

# Tabla de Contenido

I.	Introducción .....	1
1.1	Formulación general del proyecto .....	1
1.2	Ubicación y vías de Acceso .....	2
1.3	Objetivos .....	2
1.3.1	Objetivo general.....	2
1.3.2	Objetivos específicos .....	2
1.4	Hipótesis de trabajo. ....	2
II.	Antecedentes Generales .....	4
2.1	División político-administrativa .....	4
2.2	Marco geológico e hidrogeológico.....	5
2.3	Bombas de calor .....	13
2.3.1	Sistema de intercambiadores horizontales en circuito cerrado .....	14
2.3.2	Sistema de intercambiadores verticales en circuito abierto .....	15
2.4	Sistema de intercambiadores horizontales en circuito cerrado .....	16
2.4.1	Unidades territoriales de análisis y su relación con las unidades hidrogeológicas .....	16
2.4.2	Clima.....	23
2.4.3	Difusividad térmica.....	27
2.4.4	Plan Regulador Comunal.....	28
2.5	Sistema de intercambiadores verticales en circuito abierto .....	28
2.5.1	Conductividad hidráulica .....	28
2.5.2	Pruebas de Bombeo .....	29
2.5.3	Transmisividad.....	29
2.5.4	Abatimiento .....	30
2.5.5	Variación del nivel estático .....	30
2.6	Aspectos legales .....	31
2.6.1	Sistemas de intercambiadores en circuito cerrado .....	31
2.6.2	Sistemas de intercambiadores en circuito abierto .....	32
2.7	Aspectos económicos .....	37
2.7.1	Costos bombas de calor con intercambiadores horizontales cerrados .....	37
2.7.2	Costos bombas de calor con intercambiadores horizontales verticales.....	37
2.7.3	Inversión estimada de proyectos exitosos en Chile .....	38
III.	Metodología.....	39

3.1 Sistema de intercambiadores horizontales en circuito cerrado .....	39
3.1.1 Generación de base de datos .....	39
3.1.2 Cálculo de la evolución de temperatura del terreno .....	39
3.1.3 Cálculo Coeficiente de Rendimiento (COP) .....	42
3.1.4 Superficie mínima predial por áreas residenciales .....	43
3.1.5 Definición de viviendas tipo y su demanda térmica anual .....	43
3.1.6 Determinación del área de los intercambiadores de calor. ....	44
3.1.7 Determinación de zonas aptas para la instalación de los intercambiadores de calor. ....	45
3.2 Sistema de intercambiadores verticales en circuito abierto .....	45
3.2.1 Generación de base de datos .....	45
3.2.2 Determinación de caudal .....	45
3.2.3 Temperatura del agua subterránea .....	45
3.2.4 Cálculo Coeficiente de Rendimiento (COP) .....	46
3.2.5 Cálculo potencia generada .....	46
3.2.6 Obtención de transmisividad .....	47
3.2.7 Cálculo abatimiento .....	47
3.2.8 Cálculo de nivel estático actual .....	47
3.2.9 Cálculo profundidad del pozo y dirección de flujo .....	47
IV. Resultados .....	49
4.1 Sistema de intercambiadores horizontales en circuito cerrado .....	49
4.1.1 Temperatura estimada del subsuelo y COP .....	49
4.1.2 Superficie mínima predial .....	51
4.1.3 Determinación superficie de intercambiadores. ....	57
4.2 Sistema de intercambiadores verticales en circuito abierto .....	60
4.2.1 Caudales expedientes DGA .....	60
4.2.2 Temperatura agua subterránea y coeficiente de rendimiento .....	60
4.2.3 Potencia generada .....	62
4.2.4 Transmisividad, conductividad hidráulica y abatimiento .....	64
4.2.5 Nivel piezométrico y estático .....	68
4.2.6 Profundidad de los pozos .....	72
V. Discusiones .....	74
5.1 Sistema de intercambiadores horizontales en circuito cerrado .....	74
5.1.1 Temperatura en profundidad y COP .....	74
5.1.2 Superficie mínima predial y viviendas aisladas .....	74
5.1.3 Potencia térmica generada .....	75

5.1.4 Zonas residenciales aptas para la instalación de intercambiadores horizontales cerrados.....	75
5.2 Sistema de intercambiadores verticales en circuito abierto .....	75
5.2.1 Profundidad a perforar: .....	75
5.2.2 Disponibilidad hídrica: .....	77
5.2.3 Potencia generada.....	77
VI. Conclusiones .....	79
VII. Bibliografía .....	80
VIII. Anexos .....	83
7.1 Sistema de Intercambiadores horizontales cerrados .....	83
7.1.1 Horas Uso.....	83
7.1.2 Características de las zonas residenciales de la Región Metropolitana .....	287
7.2 Sistemas de intercambiadores verticales abierto.....	299
7.2.1 Caudales de agua subterránea concedidos por la DGA.....	299
7.2.2 Nivel estático y Temperatura .....	300
7.2.3 Abatimiento.....	322

# Índice de Figuras

Figura 1 Provincias Región Metropolitana.....	5
Figura 2: Distribución del relleno sedimentario por tipo de cobertura en la Cuenca de Santiago.....	6
Figura 3 Mapa de relleno de la Cuenca de Santiago y su potencial acuífero.....	9
Figura 4 Ubicación de los perfiles geológicos CC', DD' y FF'. Fuente: "Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la energía geotérmica".....	10
Figura 5 Perfil CC', correspondiente al sector de Colina-Lampa. Fuente: Modificado de Proyecto "Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la energía geotérmica".....	11
Figura 6 Perfil DD',suroeste a noreste el sector centro y norte de Santiago. Modificado del Proyecto "Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la energía geotérmica".....	12
Figura 7 Perfil FF', correspondiente a las inmediaciones del río Maipo. Modificado de Proyecto "Determinación de parámetros termales en el subsuelo de las cuencas de Santiago y Talca: implicancias para el uso directo de la energía geotérmica".....	12
Figura 8 Esquema de funcionamiento de la bomba de calor geotérmica.....	14
Figura 9 Sistema de intercambiadores horizontales en sistema cerrado. A la izquierda circuito en serie, a la derecha circuito en paralelo.....	15
Figura 10 Sistema de intercambiadores horizontales en sistema cerrado. Circuito en espiral.....	15
Figura 11 Ubicación de las sub-cuencas de la Región Metropolitana.....	21
Figura 12 Unidades territoriales participativas y subcuencas.....	22
Figura 13 Temperaturas medias en la Región Metropolitana.....	24
Figura 14 Temperatura promedio mensual estación Quinta Normal.....	26
Figura 15 Promedio temperaturas anuales de los últimos 30 años.....	27
Figura 16 Mapa de procesos solicitud de aprovechamiento de agua subterránea.....	34
Figura 17 Fases para constitución de un derecho de aprovechamiento de agua.....	35
Figura 18 Restricciones de los derechos de agua.....	36
Figura 19 Temperatura típica del subsuelo a diferentes profundidades. Las curvas muestran la evolución de la temperatura desde la superficie a los 4m en intervalos de 0.5m.....	41
Figura 20 Temperatura estimada y medida a 1,45m de profundidad en la Ciudad de Coyhaique.....	41
Figura 21 Superficie viviendas en Chile.....	43
Figura 22 Principales factores para la dimensión de los pozos en los GWHP.....	48
Figura 23 Temperatura subsuelo a 1,5m y 3m.....	49
Figura 24 COP calefacción de intercambiadores enterrados a 1,5m y 3m.....	49
Figura 25 COP calefacción con intercambiadores enterrados a 1,5m.....	50
Figura 26 Superficie mínima predial de zonas residenciales en Región Metropolitana.....	53
Figura 27 Superficie mínima predial de zonas residenciales en la zona central de la Región Metropolitana.....	54
Figura 28 Superficie mínima predial de zonas residenciales en la zona suroeste de la Región Metropolitana.....	55
Figura 29 Superficie mínima predial de zonas residenciales en la zona norte de la Región Metropolitana.....	56

Figura 30 Razón superficie vivienda 75m <sup>2</sup> vs superficie libre de construcción, tomando como superficie total la superficie mínima indicada en los planes reguladores de cada comuna. ....	58
Figura 31 Razón superficie vivienda 150m <sup>2</sup> vs superficie libre de construcción, tomando como superficie total la superficie mínima indicada en los planes reguladores de cada comuna. ....	59
Figura 32 Temperatura agua subterránea Región Metropolitana.....	61
Figura 33 Potencia final generada por la bomba de calor por subcuencas.....	63
Figura 34 Transmisividad calculada en la zona de estudio.....	65
Figura 35 Conductividad hidráulica calculada en la zona de estudio.....	66
Figura 36 Abatimiento registrados de pozos de bombeos presentes en el área de estudio. ....	67
Figura 37 Piezometría y dirección de flujo subterráneo en la Cuenca de Santiago. ....	69
Figura 38 Nivel estático promedio año 2013 en la Cuenca de Santiago. ....	70
Figura 39 Máxima profundidad del nivel estático registrada en la Cuenca de Santiago entre el período 1985-2015. ....	71
Figura 40 Profundidad estimada de pozos BHE.....	73

# Índice de Tablas

Tabla 1 Cuadro resumen provincias Región Metropolitana.....	4
Tabla 2 Homologación de subcuencas con unidades territoriales participativas.....	17
Tabla 3 Promedio temperatura comunas de Santiago..	25
Tabla 4 Continuación promedio temperatura comunas de Santiago.....	25
Tabla 5 Desviación estándar de la temperatura promedio mensual en la estación Quinta Normal.....	26
Tabla 6 Promedio temperaturas anuales de los últimos 30 años.....	26
Tabla 7 Valores orientativos de difusividad térmica para distintos materiales.....	27
Tabla 8 Conductividad hidráulica de los sedimentos.....	29
Tabla 9 Valores de abatimiento aproximados para distintas demandas térmicas según la conductividad del suelo.....	30
Tabla 10 Costos sistema de intercambiadores horizontales cerrados.....	37
Tabla 11 Costos perforación.....	37
Tabla 12 Proyectos exitosos en Chile.....	38
Tabla 13 Máxima energía específica de extracción para colectores horizontales.....	44
Tabla 14 Temperatura mínima, máxima y promedio a 1,5m y 3m de profundidad.....	50
Tabla 15 COP mínimo, máximo y promedio de intercambiadores enterrados a 1,5m y 3m de profundidad.....	50
Tabla 16 Variación de COP según variación de la temperatura estimada a 1,5m de profundidad en 2°C.....	51
Tabla 17 Comunas con información de superficie mínima predial.....	51
Tabla 18 Comunas sin información de superficie mínima predial.....	52
Tabla 19 Potencia calefacción térmica y calor a extraer del suelo por tipo de vivienda.....	57
Tabla 20 Área de intercambiadores y superficie total requerida por tipo de vivienda.....	57
Tabla 21 Caudales otorgados y número de datos utilizados por subcuenca.....	60
Tabla 22 Potencia extraída del agua subterránea según caudales otorgados por la DGA, por subcuenca.....	62
Tabla 23 Horas uso.....	286
Tabla 24 Datos obtenidos de los planes reguladores comunales.....	287
Tabla 25 Mediciones realizadas por CEGA.....	300
Tabla 26 Medición aguas termales.....	301
Tabla 27 Pozos DGA, ubicación y nivel estático año 2013.....	301