13	44
	ARENA FINA Y ARCILLA	10	54
ND-1303-499	ARCILLA	14	14
	ARCILLA CON GRAVA	2	16
	ARCILLA	8	24
	GRAVA	9	33
	ARCILLA	6	39
	ARENAS	6	45
	ARCILLA	3	48

PERFIL A			
Pozo	Contenido	Largo Estrato	Profundidad Estrato
ND-1303-432	ARCILLA	3	3
	BOLONES	76	79
ND-1303-420	ARCILLA	4	4
	BOLONES	62	66
ND-1303-254	BOLONES CON RIPIO	9	9
	RIPIO CON ARENA	15	24
	ARCILLA	3	27
	GRAVA	8	35
	ARENA	9	44
ND-1303-431	BOLONES	6	6
	ARENAS	2	8
	GRAVA	34	42

	ARENAS	7	49
ND-1303-662	ARCILLA	14	14
	ARENAS	3	17
	ARCILLA CON GRAVA	12	29
	ARCILLA CON GRAVA	24	53
	ARENAS	26	79
ND-1303-370	ARENA	13	13
	GRAVAS	2	15
	ARENAS	4	19
	GRAVAS	10	29
	ARENAS	12	41
	ARENA FINA	38	79
ND-1303-403	BOLONES	9	9
	GRAVA	8	17
	ARCILLA	3	20
	ARENA	3	23
	ARCILLA	14	37
ND-1303-535	BOLONES	13	13
	GRAVA	6	19
	ARENA	13	32
	GRAVA	4	36
	ARCILLA	24	60
	ARENA	5	65
	ARCILLA	4	69

PERFIL D			
Pozo	Contenido	Largo Estrato	Profundidad Estrato
VPC-1303-69	ARCILLA	5	5
	ARENAS	18	23
	ARCILLAS	3	26
	ARENAS	33	59
	ARENAS CON GRAVA	19	78
	GRAVA CON ARENA	16	94
ND-1303-317	ARCILLA	6	6
	ARENAS	9	15

	ARCILLAS	15	30
	ARENAS	3	33
	ARCILLA	1	34
	RIPIO	8	42
	ARCILLA CON BOLONES	2	44
ND-1303-366	ARCILLA	10	10
	ARENA	4	14
	GRAVA	15	29
	ARCILLA	3	32
	GRAVA	4	36
	ARCILLA	1	37
	GRAVA	13	50
ND-1303-662	ARCILLA	14	14
	ARENAS	3	17
	ARCILLA CON GRAVA	12	29
	ARCILLA CON GRAVA	24	53
	ARENAS	26	79
ND-1303-1013	ARCILLA	10	10
	ARCILLA CON GRAVA	13	23
	GRAVA CON ARENA	21	44
	ARCILLA	5	49