



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA
PARA IMPLEMENTAR BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN LA
CIUDAD DE TEMUCO, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

DAVID ANDRES CABELLO TRAVERSO

PROFESOR GUÍA

DIEGO MORATA CÉSPEDES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

DOLORINDA DANIELE

MAURICIO MUÑOZ MORALES

Esta memoria fue financiada por el proyecto Conicyt-Fondap 15090013

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
POR: David Andrés Cabello Traverso

FECHA: julio de 2017

PROFESOR GUÍA: Diego Morata Céspedes

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA PARA IMPLEMENTAR BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN LA CIUDAD DE TEMUCO, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

La bomba de calor geotérmica es el principal medio de explotación de la energía geotérmica de baja entalpía. Las estadísticas muestran que su uso ha aumentado un 10% anual a nivel mundial en los últimos cinco años con una capacidad instalada de ~40 GWt en 2016. En Chile su uso es limitado, pero también tiene una tendencia al alza en los últimos años. Temuco en la Región de la Araucanía presenta serios problemas de contaminación por el uso de leña húmeda como combustible y su aporte a la emisión de material particulado, el cual llega en el mes de junio a los $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de MP 2,5 y $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el MP 10, superando ampliamente la norma nacional y de la OMS. Este trabajo estima el potencial del recurso geotérmico aplicado a bombas de calor geotérmicas en Temuco sus 3 modalidades: circuito cerrado horizontal (GSHP Ground Source Heat Pump), circuito cerrado vertical (BHP Borehole Heat Pump) y circuito vertical abierto (GWHP Groundwater Heat Pump).

Trabajando en la hipótesis de que existen predios en la ciudad donde es posible la instalación de colectores horizontales cerrados y que las características hidrogeológicas son favorables para sistemas verticales, se estima el potencial de cada uno de los intercambiadores de calor geotérmicos. La metodología considera un análisis hidrogeológico con información de la Dirección General de Aguas (DGA), un análisis cívico con el Plan Regulador Comunal (PRC) de la ciudad y su interpretación mediante el software geoespacial *Arcgis 10.3*. Se estudia la profundidad del agua subterránea y su temperatura, para evaluar la viabilidad de sistemas abiertos (GWHP). Se realizan secciones estratigráficas y un estudio del calor extraíble de los sedimentos con el fin de estimar la capacidad de los sistemas BHP. Finalmente, las restricciones espaciales del PRC indican la favorabilidad de implementar sistemas GSHP.

Los resultados muestran que un 49% del PRC de la ciudad, puede ser climatizado mediante sistemas del tipo GSHP. La temperatura del suelo a 1,5 m de profundidad permitiría al sistema un coeficiente de rendimiento (COP) entre 3,7 y 4,3, significando costos operacionales anuales de 90 a 320 mil pesos (USD\$ 140 a USD\$ 490). La profundidad del agua subterránea está entre los 3 y los 30 m, lo que sumado a una potencia del acuífero de al menos 100 m sugiere a los sistemas GWHP como una buena alternativa, ya que requieren profundidades a perforar de 24 a 64 m en promedio (solo pozo productor) y presentan un COP promedio de 5,6 implicando un costo operacional anual de 65 a los 230 mil pesos (USD\$ 100 a USD\$ 350). También se realiza el estudio para sistemas del tipo BHP, donde la profundidad a perforar requerida para suplir las demandas térmicas para una vivienda pareada de 68 m^2 está entre los 20 y los 42 m y el costo operacional es similar al de un sistema GSHP.

Agradecimientos

Al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) que a través del proyecto Fondap-Conicyt 15090013 hizo posible la realización de esta memoria.

A mi profesor guía Dr. Diego Morata, por brindarme su apoyo y compartir sus valiosos consejos. A la Dra. Linda Daniele, por permitirme ser parte del proyecto y mención especial a Mauricio Muñoz por tener la paciencia y responder todas las inquietudes con respecto a esta memoria, hacer una muy grata compañía en la visita de terreno y compartir esas interesantes historias de vida.

A la empresa Aguas Araucanía por facilitar sus instalaciones y su personal en colaboración con este proyecto.

¡A la Blanquita!, por su incomparable paciencia y disposición a ayudarme en todo lo que necesitaba. Gracias Blanca. También agradecer a Rosita y Don Carlos.

A mi familia, especialmente a mi madre, pieza fundamental en este puzle de la vida. Por siempre estar ahí, por guiarme por la buena senda y entregar amor incondicional. A mis hermanos por compartir grata compañía desde siempre.

A mis amigos, Miguel, Gianni, Luis, Erick, por disponer siempre de un momento para compartir.

A mis amigos y compañeros de geología Mauricio, Rodolfo, Hugo y Cristóbal, por darle vida a esos últimos momentos y amenizar esos largos terrenos en la nada.

Al grupo de bombas de calor, Jaime y Camila, por estar siempre ahí y compartir nuestras penas y fracasos durante este largo proceso que ha sido la memoria. ¡Han sido la mejor compañía de este proceso!

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Formulación del proyecto	1
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Área de estudio	6
1.3.1 Ubicación, vías de acceso y clima	6
1.4 Estudios previos.....	8
1.5 Hipótesis de trabajo	9
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1 Bombas de calor geotérmicas	10
2.2 Tipologías	12
2.3 Plan regulador comunal	13
2.4 Costos.....	15
2.4.1 Costo de instalación.....	15
2.5 Aspectos legales.....	16
2.5.1 Sistema vertical abierto.....	16
2.5.2 Comentarios.....	16
3. METODOLOGÍA.....	20
3.1 Base de datos	20
3.2 Temperatura del subsuelo.....	20
3.3 Coeficiente de rendimiento.....	21
3.4 Zonificación.....	22
3.5 Bombas de calor tipo GWHP.....	23

3.6 Bombas de calor tipo BHP.....	26
4. MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	28
4.1 Geología Regional	28
4.1.1 Basamento impermeable.....	28
4.1.2 Rocas estratificadas.....	28
4.1.3 Depósitos semiconsolidados	30
4.1.4 Depósitos no consolidados.....	30
4.2 Recursos de agua subterránea	31
5. RESULTADOS	33
5.1 Intercambiadores horizontales	33
5.1.1 Temperatura del subsuelo	33
5.1.2 Estimación del COP.....	33
5.1.3 Limitantes espaciales	35
5.2 Intercambiadores verticales abiertos.....	38
5.2.1 Profundidad del agua subterránea.....	38
5.2.2 Espesor del acuífero.....	41
5.2.3 Estimación del COP.....	43
5.2.4 Estimación del potencial.....	44
5.2.5 Profundidad a perforar	45
5.3 Intercambiadores verticales cerrados.....	46
5.3.1 Tasa de extracción de calor.....	46
5.3.2 Profundidad a perforar	49
5.4 Comparativa de costos	51
5.4.1 Costos de instalación	51
5.4.2 Costo de operación.....	52
6. DISCUSIONES	53

6.1 Sistema horizontal cerrado.....	53
6.2 Sistema vertical abierto.....	53
6.2.1 Zonas muy favorables.....	55
6.3 Sistema vertical cerrado.....	57
7. CONCLUSIONES.....	58
8. SUGERENCIAS.....	59
9. BIBLIOGRAFÍA.....	60
10. ANEXOS.....	64
10.1 Niveles estáticos y piezométricos.....	64
10.2 Temperatura de agua subterránea.....	68
10.2.1 Temperatura estabilizada.....	68
10.2.2 Perfiles de temperatura en profundidad.....	69
10.3 Abatimiento en pozos con caudales de explotación < 10 l/s.	74
10.4 Estratigrafía.....	75
10.5 Atributos del Plan Regulador Comunal.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Usos directo de la energía geotérmica, capacidad instalada y energía utilizada en el período 1995-2015. Extraído de Lund & Boyd (2016).....	1
Figura 1.2. Usos directos de la energía geotérmica de los últimos 20 años. Tomado de Lund y Boyd, (2016).....	2
Figura 1.3. Humedad relativa del ambiente. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).	3
Figura 1.4. Fuentes contaminantes de material particulado MP 2,5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).	4
Figura 1.5. Concentración de material particulado MP 10 y MP 2,5. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).	5
Figura 1.6 Ubicación y vías de acceso a la ciudad de Temuco. La zona de estudio se encuentra dentro del rectángulo azul. Modificado de Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, 2016.....	7
Figura 1.7. Gráfica de temperaturas medias mensuales en el período 1970-2015. Elaboración propia a partir de datos de Estadística Climatológica Tomo II (2001) y Anuarios climatológicos 2000-2015.	8
Figura 2.1. Comparativa de temperatura en: ambiente, suelo y agua subterránea (izquierda). Perfil de temperatura en profundidad para invierno y verano en suelos húmedos y secos (derecha). Extraído de RETScreen (2005).....	10
Figura 2.2.Ciclo de una bomba de calor. Extraído de Aiguasol, (2016).	11
Figura 2.3 Intercambiadores acoplados a una bomba de calor. Imagen adaptada de material inédito del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). http://www.cega.ing.uchile.cl/	12
Figura 2.4. Coeficiente de ocupación máxima del Plan Regulador Comunal de la ciudad de Temuco. Modificado de archivo proporcionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2010 y posteriores enmiendas. Gobierno de Chile.....	14
Figura 2.5. Procesos para la solicitud de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Tomado de Dirección General de Aguas (2017).	18
Figura 2.6. Fases para la constitución de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Extraído de Vielma (2013)	19
Figura 4.1 Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de Mella y Quiroz, (2010).....	29

Figura 4.2 Mapa hidrogeológico del área de Temuco. (Adaptado de Troncoso et al., 2007).	32
Figura 5.1. Temperatura a 0,8m, 1,5m y 3m de profundidad en la Estación Carillanca durante el año 2015.....	33
Figura 5.2 Coeficiente de rendimiento para calefacción calculado a partir de la temperatura a 0,8 m, 1,5 m y 3 m, de profundidad.....	34
Figura 5.3 Categorías espaciales definidas para la implementación de sistemas de calefacción por bombas de calor geotérmicas.	37
Figura 5.4. Modelo Geoestadístico de interpolación basado en kriging para el nivel estático.	39
Figura 5.5 Modelo geoestadístico de interpolación basado en kriging para la cota hidráulica. Las flechas indican la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.	40
Figura 5.6 Traza en planta de los perfiles A-A' y B-B'-B''. Los círculos representan la ubicación de las captaciones con su respectivo código.	41
Figura 5.7 Perfiles geológicos y estratigráficos. (a) Transversal al Río Cautín [A-A']; (b): longitudinal al río [B-B'-B''].	42
Figura 5.8 Temperatura de captaciones puntuales de agua subterránea en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.....	43
Figura 5.9. Gráfica caudales otorgados por la DGA para las comunas de Temuco y PLC. Elaboración propia a partir de datos de DGA (2017).	44
Figura 5.10. Profundidad a perforar para la instalación de GWHP.	46
Figura 5.11. Extracción de calor en profundidad (sHE). Caso flujo normal de aguas subterráneas (a) y (b), caso alto flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.	48
Figura 5.12. Profundidad a perforar para sistemas BHP. (a) caso flujo normal de aguas subterráneas y (b) caso alto flujo de aguas subterráneas. Aplicado a la tipología 5. Elaboración propia.	50
Figura 6.1. Mapa de transmisividad. Mapa base hidrogeológica de Troncoso et al. (2007).	54
Figura 6.2. Zonas muy favorables para GWHP.....	56
Figura 10.1. Superficie predial mínima en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Capacidad instalada (MWt) y energía utilizada (TJ/año) de los cinco países líderes en el uso de bombas de calor. Adaptada de Lund & Boyd, (2016).	2
Tabla 2.1. Tipologías consideradas para el estudio. (UNTEC 2014).	12
Tabla 2.2. Cantidad de viviendas por tipología y período	13
Tabla 2.3. Precios de los principales ítems para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas. Elaboración propia.	15
Tabla 3.1. Horas/grado en horario de calefacción para el período 2010-2016.	23
Tabla 3.2. Extracción de energía máxima por superficie para distintos suelos. VDI 4640, 2001.	23
Tabla 3.3. Valores típicos de extracción de calor en litologías. Modificado de Ondreka et al. (2007).....	26
Tabla 5.1. Área requerida por los intercambiadores horizontales para cada tipología.	35
Tabla 5.2. Categorías espaciales y su favorabilidad para sistemas geotérmicos horizontales cerrados.....	36
Tabla 5.3. Coeficiente de rendimiento para sistemas GWHP.....	44
Tabla 5.4 Potencia entregada por el agua subterránea en función del caudal extraído, para distintos percentiles de derechos otorgados por la DGA.....	45
Tabla 5.5. Tasa de extracción de calor (sHE) para los pozos con información estratigráfica.	47
Tabla 5.6. Profundidad a perforar para los sistemas verticales cerrados (BHP).	49
Tabla 5.7. Costos de instalación para los tres sistemas de intercambio de calor estudiados (dimensión similar).....	51
Tabla 5.8. Costos operacionales de los sistemas con bombas de calor geotérmicas.	52

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del proyecto

La energía geotérmica puede ser utilizada directa o indirectamente. Un uso indirecto de esta es utilizar el calor de la Tierra para generar electricidad, ya sea mediante la producción de vapor a altas temperaturas o bien, directamente usar los fluidos geotérmicos para ello. Por otra parte, también se puede utilizar directamente el calor sin transformarlo previamente en electricidad. El uso directo de la energía geotérmica es uno de los más antiguos, comunes y versátiles en lo que a la geotermia respecta (Dickson y Fanelli, 2003). Se estima que a fines del 2014 la capacidad instalada era de 70 MWt, lo que significa un aumento de 45% desde el 2010, creciendo a una tasa de 7.7% anual en el período. La energía producida fue de 587,786 TJ/año registrando un aumento de 38,7% en el mismo período (Figura 1.1).

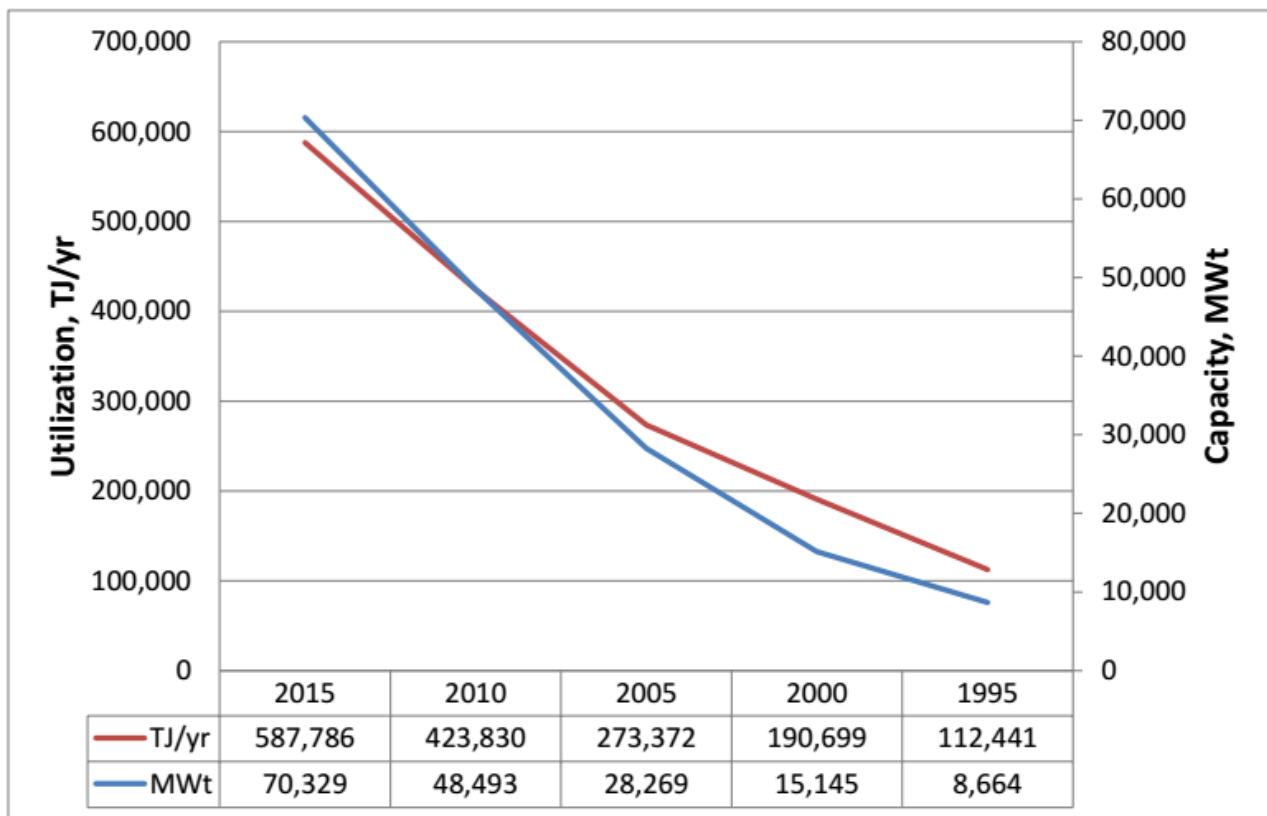


Figura 1.1. Usos directos de la energía geotérmica, capacidad instalada y energía utilizada en el período 1995-2015. Extraído de Lund & Boyd (2016).

Las bombas de calor geotérmicas (“*Geothermal Heat Pump*”, GSHP) representan el 55% de la capacidad instalada en usos directos al 2015 y están por sobre otros usos como invernaderos, acuicultura y usos recreacionales (termas) entre otros (Figura 1.2).

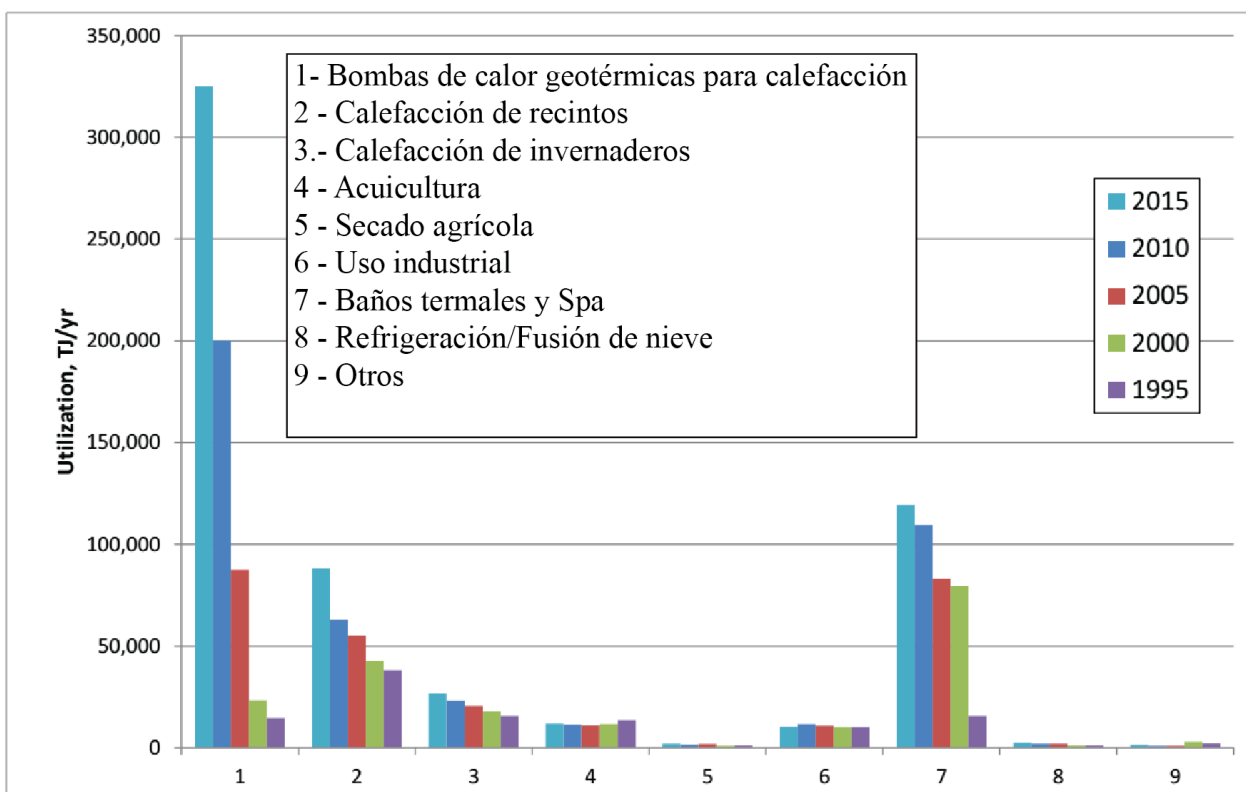


Figura 1.2. Usos directos de la energía geotérmica de los últimos 20 años. Tomado de Lund y Boyd, (2016).

La capacidad instalada mundial de bombas de calor geotérmicas ha aumentado un 8,69% anual en el período 2010-2015 (Lund & Boyd, 2016), mientras que la utilización de energía de estas unidades lo ha hecho a una tasa de 10,3% anual en el mismo período (Figura 1.2.). Los países líderes en el uso de bombas de calor geotérmicas suman casi 40.000 MWt de capacidad instalada (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Capacidad instalada (MWt) y energía utilizada (TJ/año) de los cinco países líderes en el uso de bombas de calor. Adaptada de Lund & Boyd, (2016).

Líderes mundiales en el uso de bombas de calor geotérmicas	
MWt	TJ/year
Estados Unidos (16.800)	China (100.311)
China (11.781)	Estados Unidos (66.670)
Suecia (5.600)	Suecia (51.920)
Alemania (2.590)	Finlandia (18.000)
Francia (2.010)	Alemania (16.200)

En Chile, la capacidad instalada en usos directos de geotermia, alcanza los 11,31 MWt, principalmente en el área recreacional (Spas y termas), con un uso anual de 152,12 TJ/año. El uso de las bombas de calor geotérmicas comienza en el año 1996 cuando se instalan 51 unidades en el sur del país. Aproximadamente un 70% son colectores cerrados mientras que el resto corresponde a intercambiadores abiertos. La capacidad instalada en bombas de calor es 8,2 MWt que produce 34 TJ/año, de esta, un 83% está orientado al sector comercial, industrial e institucional, mientras que solo el 17% se acota al sector residencial (Lund & Boyd, 2016). Por otra parte, encuestas locales han constatado una capacidad total de 4,6 MWt en 15 proyectos con bombas de calor geotérmicas, de las cuales, un 36% corresponde a la categoría residencial (Subsecretaría-de-Energía 2016).

En la ciudad de Temuco, las bajas temperaturas en invierno llevan inevitablemente a la necesidad de calefacción. El combustible más usado para la calefacción es la leña y se utiliza principalmente en estufas de doble combustión y cocinas. En el sector residencial, este insumo llega a tener una penetración del 91,17%, muy por sobre otros combustibles más limpios. En menor medida se utilizan estufas a gas, parafina y electricidad (Ministerio del Medio Ambiente). Por otra parte, la alta humedad relativa del ambiente, supera el 75% en promedio anual e incluso un 85% (casi 20 puntos superior a la Estación Quinta Normal, en la Región Metropolitana) en los meses de invierno (Figura 1.3), no permite un eficaz secado de la leña. Durante su combustión, la leña húmeda emite una gran cantidad de material particulado que va directamente a la atmósfera (Figura 1.4) y la convierte en la principal fuente contaminante de MP 2,5 (96%).

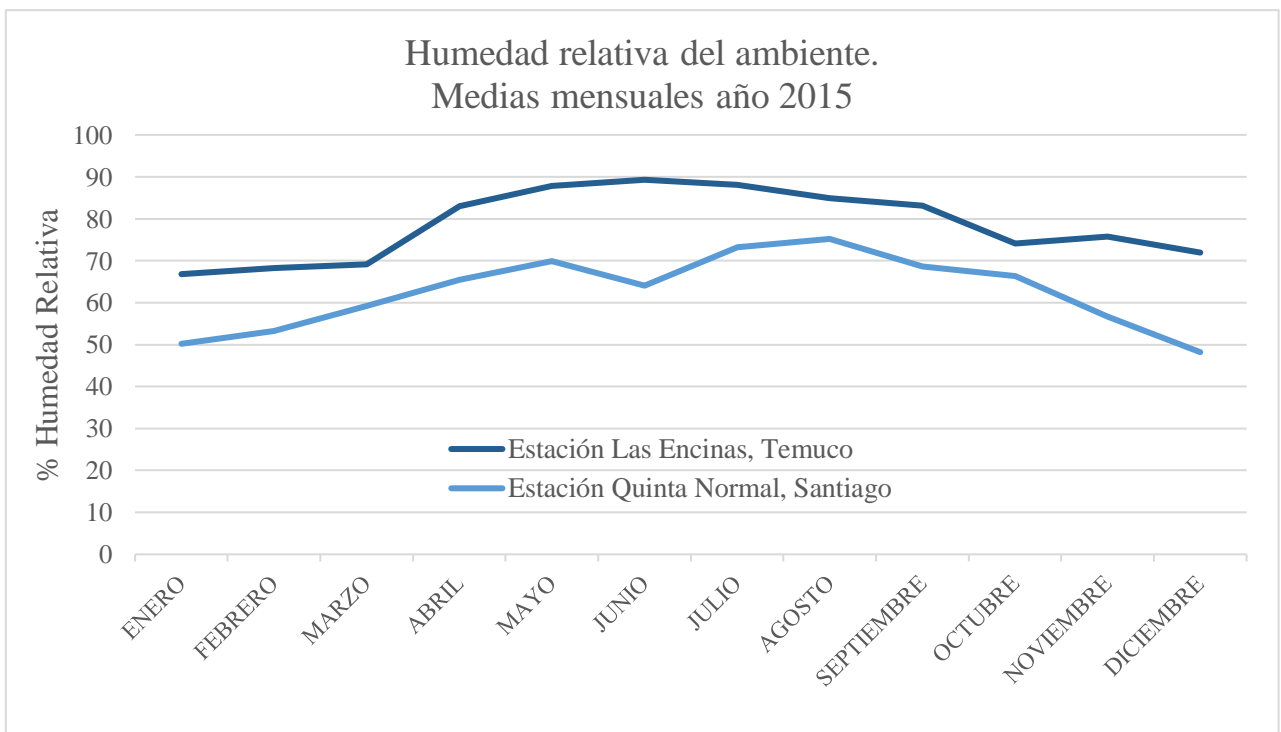


Figura 1.3. Humedad relativa del ambiente. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

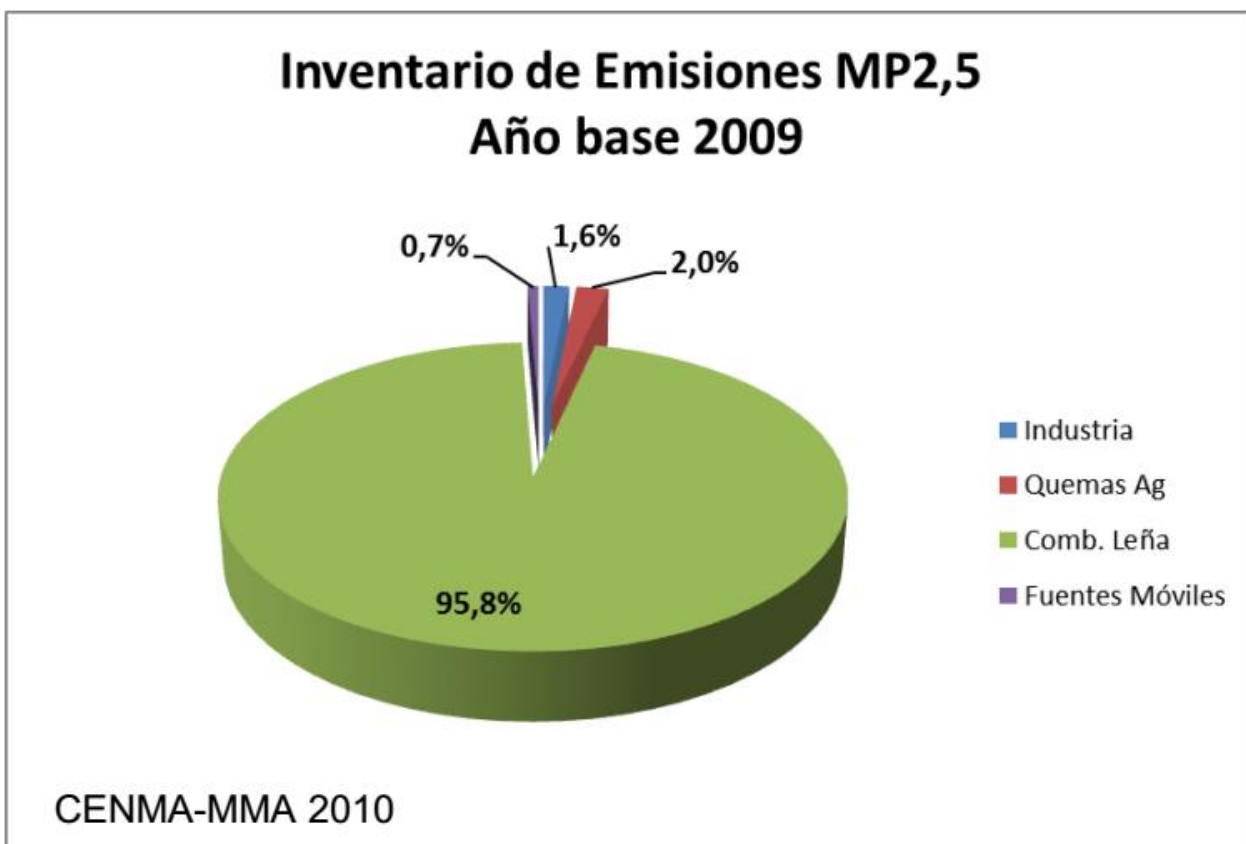


Figura 1.4. Fuentes contaminantes de material particulado MP 2,5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

Datos recientes obtenidos en la estación Las Encinas, en Temuco, indican que los niveles de concentración mensual de material particulado en los meses de invierno han superado con creces ambas normas, la nacional (MMA) y la que sugiere la OMS, para el límite de concentración de MP 10 y MP 2,5 (Figura 1.5).

Actualmente el Plan de Descontaminación Atmosférica para las ciudades de Temuco y Padre Las Casas, pretende establecer una norma para el MP 2.5 y actualizar el estado del plan para MP 10. Sin embargo, las políticas presentes en este plan, apuntan principalmente al uso de la leña, su calidad, distribución y los artefactos utilizados para su combustión, postulando un recambio de estos aparatos como también subsidiando y fomentando el comercio de leña seca y de buena calidad (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

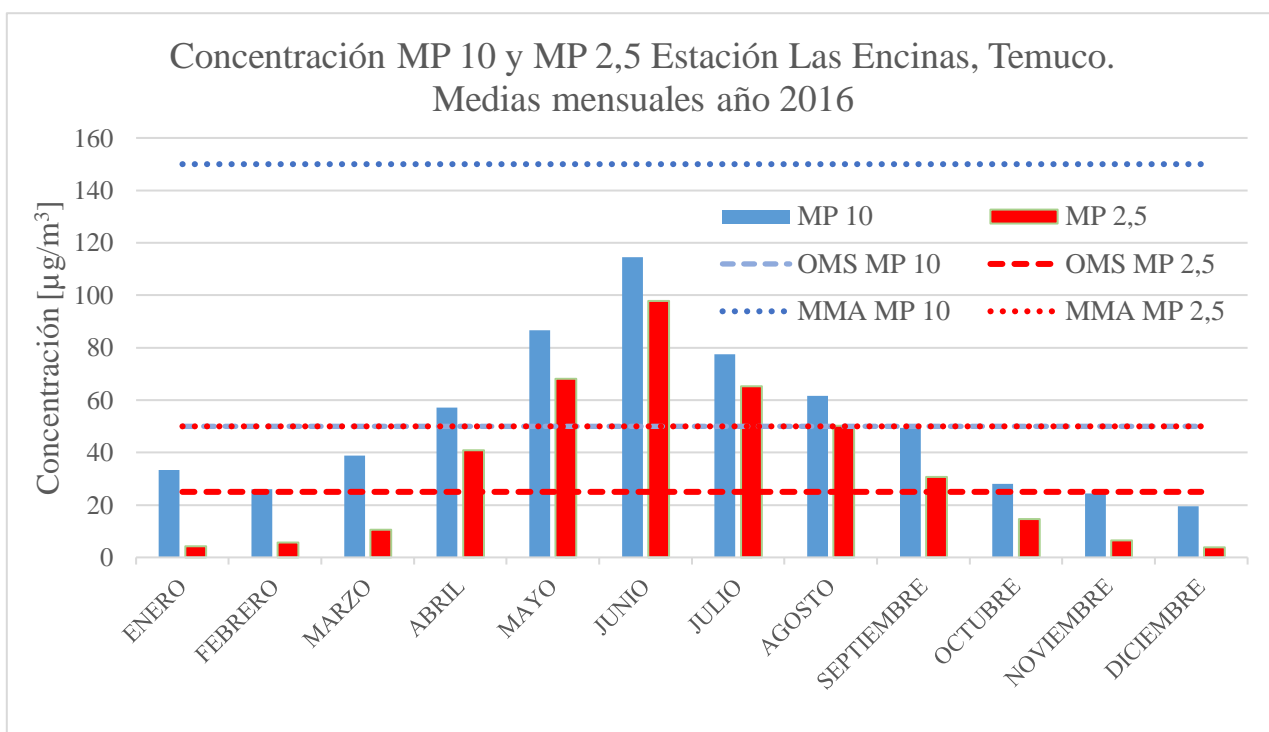


Figura 1.5. Concentración de material particulado MP 10 y MP 2,5. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).

En lo que respecta a las bombas de calor en Chile, al día de hoy, existen variados proyectos en desarrollo en el país con potencias instaladas desde los 4 kw (residencial) hasta los 700 kw (industria forestal). (Aguasol, 2016). Particularmente en la ciudad de Temuco, el condominio Franckfurt, en el cual se emplazan 34 viviendas, presenta un sistema de calefacción distrital y agua caliente sanitaria con intercambiadores verticales abiertos.

En esta memoria, apoyándose en la información hidrogeológica de la ciudad, además de las características y usos de las diferentes zonas definidas en el Plan Regulador Comunal (PRC) de Temuco y Padre Las Casas, se identificarán las zonas más favorables para cada tipo de intercambiador de calor de bombas geotérmicas.

Este trabajo plantea la alternativa del uso de estos aparatos de acuerdo a una base de datos geostatísticos. Una solución económica al problema es el uso de bombas de calor con intercambiadores horizontales. Mientras que este sistema es solo aplicable a recintos sin una limitante de espacio, otros sistemas se proponen como solución ante dicha limitante. Más costosos, los sistemas verticales de bombas de calor son una alternativa muy eficiente para combatir la contaminación atmosférica en una ciudad tan encajonada como lo es Temuco.

Se espera que, dada la poca profundidad del agua subterránea, y los altos caudales de pozo que se extraen actualmente en la ciudad de Temuco (Troncoso et al., 2007), la alternativa para sistemas de bombas de calor geotérmicas más favorable sea con intercambiadores verticales abiertos (GWHP), sobretodo en las zonas más densamente pobladas de la ciudad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estimar el potencial geotérmico de baja entalpía y evaluar los sistemas de intercambio para bombas de calor geotérmicas, para distintas zonas dentro de la ciudad de Temuco, en la Región de la Araucanía.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las tipologías de viviendas típicas presentes en la ciudad de Temuco para el estudio posterior.
- Caracterizar la ciudad de Temuco en zonas que compartan limitantes espaciales para el uso de sistemas abiertos o cerrados y la opción de climatización distrital.
- Estimar el coeficiente de rendimiento de los sistemas GSHP y GWHP.
- Estimar la cantidad de viviendas que podrían climatizarse mediante GWHP para un caudal promedio de agua subterránea extraído actualmente en la ciudad.
- Estimar la profundidad a perforar requerida para sistemas GWHP y BHP.
- Realizar una comparativa simple de costos de instalación y operación para los tres sistemas estudiados.

1.3 Área de estudio

1.3.1 Ubicación, vías de acceso y clima

El área de estudio corresponde a la zona entre la Depresión Central y la Cordillera de la Costa (particularmente la Cordillera de Nahuelbuta en esta latitud) entre los 38,62° y los 38,81° latitud sur. El acceso principal es por la ruta 5, o Panamericana Sur. Rutas secundarias permiten el acceso a las distintas zonas del área estudiada (Figura 1.6)¹.

El clima del área de Temuco se clasifica como oceánico (*Cfsb*) según la clasificación de Köppen², el cual, se caracteriza por temperaturas suaves y precipitaciones abundantes todo el año con un máximo en invierno. La temperatura media anual es de 11,6° C (Figura 1.7) con máximas y mínimas medias de 16,6°C y 7,2°C respectivamente en el período 1970-2015. La temperatura mínima absoluta en invierno ronda los -6,6° C (Estadística Climatológica Tomo II, 2001).

¹ Mapa extraído de Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile

² *Cfsb* en clasificación de Köppen: Ocupa las Planicies Litorales, la Depresión Intermedia y espacios cordilleranos ubicados bajo la cota 900 m. Presenta temperaturas medias que fluctúan entre 17,2° C en enero y 7,6° C en julio con una media anual de alrededor de 12° C. Las precipitaciones se presentan durante todo el año con montos anuales que oscilan entre 1.000 mm en los relieves más bajos y 2.000 mm en los más altos; con algunas variaciones locales que impone el relieve y la influencia marítima.

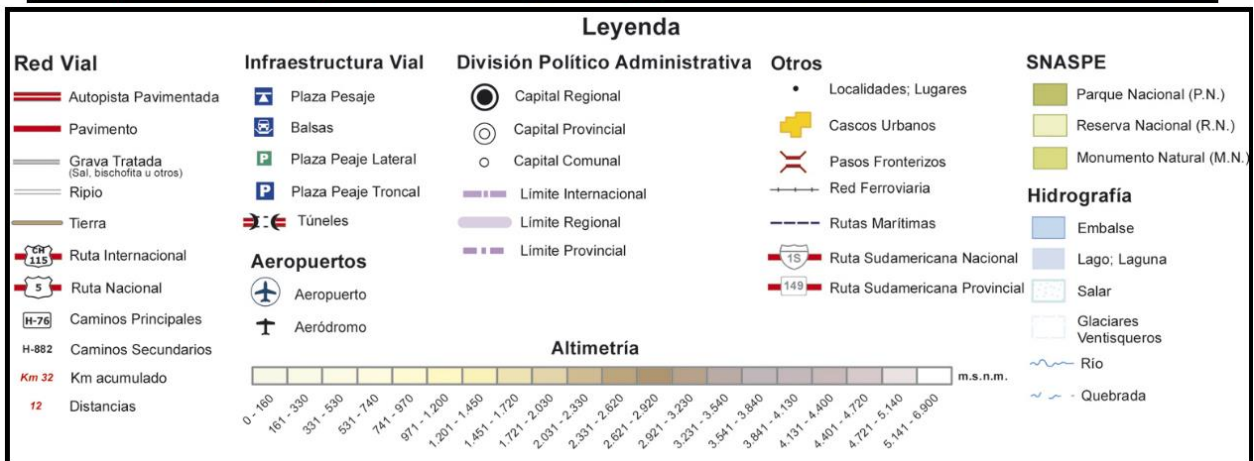
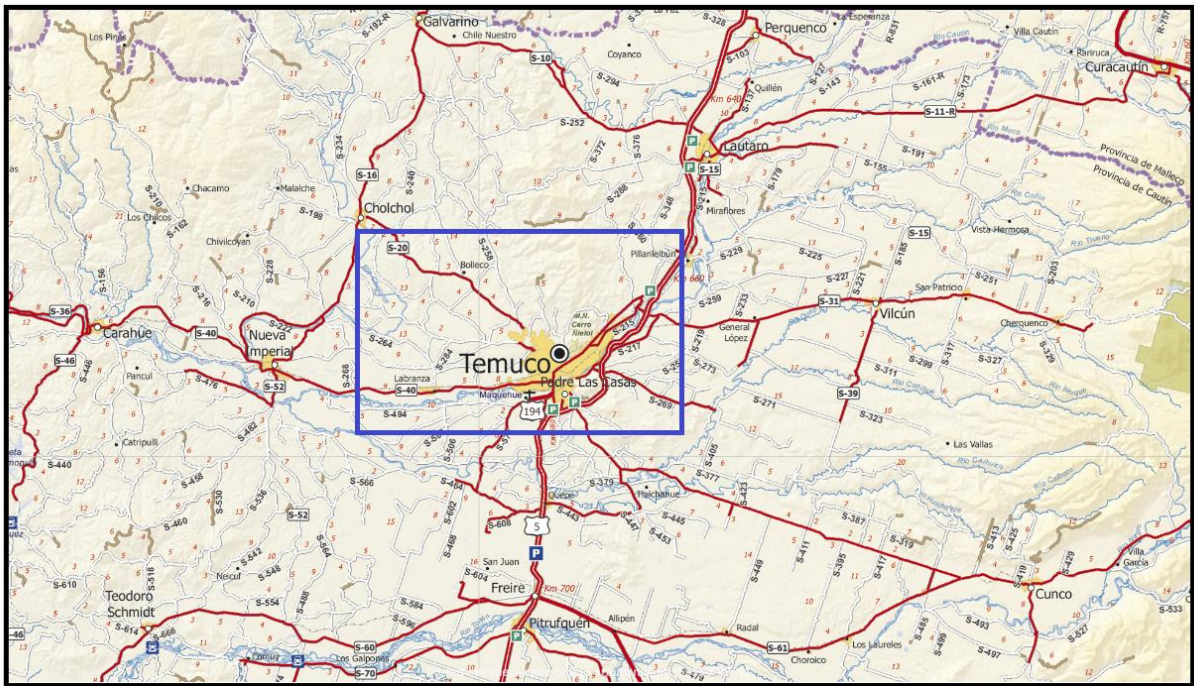


Figura 1.6 Ubicación y vías de acceso a la ciudad de Temuco. La zona de estudio se encuentra dentro del rectángulo azul. Modificado de Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, 2016.

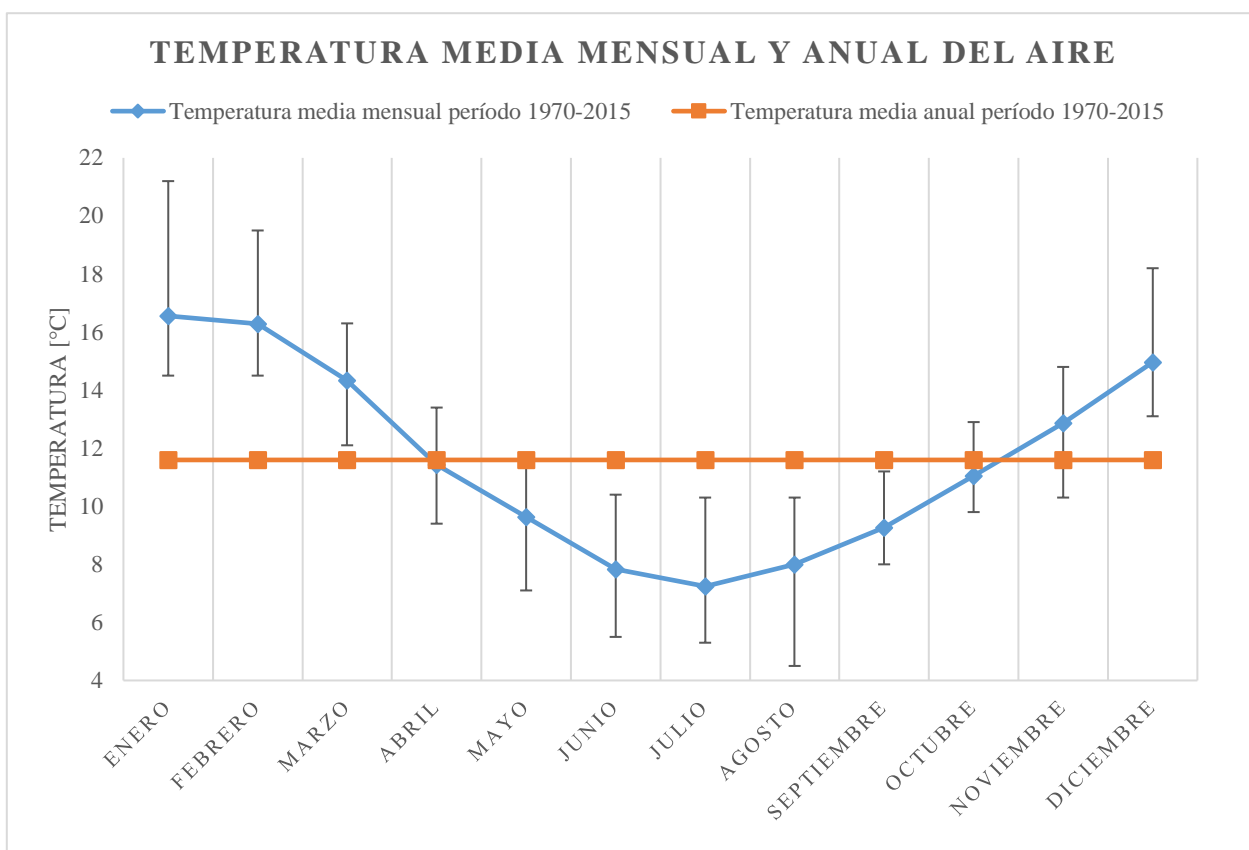


Figura 1.7. Gráfica de temperaturas medias mensuales en el período 1970-2015. Elaboración propia a partir de datos de Estadística Climatológica Tomo II (2001) y Anuarios climatológicos 2000-2015.

1.4 Estudios previos

Particularmente en el área de Temuco no existen estudios afines a la geotermia de baja entalpía.

Troncoso et al. (2007), dentro de un trabajo de geología para el uso del territorio, realizan un estudio hidrogeológico de las cuencas de la Región de la Araucanía. En él se colecta valiosa información de niveles estáticos, flujo de agua subterránea e hidroquímica de las aguas.

Por otra parte, Lemus et al. (2015) realiza una evaluación de los recursos geotérmicos en la Región de los Ríos, en la cual, determinan un potencial geotérmico de muy baja temperatura en la Cordillera de la Costa y Depresión Central. En este estudio, acuíferos libres y confinados con temperaturas que oscilan entre los 16° y 24° C, son propuestos como acuíferos de gran importancia, debido, además de su temperatura, a su baja profundidad (2 a 66 m.b.n.t) y parámetros hidrogeológicos favorables.

Muñoz et., al (2015) realizaron una estimación en la ciudad de Santiago donde presentan las zonas favorables para la instalación de bombas del tipo BHP y GWHP. El factor más importante que favorece este tipo de bombas de calor es el nivel estático. En el caso de las BHP, los sedimentos saturados tienen mejor conductividad y en el caso de las GWHP, el agua es la fuente de calor.

Gaínza (2014), concluye que las bombas del tipo GWHP son claramente más convenientes que las del tipo BHP en la cuenca del Maule, debido a la poca profundidad del nivel estático. Por otra parte, determina que el incorporar el flujo de agua subterránea genera cambios significativos en la estimación del potencial para las bombas del tipo BHP. Además, sugiere que existan derechos de agua no consuntivos para la explotación de acuíferos con el propósito de climatización.

Maripangui et., al (2016) determinan el recurso geotérmico disponible para el uso de bombas tipo GSHP en la ciudad de Coyhaique, concluyendo que el costo de operación de este sistema es el más bajo comparado con otras alternativas “ecológicas” como el gas natural o pellets. Por otra parte, se reducirían las emisiones de material particulado PM10 en más de un 90% usando GSHP. Postulan además que la calefacción distrital es una muy buena alternativa.

Schiel et., al (2016), realiza un modelo en planta basado en GIS en la ciudad de Ludwigsburg, Alemania, en el que presenta la demanda de calefacción por tipo de asentamiento y qué porcentaje de esta es posible cubrir mediante bombas del tipo BHP. Concluye que las áreas residenciales requieren de una menor cantidad de energía por m² y es posible suplirla completamente con un solo pozo, mientras que, en zonas de mayor demanda como el centro de la ciudad, se requiere más de uno.

1.5 Hipótesis de trabajo

La hipótesis de esta memoria se basa en que existen zonas de la ciudad de Temuco que tienen condiciones espaciales favorables para la instalación de intercambiadores horizontales. Por otra parte, las condiciones hidrogeológicas de la zona en la que está emplazada la ciudad son favorables para el funcionamiento de intercambiadores verticales y por ende tienen factibilidad técnica-económica.

2. ANTECEDENTES

2.1 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 2.1) (RetScreen, 2005).

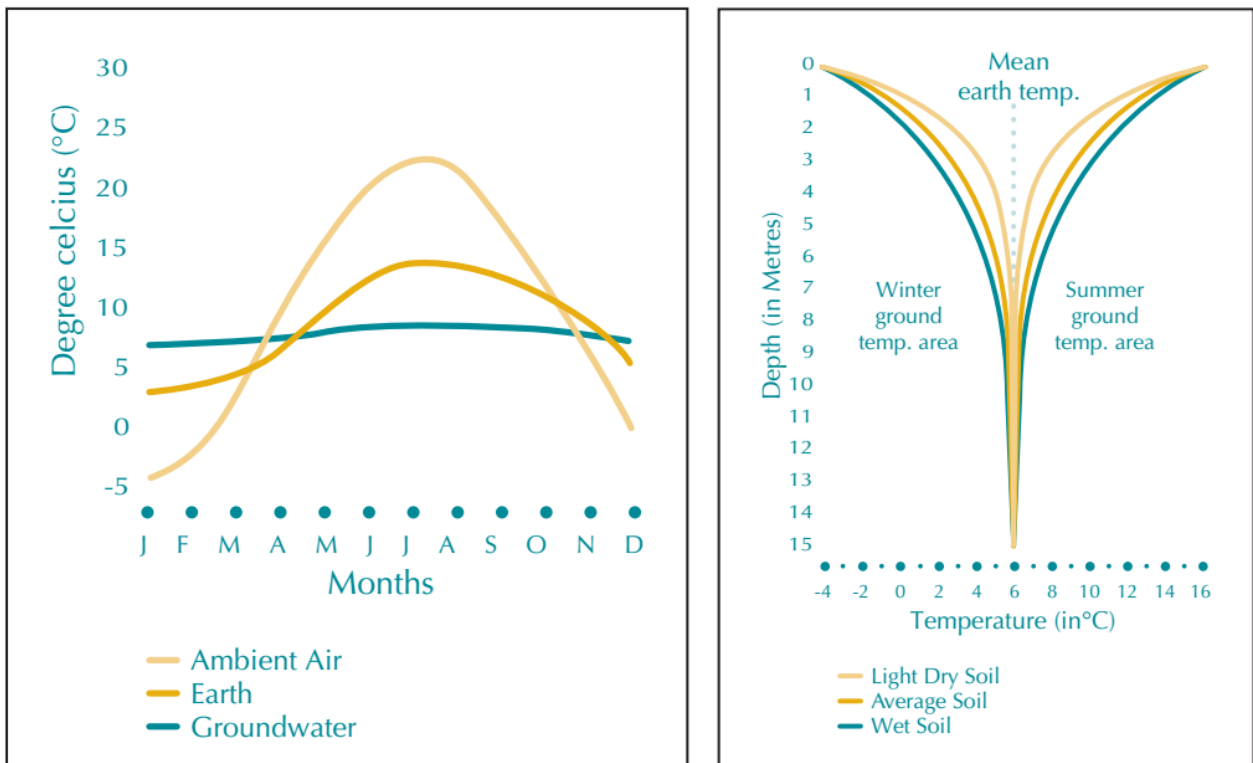


Figura 2.1. Comparativa de temperatura en: ambiente, suelo y agua subterránea (izquierda). Perfil de temperatura en profundidad para invierno y verano en suelos húmedos y secos (derecha). Extraído de RETScreen (2005).

La bomba de calor es un dispositivo eléctrico que, mediante un compresor y un ciclo de refrigeración “bombea” calor desde una zona de menor temperatura a una de mayor temperatura. El funcionamiento de una bomba de calor geotérmica en modo calefacción se puede resumir de la siguiente manera: primero un intercambiador “colecta” calor desde el suelo; luego dentro de la bomba de calor (Figura 2.2) en el evaporador el calor evapora el fluido de trabajo (usualmente un hidrocarburo con una baja temperatura de ebullición) generando un gas a baja temperatura y baja presión; a continuación, el gas es comprimido (en el compresor), produciendo un gas a alta temperatura y alta presión, que a continuación es condensado liberando el calor correspondiente al cambio de fase y conducción (condensador). Luego, el fluido pasa por una válvula de expansión, y comienza el ciclo nuevamente. El calor se puede distribuir mediante ventilosconvectores o losa radiante, siendo esta última la opción más eficiente dada la baja temperatura de salida requerida.

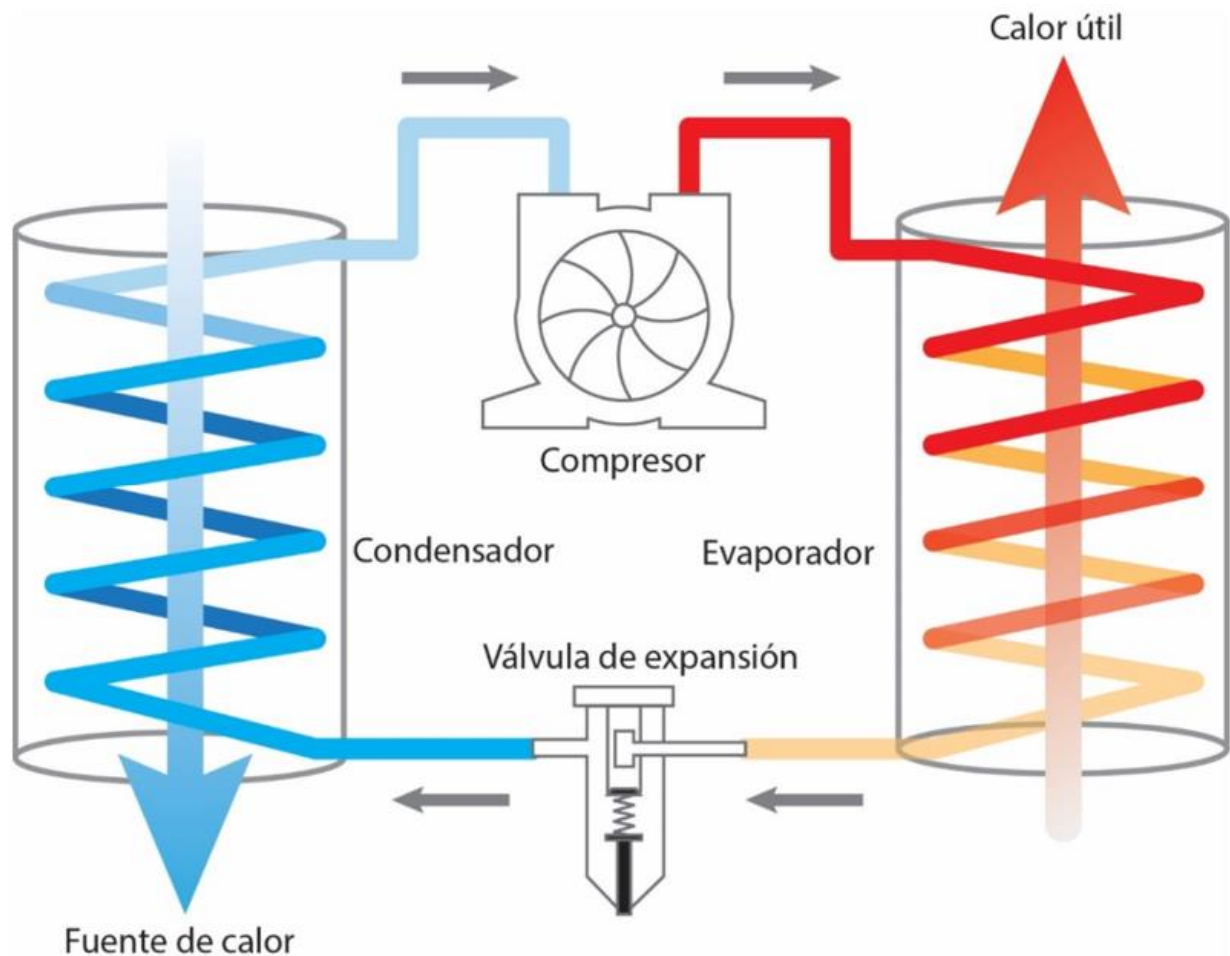


Figura 2.2. Ciclo de una bomba de calor. Extraído de Aiguasol, (2016).

Los sistemas de climatización mediante bombas de calor geotérmicas se pueden dividir en dos tipos dependiendo del intercambiador de calor externo: intercambiadores cerrados y abiertos. Los sistemas cerrados utilizan solamente el calor de la Tierra mediante un circuito cerrado con un fluido adecuado a las condiciones climáticas (generalmente un anticongelante basado en salmuera). Este circuito cerrado intercambia calor con el suelo y lo transfiere a la bomba de calor. Pueden ser horizontales (Figura 2.3, a) denominados *Ground Source Heat Pump* (GSHP), los cuales, requieren mayor superficie pero menor profundidad, o verticales (Figura 2.3, b), llamados *Borehole Heat Pump* (BHP) (mediante una perforación profunda). Por otra parte, los sistemas abiertos, utilizan el agua subterránea y deben contar con dos perforaciones profundas: una para extraer agua y otra para reinyectarla (Figura 2.3, c). Estos últimos se denominan *Ground Water Heat Pumps* (GWHP).

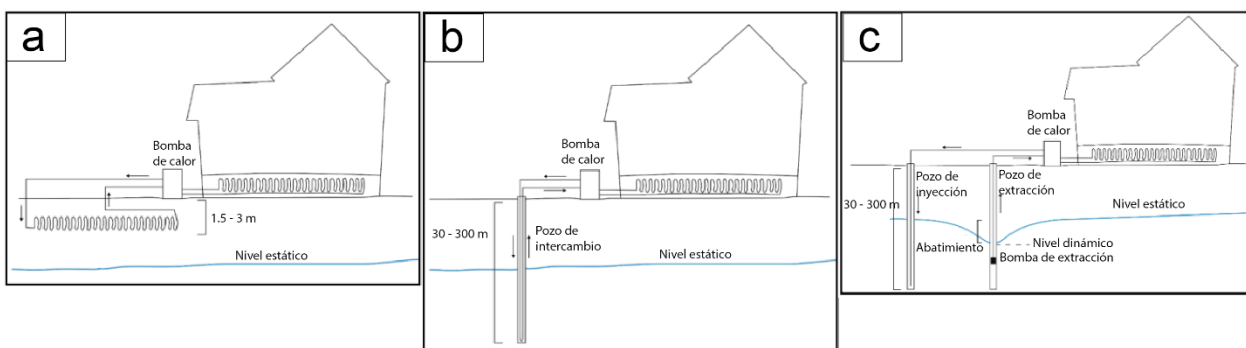


Figura 2.3 Intercambiadores acoplados a una bomba de calor. Imagen adaptada de material inédito del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). <http://www.cega.ing.uchile.cl/>.

Existen también otros sistemas de menor penetración en el mercado, tales como sistemas abiertos en cuerpos de agua superficiales (lagunas, lagos o embalses) (Florides y Kalogirou, 2007), o sistemas cerrados con intercambiadores más complejos (cónicos o cilíndricos) (Boughanmi et., al, 2015). Este estudio se centra en los tres intercambiadores expuestos en el párrafo anterior: GSHP, GWHP y BHP.

2.2 Tipologías

En este estudio se consideran seis de las tipologías más típicas en Chile. Estas fueron definidas en informe UNTEC (2014) y se detallan en la Tabla 2.1. Las características térmicas de las viviendas consideradas en estas tipologías, son para viviendas construidas posterior al 2016, es decir, con la norma térmica actual. La carga térmica requerida para cada tipología, corresponde a la potencia máxima calculada en base a la temperatura de diseño. En este caso la temperatura de diseño es $-0,7^{\circ}\text{C}$, y corresponde a la temperatura mínima que ha sido medida con un nivel de frecuencia de al menos 1% a lo largo del año (RETScreen, 2005). El costo de reacondicionar una vivienda a la norma actual considera aplicación de aislante en los complejos techumbre, muros y pisos, además del cambio de ventanas y el sellado de infiltraciones. Para efectos del estudio, se consideran las características térmicas normadas para viviendas construidas después del 2016, por lo que se asume que previo a la instalación de cualquier sistema de calefacción mediante bombas de calor geotérmicas, se realiza un el reacondicionamiento térmico.

Tabla 2.1. Tipologías consideradas para el estudio. (UNTEC 2014).

Tipología	Sistema de agrupamiento	Pisos	Superficie [m ²]	Carga térmica [w]	Costo de reacondicionamiento térmico [USD 2016]	Demanda neta anual [kwh]
T1	Casa Aislada	1 piso	57	2777,9	\$3.137	2500,2
T2	Casa Aislada	1 piso	221	9090,2	\$8.560	8737,3
T3	Casa Aislada	2 pisos	103	4763,2	\$4.074	4127,9
T4	Casa Fila	2 pisos	52	2009,8	\$497*	2860,2
T5	Casa Pareada	1 piso	68	2190,1	\$513*	3464,6
T6	Casa Pareada	2 pisos	85	3306,5	\$834*	4352,5

* Costo solo considera aplicación de aislante en techumbres y muros y no considera el recambio de ventanas por termopaneles de doble vidriado.

A continuación, en la Tabla 2.2 se indica la cantidad de viviendas que se incluyen en cada tipología para los distintos períodos en los cuales fueron construidas. Es importante mencionar que las tipologías 7,8 y 9 no son consideradas en el estudio ya que sus dimensiones han sido definidas por una entidad distinta y no representan los alcances de este estudio.

Tabla 2.2. Cantidad de viviendas por tipología y período

Cantidad de viviendas incluidas en cada tipología por período de construcción					
Tipologías	<2000	2000-2007	2008-2013	Total	%
T1	9.947	2.439	2.091	14.477	19,6%
T2	2.401	589	505	3.494	4,7%
T3	2.744	673	577	3.994	5,4%
T4	1.243	305	261	1.810	2,5%
T5	12.434	3.049	2.614	18.096	24,5%
T6	7.417	1.819	1.559	10.795	14,6%
T7	2.518	617	529	3.665	5,0%
T8	6.004	1.472	1.262	8.738	11,8%
T9	6.004	1.472	1.262	8.738	11,8%
Total	50.712	12.436	10.659	73.807	100%

2.3 Plan regulador comunal

El plan regulador comunal o PRC es una herramienta de planificación urbana utilizada por la mayoría de los municipios con el fin de establecer normas sobre el uso del suelo, áreas de uso prohibido, zonas de protección, entre otros. El PRC divide la comuna en zonas, las cuales presentan distintos atributos, usos permitidos y prohibidos y restricciones. Algunos de los atributos con los que cuenta el PRC son: superficie predial mínima, que indica el tamaño mínimo en m² que debe tener un predio perteneciente a esa zona; coeficiente de ocupación máxima: indica el porcentaje máximo de suelo que puede ser construido (en el 1er piso) con respecto al tamaño total del predio, y, coeficiente máximo de constructibilidad: indica la superficie máxima que puede ser construida con respecto al tamaño total del predio (incluyendo plantas superiores).

Para efectos de este estudio, se consideran los atributos coeficiente de ocupación máxima y superficie predial mínima. En la Figura 2.4 se observa el PRC y su atributo coeficiente de ocupación máxima. Las zonas verdes indican una mayor superficie del terreno libre por cada predio y las rojas indican una mayor densidad de construcción en el suelo.

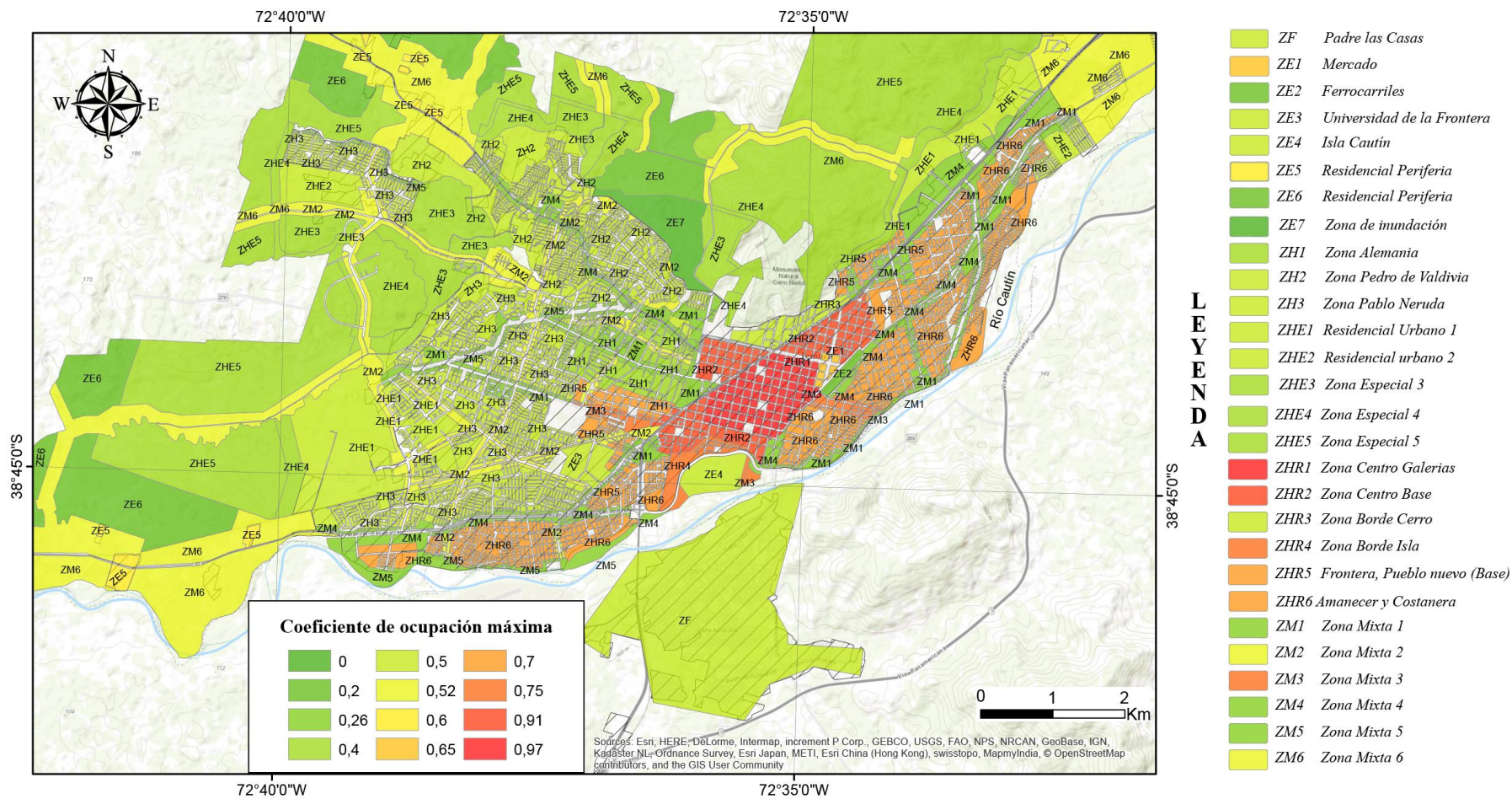


Figura 2.4. Coeficiente de ocupación máxima del Plan Regulador Comunal de la ciudad de Temuco. Modificado de archivo proporcionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2010 y posteriores enmiendas. Gobierno de Chile.

2.4 Costos

2.4.1 Costo de instalación

El costo de instalación de un sistema de climatización mediante bombas de calor geotérmicas es la principal barrera de entrada a la tecnología. El costo total va a depender de la capacidad total del sistema [kw], del tipo de intercambiador geotérmico, y del lugar físico de la instalación, entre otros. Se puede asumir que, para los distintos sistemas estudiados en este trabajo, el costo de la bomba de calor y de la distribución del calor dentro de la vivienda es el mismo. El costo del intercambiador de calor desde la fuente hacia la bomba es el que varía entre cada sistema.

En el caso de los sistemas GSHP, se debe considerar un colector geotérmico horizontal, generalmente son tuberías de polipropileno que van enterradas a 1,5 m, por lo que hay un costo de la instalación asociado a la excavación de la zanja y las conexiones, además de las tuberías, codos metálicos etc... En el caso de un sistema GWHP, se debe realizar un pozo profundo. Las empresas de perforación locales, perforan un mínimo de 30 m y el costo promedio por metro perforado y habilitado es de \$166.600 IVA incluido³. A esto se le debe añadir el costo de la bomba de agua. Para el caso de sistemas BHP, se debe realizar una perforación profunda y luego insertar el colector geotérmico o sonda vertical. El mercado actual en Chile aún es muy pequeño lo que ha dificultado evaluar el precio para la sonda vertical. Para este ítem, se utiliza una cotización online que sugiere un costo de CLP\$1.500.000 para la sonda vertical⁴. Luego, los precios para cada sistema se presentan en la Tabla 2.3. Se debe notar que el costo de la perforación está en \$CLP por metro y no representa el costo total de la perforación.

Tabla 2.3. Precios de los principales ítems para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas. Elaboración propia.

Ítem	Estimación de costos		
	GSHP	GWHP	BHP
Bomba de calor (4 kw nominal)	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000
Colector geotérmico	\$ 3.000.000		\$ 1.500.000
Perforación profunda (\$CLP/m)		\$ 166.600	\$ 166.600

³ Precio calculado en base a cotizaciones de empresas en la ciudad de Temuco en el primer semestre de 2017.

⁴ Cotización realizada en el sitio: <http://www.chile.generadordeprecios.info> para una sonda doble de 100 m de profundidad.

2.5 Aspectos legales

Esta sección aborda las regulaciones legales del uso del recurso energético geotérmico y del uso de aguas subterráneas. En el caso de intercambiadores cerrados (GSHP y BHP), el marco regulatorio actual no incluye la explotación de la energía geotérmica de baja entalpía, ya que no hace referencia a esta. Los proyectos que son regulados por la ley (Ley N° 19.657 sobre concesiones de Energía Geotérmica) son para generación de energía eléctrica a partir del recurso geotérmico y no su uso directo. En el caso de intercambiadores abiertos (GWHP), al utilizar un recurso hídrico, se debe solicitar un derecho de aprovechamiento no consuntivo de aguas subterráneas a la Dirección General de Aguas (DGA) y este procedimiento está sujeto al Código de Aguas (1981) que regula y norma los procesos a seguir para esta solicitud.

2.5.1 Sistema vertical abierto

El sistema geotérmico abierto requiere de dos pozos, uno para extraer agua del subsuelo y otro para inyectar el total del agua extraída. El proceso consiste en extraer calor del agua del pozo de producción, para luego inyectarla en el otro pozo unos grados más baja ± 6 K (VDI 4640, 2001).

Cualquier persona natural o jurídica puede solicitar un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas de acuerdo a los procedimientos y requisitos establecidos en el Código de Aguas (1981). Este aprovechamiento puede ser consuntivo o no consuntivo. Para la instalación de un sistema GWHP, se abordará el aprovechamiento no consuntivo, ya que las aguas no son consumidas y son reinyectadas al acuífero. Para solicitar un derecho de aprovechamiento de aguas, se deberá presentar una solicitud dirigida al Director General de Aguas, y deberá ser ingresada en la oficina de Partes de la DGA de la provincia en que se encuentra ubicado el punto de captación de las aguas que se deseen constituir.

Los procesos legales desde la solicitud hasta la constitución del derecho pueden ser observados en la Figura 2.5. Un mayor detalle de cada proceso enumerado (entre corchetes), puede ser revisado en la Figura 2.6.

2.5.2 Comentarios

En el caso de los GWHP, los caudales requeridos son muy bajos, del orden de 0,7 l/s para viviendas unifamiliares, y unos pocos l/s para calefacción distrital, lo que no presenta un mayor problema por parte de la DGA al momento de resolver la solicitud, ya que el caudal máximo permitido, en este caso, para la Región de la Araucanía es de 500 l/s y 100 l/s para las regiones desde la Metropolitana hacia el norte, para derechos no consuntivos.

El principal problema para este sistema es el tiempo que toma en promedio la solicitud de un derecho de aguas, de entre uno y un año y medio. La principal causa de la demora es por solicitudes erróneas. Dado esto, la DGA ha confeccionado la “Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales para Sistemas Geotérmicos de Media y Baja Entalpía” (Dirección General de Aguas, 2017), en la cual se detalla paso a paso el procedimiento a realizar y no incurrir en los errores básicos (Figura 2.5). Esta guía debería disminuir la duración del trámite legal al mínimo.

El trámite no tiene costo alguno aparte de los costos asociados a publicar en el diario oficial u otros medios y el pago de la inspección ocular en caso que proceda.

En el caso de los BHP, ya que su implementación no está regulada en la actualidad y la ley hace vista gorda a su implementación, son una alternativa más viable a corto plazo ya que no requiere trámites legales para su puesta en marcha.

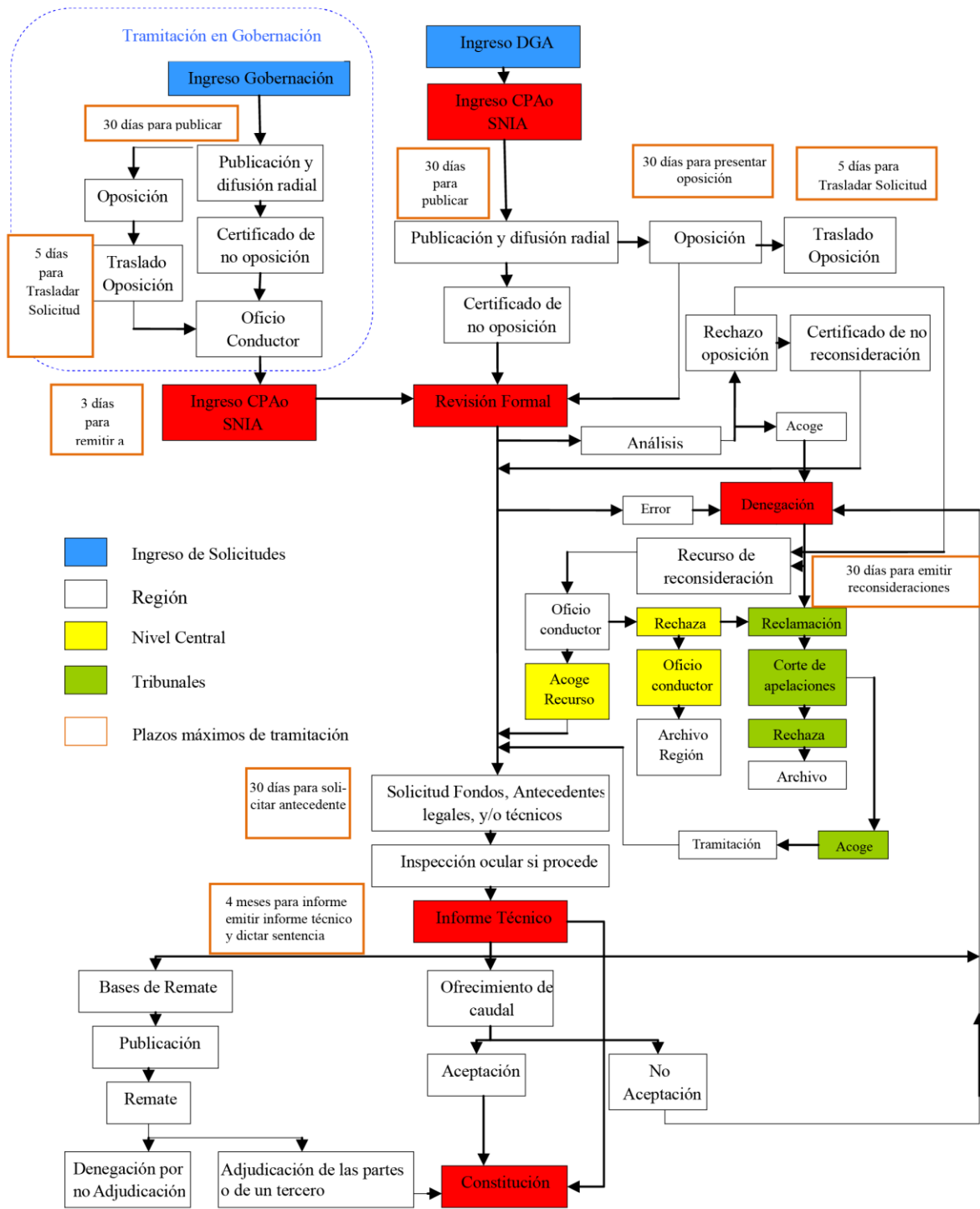


Figura 2.5. Procesos para la solicitud de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Tomado de Dirección General de Aguas (2017).



Figura 2.6. Fases para la constitución de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Extraído de Vielma (2013)

3. METODOLOGÍA

3.1 Base de datos

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, niveles estáticos y dinámicos, temperatura en superficie, temperatura del subsuelo a 10 cm, conductividad y transmisividad hidráulica. Esta base de datos incorpora información obtenida de la Dirección General de Aguas (DGA), de la Red Agro-meteorológica del INIA (AGROMET), de la Carta Geológica de Chile (Geología para el ordenamiento Territorial: Área de Temuco, Región IX), y datos propios, obtenidos en salida a terreno realizada durante el desarrollo de esta memoria.

Por otra parte, se trabajó con el Plan Regulador Comunal de las comunas de Temuco y Padre de las Casas, imágenes satelitales “Bing Satellite”, obtenidas del software SASPlanet y modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos del satélite *Alos Palsar*. Los mapas generados presentan coordenadas geográficas en el datum WGS84.

3.2 Temperatura del subsuelo

La temperatura a una profundidad z del suelo se puede ajustar a una simple función armónica. Esta función depende de la profundidad, de la temperatura media anual atmosférica y del tiempo. Existe un desfase temporal entre la temperatura ambiental y la temperatura del suelo y este desfase aumenta con la profundidad (ATECYR, 2012). La temperatura a una profundidad z y un tiempo t viene dada por la ecuación (1) (Andújar et al., 2016):

$$T_{\text{suelo}}(z, t) = T_m - T_p e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos(\omega t - \varphi - z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}) \quad (1)$$

Donde:

T_m : temperatura media ambiental anual

T_p : oscilación térmica anual

z : profundidad en metros

t : tiempo [días]

ω : frecuencia angular [rad/día]

α : difusividad termal del suelo [$\text{m}^2/\text{día}$]

φ : Fase. representa el desfase temporal.

La difusividad térmica del suelo se ha medido en terreno⁵ y tiene un valor de 0,194 mm²/s. Un desfase típico de 35 días se considera para la fase φ (ATECYR, 2012).

Por otra parte, también se evalúa cómo varía la temperatura en función de la profundidad, considerando otros escenarios, a 80 cm y a 300 cm de profundidad, además de 150 cm.

3.3 Coeficiente de rendimiento

El coeficiente de rendimiento o COP (*Coefficient of performance*) se define como la razón entre la potencia termal liberada por la bomba de calor (Q_{lib}) y la potencia eléctrica consumida (P_{con}) en el proceso (Morrone & Coppola, 2014).

$$COP = \frac{Q_{lib}}{P_{con}} \quad (2)$$

Por otra parte, el COP se puede estimar de antemano con la expresión (3), basada en el ciclo de Carnot y ajustada con un factor de eficiencia α que depende del diseño de la bomba de calor y puede variar entre 0,3 y 0,7 (Morrone & Coppola, 2014). Datos experimentales arrojan valores de α cercanos a 0,5 (De Swardt y Meyer, 2001).

$$COP = \alpha \frac{T_{hot} + 273}{T_{hot} - T_{cold}} \quad (3)$$

Donde:

T_{hot} : temperatura del foco de liberación de calor (ej: losa radiante, 40°C)

T_{cold} : (T_{in-x}): temperatura de entrada al evaporador.

La temperatura T_{in} corresponde a la temperatura de la fuente fría. En el caso de sistemas horizontales cerrados corresponde a la temperatura del suelo y en sistemas abiertos a la temperatura del agua subterránea. El parámetro x representa un ajuste que se debe hacer ya que la temperatura de la fuente se ve afectada hacia el evaporador. Este parámetro varía dependiendo del sistema de intercambiadores y no debería superar los 8,33° C (15° F) en el caso de sistemas cerrados donde x es mayor (RETSscreen, 2005).

⁵: Camila Aravena. Comunicación personal. Universidad Católica de Temuco, julio 2017.

3.4 Zonificación

Para determinar las limitantes espaciales, se definen categorías basadas en dos criterios, la posibilidad de instalar colectores horizontales y la opción (como zona) de climatización distrital. Para el primer criterio, se recurre al Plan Regulador Comunal (PRC) (Figura 2.4), el cual, indica la superficie predial mínima del terreno, el coeficiente máximo de ocupación y el tipo de uso de suelo permitido, entre otros.

Por otra parte, con el uso del software *Google Earth*, se determinan zonas que tengan distribuciones ordenadas, en general, condominios de casas y edificios, las cuales califican para calefacción distrital. Además, se revisa la información en el PRC y a través del tipo de uso de suelo se determina la coherencia de la información.

Para determinar el espacio requerido para calefaccionar la vivienda, es necesario calcular la potencia calórica que entregaría el sustrato suelo. Se procederá a calcular este espacio para viviendas estándar clasificadas en tipologías (Tabla 2.1). A continuación, se obtiene la razón entre el área del primer piso de la vivienda y el área requerida por los intercambiadores para cada tipología, y se denomina R_x , donde x representa la tipología en cuestión. Luego se compara R_x con el coeficiente de ocupación máxima de cada zona del PRC y se define si cabe el intercambiador para cada tipología x . Finalmente se genera un mapa para todas las zonas del PRC indicando las áreas favorables, donde caben los intercambiadores horizontales para cada tipología, áreas no favorables, y áreas que califican para calefacción distrital.

La cantidad máxima de energía que se puede extraer del suelo depende del tipo de material que contenga, la saturación de agua y la cantidad de horas que se explotará el calor durante el ciclo anual. Esta cantidad viene tabulada en tablas y se puede realizar una estimación tomando el siguiente supuesto: Se considera el suelo de la ciudad de Temuco con una naturaleza cohesiva y húmeda, dada la alta humedad presente en la ciudad a lo largo del año y particularmente en los meses de invierno (Figura 1.3).

Por otra parte, la cantidad de horas de explotación del suelo se calcula de la siguiente manera:

Utilizando los datos de temperatura horaria de AGROMET, se procede a calcular las horas normalizadas por potencia, que se requiere calefaccionar la vivienda en el período de uso residencial (desde las 19:00 a las 8.00 hrs). Se ponderan las horas por la potencia utilizada en cada hora. El factor de normalización es la diferencia entre la temperatura base (19°) y la temperatura de diseño ($-0,7^\circ$), es decir $19,7^\circ$ C.

$$\sum_i^{\text{horas del año}} \frac{T_{base} - T_{ambiente_{hora i}}}{T_{base} - T_{diseño}}$$

Con i las horas entre las 19:00 y las 8:00.C

La (Tabla 3.1) muestra un resumen con los datos de Hora/grado del año 2010 hasta el 2016.

Tabla 3.1. Horas/grado en horario de calefacción para el período 2010-2016.

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Promedio
Horas/grado por año	2434	2309	2483	2525	2502	2443	2453	2450

Como se observa en la tabla, las horas promedio de calefacción son 2450 hr/año, por lo que, se acerca al valor de 2400 hr/año propuesto en la Tabla 3.2. Considerando el suelo de la ciudad de Temuco como cohesivo y húmedo, la potencia entregada por este varía entre 16 y 24 W/m² (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Extracción de energía máxima por superficie para distintos suelos. VDI 4640, 2001.

SUELO	Extracción de energía específica máxima	
	1800 horas de operación (W/m)	2400 horas de operación
Suelo seco	10 W/m ² y 5W/m de tubería	8 W/m ² y 4W/m de tubería
Suelo cohesivo húmedo	20-30 W/m ² y 15W/m de tubería	16-24 W/m ² y 12W/m de tubería
Gravas y arenas saturadas	40 W/m ² y 20W/m de tubería	32 W/m ² y 16W/m de tubería

Para realizar los cálculos se considera el valor de 20 W/m². El área de los intercambiadores se calcula como:

$$Ai = \frac{Ps[w]}{20[\frac{W}{m^2}]} \quad (4)$$

donde Ps corresponde a la potencia entregada por el suelo y se calcula como:

$$Ps = Pt - \frac{Pt}{COP} \quad (5)$$

El COP utilizado es el COP promedio en el ciclo anual calculado con la temperatura a 1,5 m de profundidad. Este valor entrega una estimación conservadora ya que, al utilizar un COP menor, como por ejemplo el COP mínimo de invierno, el área requerida será menor ya que el suelo entrega menos potencia (la diferencia la entrega el trabajo de la bomba de calor).

3.5 Bombas de calor tipo GWHP

Para evaluar la favorabilidad de los sistemas GWHP en la ciudad de Temuco, en primer lugar, se calculan algunos parámetros hidrogeológicos de interés. Es de vital importancia conocer la distribución de los acuíferos, su profundidad, la dirección del flujo y su potencia hasta la base.

El nivel estático de una captación de agua subterránea es la profundidad que tiene el espejo de agua en el que no se está bombeando agua por un período razonable. El nivel dinámico por su parte, es la profundidad del espejo de agua, pero en un momento en el que se está utilizando la bomba a un caudal dado. Ambos niveles son medidos desde la superficie del terreno.

La profundidad del nivel estático y dinámico, se obtiene de tres fuentes: directamente de los expedientes registrados en la Dirección General de Aguas (56 pozos), del estudio de Troncoso et al. (2007) (20 pozos), y medidos directamente en terreno (12 pozos). La visita a terreno se desarrolla desde el 28 de noviembre al 3 de diciembre de 2016. Mediante la sonda Solinst 107 TLC, se obtienen mediciones de temperatura, nivel estático y conductividad eléctrica a intervalos de 1 m.

En total, se cuenta con 88 pozos de más de 25 metros de profundidad. Las cotas de altura se extraen del modelo digital de elevación, y, con estas, se obtienen las cotas hidráulicas (m.s.n.m). Los mapas de nivel estático y cota hidráulica se generan a partir de los datos puntuales, como una superficie de interpolación, utilizando el software *Arcmap 10.3* mediante un método kriging con una transformación logarítmica de segundo grado y un modelo circular con anisotropía.

Basándose en el mapa geológico de la zona (Mella y Quiroz, 2010), se confeccionan dos secciones estratigráficas, transversal y longitudinal al valle del río Cautín. En estas secciones se proyecta la información hidrogeológica de 16 pozos considerados como representativos de la zona. Se incorpora el nivel estático y la profundidad del pozo. De esta manera se grafica la potencia mínima del acuífero principal.

En la campaña de terreno se midieron perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en captaciones subterráneas distribuidas en la ciudad. El COP se calcula a partir de la temperatura del agua subterránea, mediante la expresión (3).

La transmisividad se obtiene analizando las pruebas de bombeo proporcionadas por la DGA, mediante el software *Aquifertest 2016* con el método de Theis para las pruebas recuperación. Se cuenta con 23 pozos con pruebas de recuperación, por lo que sólo en estas se ha realizado el análisis de Theis para generar un modelo coherente. El coeficiente de permeabilidad de Darcy (K [m/día]) se calcula a partir de la transmisividad (T [m²/día]) y el espesor saturado del pozo (E_s [m]) (diferencia entre el nivel dinámico y profundidad del pozo) según la ecuación (6).

$$K = \frac{T}{E_s} \quad (6)$$

La transmisividad y permeabilidad son datos que ayudan a evaluar la bondad de acuífero y pueden determinar si es adecuado o no explotar los caudales requeridos para entregar una potencia a una bomba de calor. La potencia entregada por el agua subterránea se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P = Q\rho C_p \Delta T \quad (7)$$

Donde:

P : potencia extraíble del agua subterránea [J/s]

Q : caudal extraído [m^3/s]

ρ : densidad del agua [kg/m^3]

ΔT : diferencia de temperatura entre el agua entrante y saliente de la bomba de calor [$^{\circ}\text{K}$]

C_p : capacidad calorífica del agua [J/kgK]

De esta manera, la potencia extraíble dependerá fuertemente del caudal extraíble en la ciudad. La densidad del agua se asume como $1000 \text{ [kg}/\text{m}^3]$. La diferencia de temperatura ΔT , se asume como 3°C ⁶. La capacidad calorífica del agua es $4186 \text{ [J}/\text{KgK}]$.

La profundidad a perforar depende de: el nivel estático y su variación estacional, el abatimiento dado el caudal explotado y, una profundidad de seguridad (5 m)⁷. Existen estaciones de monitoreo de pozos de agua subterránea las cuales toman datos cada cierto tiempo. Específicamente para el área de estudio no existe este tipo de información, pero en cuencas similares de zonas cercanas (Región del Bío-Bío)⁸ se han registrado variaciones estacionales de hasta 4 m en el nivel estático. Se utilizará este dato para el cálculo. Para el cálculo del abatimiento se considera una estadística de los pozos que extraen un caudal similar al requerido para el sistema GWHP evaluado y se utilizará el abatimiento promedio de los datos registrados.

Finalmente, la profundidad a perforar se calcula como:

$$P_p = N_e + V_e + A + P_s \quad (8)$$

Donde:

P_p : Profundidad a perforar

N_e : Nivel estático

V_e : Variación estacional

A : Abatimiento

P_s : Profundidad de seguridad (5 m)

⁶ Valor reportado por ficha técnica de bomba de calor marca Waterkotte. <https://www.waterkotte.eu>. Consultado en julio 2017.

⁷ Profundidad de seguridad considera: 2 m de gravas en la base, 1 m para la instalación de la bomba. Generalmente se añaden 2 m además de los 3 anteriores. Información entregada por comunicación telefónica con empresas locales de perforación de pozos profundos.

⁸ Datos extraídos de Servicio de monitoreo en línea, Dirección General de Aguas, consultado en julio 2017.

3.6 Bombas de calor tipo BHP

Un sistema cerrado de colectores verticales, solo intercambia calor con el sustrato por el cual circula. Con el fin de estimar el potencial calorífico de este sustrato, es necesario conocer la naturaleza de los sedimentos de la cobertura de la zona de estudio. Para ello, se realizan columnas estratigráficas basadas en los datos de estratigrafía de pozos proporcionados por la DGA. A continuación, se clasifican los sedimentos para poder asociarles una tasa de extracción de calor (sHE) a cada una de las capas de las generadas. La tasa de extracción de calor (sHE) es una medida del potencial calorífico por metro de perforación de pozo y sus unidades son [w/m]. Para el estudio esta tasa se obtiene de la Tabla 3.3, donde la mayoría de los sedimentos de los pozos estudiados, se clasifican como “gravas y arenas saturadas” si están bajo el nivel estático o “gravas y arenas secas” si están sobre este. Si bien no se tiene información del flujo de aguas subterráneas, se evalúa también el caso en el que exista un alto flujo de estas bajo el nivel estático.

Tabla 3.3. Valores típicos de extracción de calor en litologías. Modificado de Ondreka et al. (2007).

Valores típicos de extracción de calor de diferentes suelos para 2400 horas de operación	
Roca individual	Extracción de calor específica, sHE (W/m)
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

Luego de determinar el sHE para cada capa, los valores se ponderan por el espesor de la capa con respecto al espesor total penetrado (profundidad total del pozo) y se obtiene el sHE total (sHE_{tot}), usando la ecuación .

$$sHE_{tot} = \frac{1}{E_{Stot}} \sum_{k=1}^n ([sHE_k] \times [E_{Sk}]) \quad (9)$$

Donde E_{Stot} representa el espesor total penetrado, mientras que sHE_k y E_{Sk} son los sHE y espesores de cada capa k, respectivamente.

Finalmente se genera un mapa mediante un método de interpolación estadística basada en kriging ordinario con un modelo de tipo circular optimizado sin anisotropía.

Ya obtenida la tasa de extracción de calor, se procede a calcular la profundidad a perforar. Se consideran las seis tipologías y sus requerimientos energéticos para calcular la profundidad necesaria para suplir cada demanda. La potencia requerida corresponde a la potencia entregada por el suelo y se calcula en la sección 5.1.2 asumiendo un COP igual al que se utiliza en sistemas cerrados horizontales⁹.

Luego la profundidad a perforar queda dada por la ecuación:

$$P = \frac{D_i}{sHE} \quad (10)$$

Donde:

P: profundidad a perforar [m]

D_i: potencia entregada por el suelo de la tipología i [w]

sHE: tasa de extracción de calor [w/m]

Finalmente, se genera un mapa para la tipología 5, la más abundante en la ciudad, considerando los casos con y sin alto flujo de aguas subterráneas.

⁹ Este supuesto es discutible, pero a profundidades mayores, como es el caso de un sistema BHP, la temperatura tiende a estabilizarse con la temperatura media ambiental anual y por tanto se utiliza el COP anual.

4. MARCO HIDROGEOLÓGICO

4.1 Geología Regional

La geología de la zona de estudio (Figura 4.1) consiste principalmente en rocas de edad cenozoica, además de depósitos no consolidados recientes, en los cuales se encuentran los recursos de agua subterránea de mayor importancia para la ciudad.

4.1.1 Basamento impermeable

El basamento del área de estudio se compone de rocas metamórficas del Complejo Metamórfico Bahía Mansa del Devónico-Triásico (PzTrbm), el cual subyace en discordancia de erosión a rocas sedimentarias de edad Triásica hasta Pleistocena.

La Formación Llafquentué-Huimpil (TrIh) (Parada y Moreno, 1980) está conformada por areniscas finas, conglomerados de cuarzo y lutitas grises con intercalaciones de mantos de antracita. Su base no está expuesta, pero observaciones permiten inferir que sobreyace al basamento metamórfico en inconformidad. Por otra parte, esta formación subyace en discordancia angular y de erosión a la Formación Pilmahue (Elgueta y Rubio, 1989) y la Formación Temuco. Flora fósil reconocida por Troncoso et al. (2004), indica una edad triásico superior para esta formación. No aflora en el área de estudio.

4.1.2 Rocas estratificadas

4.1.2.1 Formación Temuco EMt (Rubio, 1993)

Formada por conglomerados con cuarzo metamórfico y clastos de esquistos, mayoritariamente, con niveles de areniscas cuarcíferas intercalados; limolitas y arcillolitas cuarzomíceas con guías carbonosas (Elgueta y Rubio, 1989). Sobreyace en discordancia angular a la Formación Llafquentué-Huimpil (Elgueta y Rubio, 1989) y se engrana lateralmente con el miembro basal de la Formación Pilmahue (Mella y Quiróz, 2010). Edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sitúan a la Formación Temuco en el Oligoceno inferior bajo (Mella y Quiróz, 2010). No aflora en el área de estudio.

4.1.2.2 Formación Pilmahue OMp (García, 1968)

Está conformada por dos miembros: El miembro basal (OMp(a)), está compuesto por areniscas pardo-amarillentas, limolitas laminadas con improntas de flora fósil, cuerpos subvolcánicos, lavas andesíticas y dacíticas y flujos bloques y ceniza riódacíticos. El miembro superior (OMp(b)) se compone de lavas andesíticas, cuerpos subvolcánicos alimentadores (stocks, filones y diques) e intercalaciones menores de areniscas y limolitas. Ambos miembros presentan importante alteración argílica y propilítica. La Formación Pilmahue, en su base, engrana lateralmente con la Formación Temuco (Mella y Quiroz, 2010). Subyace en discordancia de erosión a la Formación Cholchol (Elgueta y Rubio, 1989). Edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Mella y Quiroz, 2010) arrojan 32 Ma, lo que junto a otros análisis realizados por Vergara y Munizaga (1974) sitúan a la Formación Pilmahue desde el Oligoceno inferior bajo hasta el Mioceno inferior.

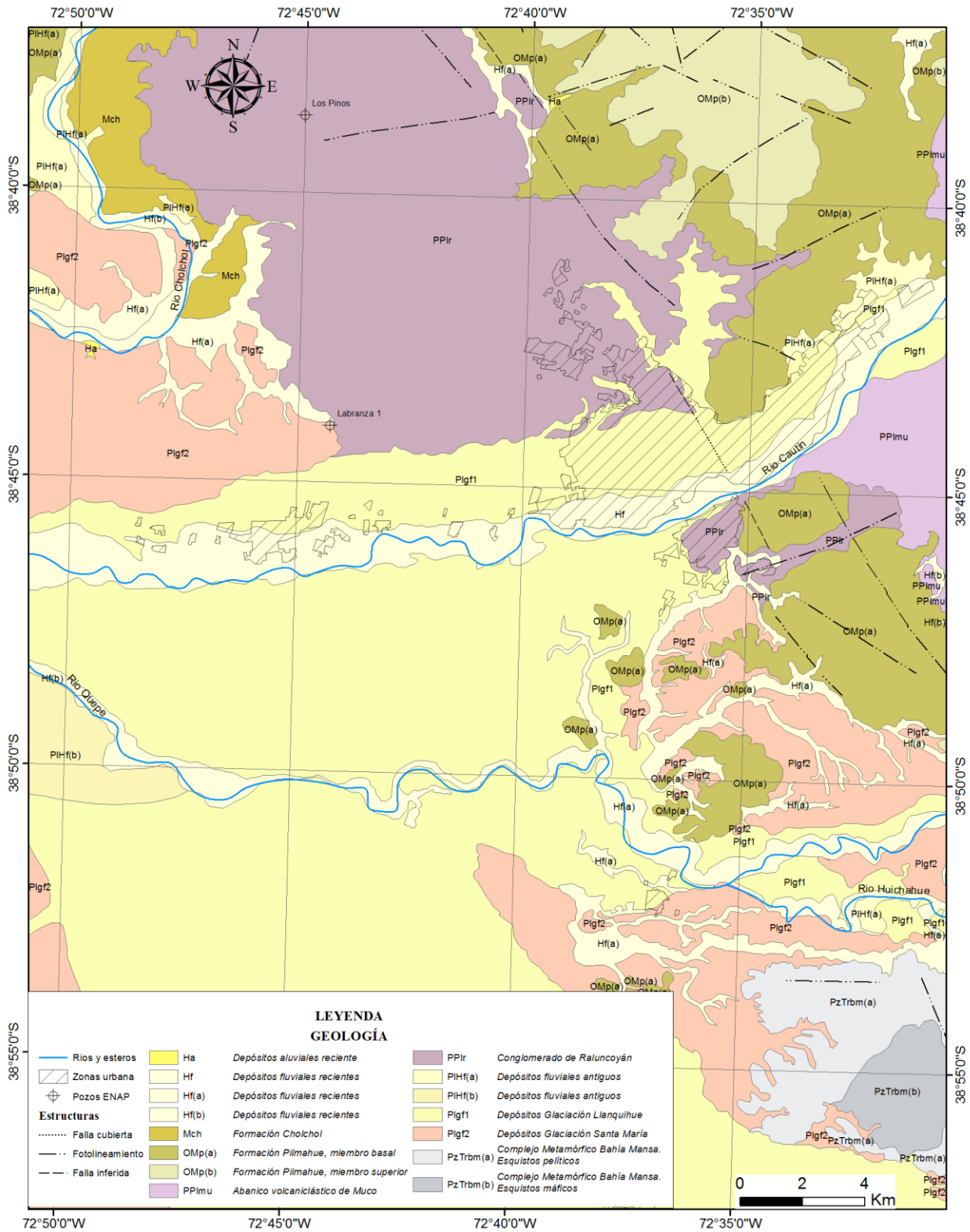


Figura 4.1 Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de Mella y Quiroz, (2010).

4.1.2.3 Formación Cholchol Mch (García, 1968)

Consiste en arcillolitas, limolitas y areniscas fosilíferas de grano medio a grueso de color azul-gris. Tiene un espesor máximo de 680 m (Rubio, 1990). Sobreyace en discordancia de erosión a las formaciones Pilmahue y Temuco y subyace en paraconcordancia a los conglomerados del Plioceno-Pleistoceno, así como a depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno y actuales (Mella y Quiroz, 2010).

4.1.2.4 Formación Malleco PPlm (Suárez y Emparán, 1997)

Se compone de conglomerados gruesos semiconsolidados, niveles arenosos y limos aislados; tobas gruesas y finas. Tiene un espesor observado de 150 m. Sobreyace en discordancia de erosión a la Formación Cholchol y subyace a depósitos glaciofluviales y fluviales del Pleistoceno y Holoceno. No aflora en el área de estudio.

4.1.3 Depósitos semiconsolidados

4.1.3.1 Conglomerado Raluncoyán PPlr (Mella y Quiroz, 2010)

Conglomerados monomícticos de composición andesítica con imbricación localizada que indica aporte desde el este. Presenta niveles subordinados de arena, limo y arcilla. En el área de estudio, sobreyace a depósitos piroclásticos de la Formación Pilmahue. Dada su posición estratigráfica, su geomorfología aterrazada elevada, su red de drenaje desarrollada y su fuerte alteración, se sugiere una edad pliocena-pleistocena inferior.

4.1.3.2 Abanico volcanoclástico de Muco PPlmu (Moreno y Varela, 1985)

Compuesto por depósitos fluviales y depósitos de flujos piroclásticos y lahares. Los primeros consisten en gravas intercaladas con lentes de arena y limo. Los depósitos volcánicos son clasto a matriz soportados con abundantes fragmentos de pómez y escoria en matriz de arena y ceniza. Sobreyace en discordancia de erosión a la Formación Pilmahue y se interdigita con niveles superiores del Abanico Volcanoclástico de Malleco (Moreno y Varela, 1958). Por su disposición estratigráfica y sus semejanzas a la parte superior de la Formación Malleco y los depósitos de la Glaciación Santa María, se infiere una edad pliocena superior a pleistocena.

4.1.4 Depósitos no consolidados

4.1.4.1 Depósitos glaciofluviales Plgf2

Compuestos por gravas con estratificación planar-horizontal e intercalaciones de lentes de arenas y limos laminados. La matriz se compone de arenas gruesas con clastos volcánicos y de granitoides que, en algunos sectores, forma lentes de grava interestratificados. En general, se presentan cubiertos por hasta 5 m de suelos rojizos caracterizados por alteración de lahares y flujos piroclásticos. Por la similitud en la meteorización, su geomorfología, la posición estratigráfica y relaciones de contacto (Quiroz y Duhart, 2008), se asigna esta unidad a los depósitos de la Glaciación Río Santa María (Mercer, 1976; Porter, 1981).

4.1.4.2 Depósitos glaciofluviales Plgf1

Estos depósitos se encuentran en las terrazas medias y bajas de los ríos Quepe, Toltén y Cautín. Se componen de gravas macizas pobremente seleccionadas, estratificadas. En el área de estudio afloran al norte y sur del cauce del Río Cautín. Estos depósitos tienen características muy similares a depósitos observados hacia el este, los cuales rellenan los terrenos bajos entre las morrenas de la Glaciación Llanquihue y de la Glaciación Río Santa María y han sido cortados por el río Toltén en dos prominentes terrazas. Son comunes las barras de gravas clastosoportadas con estructuras de corte y relleno (cut & fill) y estratificación cruzada. Dataciones en una turba intercalada en depósitos semejantes, indican una edad ^{14}C de 27.500 ± 940 AP (Laugenie, 1982). La morfología, litología y ambiente de sedimentación, correlacionables con otros depósitos del área, sugieren que estos depósitos corresponden a la Glaciación Llanquihue (entre *ca.* 73.000 AP (Mercer, 1983; Clapperton, 1993) y 14.550 AP (Lowell et al., 1995; Denton et al., 1999).

4.1.4.3 Depósitos fluviales antiguos (PIHf)

Unidad conformada por depósitos no consolidados dispuestos en terrazas de 1-4 m de alto sobre el lecho de los ríos Cholchol y Quepe. En el río Quepe se compone de conglomerados clastosoportados y niveles de arena fina y limos. En el río Cholchol a su vez, se caracteriza por secuencias de limos laminados y arenas finas con menor presencia de turba. Sobreyace en discordancia de erosión a rocas sedimentarias y volcánicas del Oligoceno-Mioceno y depósitos no consolidados del Pleistoceno. Los depósitos se asocian a ambientes tranquilos como ríos meandriformes, planicies de inundación y lagos menores. Las relaciones de contacto indican que estos depósitos engranan lateralmente con los depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue.

4.1.4.4 Depósitos fluviales recientes (Hf)

Incluyen depósitos que ocupan lechos y llanuras de inundación de cauces activos, como los ríos Cautín, Toltén, Cholchol y Quepe. Consisten en gravas, arenas y limos interestratificados, intercalados con gravas de buena selección con clastos redondeados a subredondeados de aspecto fresco. Las gravas se presentan en general, clastosoportadas e imbricadas con matriz de arena gruesa. Bancos de arena y limo se intercalan, con estratificación cruzada y en artesa y laminación, respectivamente.

4.2 Recursos de agua subterránea

En las cercanías de la ciudad se definen acuíferos del tipo: libres en depósitos intergranulares, confinados/semiconfinados, y libres en roca fisurada. De mayor importancia, el acuífero en sedimentos fluviales actuales del Río Cautín (Unidad Hf) y glaciofluviales (Plgf1) denotado como A1 (Figura 4.2), provee la mayor cantidad de agua a la ciudad. Le siguen en importancia los acuíferos confinados/semiconfinados //A1, //A3, //A3/B4 y //B2, los cuales se encuentran en unidades fluviales actuales, glaciofluviales antiguas y rocas semiconsolidadas fracturadas respectivamente (PPIr). Finalmente, el acuífero en roca fracturada B4, es libre y se encuentra en las rocas del Cordón de Nielol, de donde se extraen caudales bajos a muy bajos (Troncoso et al., 2007).

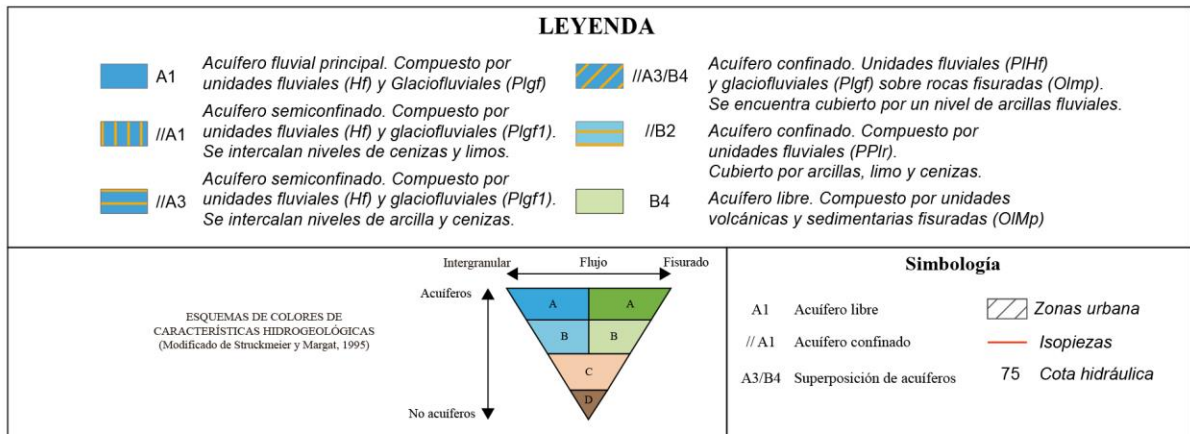
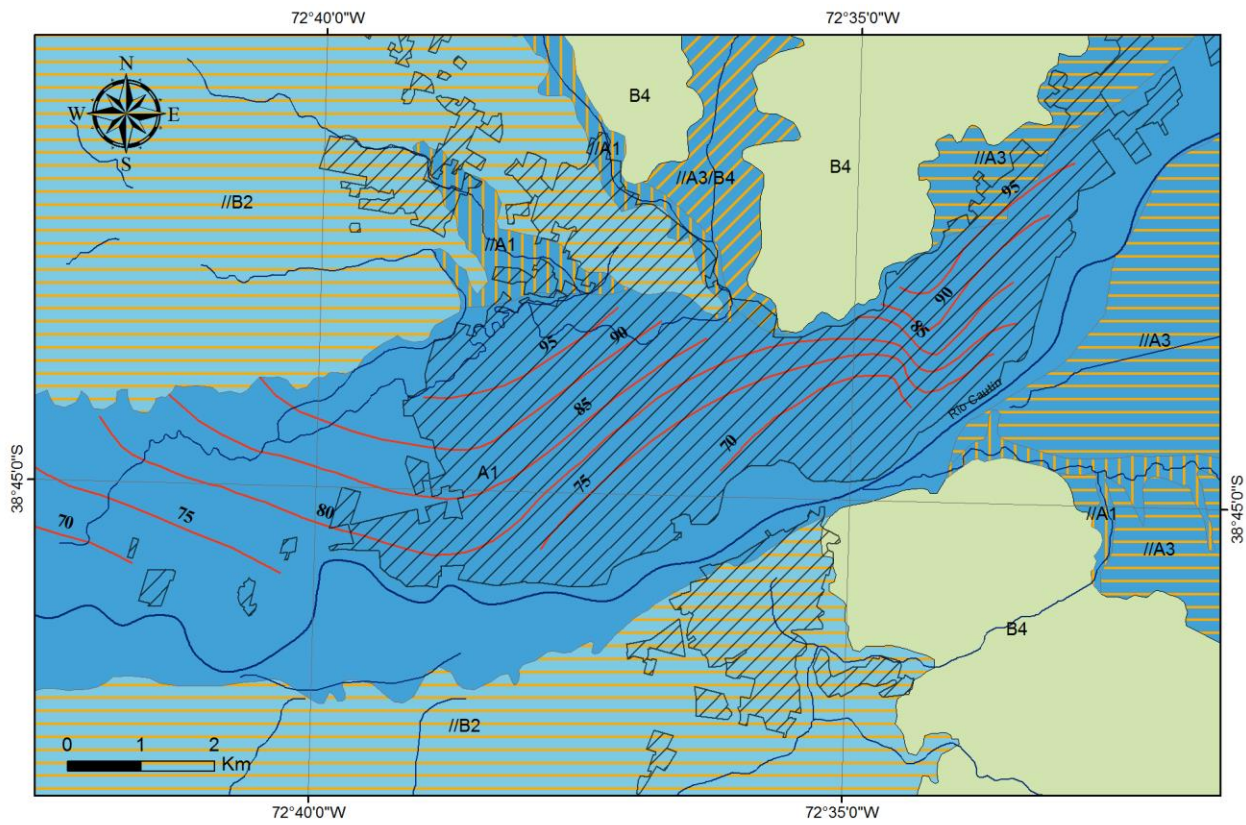


Figura 4.2 Mapa hidrogeológico del área de Temuco. (Adaptado de Troncoso et al., 2007).

5. RESULTADOS

5.1 Intercambiadores horizontales

En esta sección se exponen los resultados para la temperatura calculada en profundidades de 0,8 m, 1,5 m y 3 m. Luego, en base a esto, se calcula el COP para las tres profundidades mencionadas. A partir del COP se calcula el área requerida por los intercambiadores horizontales, asumiendo una profundidad de instalación de 1,5 m. El área disponible en cada predio se calcula mediante el coeficiente de ocupación máxima que indica el PRC. Ambas áreas se comparan y se determina la favorabilidad de cada zona en cuanto al espacio disponible para estos colectores y se expone esta información en un mapa.

5.1.1 Temperatura del subsuelo

La temperatura ha sido estimada mediante la expresión (1). En la Figura 5.1, se muestra una gráfica en la cual se observan: la temperatura medida del ambiente, una expresión de ajuste polinómico para la temperatura medida del ambiente y, por último, la temperatura estimada para tres escenarios de profundidad, 0,8 m, 1,5 m y 3 m. Se puede apreciar cómo la temperatura en profundidad está desfasada con respecto a la temperatura ambiental (comparando con el ajuste polinómico). Este desfase se explica por la alta capacidad del suelo de retener el calor y la baja difusividad térmica. También es importante notar la oscilación térmica, a medida que la profundidad es mayor el efecto de la temperatura ambiente se atenúa. Por ejemplo, en el caso de la temperatura a 3m, la oscilación térmica anual es menor a 2,5°C.

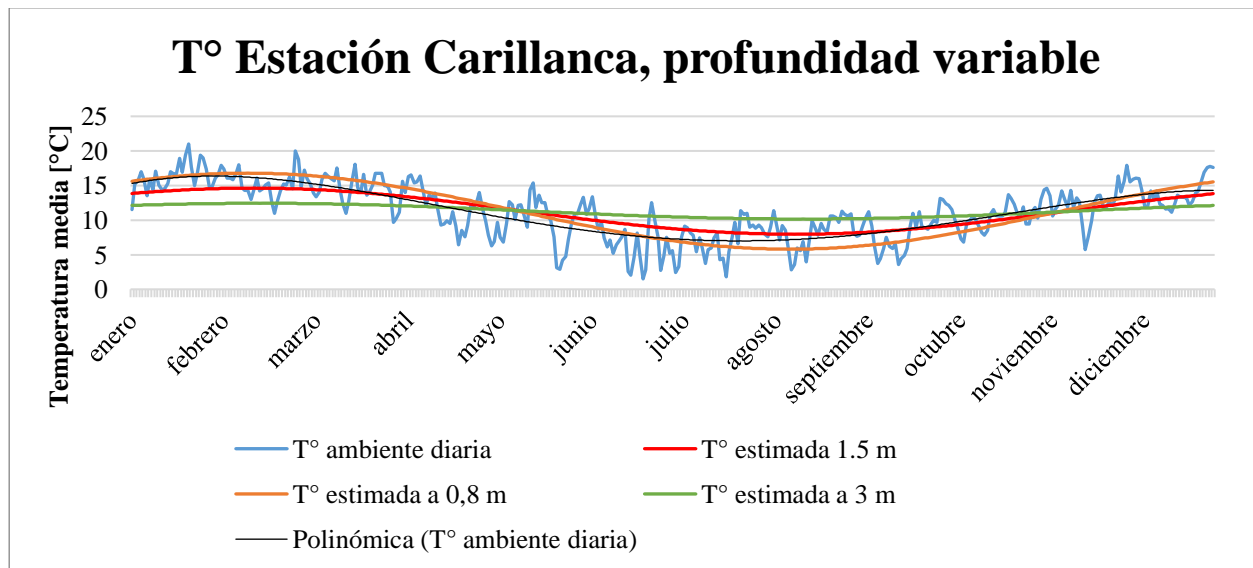


Figura 5.1. Temperatura a 0,8m, 1,5m y 3m de profundidad en la Estación Carillanca durante el año 2015.

5.1.2 Estimación del COP

El coeficiente de rendimiento (COP) se puede calcular mediante la ecuación (3) (ver Metodología, sección 3.3).

La diferencia de temperatura mínima para que exista transferencia de calor entre el suelo y el intercambiador es de 8,33 ° C, mientras que en el evaporador la diferencia mínima es de 2° C (RetScreen, 2005). De esta manera:

$$T_{cold} = T_{suelo} - 8,33^{\circ} - 2^{\circ} C \tag{11}$$

El parámetro α se refiere a la eficiencia real del sistema y esta varía entre 0,3 y 0,7 (Morrone & Coppola, 2014). Luego, se puede estimar un COP real anual para el sistema en cuestión, aplicado a la ciudad de Temuco, asumiendo una temperatura promedio anual del suelo de 11,3°, $\alpha=0,5$. Además, se considera el caso de distribución de calor mediante losa radiante por lo que la temperatura en el foco caliente (T_{hot}) es de 40°C.

$$COP_{anual} = 0,5 * \frac{40 + 273}{40 - (11,3 - 10,33)} = 4,00 \tag{12}$$

El coeficiente de rendimiento es dependiente de la temperatura de la fuente fría (T_{cold}), por lo que varía durante el año a medida que cambia la temperatura del suelo. En la Figura 5.2 se observa la variación del COP durante un ciclo anual. Es importante destacar que los mayores COP se obtienen durante el verano, ya que la temperatura de confort se acerca más a la temperatura de la fuente, mientras que, en invierno es necesario elevar la temperatura a un nivel mucho mayor que la del suelo, aumentando el consumo eléctrico de la bomba de calor y consiguientemente disminuyendo el COP.

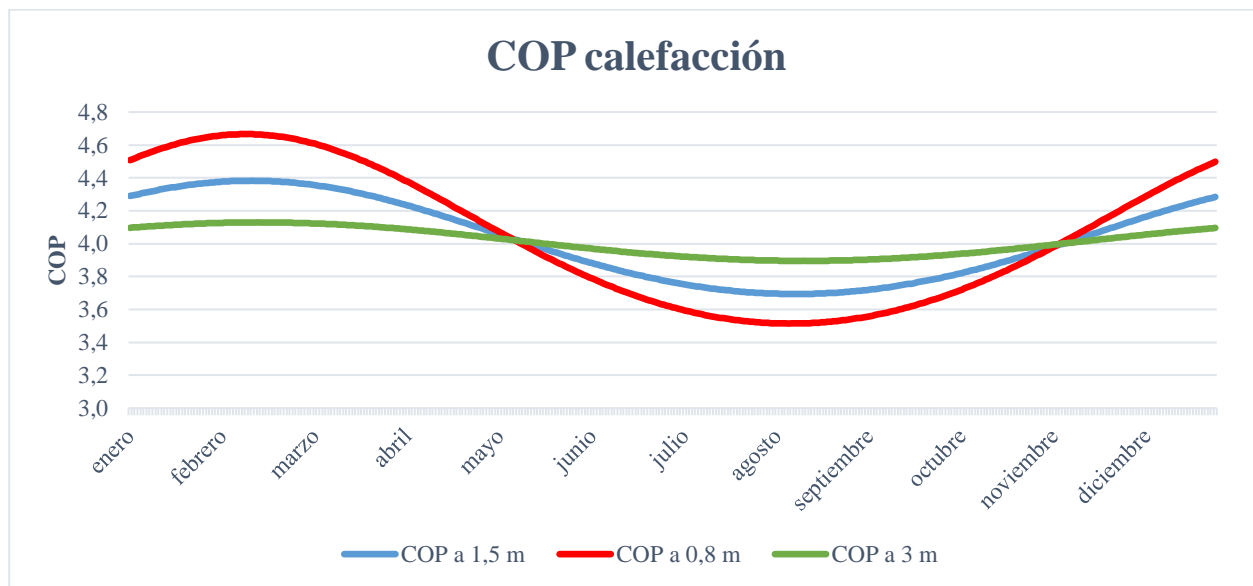


Figura 5.2 Coeficiente de rendimiento para calefacción calculado a partir de la temperatura a 0,8 m, 1,5 m y 3 m, de profundidad.

En invierno la mínima temperatura media diaria a 1,5m de profundidad ronda los 7,9°C, luego el COPc de invierno es 3,69.

5.1.3 Limitantes espaciales

En esta sección se presentan las zonas definidas por los criterios: coeficiente de ocupación máxima y, área requerida por los intercambiadores. El coeficiente de ocupación máxima se obtiene directamente del PRC (Figura 2.4). El área requerida por los intercambiadores depende de la potencia máxima de calefacción que debe entregar el suelo. Esta se calcula en función de la potencia máxima requerida por la vivienda dada por la tipología (Tabla 2.1) y el COP (se utiliza el COP promedio anual). En la Tabla 5.1 se detalla el área requerida para las distintas tipologías en tres escenarios dependiendo del calor extraíble del suelo (tasa baja, media y alta). Para efectos del estudio se considera el escenario promedio (tasa de 20[w/m²]). Finalmente, se compara la razón de áreas (Rx) requerido (área requerida por intercambiadores / área 1er piso vivienda) con el coeficiente de ocupación máxima y se designan cinco categorías dependiendo de la favorabilidad.

Tabla 5.1. Área requerida por los intercambiadores horizontales para cada tipología.

Tipología		1	2	3	4	5	6	
Área 1° piso [m ²]		57	221	52	26	68	43	
COP	Demanda 99% [w]	2.778	9.090	4.763	2.009	2.190	3.306	
	Potencia suelo [w]	2.084	6.818	3.572	1.507	1.643	2.480	
	Consumo bomba [w]	695	2.273	1.191	502	548	827	
Área requerida por intercambiadores [m²]								
Extracción de calor específica [w/m ²]	Mínima	16	130	426	223	94	103	155
	Media	20	104	341	179	75	82	124
	Máxima	24	87	284	149	63	68	103
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
Rx: Razón de área intercambiadores/ área 1° piso	Mínima	2,3	1,9	4,3	3,6	1,5	3,6	
	Medio	1,8	1,5	3,5	2,9	1,2	2,9	
	Máxima	1,5	1,3	2,9	2,4	1,0	2,4	
% de ocupación máxima requerido	Caso pesimista	30%	34%	19%	22%	40%	22%	
	Caso medio	35%	39%	22%	26%	45%	26%	
	Caso optimista	40%	44%	26%	29%	50%	29%	

A continuación, se detallan las categorías definidas y se observan en la Tabla 5.2 y el mapa (Figura 5.3).

Zonas H: Zonas de esparcimiento y residencial, entre las que se incluyen zonas residenciales periféricas y zonas mixtas. Los predios tienen espacio disponible para instalar colectores horizontales en las tipologías 1, 2 y 5. Son las zonas ZE6, ZM1, ZM4 y ZM5 del PRC. Estas zonas cubren un 25% del total de las zonas estudiadas.

Zonas M: Zona medianamente favorable. La tipología 5 es apta para intercambiadores horizontales. Incluyen el barrio Alemania y las zonas especiales 3, 4 y 5. Son las zonas ZH1, ZHE3, ZHE4 y ZHE5 del PRC. Cubre un 24% del área total del PRC considerado.

Zonas V: Zonas residenciales, mixtas y netamente comerciales, en la que se incluyen colegios, centros comerciales menores y grandes además de las galerías del centro. Ninguna de las tipologías es apta para colectores horizontales. La zona no es apta para sistemas de calefacción distrital, porque las viviendas están construidas de manera aleatoria y la densidad de casas por bloque es baja. Lo anterior, implica que el sistema de distribución de calor sería difícil de implementar. Son las zonas ZE1, ZE2, ZE3, ZE4, ZE5, ZF, ZH2, ZH3, ZHR1, ZHR2, ZHR3, ZHR4, ZHR5, ZHR6, ZM2, ZM3, ZM6 del PRC de Temuco. Representa un 45% del área estudiada.

Zonas D: Zona residencial urbana. La disposición ordenada de las casas permite implementar climatización distrital con costos bajos para el sistema de distribución de calor. Existen terrenos, principalmente afuera de la ciudad, en los que no hay construcciones, y se prevé que podrían construirse complejos residenciales con una disposición ordenada en el mediano plazo. Son las zonas ZHE1 y ZHE2 del plan regulador. Corresponde a un 5% de la superficie estudiada.

Zonas I: Zonas de anegamiento por inundación. No se permite su uso.

Tabla 5.2. Categorías espaciales y su favorabilidad para sistemas geotérmicos horizontales cerrados.

Nomenclatura urbana	Zona PRC	1	2	3	4	5	6	CATEGORÍA
Mercado	ZE1	V	V	V	V	V	V	V
Ferrocarriles	ZE2	V	V	V	V	V	V	V
Universidad de la frontera	ZE3	V	V	V	V	V	V	V
Isla Cautín	ZE4	V	V	V	V	V	V	V
Residencial periferia	ZE5	V	V	V	V	V	V	V
Residencial periferia	ZE6	H	H	H	H	H	H	H
Zona de inundación	ZE7	I	I	I	I	I	I	I
Padre las Casas	ZF	V	V	V	V	V	V	V
Alemania	ZH1	V	V	V	V	H	V	M
Pedro de Valdivia	ZH2	V	V	V	V	V	V	V
Pablo Neruda	ZH3	V	V	V	V	V	V	V
Residencial urbano 1	ZHE1	V	V	V	V	V	V	D
Residencial urbano 2	ZHE2	V	V	V	V	V	V	D
Especial 3	ZHE3	V	V	V	V	H	V	M
Especial 4	ZHE4	V	V	V	V	H	V	M
Especial 5	ZHE5	V	V	V	V	H	V	M
Centro galerías	ZHR1	V	V	V	V	V	V	V
Centro Base	ZHR2	V	V	V	V	V	V	V
Borde cerro	ZHR3	V	V	V	V	V	V	V
Borde Isla	ZHR4	V	V	V	V	V	V	V
Frontera, Pueblo nuevo (Base)	ZHR5	V	V	V	V	V	V	V
Amanecer y Costanera	ZHR6	V	V	V	V	V	V	V
Mixta 1	ZM1	H	H	V	V	H	V	H
Mixta 2	ZM2	V	V	V	V	V	V	V
Mixta 3	ZM3	V	V	V	V	V	V	V
Mixta 4	ZM4	H	H	V	V	H	V	H
Mixta 5	ZM5	H	H	V	V	H	V	H
Mixta 6	ZM6	V	V	V	V	V	V	V

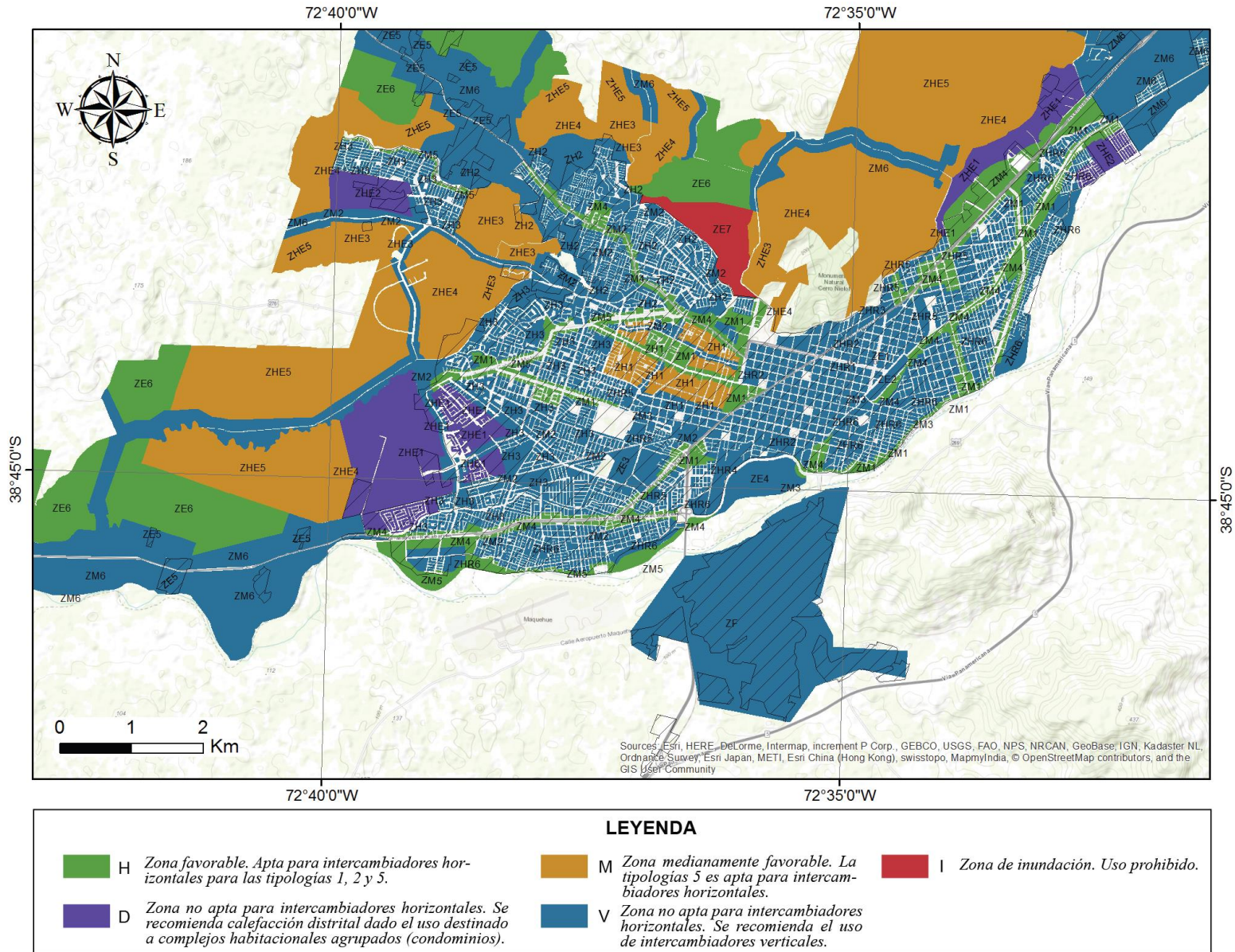


Figura 5.3 Categorías espaciales definidas para la implementación de sistemas de calefacción por bombas de calor geotérmicas.

5.2 Intercambiadores verticales abiertos

5.2.1 Profundidad del agua subterránea

5.2.1.1 Nivel estático

El nivel estático de las aguas subterráneas (Figura 5.4) se puede clasificar en cuatro dominios. El primero, se sitúa aguas arriba del río Cautín y al norte del mismo, donde el valle incide en los cerros de Ñielol. En esta zona hay una gran cantidad de captaciones y el nivel oscila entre los 10 y los 30 m.b.n.t. En el segundo dominio, aguas abajo, el nivel estático asciende a una profundidad menor a los 10 m.b.n.t. Un tercer dominio se distingue notoriamente en la zona norte de la ciudad, donde, existen pocas captaciones y el nivel observado se acota entre los 15 a 25 m.b.n.t. El último dominio, se observa al sur del río Cautín, y presenta profundidades del nivel mayores a los 25 m.b.n.t. La diferencia entre el tercer y cuarto dominio, es de gran relevancia para posteriormente definir ciertos parámetros hidrogeológicos.

5.2.1.2 Cota hidráulica

Conocer la dirección del flujo de aguas subterráneas es de vital importancia ya que, para la instalación de una GWHP, es necesario contar con un pozo de reinyección de agua (fría en invierno y caliente en verano), y la ubicación de este pozo debe ser aguas abajo a lo largo de la dirección de flujo para que no se produzca un quiebre térmico. También se debe considerar una distancia de seguridad para que la pluma termal no afecte al pozo de extracción. Para determinar la dirección de flujo es necesario conocer las cotas hidráulicas, es decir, el nivel del agua subterránea con respecto al nivel del mar (altura).

En la Figura 5.5, se observa que el agua subterránea se presenta a cotas del orden de 140 m.s.n.m. en la zona noroeste del área de estudio. Hacia el sur, en la zona urbana, el nivel presenta alturas que rondan los 80 m.s.n.m. Hacia el límite suroeste del área de estudio, el nivel piezométrico se encuentra a tan sólo 50 m.s.n.m. Se evidencia una tendencia de flujo desde el NE hacia el SO, lo cual es consistente con el modelo propuesto por Troncoso et al. (2007) (Figura 4.2). Las flechas indican la dirección de flujo.

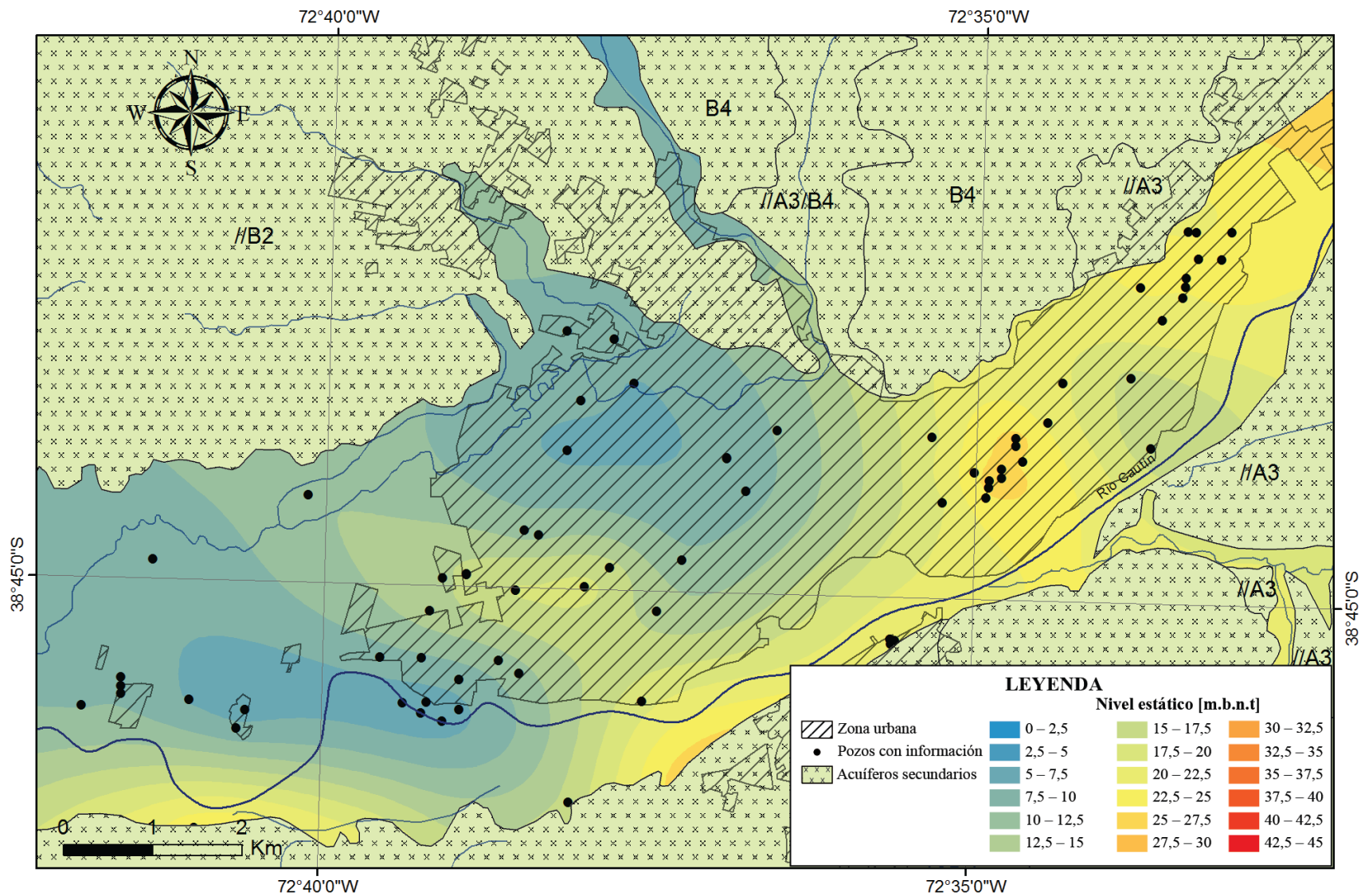


Figura 5.4. Modelo Geoestadístico de interpolación basado en kriging para el nivel estático.

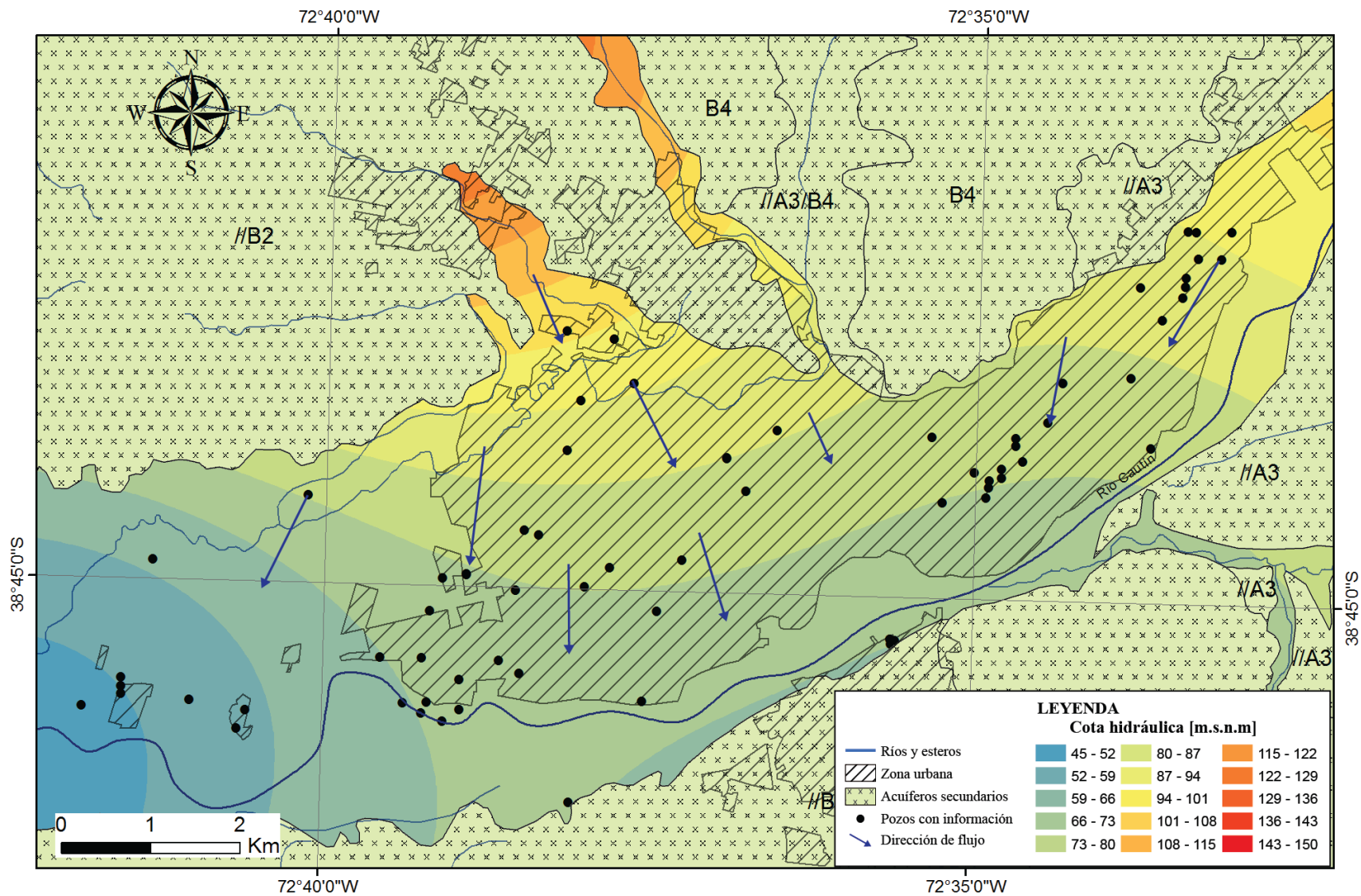


Figura 5.5 Modelo geoestadístico de interpolación basado en kriging para la cota hidráulica. Las flechas indican la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.

5.2.2 Espesor del acuífero

Para evidenciar la potencia de los acuíferos se confeccionan las secciones estratigráficas A-A' y B-B'-B'', transversal y longitudinal al río Cautín respectivamente. La traza en planta se puede observar en la Figura 5.6. Los círculos indican la posición de las captaciones con información estratigráfica.

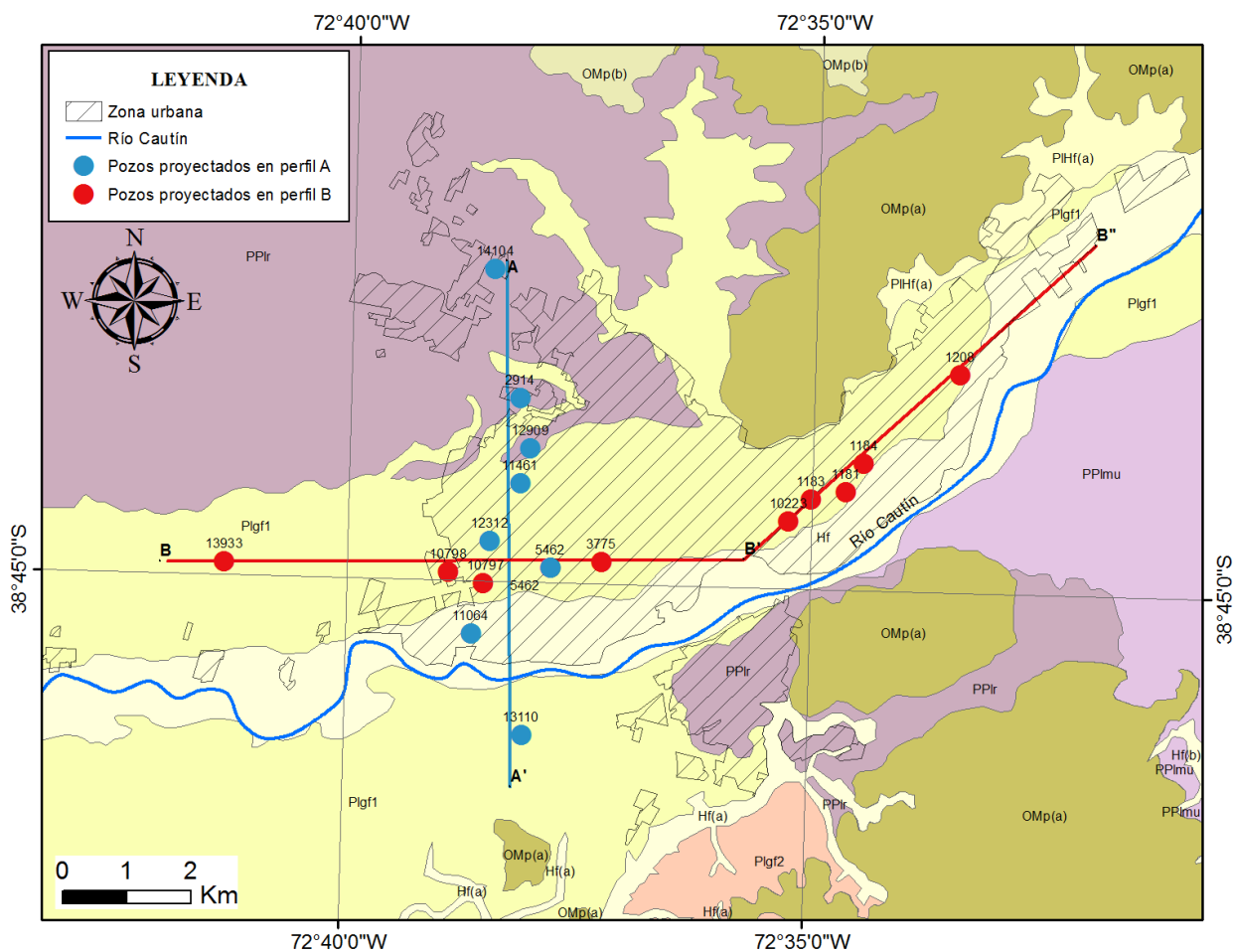


Figura 5.6 Traza en planta de los perfiles A-A' y B-B'-B''. Los círculos representan la ubicación de las captaciones con su respectivo código.

En la Figura 5.7 se observan los perfiles, transversal (a) y longitudinal (b) al valle del Río Cautín. Sobre estos, se han proyectado los pozos con su profundidad y nivel estático.

Si bien los contactos en profundidad entre las unidades PPIr y los depósitos más recientes han sido inferidos según el mapa geológico (Mella y Quiroz, 2010), las secciones indican las litologías predominantes que consisten en depósitos glaciofluviales y fluviales incluyendo gravas y arenas pobremente seleccionadas con intercalaciones de limos en lentes.

La información entregada por los pozos perforados da un indicio de la profundidad mínima del acuífero, la cual se extendería hasta por lo menos los 100 m.b.n.t. La profundidad máxima no es posible de determinar en esta zona ya que no se cuenta con pozos profundos locales. Sin embargo, unos 5 km hacia el oeste, en la localidad de Labranza se han perforado pozos petroleros (Labranza 1, Figura 4.1) por la empresa ENAP, y se reporta un espesor de la cuenca de 2000 m (Elgueta y Rubio, 1989).

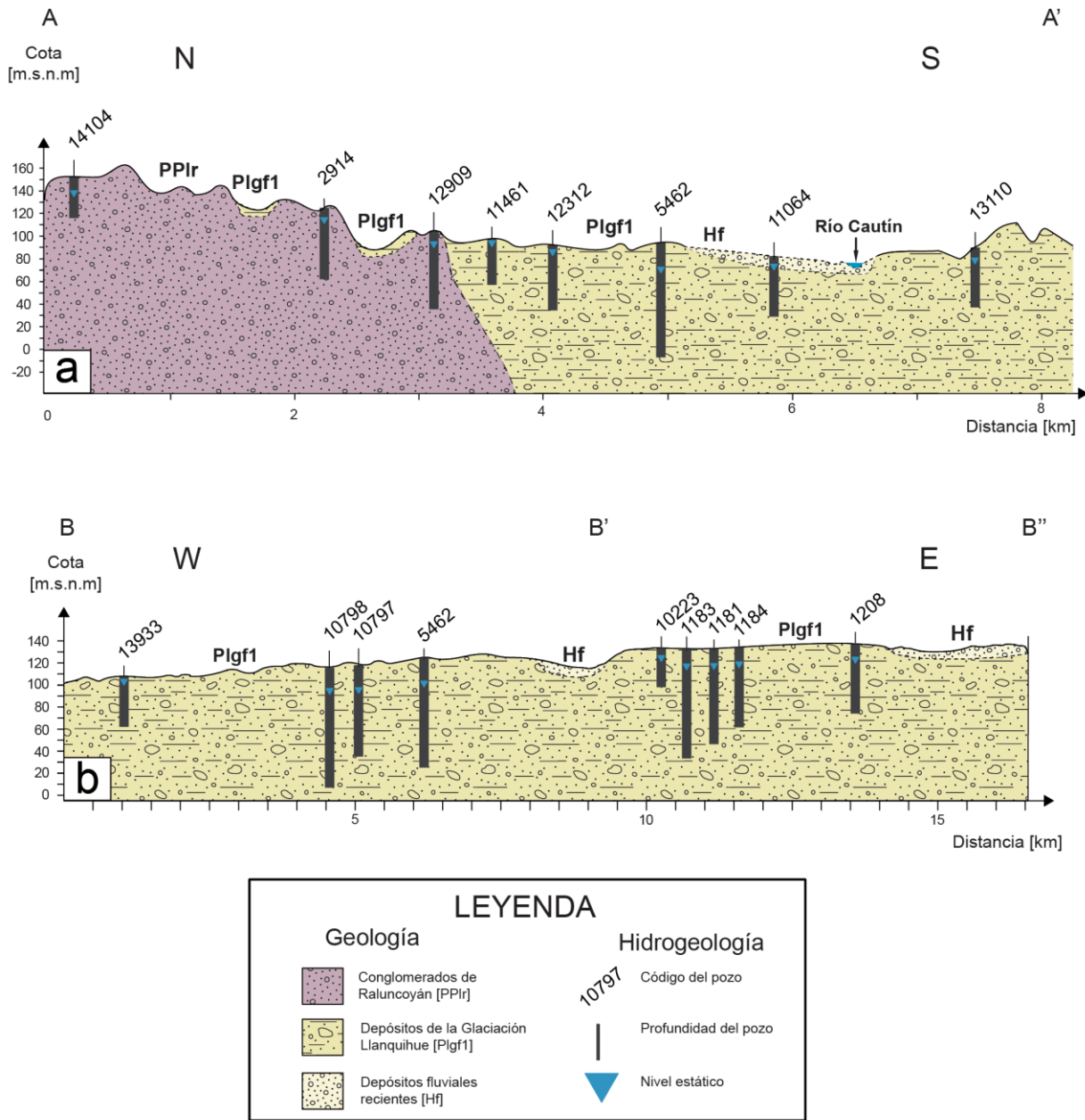


Figura 5.7 Perfiles geológicos y estratigráficos. (a) Transversal al Río Cautín [A-A']; (b): longitudinal al río [B-B''].].

5.2.3 Estimación del COP

Para determinar el rendimiento aproximado de este sistema, es necesario conocer la temperatura del agua inyectada a la bomba. En este sistema, la temperatura de la fuente o T_{cold} , es la temperatura del agua subterránea con un ajuste que depende de la temperatura del suelo por el cual circula antes de entrar al evaporador, similar al fenómeno expresado por la ecuación (11). Esta temperatura es la diferencia mínima que debe existir en el evaporador para que haya flujo de calor. (RETSscreen, 2005), y corresponde aproximadamente a 2° [K]. Luego:

$$T_{cold} = T_{\text{agua subterránea}} - 2^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

En la campaña de terreno se midió la temperatura del agua subterránea en pozos profundos destinados a agua potable. En la Figura 5.8 se observa un mapa con las temperaturas obtenidas en terreno. Se observa que la temperatura varía hasta 2°C , entre $12,8$ y $14,8^{\circ}\text{C}$, con un promedio de $14,1^{\circ}\text{C}$. Si bien el universo de datos es pequeño, la dispersión de los valores también lo es.

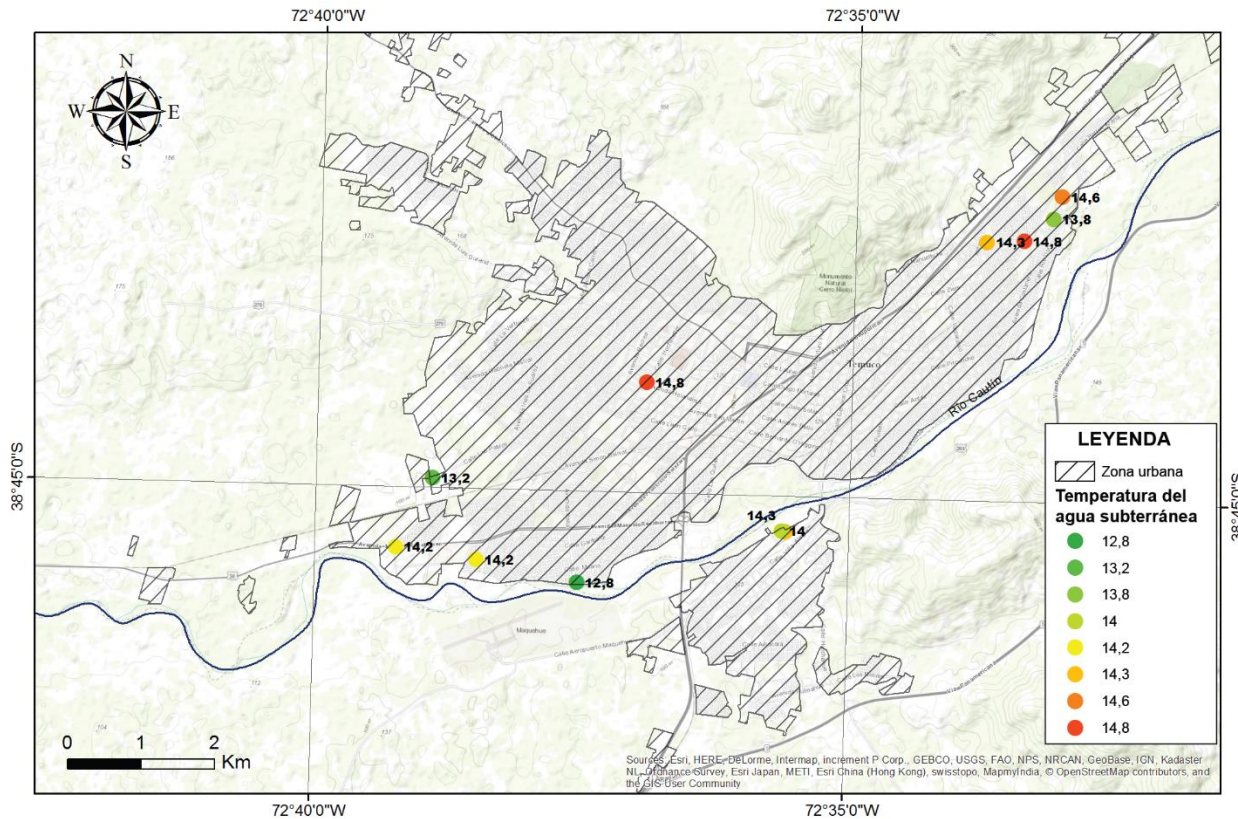


Figura 5.8 Temperatura de captaciones puntuales de agua subterránea en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.

El COP_c se calcula con la ecuación (3) asumiendo una eficiencia real de 0,5. En la Tabla 5.3 se observa el COP en función de las temperaturas: mínima, promedio y máxima.

Tabla 5.3. Coeficiente de rendimiento para sistemas GWHP.

Coeficiente de rendimiento para GWHP			
Temperatura del agua subterránea [°C]	Mínima	Promedio	Máxima
		12,8	14,1
Eficiencia de Carnot	10,72	11,22	11,51
COP ($\alpha = 0,5$)	5,36	5,61	5,75

5.2.4 Estimación del potencial

Conforme a los datos obtenidos el 2017 desde la DGA, se tienen 891 derechos otorgados entre las comunas de Temuco y Padre las Casas para utilización de aguas subterráneas con caudales anuales que van desde 0,01 hasta los 123 l/s. En base a esto, se conforma una gráfica con la información para luego realizar un análisis estadístico (Figura 5.9).

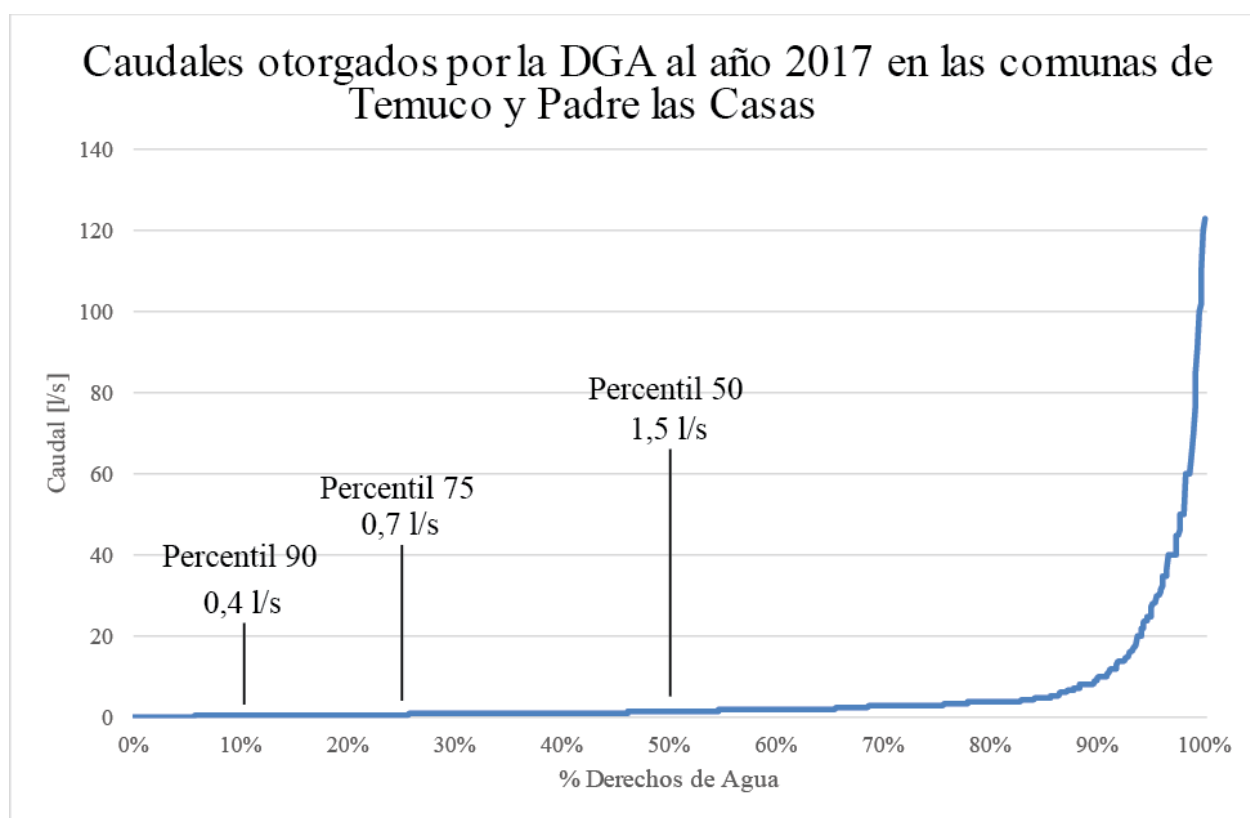


Figura 5.9. Gráfica caudales otorgados por la DGA para las comunas de Temuco y PLC. Elaboración propia a partir de datos de DGA (2017).

En el gráfico se observa que el 90% de los derechos otorgados, son por al menos 0,4 l/s, un 75% tienen al menos 0,7 l/s y un 50% supera los 1,5 l/s. En base a estos tres percentiles y los caudales respectivos, se evaluará el potencial de un sistema GWHP.

El cálculo para la potencia entregada por un caudal x se detalla en la metodología y queda expresada por la ecuación (7). En la Tabla 5.4 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 5.4 Potencia entregada por el agua subterránea en función del caudal extraído, para distintos percentiles de derechos otorgados por la DGA.

	Percentil 90	Percentil 75	Percentil 50
Caudal (l/s)	0,4	0,7	1,5
Potencia [w]	5.023	8.791	18.837

Se observa que, si bien los caudales extraídos son bajos la potencia que entregarían es razonablemente alta llegando a 18,8 [kw] en el 50% de los derechos otorgados.

A continuación, para realizar una comparación de este potencial se toma en cuenta una potencia correspondiente a un caudal de 1,5 [l/s] y se evalúa a cuántas viviendas puede suplir dependiendo de la tipología.

Tipología		1	2	3	4	5	6
COP	Demanda 99% [w]	2778	9090	4763	2009	2190	3306
5,61	Potencia agua subterránea [w]	2283	7470	3914	1651	1800	2717
	N° de viviendas climatizadas con 1,5 l/s (31,4 [kw])	8	3	5	11	10	7

5.2.5 Profundidad a perforar

Profundidad a perforar

La profundidad a perforar para sistemas GWHP se calcula mediante la ecuación (8). Para el nivel estático se considera el mapa generado en la sección 5.2.1.1. La variación estacional se considera constante en el área e igual a 4 m. El abatimiento promedio para pozos con caudal extraído menor a 10 l/s es de 11,35 m. La profundidad de seguridad es de 5 m.

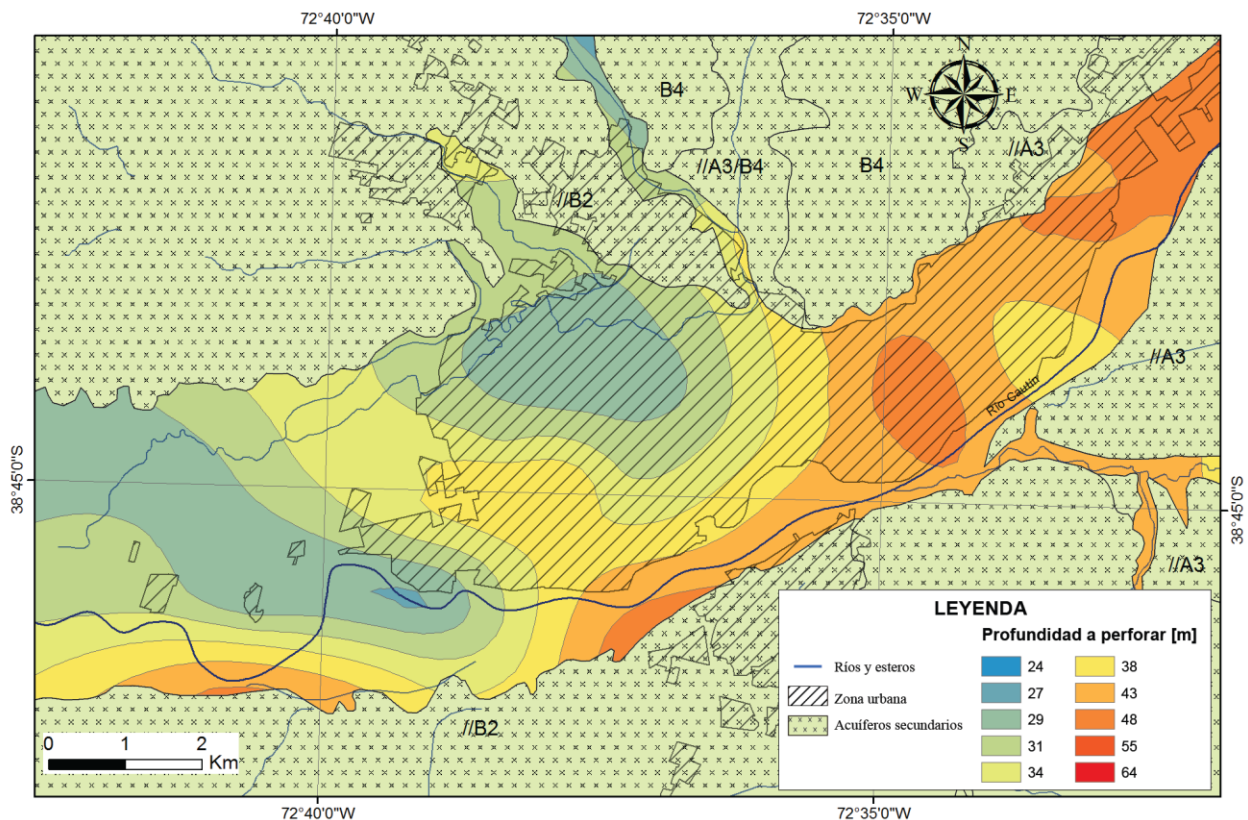


Figura 5.10. Profundidad a perforar para la instalación de GWHP.

Se observa que las zonas más favorables para este sistema son claramente en el centro de la ciudad, ya que en esta zona el nivel estático es más somero. La variación de la profundidad queda determinada exclusivamente por el nivel estático ya que los otros parámetros se consideran constantes en el área. La profundidad varía entre los 24 m y los 64 m.

5.3 Intercambiadores verticales cerrados

La metodología para el estudio de intercambiadores verticales cerrados (BHP) consiste en calcular la profundidad a perforar considerando el calor extraíble por cada metro perforado. En este caso se han analizado dos casos: uno considerando el suelo bajo el nivel estático como suelo saturado y el segundo considerando este suelo como saturado y un alto flujo de aguas subterráneas. Luego se procede a calcular la profundidad a perforar para conseguir la potencia requerida por cada tipología.

5.3.1 Tasa de extracción de calor

Los valores de sHE para los pozos con información estratigráfica se han calculado mediante la metodología propuesta en la sección 3.2. Se ha calculado la tasa para dos escenarios, con alto flujo de aguas subterráneas y con flujo normal. Estos se presentan en la Tabla 5.5. Los valores varían entre 35 [w/m] y 58 [w/m], donde los suelos presentan mayor abundancia de arcillas y de gravas saturadas respectivamente. Si se considera un alto flujo de aguas subterráneas, la tasa aumenta hasta en un 40% llegando hasta 80 [w/m] en los sectores más favorables.

Tabla 5.5. Tasa de extracción de calor (sHE) para los pozos con información estratigráfica.

Código Pozo	Profundidad [m]	sHE promedio [wm ⁻¹]	sHE promedio con alto flujo de agua subterránea [wm ⁻¹]	UTM Este	UTM Norte	Potencia a 100 m [KW]
10797	83	56,20	73,55	704893	5708287	5,62
10798	109	51,93	75,87	704347	5708467	5,19
10826	99	56,77	80,69	703938	5708057	5,68
11064	54	52,28	75,43	704708	5707500	5,23
11461	40	54,50	64,25	705474	5709851	5,45
11809	40	46,25	65	700483	5707222	4,63
12066	30	42,00	47	703383	5707540	4,20
12312	57	51,67	68,66	704997	5708956	5,17
12313	42	45,89	60,66	705152	5708905	4,59
12333	35	58,14	67,57	707258	5709767	5,81
12551	40	53,00	77,75	704082	5708423	5,30
12909	68	43,90	56,69	705625	5710406	4,39
13212	40	45,63	45,62	706218	5710599	4,56
13489	70	37,14	37,14	706792	5706157	3,71
14104	36	45,69	54,02	705088	5713205	4,57
5911	27	49,63	71,85	700040	5707010	4,96
9372	44	52,72	74,13	699372	5707394	5,27
9377	62	44,68	59,19	705669	5708322	4,47
XEP2700	45*	51,39	51,39	710185	5709431	5,14
XEP2714	45*	52,25	56,70	713919	5714388	5,23
XEP2715	45*	43,24	56,48	714040	5714493	4,32
XEP2773	51*	35,00	35,00	701301	5705634	3,50
XEP2787	43*	52,91	52,91	709121	5707637	5,29
XEP2788	49*	50,56	54,68	710326	5709637	5,06
XEP2789	48*	55,00	55,00	710487	5709894	5,50
XEP2810	42*	58,40	58,40	712503	5712277	5,84
XEP2853	50*	35,00	51,02	707434	5704837	3,50
*Los pozos XEP2700 al XEP2853 no tienen información de profundidad total perforada, por lo que se ha estimado añadiendo 20 m al nivel estático.						

En la Figura 5.11 (a) se observa el mapa de calor extraíble en profundidad (w/m) generado para el caso de un flujo normal de aguas subterráneas. La porción inferior del mapa indica bajas tasas ya que en la zona se reportan pozos con alta cantidad de arcillas compactadas. La zona urbana propiamente tal presenta altas tasas de extracción de calor, esto se debe a un relleno de gravas y arenas además de un nivel estático muy somero que resulta en una mayor saturación de las capas.

La Figura 5.11 (b) si bien muestra mayores tasas de extracción de calor generalizadas con respecto al caso base de aguas sin alto flujo subterráneo (Figura 5.11, a), no evidencia un aumento proporcional en toda el área. Esto se explica ya que el nivel estático es muy variable en el área y es importante a la hora de considerar el flujo subterráneo. Zonas con nivel estático más somero verán reflejado un mayor aumento de sHE en este caso.

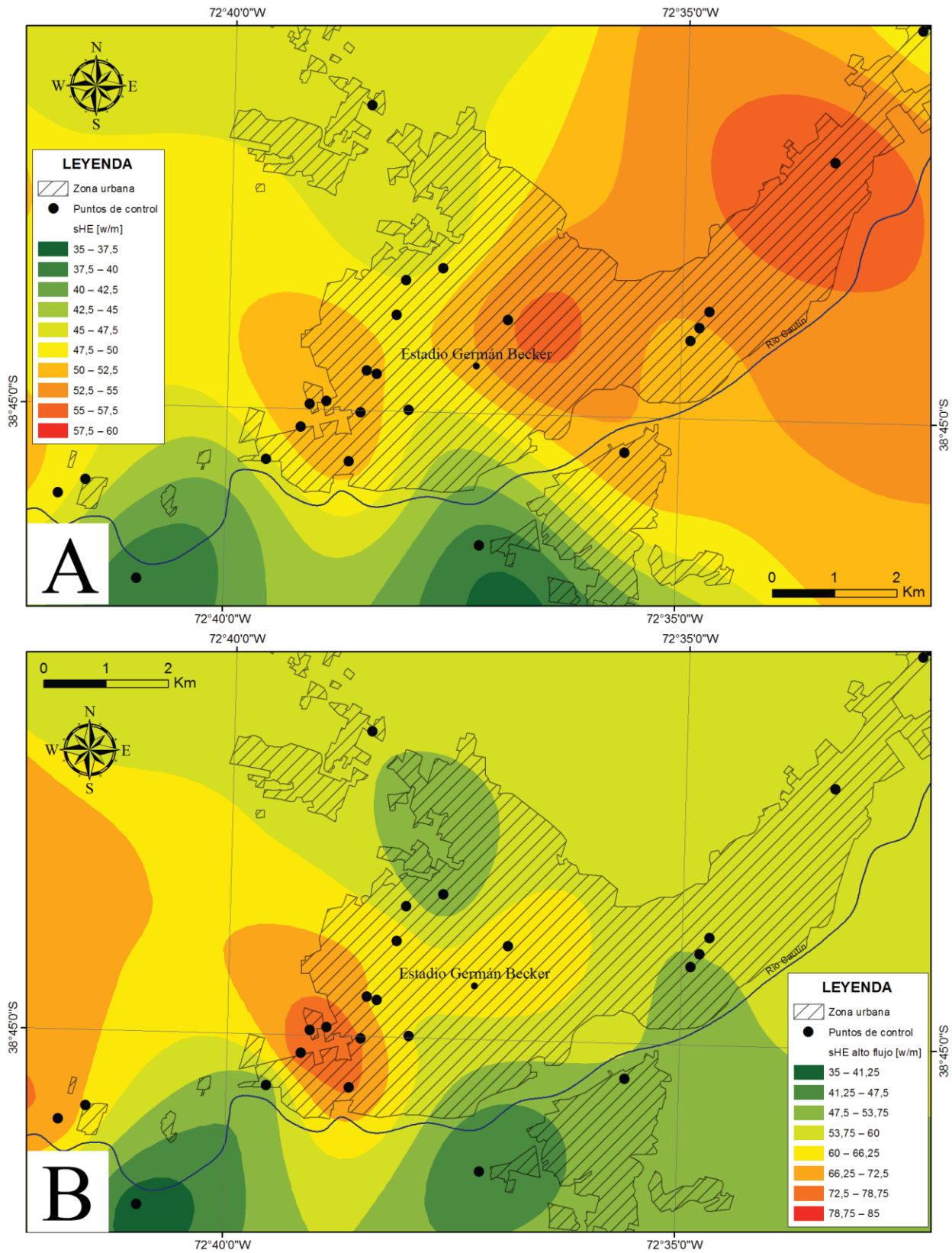


Figura 5.11. Extracción de calor en profundidad (sHE). Caso flujo normal de aguas subterráneas (a) y (b), caso alto flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.

5.3.2 Profundidad a perforar

La profundidad a perforar para el funcionamiento de una bomba BHP para cada tipología se resumen en la Tabla 5.6. Los resultados varían entre los 20 m y lo 195 m. Si bien tiene una gran variabilidad, es importante mencionar que para las tipologías 1 y 5 que son las más comunes (Tabla 2.1) solo es necesario perforar hasta los 60 m e incluso menos. La vivienda con mayor demanda energética (tipología 2) requiere una profundidad notoriamente mayor que las demás, pero esta vivienda solo representa un 4,7% del total (Tabla 2.2).

Tabla 5.6. Profundidad a perforar para los sistemas verticales cerrados (BHP).

Tipología		1	2	3	4	5	6	
COP	Demanda 99% [w]	2778	9090	4763	2009	2190	3306	
4,00	Potencia suelo [w]	2084	6818	3572	1507	1643	2480	
FLUJO NORMAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS								
sHE máximo [w/m]	58	Profundidad mínima a perforar [m]	36	118	62	26	28	43
sHE promedio [w/m]	49	Profundidad a perforar promedio [m]	43	139	73	31	34	51
sHE mínimo [w/m]	35	Profundidad máxima a perforar [m]	60	195	102	43	47	71
ALTO FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS								
sHE máximo [w/m]	81	Profundidad mínima a perforar [m]	26	84	44	19	20	31
sHE promedio [w/m]	60	Profundidad a perforar promedio [m]	35	113	59	25	27	41
sHE mínimo [w/m]	35	Profundidad máxima a perforar [m]	60	195	102	43	47	71

A continuación, se muestra la profundidad a perforar para la tipología 5 (la más abundante) en los casos: flujo normal de aguas subterráneas (Figura 5.12, a) y alto flujo de aguas subterráneas (Figura 5.12, b). Si bien la mejoría en el caso con alto flujo respecto al caso base no es dramática, genera una disminución de casi un 30% en la profundidad a perforar en los mejores casos (mayor sHE). Es importante mencionar que las zonas más favorables en el segundo caso, se encuentran ubicadas en la zona urbana y al oeste de esta. Esto es consecuente con la cota de las aguas subterráneas que justamente se hace más somera en esta zona de la ciudad. En una visión general, se observa que para toda la zona urbana una vivienda unifamiliar pareada de 68 m² y 1 piso requiere una perforación menor a 35 m considerando alto flujo subterráneo y 39 m sin considerarlo.

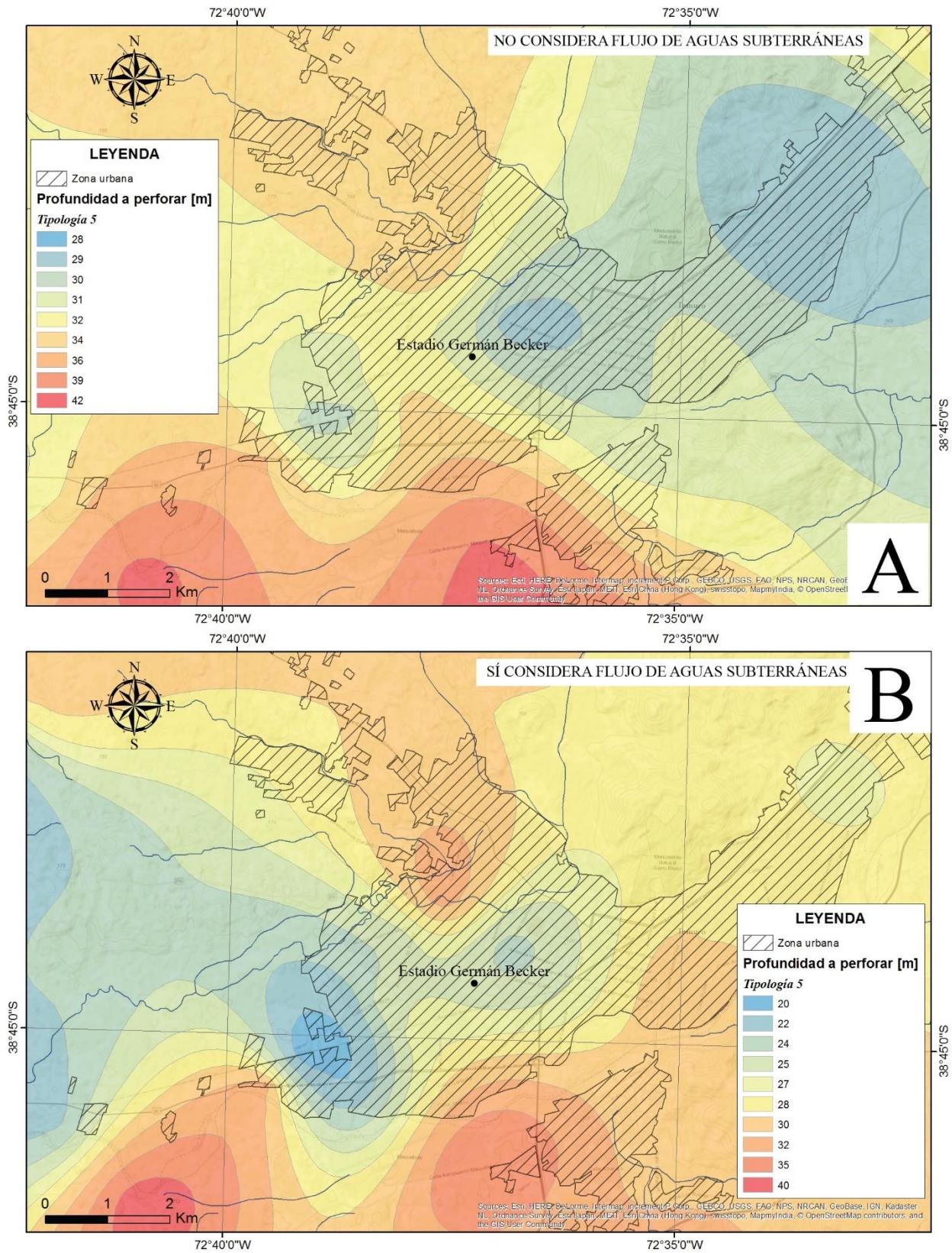


Figura 5.12. Profundidad a perforar para sistemas BHP. (a) caso flujo normal de aguas subterráneas y (b) caso alto flujo de aguas subterráneas. Aplicado a la tipología 5. Elaboración propia.

5.4 Comparativa de costos

En esta sección se discute una comparación de costos para la instalación y operación de los tres sistemas estudiados, basándose en los resultados obtenidos y asumiendo supuestos para que las dimensiones de cada sistema sean similares.

5.4.1 Costos de instalación

En la Tabla 5.7 se muestran los costos de instalación para tres sistemas de una dimensión similar (4 [kw]). Para el caso de un sistema GWHP, la potencia requerida del agua subterránea con un COP de 5,6 es de 3,3 [kw], lo que requiere un caudal de 0,26 l/s. Dado que los resultados para la profundidad a perforar se han calculado en base a abatimientos para caudales de hasta 10 l/s, un caudal de 0,26 l/s debiera estar cubierto. Por otra parte, la mínima profundidad que las empresas locales están dispuestas a perforar corresponde a 30 m en promedio. Según los resultados 30 m está dentro del rango calculado. Dado lo anterior, se asumirán los costos para 60 m de perforación ya que se debe considerar un pozo de reinyección. Para el caso del sistema BHP se considera la tipología 6 que requiere una potencia de 3,3 kw. Si bien la bomba de calor con una potencia de 4 kw nominal puede estar sobredimensionada, es la mejor aproximación con la que se cuenta. De esta manera, la profundidad a perforar para el sistema BHP se calcula considerando un sHE promedio conservador, utilizando el caso de aguas saturadas sin flujo subterráneo (49 [w/m]) y corresponde a 51 m.

Tabla 5.7. Costos de instalación para los tres sistemas de intercambio de calor estudiados (dimensión similar).

Ítem	Estimación de costos MMCLP		
	GSHP	GWHP	BHP
Bomba de calor (4 kw nominal)	6,05	6,05	6,05
Colector geotérmico	2,77	0,00	1,51
Perforación profunda	0,00	10,00	8,50
Costo total instalación	8,82	16,05	16,06

La metodología propuesta para determinar las zonas aptas para el uso de GSHP, considera en primera instancia la limitante espacial. Implícitamente se está asumiendo que el costo de instalación de un sistema GSHP es razonablemente menor al de los sistemas alternativos (GWHP y BHP), por lo que, si el criterio de espacio no es una limitante se debe optar por este sistema. En la Tabla 5.7 se observa que, efectivamente asumiendo una capacidad similar para los tres sistemas dimensionados, el costo de instalación es menor en el GSHP. Por otra parte, ambos sistemas cerrados tienen un costo de instalación total similar.

5.4.2 Costo de operación

El costo de operación corresponde al costo por operar la bomba de calor con un valor por kwh a la tarifa correspondiente al 2017 sumado al costo de mantención anual del sistema¹⁰. Es importante mencionar que con una correcta selección de la tarificación eléctrica el usuario puede optar a una rebaja de hasta un 35% en el precio por kwh consumido. El costo de la energía al 2017 varía entre US\$0,12 y US\$0,22 el kwh (CLP\$80 y CLP\$146)¹¹. El consumo eléctrico de las bombas de calor para cada tipología se calcula en base a la demanda neta anual (UNTEC, 2014) y el COP calculado para los sistemas estudiados.

Tabla 5.8. Costos operacionales de los sistemas con bombas de calor geotérmicas.

Tipología		1	2	3	4	5	6
COP	Demanda neta [kWh]	2500	8737	4128	2860	3465	4353
4	Consumo [kWh]	625	2184	1032	715	866	1088
5,61		446	1557	736	510	618	776
Tarifa BT-1: CLP\$146 / kwh	Costo anual operación GWHP y BHP (\$CLP)	\$ 91.257	\$ 318.911	\$ 150.668	\$ 104.397	\$ 126.458	\$ 158.866
	Costo anual operación GSHP (\$CLP)	\$ 65.068	\$ 227.388	\$ 107.428	\$ 74.437	\$ 90.166	\$ 113.274
Costo anual mantención bomba de calor		\$ 84.145	\$ 84.145	\$ 84.145	\$ 84.145	\$ 84.145	\$ 84.145

¹⁰ El costo de mantención anual fue extraído de Aiguasol (2016).

¹¹ CGED 2017, precios en tarifa BT1 y AT-4 respectivamente.

6. DISCUSIONES

6.1 Sistema horizontal cerrado

La metodología utilizada para determinar las limitantes espaciales y, por consiguiente, la favorabilidad para instalar intercambiadores horizontales en un predio, se basa en el atributo del PRC coeficiente de ocupación máxima. Al indicar el área máxima que se puede construir dentro del predio con respecto al total, la metodología entrega zonas calculadas de una manera conservadora dado que las viviendas podrían tener una superficie menor a la indicada por el coeficiente. Esto sugiere que podrían añadirse zonas favorables al uso de estos intercambiadores si en la práctica el uso de suelo es menor.

Se ha evaluado también la utilización del atributo “superficie predial mínima” del PRC (ver Anexo, Figura 10.1), la cual tiene un inconveniente similar ya que los predios pueden ser de una mayor área a la estipulada y no se considerarían zonas que efectivamente tienen espacio suficiente para el intercambiador. Finalmente se opta por utilizar el coeficiente de ocupación máxima ya que es un atributo más escalable al ser un % del total de superficie del predio. Dada esta limitación de la metodología, es importante recalcar que existen zonas consideradas como no favorables que sí podrían instalar colectores horizontales.

6.2 Sistema vertical abierto

La potencia mínima del acuífero principal ha sido estimada en base a la profundidad de los pozos, y supera en promedio los 65 m y en algunas zonas los 100 m. Troncoso et al. (2007), reportan espesores del acuífero de 1 a 114 m, lo que es coherente con el estudio. Si se compara esto con la profundidad necesaria para los sistemas GHWP, resulta en que no hay inconvenientes a la hora de realizar las perforaciones, ya que las profundidades requeridas por un sistema GWHP no superan los 64 m.

Si bien, la temperatura del acuífero ha sido medida en el mes de noviembre, uno de los meses más cálidos del año, ha sido medida a profundidades que superan los 12 m, por lo que se asume que no debiera existir una variación estacional significativa con respecto a los meses más fríos (Figura 2.1). Esta temperatura genera un COP promedio de 5,61. Es importante mencionar que este valor es teórico y solo representa el rendimiento de la bomba de calor excluyendo pérdidas de carga por el hecho de ser un sistema abierto. Esto se ve reflejado en un mayor consumo de la bomba propulsora hidráulica, el cual no ha sido considerado en el cálculo. Lo anterior, explica porque Aiguasol (2016) reporta coeficientes de rendimiento para sistemas abiertos en el rango de 3 – 4 para proyectos realizados en Chile.

La estimación del potencial ha considerado un caudal de explotación determinado de una forma meramente estadística. Si bien estos datos son comprobados y se puede decir con certeza que el acuífero puede entregar hasta 1,5 l/s en al menos la mitad de las captaciones de agua subterránea registradas por la Dirección General de Aguas, el rendimiento del acuífero puede ser mucho mayor. Troncoso et al. (2017), reportan caudales explotables para el acuífero A1 de 3 a 113 l/s (Figura 6.1).

La transmisividad del acuífero influye fuertemente en el caudal extraíble del pozo, ya que es inversamente proporcional al abatimiento generado en el pozo. En la Figura 6.1 se observa un mapa con las transmisividades obtenidas a partir de las pruebas de recuperación de las captaciones. La transmisividad en el acuífero A1, varía desde 2 a 1150 [m²/día]. Troncoso et al. (2007) reportan transmisividades para el acuífero A1 en el rango 2 – 6000 m²/día, calificadas como de muy bajas a muy altas.

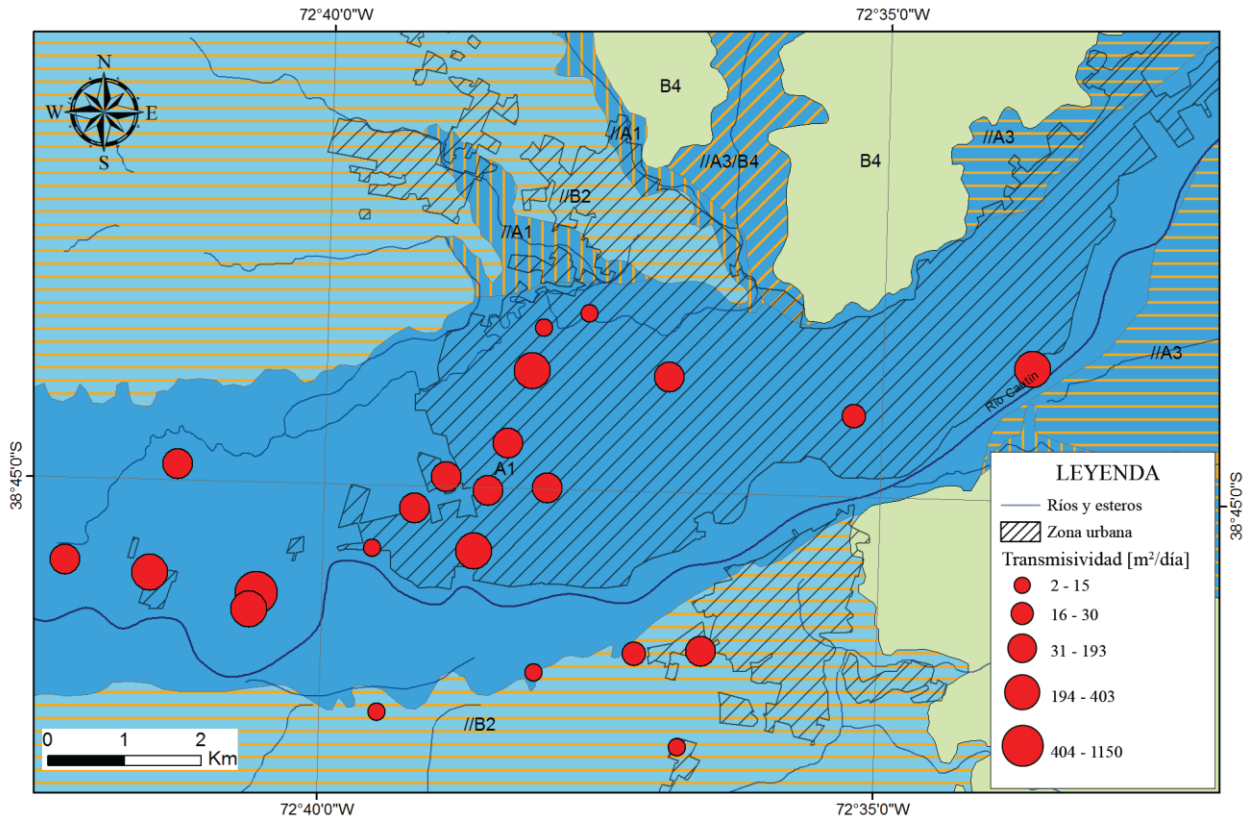


Figura 6.1. Mapa de transmisividad. Mapa base hidrogeológica de Troncoso et al. (2007).

Como se observa en la Figura 6.1, existen zonas muy favorables presentes dentro de la unidad definida como acuífero A1 (en azul sólido), acuífero compuesto por sedimentos de origen fluvial. Las zonas ubicadas hacia el oeste de la zona urbana presentan transmisividades todas en el rango de 30 a 400 [m²/día].

6.2.1 Zonas muy favorables

Si se comparan los resultados para tres criterios evaluados en cuanto a GWHP: primero, favorabilidad según PRC, es decir las zonas que fueron descartadas para sistemas GSHP; segundo, profundidad a perforar y tercero transmisividad local, se pueden identificar zonas muy favorables para el uso de sistemas GWHP. Como se observa en la Figura 6.2, Hay zonas donde estos tres criterios convergen. Por ejemplo, en la zona centro poniente de la ciudad, se identifican áreas con potencial para sistemas de distribución distrital (en púrpura) por la disposición ordenada de las viviendas. Si a esto se añade que la profundidad a perforar es pequeña en el rango 27-34 m, y que la transmisividad en el acuífero es de unos cientos de $m^2/día$ (rango 190-400), se postula esta zona como una de las más favorables para calefacción distrital mediante GWHP. Más aun, los resultados indican que con un caudal de 1,5 l/s se pueden climatizar del orden de 7 a 10 viviendas de tipologías comúnmente observadas en condominios (T5 y T6). Si se considera un caudal de 6 l/s, caudal perfectamente extraíble en esta zona dados los parámetros elásticos del acuífero, la cantidad aumentaría a 28-40 viviendas.

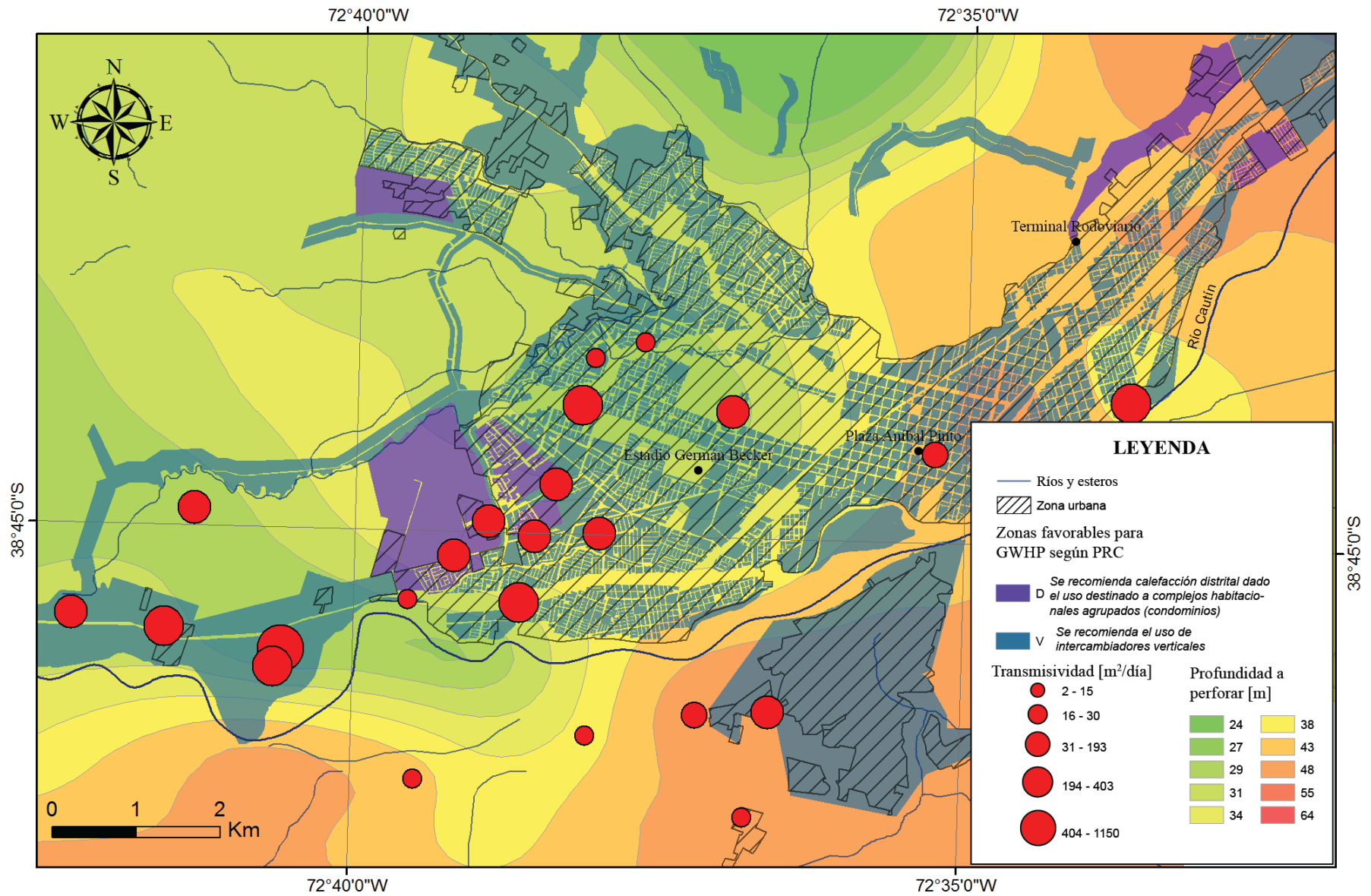


Figura 6.2. Zonas muy favorables para GWHP

Por otra parte, la profundidad calculada en la sección 5.2.5, se considera asumiendo la perforación de un pozo inyector además del pozo de producción. Para abaratar costos, es discutible la opción de no perforar este pozo, y el agua residual utilizarla en fines domésticos como regadío o agua potable rural. En este caso se debiera contar un derecho consuntivo de aguas subterráneas.

Los sistemas abiertos requieren una inyección de agua a temperatura idealmente constante. Si bien, este estudio ha contemplado la opción de lograr este objetivo mediante un pozo profundo, también se encuentra viable la utilización de norias, ya que estas representan gran parte del total de derechos de agua constituidos (ver Figura 5.9) (y probablemente una gran cantidad de captaciones no constituidas).

6.3 Sistema vertical cerrado

Los resultados indican que la profundidad a perforar para sistemas verticales cerrados es en promedio 62 m y 50 m, para los casos flujo normal y alto flujo de aguas subterráneas respectivamente. Si bien es una profundidad que está en un rango similar al de sistemas GWHP, el sistema cerrado, requiere el colector geotérmico tipo sonda lo que significa un costo extra además de la perforación, por lo que habría que evaluar caso a caso.

Por otra parte, a la hora de tomar la decisión, es importante considerar el tema legal. Un sistema cerrado no requerirá la solicitud de un derecho de aguas a la DGA, por lo que el tiempo requerido para poner en marcha el sistema es menor y no requiere trámites adicionales.

Comparando con un sistema GSHP, si bien el costo puede llegar a ser el doble, tiene la ventaja de poder ser instalado en casi cualquier lugar ya que tiene un menor impacto en el entorno. Si bien los colectores horizontales son subterráneos, la intervención que se debe realizar puede afectar el entorno en el mediano plazo. Por ejemplo, en un bosque nativo antiguo con gran valor para su dueño, una excelente alternativa es un sistema BHP.

7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que efectivamente existe un potencial geotérmico de baja entalpía en la ciudad de Temuco y puede ser explotado al menos mediante los tres sistemas de intercambio de calor aquí estudiados.

En lo referente a los sistemas GSHP, estos tienen aplicabilidad en las zonas definidas como zona H y zona M, las cuales cubren un gran porcentaje del PRC, pero se concentran en áreas no urbanizadas de la ciudad. El costo de instalación, para viviendas individuales, es el más bajo comparado con los sistemas verticales por lo que se sugiere su instalación en ambas zonas, H y M. El coeficiente de rendimiento anual estimado para el sistema es de 4 y significa costos operacionales de 90 a 320 mil pesos (USD\$ 140 a USD\$ 490) anuales dependiendo del tipo de vivienda, asumiendo la norma térmica posterior al año 2016.

Con respecto a los sistemas GWHP, la ciudad de Temuco, al estar emplazada casi en su totalidad sobre depósitos fluviales y glaciofluviales recientes, presenta recursos de agua subterránea favorables, particularmente un acuífero fluvial principal con un nivel estático somero de entre 3 y 30 m, transmisividades buenas a muy buenas de 2 a 1000 m²/día. Estas características del acuífero permitirían explotar un caudal de 1,5 l/s en un 50% de los casos, con una profundidad requerida de no más de 64 m. Caudales de 6 l/s podrían abastecer de calefacción mediante GWHP una cantidad de hasta 40 viviendas emplazadas en las zonas sugeridas como muy favorables (Zona D, Figura 6.2) utilizando un sistema de distribución distrital, aprovechando la disposición de las viviendas. La temperatura promedio de las aguas subterráneas es de 14,1° C lo que entrega un COP de 5,61 anual para sistemas GWHP. Este COP implica costos operacionales desde los 65 a los 230 mil (USD\$ 100 a USD\$ 350) pesos anuales, dependiendo de la tipología.

La evaluación del potencial para sistemas BHP es muy buena, ya que las profundidades a perforar son comparables con un sistema GWHP, lo que significa costos de instalación similares. Los costos operacionales de una BHP al asumir el mismo COP para ambos sistemas cerrados, también están en el rango de 90 a 320 (USD\$ 140 a USD\$ 490) mil pesos anuales.

8. SUGERENCIAS

Se sugiere un estudio del impacto térmico y químico de aguas ya utilizadas en bombas GWHP, con el fin de evaluar la opción de no reinyectar el agua al acuífero y abaratar el costo de la perforación de estos pozos. Esta alternativa se plantea viable ya que actualmente en algunas instituciones de la zona centro norponiente de la ciudad, como la Asociación Chilena de Seguridad (ACHS) (donde el nivel estático es muy somero), el agua debe ser bombeada desde los subterráneos y luego vendida a la empresa de agua potable.

La metodología utilizada para la determinación de zonas favorables para GSHP mediante el uso del coeficiente de ocupación máxima del suelo, luego del ajuste de algunos detalles, se puede escalar y utilizar en cualquier comuna que posea un Plan regulador comunal con dicho atributo y de esta manera generar una herramienta a nivel nacional con las zonas favorables. Luego dicha información se puede utilizar a nivel gubernamental para fomentar políticas públicas orientadas al uso de GSHP a nivel residencial.

9. 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.

ASHRAE. (1995). Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791. Tullie Circle. N.E., Atlanta, GA, USA.

Asociación técnica española de climatización y refrigeración (ATECYR). (2012). Guía técnica: diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.

Boughanmi, H., Lazaar, M., Bouadila, S., & Farhat, A. (2015). Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate. *Energy and Buildings*, 104, 87-96.

Clapperton, C.M. (1993). Quaternary geology and geomorphology of South America. Elsevier Science Publishers: 779 p. Amsterdam.

Denton, G.h.; Lowell, T.V.; Heusser, C.J.; Schluchter, C.; Andersen, B.G.; Heusser, L.; Moreno, P.; Marchant, D.R. (1999). Geomorphology, stratigraphy, and radiocarbon chronology of Llanquihue Drift in the area of the southern Lake District, Seno Reloncaví, and Isla Grande de Chiloé, Chile. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography* 81 A (2): 167-2.

De Swardt, C. A., & Meyer, J. P. (2001). A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, 25(10), 899-910.

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2003). Geothermal energy: utilization and technology: UNESCO renewable energy series. *Earthscan*, London, 205.

Dirección General de Aguas (2017). Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales para Sistemas Geotérmicos de Media y Baja Entalpía. Ministerio de Obras Públicas. Online: http://www.energia.gob.cl/sites/default/files/guias_aguas_superficial_0.pdf

Elgueta, S.; Rubio, X. (1989). Estudio del potencial petrolero de la Cuenca Temuco-Los Ángeles con énfasis en estratigrafía y sedimentología. Parte 1: Prospecto Temuco-Huichahue. Informe Técnico (Inédito), Empresa Nacional del Petróleo: 54 p. Santiago. (*)

Estadística Climatológica Tomo II. (2001). Dirección Meteorológica de Chile. En línea: http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Estadistica_ClimatologicaII.pdf

Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32(15), 2461-2478.

Garat Charme, P. D. (2014). Potencial de energía geotérmica de baja entalpía para calefacción domiciliaria en la cuenca de Santiago. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología. 662 p.

García, F. (1968). Estratigrafía del Terciario de Chile central. *En El Terciario de Chile Zona central* (Cecioni, G.; editor). Editorial Andrés Bello: 25-57. Santiago.

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

Laugenie, C. (1982). La region des lacs, Chili meridional. Recherches sur l'évolution géomorphologique d'un piémont glaciaire quaternaire andin. Thèse de doctorat Université de Bordeaux (2): 822 p.

Lemus, M.; Honores, C.; Aguilera, F.; Pérez, Y; Morales, D.; Cáceres, D.; Neira, H. (2015). Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Región de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-15-59, 289 p., 4 mapas escala 1:250.000. Santiago.

Lowell, T.V.; Huesser, C.J.; Anderson, B.G.; Moreno, P.I.; Hauser, A.; Huesser, L.E.; Schluchter, C.; Marchant, D.R.; Denton, G.h. (1995). Interhemispheric Correlation of Late Pleistocene Glacial Events. *Science* 269: 1541-1549.

Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.

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).

Mella, M.; Quiroz, D. (2010). Geología del Área Temuco-Nueva Imperial, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 122: 46 p., 1 mapa escala 1:100.000.

Mercer, J. (1976). Glacial history of Southern South America. *Quaternary Research* 6: 125-166.

Mercer, J. (1983). Cenozoic Glaciation in the Southern hemisphere. *Annual Review of Earth Planetary Sciences* 11: 99-132.

Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Plan de descontaminación atmosférica por MP 2,5, para las comunas de Temuco y Padre las Casas y de actualización del plan de descontaminación por MP 10, para las mismas comunas. Seremi del Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile.

Moreno, H.; Varela, J (1985). Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la región central y sur de Chile. *In Suelos Volcánicos de Chile* (Tosso, J.; editor). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura: 491-526.

Morrone, B., Coppola, G., & Raucci, V. (2014). Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates. *Energy Conversion and Management*, 88, 189-198.

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.

Ondreka, J., Rüsgen, M. I., Stober, I., & Czurda, K. (2007). GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—Possibilities and limitations. *Renewable Energy*, 32(13), 2186-2200.

Parada, M.A.; Moreno, H. (1980). Estratigrafía y ambiente de depositación de la formación triásica superior Llafquentué-Huimpil, Provincia de Cautín (38°30'-72°40'W). *Universidad de Chile, Comunicaciones* 30: 15-21.

Porter, S.C. (1981). Pleistocene Glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research* 16: 263-292.

Quiroz, D.; Duhart, P. (2008). Geología del área Queule-Toltén: regiones de la Araucanía y de Los Ríos, Escala. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 110: 22 p., 1 mapa escala 1:100.000.

RETSscreen, I. (2005). Clean energy project analysis. Minister of Natural Resources. Canada.

Rubio, X. (1990). Estudio Geológico Regional y Estratigráfico de las Secuencias Terciarias de la Cuenca de Labranza, Temuco, IX Región. Taller de Título II (Inédito), Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile: 43 p. Santiago.

Rubio, X. 1993. Geología regional y estratigrafía del Terciario de la cuenca de Labranza, IX Región. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 132 p.

Schiel, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO² emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023-1036.

Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341-348.

Suárez, M.; Emparán, C. (1997). Hoja Curacautín, Región de La Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Carta Geológica de Chile 71: 105 p., 1 mapa escala 1:250.000 (realizado por C. Emparan, M. Suárez y J. Muñoz, 1992).

Troncoso, A.; Herbst, R.; Muñoz, J. (2004). La flora fósil de la Formación Huimpil-Llafquentué, Triásico Superior, IX Región, Chile. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, n.s. 6 (2): 313-319.

Troncoso, R.; Arenas, M.; Jara, C.; Milovic, J.; Pérez, Y. (2007). Geología para el ordenamiento territorial: área de Temuco, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 11: 67 p., 6 mapas escala 1:100.000. Santiago.

UNTEC (2014). Alternativas tecnológicas para calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena. *Programa de gestión y economía ambiental*. 130 p.

VDI. VDI 4640 Thermal Use of the Underground. 2001-2010. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure. 4 volúmenes.

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. 128 p.

Vergara, M.; Munizaga, F. (1974). Age and evolution of the upper andesitic volcanism in central-south Chile. *Geological Society of America Bulletin* 85: 603-606.

10. ANEXOS

10.1 Niveles estáticos y piezométricos

Pozo	UTM E	UTM N	Altura (DEM)	Nivel estático	Nivel piezométrico
ND-0902-13148	702581	5709350	84	14	70
ND-0902-10798	704347	5708467	104	22,25	81,75
ND-0902-1183	710024	5709597	105	16,8	88,2
ND-0902-10826	703938	5708057	99	18,52	80,48
ND-0902-1182	710324	5709537	104	28,4	75,6
ND-0902-13769	707667	5706193	104	35	69
ND-0902-1181	710564	5709717	93	16,2	76,8
ND-0902-1185	710154	5709317	91	26,7	64,3
ND-0902-10797	704893	5708287	91	24,08	66,92
ND-0902-1184	710844	5710157	108	16,35	91,65
ND-0902-1207	711774	5710647	114	8,57	105,43
ND-0902-13489	706792	5706157	100	33,08	66,92
ND-0902-13674	703435	5705401	110	30,09	79,91
ND-0902-12909	705625	5710406	105	10,5	94,5
ND-0902-1208	712354	5711547	114	13,3	100,7
ND-0902-12312	704997	5708956	89	6	83
ND-0902-11064	704708	5707500	95	9	86
ND-0902-13110	705486	5705918	89	12	77
ND-0902-13933	700845	5708636	76	5,5	70,5
ND-0902-14082	701869	5706954	67	4,99	62,01
ND-0902-12313	705152	5708905	102	7	95
ND-0902-11461	705474	5709851	92	3,5	88,5
ND-0902-11809	700483	5707222	71	11,21	59,79
ND-0902-1202	704264	5706957	71	4,84	66,16
ND-0902-1211	703834	5706917	82	4,9	77,1
ND-0902-1212	703634	5707027	80	3,9	76,1
ND-0902-12551	704082	5708423	88	8,2	79,8
ND-0902-13212	706218	5710599	90	4,23	86,17
ND-0902-10223	709666	5709259	114	12,8	101,2
ND-0902-14104	705088	5713205	161	14	147
ND-0902-12333	707258	5709767	99	5,5	93,5
ND-0902-1200	704074	5706827	80	3,95	76,05
ND-0902-1065	712414	5712287	119	17,31	101,69
ND-0902-11916	707358	5704939	88	10,9	77,1
ND-0902-12066	703383	5707540	81	9,5	71,5
ND-0902-14301	709550	5709990	118	11,8	106,2
ND-0902-5911	700040	5707010	63	7,85	55,15
ND-0902-14239	701773	5713800	148	9	139
ND-0902-11003	704050	5706444	93	6,42	86,58
ND-0902-11818	709197	5709019	103	14,5	88,5
ND-0902-11818	709294	5709017	104	14,35	89,65
ND-0902-12831	705787	5708062	81	8	73

ND-0902-13653	699754	5708414	73	10,49	65,29
ND-0902-10171	703681	5710292	103	4,55	98,45
ND-0902-12704	708022	5710360	104	6,8	97,2
ND-0902-10829	709012	5710823	121	2	119
ND-0902-12031	699886	5704770	83	2,23	80,77
ND-0902-13216	703930	5710371	94	4	90
ND-0902-12832	708036	5709883	104	6,8	97,2
ND-0902-11312	708867	5712713	122	3,65	118,35
ND-0902-12071	701461	5711935	151	3,46	147,54
ND-0902-13522	713646	5710646	130	4,11	125,89
ND-0902-13553	713538	5710477	128	4	124
ND-0902-12830	706901	5709479	96	5,5	90,5
ND-0902-11027	700783	5707432	70	3,2	66,8
ND-0902-11443	709072	5712712	146	3,55	142,45
ND-0902-11028	703459	5706436	83	3,27	79,73
ND-0902-11214	702870	5709387	88	1,6	86,4
ND-0902-14031	702057	5712272	146	1	145
ND-0902-11257	701606	5704150	79	0,5	78,5
ND-0902-12220	713978	5708016	126	1,5	124,5
ND-0902-11033	703296	5706369	82	1,45	80,55
ND-0902-10381	702253	5704462	94	0,23	93
ND-0902-12608	700349	5710105	113	2,01	110,99
ND-0902-13830	701507	5710441	140	0,35	139,65
ND-0902-11184	703792	5705481	87	0,5	86,5
ND-0902-11720	703981	5706251	84	0,9	83,1
ND-0902-14282	713335	5714201	131	1,65	129,35
ND-0902-14313	706920	5709770	89	4,3	84,7
ND-0902-14341	709089	5707684	93	24,25	68,75
ND-0902-14348	714987	5709098	135	2,64	132,36
ND-0902-14540	701775	5706748	74	2,8	71,2
ND-0902-14549	701914	5705551	92	32,25	59,75
ND-0902-14642	714472	5710601	135	2,1	132,9
ND-0902-14648	700845	5707213	66	1,4	64,6
ND-0902-1817	706434	5704837	84	29,95	54,05
ND-0902-2914	705472	5711184	114	11	103
ND-0902-3260	708150	5714304	98	0,9	97,1
ND-0902-3346	707871	5714398	95	1	94
ND-0902-3775	706964	5708507	106	4,7	101,3
ND-0902-3775	706751	5708623	90	4,3	85,7
ND-0902-4064	707754	5709647	99	2,27	96,73
ND-0902-4793	712379	5712768	111	2,95	108,05
ND-0902-4859	706474	5708047	93	7,95	85,05
ND-0902-4957	704009	5705127	94	8,54	85,46
ND-0902-4964	704217	5707418	88	5,07	82,93
ND-0902-4967	700484	5707137	70	11	59
ND-0902-5070	707474	5709389	98	7,95	90,05
ND-0902-5461	711994	5709867	97	10,06	86,94
ND-0902-5462	705944	5708537	89	24,12	64,88

ND-0902-5517	707904	5713257	94	1,4	92,6
ND-0902-5583	707293	5710229	97	4,2	92,8
ND-0902-5872	703895	5707041	85	7,14	77,86
ND-0902-5991	699703	5708339	77	1,5	75,5
ND-0902-6087	712639	5708849	104	3	101
ND-0902-6091	701881	5708814	89	1,2	87,8
ND-0902-6100	710494	5710457	107	2,7	104,3
ND-0902-9372	699372	5707394	68	8	60
ND-0902-9377	705669	5708322	106	27,38	78,62
PT04	712394	5711769	114	29,7	84,3
PT05	712124	5711293	108	30,27	77,73
PT08	711014	5710598	106	22,9	83,1
PT10	710187	5709509	104	43,9	60,1
PT19	704267	5707291	74	6,31	67,69
PT26	712526	5711985	112	28,7	83,3
PT27	710490	5709975	107	42,02	64,98
PT57	706001	5711093	93	8,6	84,4
PT58	703088	5709540	92	2,62	89,38
PT60	700487	5707322	61	12,02	48,98
PT80	714032	5714562	140	37,72	102,28
PT82	701247	5707065	62	3,37	58,63
XEP2700	710185	5709431	101	24,6	76,4
XEP2701	710222	5709956	106	16,8	89,2
XEP2702	711010	5710524	111	15	96
XEP2703	712123	5711214	107	12,12	94,88
XEP2704	712123	5711214	107	3,6	103,4
XEP2705	709081	5707766	89	11	78
XEP2706	712526	5711908	117	13,22	103,78
XEP2707	713039	5711881	105	1,39	103,61
XEP2708	706216	5707670	85	4,51	80,49
XEP2709	704109	5707284	85	4,9	80,1
XEP2710	705274	5707523	87	6,9	80,1
XEP2711	704488	5707310	87	4,34	82,66
XEP2712	706621	5707462	75	4,6	70,4
XEP2713	706599	5707075	80	2,56	77,44
XEP2714	713919	5714388	135	24,94	110,06
XEP2715	714040	5714493	132	25,32	106,68
XEP2735	700488	5707237	72	10,91	61,09
XEP2754	707856	5714485	92	0,68	91,32
XEP2765	708627	5709700	100	4,75	95,25
XEP2766	708174	5713357	91	3,8	87,2
XEP2767	704031	5707591	77	9,27	67,73
XEP2773	701301	5705634	86	30,6	55,4
XEP2787	709121	5707637	99	22,54	76,46
XEP2788	710326	5709637	108	28,63	79,37
XEP2789	710487	5709894	106	28	78
XEP2790	710685	5710059	104	16,2	87,8
XEP2791	704313	5707461	82	4,28	77,72
XEP2792	703833	5707344	76	3,9	72,1

XEP2793	704259	5707210	79	3,95	75,05
XEP2794	704933	5707383	80	6	74
XEP2795	706260	5707372	70	2,57	67,43
XEP2796	711991	5711017	109	8,17	100,83
XEP2797	712392	5711637	110	12,8	97,2
XEP2798	712790	5711995	103	3,18	99,82
XEP2799	712824	5712168	101	2,86	98,14
XEP2800	713004	5712062	103	2,35	100,65
XEP2801	711896	5711637	119	12	107
XEP2802	708008	5708933	90	19	71
XEP2803	706312	5707079	77	2,2	74,8
XEP2804	709140	5707737	84	11,32	72,68
XEP2805	706186	5707896	82	1,45	80,55
XEP2806	706037	5707200	70	2,43	67,57
XEP2809	709442	5707982	87	2,42	84,58
XEP2810	712503	5712277	113	22,25	90,75
XEP2812	713105	5712880	105	6,5	98,5
XEP2831	701614	5708787	82	2,41	79,59
XEP2832	708364	5709437	106	12,32	93,68
XEP2833	709994	5705791	84	17	67
XEP2837	706964	5708507	106	4,7	101,3
XEP2838	706751	5708623	90	4,3	85,7
XEP2839	712204	5711197	113	10,38	102,62
XEP2840	712194	5711107	113	10,8	102,2
XEP2841	706786	5709817	99	3,81	95,19
XEP2843	707334	5704837	85	15,3	69,7
XEP2844	707361	5704614	89	12,2	76,8
XEP2849	705472	5711184	114	11	103
XEP2850	706234	5708714	87	9,78	77,22
XEP2853	707434	5704837	98	29,95	68,05

10.2 Temperatura de agua subterránea

10.2.1 Temperatura estabilizada

Pozo	UTM E	UTM N	Altura	Ne	Np	Temperatura estable
1004	711880	5711660	123	33,7	89,3	14,3
9034	712388	5711673	126	32,28	93,72	14,8
1010	712787	5711974	115	25,3	89,7	13,8
1006	712904	5712276	123	24	99	14,6
9074	704349	5708463	101	45,5	55,5	13,2
9038	703846	5707530	84	12	72	14,2
9019	704935	5707357	88	19	69	14,2
1649	706302	5707042	89	12,4	76,6	12,8
631	709132	5707725	100	36	64	14,3
562	709082	5707741	100	32,5	67,5	14
Colegio Alemán	707260	5709757	109	6	103	14,8
ACHS	707820	5710073	107	5,5	101,5	15,7

10.2.2 Perfiles de temperatura en profundidad

POZO	Profundidad (m.b.n.t)	Conductividad eléctrica [uS/cm]	Temperatura [°C]	Nivel estático	Observaciones
POZO 1004	33,1	154	15,1	N.E	
	34,4	189	14,4		
	35,4	209	14,3		
	36,4	209	14,3		
	37,4	210	14,3		
	38,4	208	14,3		
	39,4	205	14,3		
	40,4	203	14,3		
	41,4	203	14,3		
	42,4	202	14,3		
	43,4	201	14,3		
	44,4	200	14,3		
	45,4	200	14,3		
	46,4	198	14,3		
	47,4	198	14,3		
	48,4	197	14,3		
	49,4	196	14,3		
	50,4	196	14,3		
	51,4	196	14,3		
	52,4	195	14,3		
	53,4	193	14,3		
	54,4	193	14,3		
	55,4	192	14,3		
	56,4	193	14,3		
57,4	190	14,3			
58,4	191	14,3			
59,4	190	14,3			
60,4	187	14,3			
POZO 9034	32,28	268	14,9	N.E	
	33	264	14,8		
	34	263	14,8		
	35	263	14,8		
	36	262	14,8		
	37	262	14,8		
	38	262	14,8		
	39	261	14,8		
	40	261	14,8		
	41	261	14,8		
	42	261	14,8		
	43	261	14,8		
	44	260	14,8		
	45	260	14,8		
46	259	14,8			
47	259	14,8			
48	258	14,8			
49	259	14,8			
50	257	14,8			
51	257	14,8			
52	257	14,8			
53	257	14,8			

	54	257	14,8		
	55	256	14,8		
	56	255	14,8		
	57	254	14,8		
	58	253	14,8		
	59	253	14,8		
	60	252	14,8		
POZO 1010	25,3	155	14,3	N.E	
	26	152	14,1		
	27	151	13,9		
	28	151	13,9		
	29	150	13,9		
	30	150	13,9		
	31	149	13,9		
	32	148	13,9		
	33	148	13,8		
	34	148	13,8		
	35	148	13,8		
	36	148	13,8		
	37	148	13,8		
	38	148	13,8		
	39	147	13,8		
	40	146	13,8		
	41	146	13,8		
	42	146	13,8		
	43	146	13,8		
	44	145	13,8		
	45	145	13,8		
	46	145	13,8		
	47	145	13,8		
	48	145	13,8		
	49	144	13,8		
	50	143	13,8		
	51	143	13,8		
	52	142	13,8		
	53	142	13,8		
	54	142	13,8		
	55	142	13,8		
	56	142	13,8		
	57	145	13,8		
58	146	13,8			
59	149	13,8			
60	154	13,8			
61	180	13,8			
62	185	13,8			
63	186	13,8			
64	187	13,8			
65	187	13,8			
66	187	13,8			
67	188	13,8			
68	188	13,8			
69	189	13,8			
70	189	13,8			
POZO 1006	24	161	14,6	N.E	
	25	161	14,6		

	26	160	14,6		
	27	159	14,6		
	28	159	14,6		
	29	155	14,6		
	30	156	14,6		
	31	155	14,6		
	32	150	14,6		
	33	147	14,6		
	34	147	14,6		
	35	141	14,7		
	36	147	14,7		
	37	142	14,7		
	38	142	14,7		
	39	142	14,7		
	40	143	14,7		
	41	142	14,7		
	42	142	14,7		
	43	142	14,7		
	44	142	14,7		
	45	140	14,7		
	46	142	14,7		
	47	141	14,6		
	48	141	14,6		
	49	140	14,6		
	50	140	14,6		
	51	140	14,6		
	52	140	14,6		
	53	138	14,6		
	54	138	14,6		
	55	137	14,6		
	56	137	14,7		
	57	136	14,7		
	58	146	14,7		
	45,5	171	13,5	N.E	
POZO 9074	46	172	13,5		
	47	172	13,5		
	48	172	13,3		
	49	172	13,3		
	50	172	13,3		
	51	170	13,2		
	52	170	13,2		
	53	170	13,2		
	54	171	13,2		
	55	171	13,2		
	56	171	13,2		
	57	172	13,2		
	58	173	13,2		
POZO 9038	59	173	13,2		
	60	173	13,2		
	12	139	14,6	N.E	
	13	137	14,4		
	14	135	14,3		
	15	135	14,3		
	16	135	14,3		
	17	135	14,3		

	18	135	14,3		
	19	135	14,3		
	20	135	14,3		
	21	135	14,3		
	22	134	14,3		
	23	134	14,3		
	24	134	14,2		
	25	133	14,2		
POZO 9019	19	115	14,6	N.E	
	20	283	14,4		
	21	282	14,4		
	22	290	14,4		
	23	287	14,4		
	24	281	14,3		
	25	259	14,3		
	26	273	14,3		
	27	268	14,3		
	28	254	14,3		
	29	253	14,3		
	30	254	14,3		
	31	256	14,2		
	32	262	14,2		
	33	258	14,2		
	34	251	14,2		
	35	254	14,2		
	36	252	14,2		
	37	249	14,2		
	38	253	14,2		
	39	239	14,2		
	40	241	14,2		
	41	241	14,2		
	42	241	14,2		
43	245	14,2			
44	246	14,4	Bomba está cercana. Estos datos podrían verse afectados.		
45	246	14,6			
46	249	14,8			
47	249	14,9			
48	249	15,1			
49	250	15			
50	247	15			
POZO 1649	12,4	105	13,1	N.E	
	13	99	13		
	14	99	13		
	15	99	13		
	16	99	13		
	17	99	13		
	18	99	12,9		
	19	100	12,8		
	20	100	12,8		
	21	100	12,8		
	22	100	12,8	Pozómetro no siguió bajando	
23	100	12,8			
POZO 631	36	198	14,7	N.E	
	37	196	14,4		
	38	196	14,4		

	39	196	14,4		
	40	196	14,4		
	41	197	14,4		
	42	197	14,4		
	43	197	14,4		
	44	197	14,4		
	45	197	14,4		
	46	197	14,4		
	47	197	14,3		
	48	198	14,3		
	49	198	14,3		
	50	198	14,3		
	51	200	14,3		
	52	201	14,3		
	53	204	14,3		
POZO 562	32,5	168	14,1	N.E	29-nov-16
	33	166	14		
	34	166	13,8		
	35	166	13,8		
	36	166	13,8		
	37	166	13,9		
	38	166	13,9		
	39	166	14		
	40	167	13,9		
	41	167	13,9		
	42	167	13,9		
	43	167	14		
	44	167	14		
	45	167	14		
	46	167	14		
	47	167	14		
	48	167	14		
	49	167	14		
	50	167	14		
	51	167	14		
	52	167	14		
	53	167	14		
	54	167	14		
	55	167	14		
	56	167	14		
	57	167	14,1		
	58	167	14,2		
		59	167	15	Bomba a 66 m
POZO 9007	4,75*			N.E	
	6,4	235	15,1		
	6,6	225	15		
	7	225	15		
	8	225	14,9		
	9	225	14,8		
	10	225	14,7		
	11	225	14,7		
	12	225	14,6		
	13	226	14,6		
	14	226	14,6		
	15	226	14,6		

	16	226	14,6		
	17	226	14,4		
	18	226	14,4		
	19	226	14,4		
	20	225	14,6		
	21	225	14,6		
	22	225	14,6		
POZO 9048	3,8	103	15,9	N.E	
	5	97	14,6		
	6	98	14,4		
	7	98	14,2		
	8	97	14,1		
	9	97	14,1		
	10	96	14,1		
	11	97	14,1		
	12	96	14,1		
	13	96	14,1		
	14	96	14,1		
	15	97	14,1		
	16	97	14		
	17	97	14		
	18	97	14		
	19	97	14		
	20	97	14		

10.3 Abatimiento en pozos con caudales de explotación < 10 l/s.

Pozo	Caudal	Abatimiento
ND-0902-12071	2,26	0,33
ND-0902-12830	0,55	0,5
ND-0902-12832	0,6	0,5
ND-0902-14031	2,4	0,62
ND-0902-11443	0,1	0,75
ND-0902-14540	3	1,12
ND-0902-11809	3,2	1,22
ND-0902-13769	9	1,5
ND-0902-13489	1	1,63
ND-0902-11312	1,5	1,75
ND-0902-14082	2,5	1,84
ND-0902-10223	4	2,9
ND-0902-11461	8	3,7
ND-0902-13216	2	4
ND-0902-4859	8	6,93
ND-0902-12704	2	7
ND-0902-10171	1,2	7,66
ND-0902-11003	3	8,46
ND-0902-13653	1,8	8,71
ND-0902-12831	0,7	10
ND-0902-12066	2	10,09
ND-0902-11916	3	10,25
ND-0902-10829	0,5	13,3
ND-0902-5911	5	13,75

ND-0902-5461		0,1	20,44
ND-0902-13674		3,6	23,11
ND-0902-12551		4	25,03
ND-0902-13212		5,5	28,14
ND-0902-12909		1,8	29,7
ND-0902-13110		3	32,2
ND-0902-2914		0,4	32,33
ND-0902-3346		5,5	53,8
PROMEDIO		2,85	11,35

10.4 Estratigrafía

Hole ID	Desde	Hasta	Litología	S. milenio*
ND-0902-962	0	3	suelo	V
ND-0902-962	3	8	arcilla, grava	G, C
ND-0902-962	8	18	arcilla	C
ND-0902-962	18	23	roca, grava	G
ND-0902-962	23	33	arcilla, grava, roca	B, G, C
ND-0902-962	33	38	grava, roca	B, G
ND-0902-962	38	43	roca	B
ND-0902-962	43	53	arcilla, grava, roca	B, G, C
ND-0902-962	53	60	roca, grava	B, G
ND-0902-962	60	83	roca, grava, arena	B, G, S
ND-0902-2914	0	2	tierra vegetal rojo arcillosa	V
ND-0902-2914	2	16	arcillas rojas y limos en estratos	M, C
ND-0902-2914	16	43	ripios, arenas, gravas cuaternarias y estratos de limo esporádicos	G, S, m
ND-0902-2914	43	44	arcillas compactadas	C
ND-0902-2914	44	49	ripios, arenas cuaternarias	G, S
ND-0902-2914	49	62	cenizas volcánicas compactadas en estratos y de mediana dureza	T
ND-0902-5872	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-5872	1	2	arcilla, ripio, arena	G, S, C
ND-0902-5872	2	4	arcilla, ripio, arena	G, s, C
ND-0902-5872	4	6	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5872	6	8	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5872	8	10	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5872	10	12	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5872	12	14	arcilla, ripio, arena	G, s, C
ND-0902-5872	14	16	arcilla, ripio, arena	G, S, C
ND-0902-5872	16	18	bolones, arcilla, ripio, arena	B, g, s, c
ND-0902-5872	18	20	arcilla, ripio, arena	G, S, C
ND-0902-5872	20	22	arcilla, ripio, arena	G, S, C
ND-0902-5872	22	24	arcilla, ripio, arena	G, S, c
ND-0902-5872	24	26	arcilla, ripio, arena	G, S, c
ND-0902-5872	26	28	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5872	28	30	arcilla, ripio, arena	G, s, c
ND-0902-5911	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-5911	1	7	ripio fino, arena, grava, ripio 90%	G, s
ND-0902-5911	7	15	arena, grava, bolones	g, S
ND-0902-5911	15	27	arena, grava, bolones	b, g, S

ND-0902-9372	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-9372	1	5	ripio con arena y gravas	G, S
ND-0902-9372	5	8	ripio con arena, gravas y limo	G, S, M
ND-0902-9372	8	17	arena fina, limo y ripio compuesto por gravas y arena	G, S, M
ND-0902-9372	17	19	bolones	B
ND-0902-9372	19	22	ripio fino con arenas y gravas	G, S
ND-0902-9372	22	27	arena fina, limo y gravas	g, S, M
ND-0902-9372	27	31	ripio compuesto por bolones, gravas y arena	B, G, S
ND-0902-9372	31	31,5	limo	M
ND-0902-9372	31,5	46	ripio compuesto por bolones, arenas y gravas	B, G, S
ND-0902-9377	0	1	tierra	V
ND-0902-9377	1	4	maicillo	G
ND-0902-9377	4	21	bolón, grava	B, G
ND-0902-9377	21	32	bolón, arena	B, S
ND-0902-9377	32	62	bolón, grava, arena	B, G, s
ND-0902-10171	0	3	materia orgánica	V
ND-0902-10171	3	5	arcilla	C
ND-0902-10171	5	7	arcilla-tosca-ripio	G, T, C
ND-0902-10171	7	8	arcilla-arena-roca volcánica	R, S, C
ND-0902-10171	8	10	materia orgánica	M
ND-0902-10171	10	19	arcilla-tosca-ripio	G, T, C
ND-0902-10171	19	20	arcilla	C
ND-0902-10797	0	1	Suelo	V
ND-0902-10797	1	6	arcilla	C
ND-0902-10797	6	11	arcilla, arena, grava	g, s, C
ND-0902-10797	11	35	arena, grava	G, S
ND-0902-10797	35	42	arena, grava	G, S
ND-0902-10797	42	78	arena, grava, bolones	b, G, s
ND-0902-10797	78	83	conglomerado	I
ND-0902-10798	0	2	suelo	V
ND-0902-10798	2	22	limo, arena, grava	G, S, m
ND-0902-10798	22	33	arena, grava	G, S
ND-0902-10798	33	37	limo, arena, grava, bolones	b, G, S, m
ND-0902-10798	37	78	arena gruesa, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-10798	78	83	limo, arena, grava	g, S, m
ND-0902-10798	83	109	arcilla, grava	g, C
ND-0902-10826	0	2	suelo	V
ND-0902-10826	2	91	arena gruesa, grava, bolones	B, G, s
ND-0902-10826	91	99	arcilla compactada	C
ND-0902-10829	0	3	suelo	V, c
ND-0902-10829	3	7	grava, arena	G, S
ND-0902-10829	7	11	arena gruesa	G, S
ND-0902-10829	11	13	arena gruesa, bolones	B, S
ND-0902-10829	13	15	arena, bolones	B, S
ND-0902-10829	15	16	arena gruesa	S
ND-0902-10829	16	17	bolones	B
ND-0902-10870	0	3	arcilla de baja plasticidad	V, c
ND-0902-10870	3	9	arena	S
ND-0902-10870	9	27	arena, grava	G, S

ND-0902-11003	0	1	suelo	V
ND-0902-11003	1	3	arcilla, grava, bolones	b, G, C
ND-0902-11003	3	6	arcilla, arena gruesa	S, C
ND-0902-11003	6	8	arcilla compactada, arena fina	S, C
ND-0902-11003	8	12	arcilla compactada, arena fina	S, C
ND-0902-11003	12	16	arcilla compactada, arena gruesa	S, C
ND-0902-11003	16	18	arcilla, arena gruesa	S, C
ND-0902-11003	18	20	arcilla, arena gruesa	S, C
ND-0902-11003	20	22	arcilla, grava, bolones	b, G, C
ND-0902-11003	22	24	arcilla compactada, grava	B, C
ND-0902-11003	24	25	arcilla compactada	C
ND-0902-11064	0	2		V
ND-0902-11064	2	9		G, S, C
ND-0902-11064	9	15		b, G, S, c
ND-0902-11064	15	21		b, G, S, c
ND-0902-11064	21	24		S, c
ND-0902-11064	24	27		G, c
ND-0902-11064	27	34		g, S, c
ND-0902-11064	34	44		g, S, c
ND-0902-11064	44	53		g, S, c
ND-0902-11064	53	57		C
ND-0902-11312	0	0,3	suelo	V
ND-0902-11312	0,3	3	limo, arcilla	M, C
ND-0902-11312	3	7	arena, grava, limo	g, S, C
ND-0902-11443	0	0,5	suelo	V
ND-0902-11443	0,5	4	arena, grava	G, S
ND-0902-11443	4	5,5	arcilla	C
ND-0902-11461	0	4	suelo	V
ND-0902-11461	4	10	limo, grava	G, m
ND-0902-11461	10	13	arena, grava	G, S
ND-0902-11461	13	23	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-11461	23	32	arena, arcilla	S, C
ND-0902-11461	32	40	limo, grava, bolones	B, G, m
ND-0902-11809	0	1	suelo	V
ND-0902-11809	1	10	grava, arena, bolones	B, G, S
ND-0902-11809	10	15	arcilla	C
ND-0902-11809	15	40	arena, grava, bolones	B, G, S
ND-0902-12031	0	0,2	Suelo	V
ND-0902-12031	0,2	4,8	ceniza (trumao)	T
ND-0902-12031	4,8	9,4	arcilla, grava	g, C
ND-0902-12031	9,4	10,8	grava	G
ND-0902-12066	0	5	Suelo	V
ND-0902-12066	5	14	arcilla, grava, bolones	B, G, c
ND-0902-12066	14	18	arcilla compactada	C
ND-0902-12066	18	25	limo, arena fina, grava	g, S, M
ND-0902-12066	25	30	arena, grava, bolones	B, g, s
ND-0902-12071	0	0,6	Suelo	V
ND-0902-12071	0,6	3,5	arcilla, poca grava	C
ND-0902-12071	3,5	5,5	arcilla, arena	s, C

ND-0902-12071	5,5	7	arena	S
ND-0902-12312	0	2	Suelo	V
ND-0902-12312	2	8	arena, grava	G, S
ND-0902-12312	8	13	arena, grava, bolones	b, G, s
ND-0902-12312	13	14	limo, arena	S, M
ND-0902-12312	14	18	arenas, grava, bolones	b, G, s
ND-0902-12312	18	20	arena, grava, bolones	b, G, s
ND-0902-12312	20	23	limo, arena	S, M
ND-0902-12312	23	30	arena, grava, bolones	B, g, S
ND-0902-12312	30	37	arena, grava	b, G, s
ND-0902-12312	37	46	arena, grava, bolones	b, G, s
ND-0902-12312	46	52	limo, grava	G, M
ND-0902-12312	52	60	limo, arena	S, M
ND-0902-12313	0	2	suelo	V
ND-0902-12313	2	6	arena, grava	G, S
ND-0902-12313	6	9	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12313	9	13	limo, arena	S, M
ND-0902-12313	13	17	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12313	17	24	limo	M
ND-0902-12313	24	30	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12313	30	37	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12313	37	41,5	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12313	41,5	45	limo, arena	s, M
ND-0902-12333	0	1	suelo	V
ND-0902-12333	1	3	limo, arena, grava	S, M
ND-0902-12333	3	22	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12333	22	24	limo	M
ND-0902-12333	24	29	arena, grava, bolones	b, G, S
ND-0902-12333	29	35	arena, grava, bolones	B, G, S
ND-0902-12551	0	2	suelo	V
ND-0902-12551	2	7	arena, grava	G, S
ND-0902-12551	7	13	grava	G
ND-0902-12551	13	14	arena	S
ND-0902-12551	14	21	grava, bolones	B, G
ND-0902-12551	21	24	grava	G
ND-0902-12551	24	34	grava, bolones	B, G
ND-0902-12551	34	38	bolones	G
ND-0902-12551	38	40	arena, grava	G, S
ND-0902-12704	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-12704	1	3	bolones, arena y grava	B, g, s
ND-0902-12704	3	5	bolones, arena y arcilla	B, g, s
ND-0902-12704	5	8	bolones, arcilla, arena	B, g, s, m
ND-0902-12704	8	11	bolones, arena y arcilla	B, g, s, m
ND-0902-12704	11	13	bolones, arena y arcilla	B, g, S, m
ND-0902-12704	13	15	bolones, arena y arcilla	B, g, s, m
ND-0902-12704	15	17	bolones y arcilla	B, g, s, m
ND-0902-12704	17	18	bolones	B
ND-0902-12830	0	0,8	tierra vegetal	V
ND-0902-12830	0,8	2	limo y arena	S, M

ND-0902-12830	2	6,3	limo, grava y arena	G, S, M
ND-0902-12831	0	0,8	suelo	V
ND-0902-12831	0,8	10	limo, arena gruesa, grava	G, S, m
ND-0902-12831	10	22	limo, arena, grava, bolones	b, G, S, m
ND-0902-12832	0	1,2	suelo	V
ND-0902-12832	1,2	7,8	limo, arena gruesa, grava	g, s, M
ND-0902-12909	0	8	suelo	V
ND-0902-12909	8	22	arcilla	M
ND-0902-12909	22	40	arena, grava	G, S
ND-0902-12909	40	51	roca descompuesta	B
ND-0902-12909	51	68	arcilla	M
ND-0902-13212	0	8	arcilla café	V
ND-0902-13212	8	15	maicillo, limo	G, M
ND-0902-13212	15	20	Grava	G
ND-0902-13212	20	24	bolones, arcilla	B, C
ND-0902-13212	24	30	limo, arcilla	M, C
ND-0902-13212	30	34	Grava	G
ND-0902-13212	34	36	arcilla gris compactada	C
ND-0902-13212	36	39	bolones, grava	B, G
ND-0902-13212	39	40	arcilla gris compactada	C
ND-0902-13216	0	3	tierra vegetal	V
ND-0902-13216	3	5	bolones, grava, arena, arcilla	B, g, S, c
ND-0902-13216	5	8	bolones, arcilla, arena, grava	B, g, S, c
ND-0902-13216	8	9	bolones, grava	B, g
ND-0902-13489	0	7	Arcillas y trumao	V, T
ND-0902-13489	7	40	arcilla compactada, extractos de roca	G, C
ND-0902-13489	40	50	roca sólida con arena fina	B, S
ND-0902-13489	50	70	maicillo, arena fina	G, S
ND-0902-14104	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-14104	1	20	tierra	S, M
ND-0902-14104	20	22	grava y arena, bolones	b, G, S
ND-0902-14104	22	36	arena gruesa y grava	G, S
ND-0902-14540	0	1	tierra vegetal	V
ND-0902-14540	1	10	Ripio, bolones medianos, arena	b, G, S
ND-0902-14540	10	30	Bolones grandes, ripio	B, G

10.5 Atributos del Plan Regulador Comunal

Referencia urbana	Zona	Superficie predial mínima [m ²]	Coefficiente de ocupación máxima residencial [%]	Coefficiente de ocupación máxima otros usos [%]	Sistemas de agrupamiento*	Altura máxima [m]
Mercado	ZE1	500	65	60	C	11,5
Ferrocarriles	ZE2	2000	20	80	C	21
Universidad de la frontera	ZE3	300	50	70	A, P	21
Isla cautiñ	ZE4	5000	50	-	A	21
Residencial periferia	ZE5	200	60	-	A	7
Residencial periferia	ZE6	2500	20	80	A	9,6
Zona de inundación	ZE7	2500	-	-	A	9,6
Padre las Casas	ZF	200	50	70	A, P, C	
Alemania	ZH1	300	40	-	A, P	14
Pedro de Valdivia	ZH2	150	50	65	A, P, C	17,5
Pablo Neruda	ZH3	200	50	65	A, P	14
Residencial urbano	ZHE1	200	50	-	A, P	14
Residencial urbano	ZHE2	200	50	-	A, P	14
Especial	ZHE3	300	40	-	A, P	10,5
Especial	ZHE4	1000	40	-	A	10,5
Especial	ZHE5	2000	40	-	A	10,5
Centro galerías	ZHR1	500	97	70	C	libre
Centro Base	ZHR2	300	91	50	C	31,5
Borde cerro	ZHR3	500	50	-	A	14
Borde Isla	ZHR4	500	75	-	A, P	28
Frontera, Pueblo nuevo (Base)	ZHR5	200	70	60	C	21
Amanecer y Costanera	ZHR6	800	70	80	A	21
Mixta	ZM1	500	26	-	A, P	21
Mixta	ZM2	300	52	-	A, P	17,5
Mixta 3	ZM3	300	75	60	C	21
Mixta	ZM4	300	26	-	A, P, C	28
Mixta	ZM5	300	26	70	A, P	21
Mixta	ZM6	1000	52	-	A	10,5

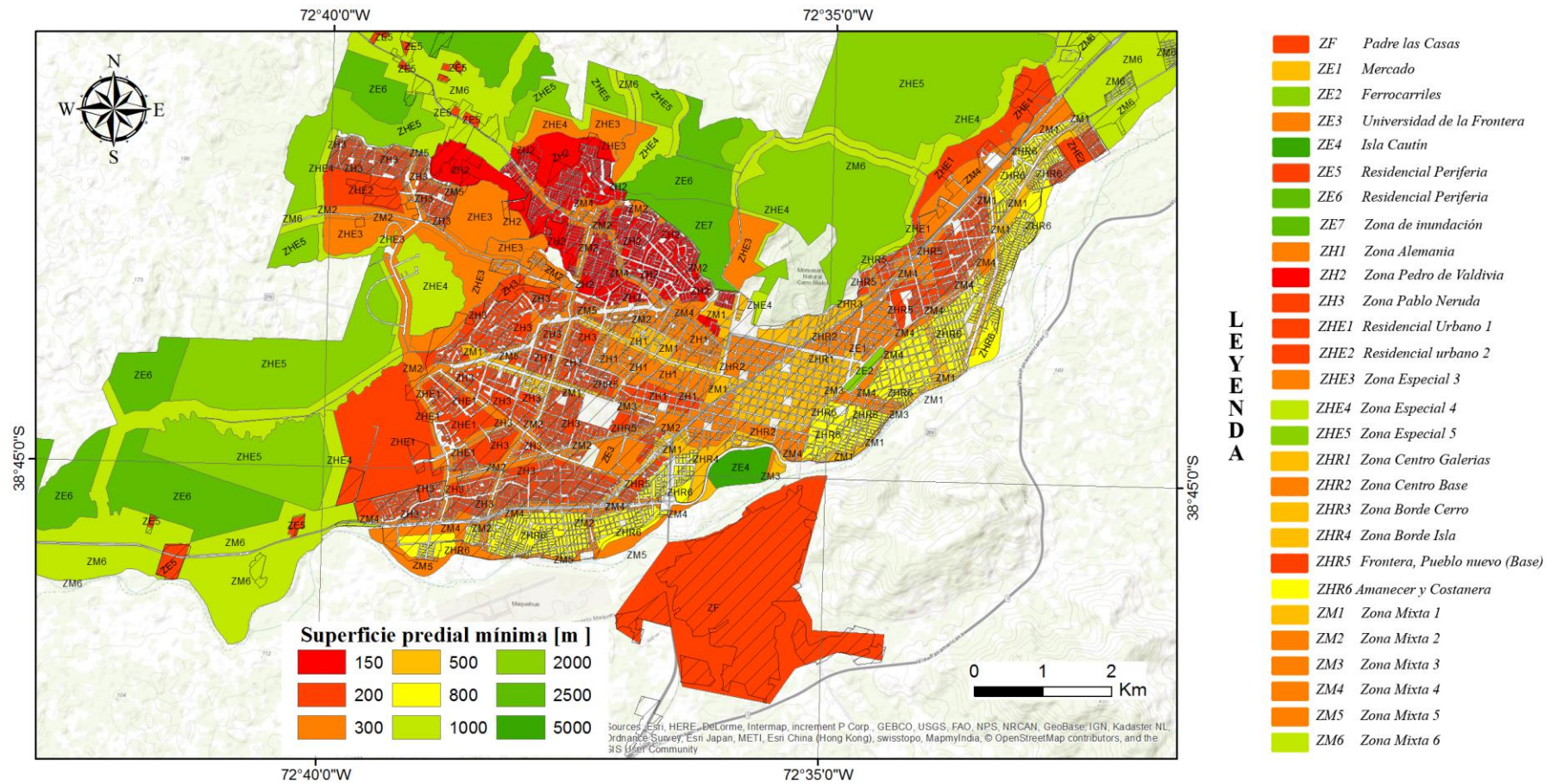


Figura 10.1. Superficie predial mínima en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.