

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE  
BAJA ENTALPÍA Y SUS POSIBLES APLICACIONES EN LA  
COMUNA DE COLINA, REGIÓN METROPOLITANA.**

**NICOLE VALENZUELA CONTRERAS**

**SANTIAGO, CHILE  
2013**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE  
BAJA ENTALPÍA Y SUS POSIBLES APLICACIONES EN LA  
COMUNA DE COLINA, REGIÓN METROPOLITANA.**

**LOW ENTHALPY GEOTHERMAL POTENTIAL ESTIMATION AND  
POSSIBLE APPLICATIONS IN COLINA, METROPOLITAN REGION**

**NICOLE VALENZUELA CONTRERAS**

**SANTIAGO, CHILE  
2013**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE  
BAJA ENTALPÍA Y SUS POSIBLES APLICACIONES EN LA  
COMUNA DE COLINA, REGIÓN METROPOLITANA.**

Memoria para optar al título profesional de:  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**NICOLE VALENZUELA CONTRERAS**

	Calificaciones
Profesores Guías	
Sr. Cristian Mattar B. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr.	7,0
Sr. Alfredo Lahsen A. Geólogo	6,0
Profesores Evaluadores	
Sr. Gerardo Soto M. Ingeniero Forestal, M.S, Dr.	6,5
Sr. Jorge Pérez Q. Ingeniero Agrónomo, M.S, PhD.	7,0

SANTIAGO, CHILE  
2013



“La presente memoria está dedicada a mis padres.  
*Mónica y Luis* por su amor y apoyo incondicional.”

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar de agradecer a mis profesores guías por su voluntad y buena disposición, quienes me han aportado con sus conocimientos para el excelente desarrollo de la presente memoria. Al profesor Cristian Mattar por su ayuda, tiempo y dedicación en el transcurso de este año. Al profesor Alfredo Lahsen por su gran disponibilidad de ayudarme, a pesar de no pertenecer a la carrera que él imparte. De igual forma quisiera agradecer la participación del profesor Nicolas Magner, quien me apoyó en el desarrollo de la parte económica de esta memoria. Por último, agradecer al profesor Luis Morales por otorgarme información para llevar a cabo mi trabajo.

Además, quisiera agradecer a mi familia, papá, mamá y hermanos, porque sin ellos nada de esto podría haber sido posible. Todos ustedes han sido un pilar fundamental en mi vida, entregándome amor y cariño todos los días de mi vida, preocupándose y dándome fuerza en los momentos difíciles. Y por enseñarme con su ejemplo que la perseverancia es vital en la vida.

A Eduardo Flores por su amor, apoyo y fuerza en los momentos difíciles, por tus palabras de aliento. Porque me enseñaste que no debo rendirme en los momentos difíciles de la vida, y me hiciste ver que lo fundamental es levantarse y jamás rendirse. Y por enseñarme a confiar en mí ante todo.

No puedo dejar de agradecer a mis amigos que han estado conmigo durante muchos años. En especial a mi amiga Dazuvinska que me acompañó en todo momento, entregándome sus palabras dulces, su amor, su preocupación y apoyo incondicional. A Melissa por sus palabras de aliento y su enorme apoyo. A mis compañeros Marisela, Gisela, Sofía, Javiera y Patricio por otorgarme sus sonrisas y su amistad durante estos 5 años de vida universitaria.

Finalmente, agradecer a Dios por guiarme en todo momento, por haberme entregado a una hermosa familia, y por haberme permitido conocer a gente tan maravillosa en este proceso tan importante en mi vida.



## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>10</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>11</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo General</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3 ANTECEDENTES</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1 Caracterización de los recursos geotérmicos</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2 Métodos de estimación del potencial geotérmico</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3 Geotermia a nivel mundial y en Chile</b> .....	<b>21</b>
<b>4 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1 Área de estudio</b> .....	<b>22</b>
<b>4.2 Materiales</b> .....	<b>26</b>
4.2.1 Datos biofísicos .....	26
4.2.2 Datos cartográficos.....	29
4.2.3 Datos económicos .....	31
<b>4.3 Método</b> .....	<b>33</b>
4.3.1 Estimación del PGBE en la comuna de Colina. ....	33
4.3.2 Evaluación de los métodos de estimación del PGBE. ....	39
4.3.3 Zonificación del PGBE de la comuna de Colina. ....	41
4.3.4 Evaluación de factibilidad técnica –económica de posibles usos de la energía geotérmica de baja entalpía. ....	42
<b>5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1 Estimación del PGBE en la comuna de Colina</b> .....	<b>48</b>
5.1.1 Estimación de las temperaturas del acuífero. ....	48
5.1.2 Interpolación de las temperaturas del acuífero.....	53
<b>5.2 Evaluación de los métodos de estimación del PGBE.</b> .....	<b>59</b>
5.2.1 Comparación de los resultados del PGBE .....	59
5.2.2 Análisis estadístico del modelo de interpolación de las temperaturas. ....	61
<b>5.3 Zonificación del PGBE de la comuna de Colina.</b> .....	<b>63</b>
5.3.1 Análisis de Conglomerados .....	64
<b>5.4 Evaluación de factibilidad técnica – económica de posibles usos de la energía geotérmica de baja entalpía</b> .....	<b>66</b>
5.4.1 Factibilidad técnica .....	66
5.4.2 Factores económicos .....	70
<b>6 CONCLUSIONES</b> .....	<b>94</b>

<b>7</b>	<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>
<b>9</b>	<b>ÁPENDICES.....</b>	<b>104</b>

## RESUMEN

En la presente investigación se estableció un método de estimación y evaluación del potencial geotérmico de baja entalpía (PGBE) existente en la comuna de Colina, Región Metropolitana. La importancia de este estudio es que Chile presenta una gran potencialidad geotérmica debido a que cuenta con una intensa actividad volcánica.

Para la estimación del PGBE se utilizaron los métodos del volumen y del flujo térmico superficial. Para establecer una zonificación del potencial geotérmico presente en la zona de estudio, se aplicó el método de *peaks* de histogramas. Finalmente, con el objetivo de evaluar la rentabilidad económica se usaron los siguientes indicadores: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodo de retorno. Por último, se realizó un análisis de sensibilidad de 3 escenarios socio-económicos.

Como resultados, el potencial geotérmico promedio de la comuna de Colina se estimó en  $17,69 \pm 3,69$  [kW], con temperaturas del acuífero que varían entre los 22 [°C] y los 33 [°C]. Resultado del análisis de conglomerados, se determinaron cuatro potenciales zonas caracterizadas por sus potenciales geotérmicos promedios en:  $14,97 \pm 1,22$  [kW],  $18,29 \pm 1,01$  [kW],  $21,72 \pm 1,02$  [kW] y  $26,77 \pm 2$  [kW] respectivamente. Por otra parte, se determinó que existe una alta probabilidad de resultar rentables económicamente proyectos que utilicen las bombas de calor horizontal en los tres escenarios estudiados. En cambio, los proyectos de bombas de calor vertical resultan con mayor rentabilidad sólo cuando se compara con la electricidad como combustible para calefacción. Finalmente, la metodología desarrollada puede ser replicada en diversas zonas del país con el objetivo de cuantificar el PGBE, incentivando el uso de ésta energía limpia y renovable.

**PALABRAS CLAVES:** Potencial Geotérmico de Baja Entalpía, Método del Volumen, *Cluster*, VAN, TIR y Periodo de Retorno.

## ABSTRACT

In the current work, a method to estimate and evaluate low enthalpy geothermal potential (LEGP) in Colina, Metropolitan Region is presented. The importance of this study is that Chile has a high geothermal potential based on its intense volcanic activity.

To estimate the LEGP the volume and the surface heat flux methods have been used. In order to establish a zonification of the estimated geothermal potential in the study area, a cluster analysis using the histogram peaks method was used. Consecutively to evaluate the economical viability, we used the following economic indicators: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and payback. Lastly a sensitivity analysis was carried out on three socio-economic different cases.

Estimation Results have shown that mean geothermal potential in Colina was  $17.69 \pm 3.69$  [kW], considering the aquifer temperatures between  $22$  [° C] and  $33$  [° C]. Four potential areas were determined using cluster analysis and were characterized by its average geothermal potential in: ],  $14.97 \pm 1.22$  [kW],  $18.29 \pm 1.01$  [kW]  $21.72 \pm 1.02$  [kW] y  $26.77 \pm 2$  [kW]. Moreover, there is a high probability that horizontal heat pumps for the exploitation of geothermal resources are viable economically in the three socio-economic different cases. In contrast, the use of vertical heat pumps only result more viable economically when they are compared with electricity as fuel for heating. Finally, a methodology that can be replicated in different parts of the country with the purpose of quantifying the LEGP was established, encouraging the use of this clean and renewable energy.

**KEY WORDS:** Low Enthalpy Geothermal Potential, Volume Method, Cluster, NPV, IRR, payback.

## 1 INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es el contenido calórico al interior de la Tierra que puede ser aprovechado con fines antrópicos (Antics and Sanner, 2007). Los reservorios geotérmicos tienen un origen geológico, presentando su mayor potencial en las zonas que están asociadas a volcanes o cordones volcánicos (Sanyal *et al*, 2002). Este potencial está relacionado con el gradiente térmico promedio de la tierra, el cual aumenta entre 25 a 30 [°C] por kilómetro de profundidad. Sin embargo, en zonas volcánicas este gradiente puede llegar a ser significativamente mayor (Lahsen, 2008).

Por otra parte, los fluidos geotérmicos pueden ser clasificados según la magnitud de su entalpía, la cual consiste en la cantidad de energía térmica que este fluido puede intercambiar con su entorno (Llopis y Angulo, 2008). Esta entalpía puede ser clasificada en alta, media, y baja según la temperatura a la cual se encuentre el fluido geotérmico, dado que ambas variables están relacionadas de forma proporcional. Según Muffler and Cataldi (1978), si el fluido geotérmico se encuentra a temperaturas menores de 100 [°C] es clasificada como baja entalpía; cuando está entre 100 [°C] y 150 [°C] se clasifica como media entalpía; por último, en caso ser mayor a 150 [°C] es clasificada como alta entalpía. Dentro de los posibles usos de estas tres clasificaciones se pueden considerar, aplicaciones directas de calor en el caso de la baja entalpía, aplicaciones directa o indirecta con fines domésticos e industriales en el caso de la media entalpía y sólo para la generación eléctrica en el caso de la alta entalpía (Ramos, 2011).

El consumo de energías renovables representa el 2,2% del total de la energía utilizada a nivel mundial. Específicamente, el uso de la energía geotérmica corresponde al 1,6% del total de las energías renovables (Fridleifsson, 2003). Según WEA (2000), se estima que existe un potencial geotérmico de 5 millones de TJ por año en el mundo. Pero, el consumo de energía geotérmica mundial es aproximadamente 67.246 [GWh/año] usados como energía eléctrica (Bertani, 2012) y de 423.830 [TJ/año] utilizados como energía calórica (Lund *et al*, 2011). En cuanto a la capacidad instalada de energía geotérmica, se determinó que al año 2010 existían 48.493 [MW/año], sólo para uso directo del calor, presentando un crecimiento anual del 11,4% entre los años 2005 y 2010, en todo el mundo (Lund *et al*, 2011). Los países con mayor consumo de la energía geotérmica son: China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Japón, consumiendo el 55% de este tipo de energía a nivel mundial, y además cuentan con el 63% de la capacidad instalada. Es relevante destacar que Islandia y Nueva Zelanda son los países que presentan un mayor desarrollo de la energía geotérmica, debido principalmente a su condición geográfica (Lund, 2010). Por último, es importante destacar que la mayor parte de la energía geotérmica es utilizada en bombas de calor (47%), calefacción de piscinas y uso termal (26%) y en calefacción de ambientes (11%) (Lund *et al*, 2011).

Por otra parte, Chile cuenta con una intensa actividad volcánica, perteneciendo además al Cordón de Fuego del Pacífico, queda de manifiesto que éste posee un alto potencial geotérmico. Además, es relevante mencionar que a lo largo del país existen 348 sitios con

fuentes termales, de los cuales 9 están situados en la Región Metropolitana, y de estas 9 fuentes, 2 se encuentran específicamente en la comuna de Colina, las cuales corresponden a Termas Colina-Peldehue y Carvajalino (Martini, 2008). Por lo cual, es posible realizar un análisis del potencial geotérmico a nivel local, específicamente en la comuna de Colina.

La capacidad instalada de energía geotérmica en Chile es de 9,11 [MW], la cual sólo es utilizada de forma directa en balnearios del país, representando un 0,02% del total de la capacidad instalada de energía geotérmica a nivel mundial (Lahsen *et al.*, 2010). Es importante destacar que hasta la fecha en el país no se genera electricidad a partir de la energía geotérmica, sin embargo, se ha estimado que posee un potencial de 16.000 [MW], sólo de alta entalpía (Lahsen, 1988). Esta cifra equivale aproximadamente a la capacidad instalada del Sistema Interconectado Central (SIC) y del Sistema Norte Grande (SING) hasta el año 2011 (17.589 [MW] (Central Energía, 2011)).

Por lo tanto, debido al significativo potencial geotérmico de alta y baja entalpía existente en Chile y en el área de estudio, y al bajo desarrollo de la investigación de este último tipo de energía calórica, el propósito de esta memoria es estimar el potencial de baja entalpía presente en la comuna de Colina, estableciendo posibles usos de esta energía renovable no convencional en dicha comuna, evaluando su factibilidad técnica y económica, con el objetivo de establecer un método de estimación del PGBE el cual pueda ser aplicado en otros territorios del país.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Estimar el potencial del recurso geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina, Región Metropolitana.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Aplicar métodos de estimación del potencial geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina.
2. Evaluar los métodos de estimación del potencial del recurso geotérmico en la comuna de Colina.
3. Zonificar el recurso geotérmico de baja entalpía en la comuna de Colina.
4. Proponer los posibles usos relacionados con la geotermia de baja entalpía en el área de estudio, en base a factores técnicos y económicos.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 Caracterización de los recursos geotérmicos

El calor contenido al interior de la Tierra es denominado un recurso geotérmico basal cuando ésta se encuentra definida en un área y en un momento determinado (Muffler and Cataldi, 1978). El mayor potencial geotérmico se encuentra en las zonas que están asociadas a volcanes o cordones volcánicos (Sanyal *et al*, 2002). La principal característica que presentan estas zonas radica en que los sistemas geotérmicos se encuentran a altas temperaturas (mayores a 100 [°C]) y a profundidades económicamente factibles de ser explotadas (menores a 3 kilómetros) (Lahsen, 2008).

El incremento de la temperatura de las zonas más superficiales de la corteza terrestre, se debe principalmente a dos procesos: absorción del calor de las reservas de magma y a la absorción de la radiación solar. En el primer caso, las reservas magmáticas que están presentes en las zonas volcánicas, transfieren el calor a las rocas superficiales mediante conducción y además por convección a través del flujo de agua subterránea (Stefansson, 2005). En el segundo caso, la corteza de la tierra se calienta debido a la absorción de la radiación solar, actuando de esta manera como un gran colector solar. Lo cual representa uno de los mayores aportes de calor para los sistemas geotérmicos de baja entalpía (Ver Figura 1) (Lahsen, 2008).

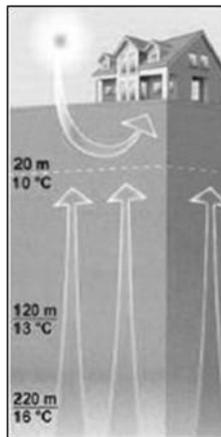


Figura 1. Fuentes de calor de los reservorios geotérmicos.

Con respecto a los tipos de manifestaciones geotérmicas, es posible encontrar cuatro tipos, las cuales se pueden diferenciar en función del tipo y de la temperatura del fluido geotérmico. Estos sistemas son: sistema de agua caliente, sistema de agua-vapor, sistema de vapor-seco y sistema de rocas secas calientes. Los sistema de agua caliente, son aquellos en el cual la gran mayoría de los fluidos se encuentran entre 30 a 100 [°C]. Los sistemas de agua-vapor, se caracterizan por presentar una mayor proporción de agua en el fluido geotérmico, la cual se encuentra a altos niveles de presión. El sistema de vapor seco, es

aquel fluido que se encuentra casi en su totalidad en estado de vapor. Finalmente, los sistemas de rocas secas calientes, son aquellos sistemas de rocas impermeables que no tienen contenidos de fluidos geotérmicos y se encuentran a temperaturas elevadas (mayores a 100 [°C]) (Llopis y Angulo, 2008).

Por otra parte, los recursos geotérmicos pueden ser clasificados a través de sus características geológicas y la factibilidad económica de ser explotado. Esta clasificación es representada a través del diagrama de McKelvey (Ver Figura 2), el cual caracteriza los recursos geotérmicos según la factibilidad económica y tecnológica de ser explotado a lo largo del eje vertical, y según el grado de certeza geológica a lo largo del eje horizontal (McKelvey, 1972). Esta última hace referencia a la probabilidad de encontrar el recurso geotérmico en un área determinada (Williams *et al*, 2011).

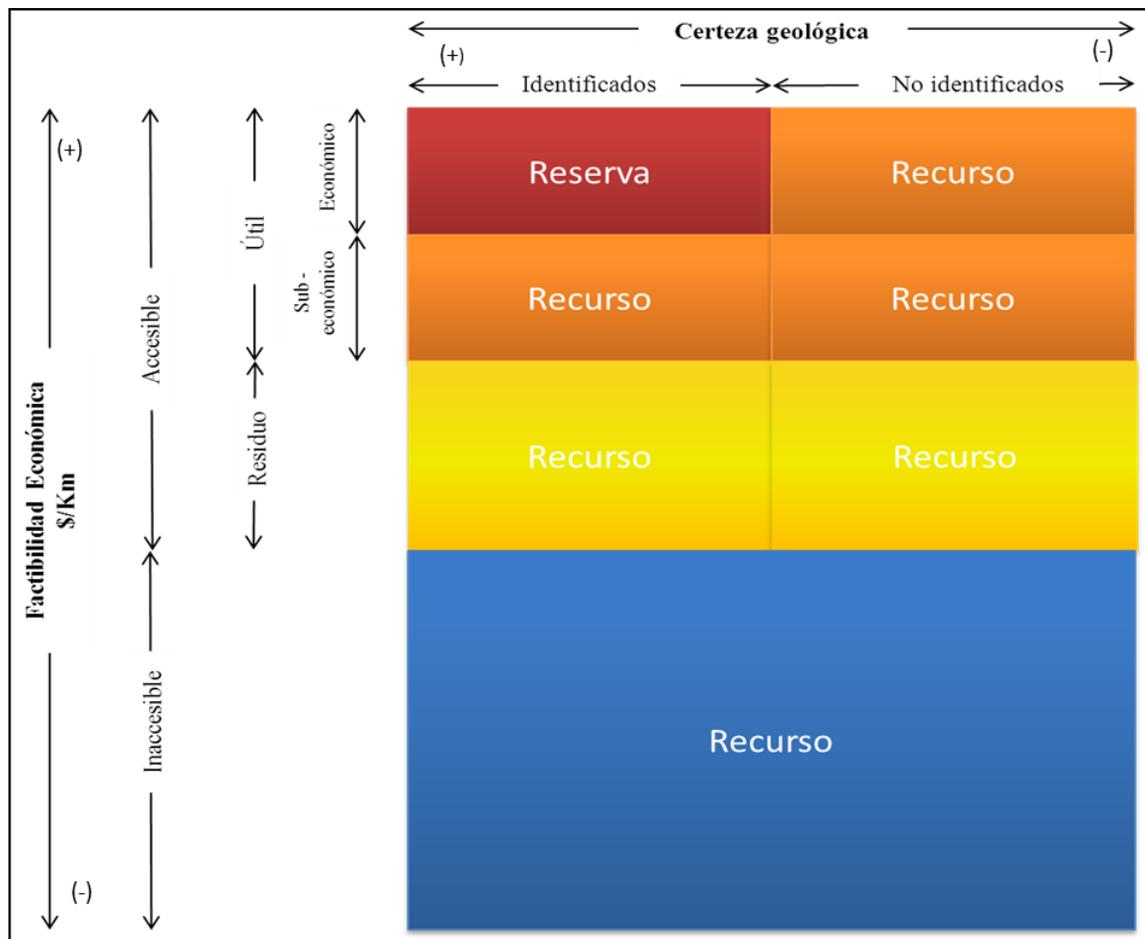


Figura 2. Diagrama de McKelvey (McKelvey, 1972).

Por lo tanto, del diagrama de McKelvey se desprende que el recurso geotérmico basal puede ser dividido en recurso accesible de manera económica y tecnológicamente, y el recurso que no es factible de ser explotado, dado que la tecnología actual no lo permite. Por

otra parte, el recurso accesible tecnológicamente se puede dividir en recurso económicamente factible de ser utilizado y no rentable (Williams *et al*, 2011). De esta forma, el recurso geotérmico que presenta mayor factibilidad económica y técnica de ser utilizado se denomina *reserva*. Este recurso debe ser identificado mediante técnicas geoquímicas, geofísicas o de perforación.

El método que se utiliza para identificar el recurso geotérmico se puede clasificar en tres categorías dependiendo de la técnica de identificación de la reserva. La primera se denomina reserva probada, y es aquella que ha sido identificada mediante métodos de perforación. La segunda es la reserva probable, y es aquella que ha sido identificada mediante investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas. Por último, la tercera categoría es la reserva posible la cual ha sido identificada sólo mediante métodos con fundamentos geológicos, los cuales son factores termodinámicos y factores físicos de la formación geotérmica que se está evaluando (Williams *et al*, 2011).

En el transcurso del tiempo diversos autores han generado numerosos sistemas de clasificación del recurso geotérmico utilizando la temperatura como criterio principal. Estas clasificaciones se diferencian en la variación que existe entre los rangos de temperatura que define cada categoría, y en el número de categorías que existe por sistema de clasificación. Las categorías principalmente quedan definidas en función del uso que tendría la energía geotérmica, dependiendo de la temperatura a la cual se encuentra el fluido (Ver Figura 3) (Williams *et al*, 2011).

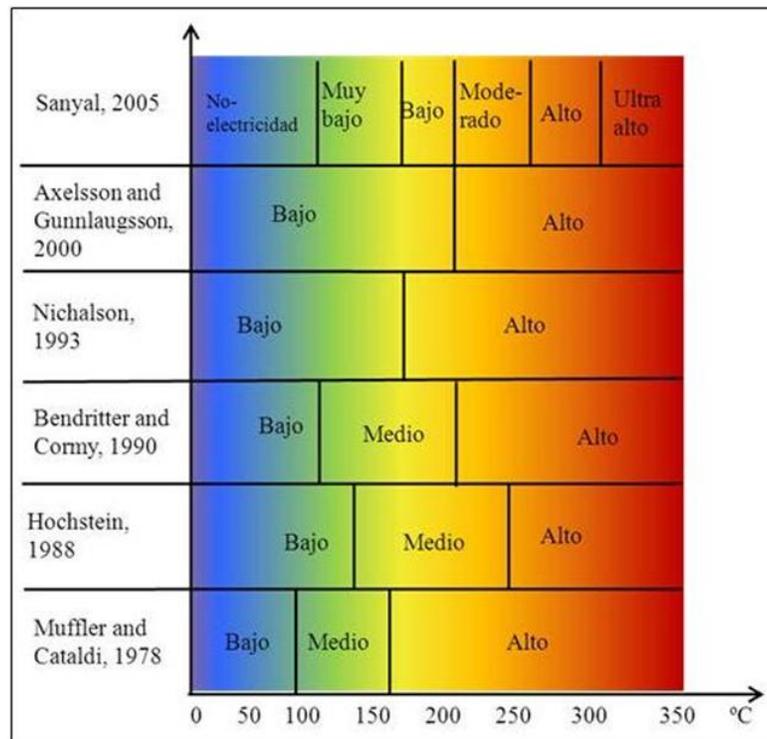


Figura 3. Ejemplos de clasificaciones del recurso geotérmico según la temperatura [°C] del Fluido (Williams *et al*, 2001).

Finalmente, Williams *et al.* (2001) plantea que por simplicidad de conceptos es más factible utilizar la clasificación de Muffler and Cataldi (1978). Dentro de los posibles usos de estas tres clasificaciones se pueden considerar, aplicaciones directas de calor en el caso de la baja entalpía, aplicaciones directa o indirecta con fines domésticos e industriales en el caso de la media entalpía y sólo para la generación de electricidad en el caso de la alta entalpía (Ramos, 2011).

Con respecto a las aplicaciones que se pueden dar a la energía geotérmica de baja entalpía, existe una gran diversidad de usos, pero los principales son: climatización de edificios, temperado de piscinas, producción de agua caliente sanitaria, climatización de invernaderos agrícolas, calefacción de plantales de crianzas de animales, secado de alimentos y maderas, y deshielo de carreteras (Popovski *et al.*, 2003; Andritsos *et al.*, 2011; Lund *et al.*, 2011).

Esto es posible utilizando los sistemas de bombas de calor, su funcionamiento se basa en la circulación de un fluido que absorbe el calor del suelo por conducción, y luego lo transfiere al lugar donde será utilizado. Este tipo de tecnologías se compone básicamente en tres sistemas: intercambiador de calor subterráneo, bomba de calor y el sistema de distribución (Ver Figura 4).

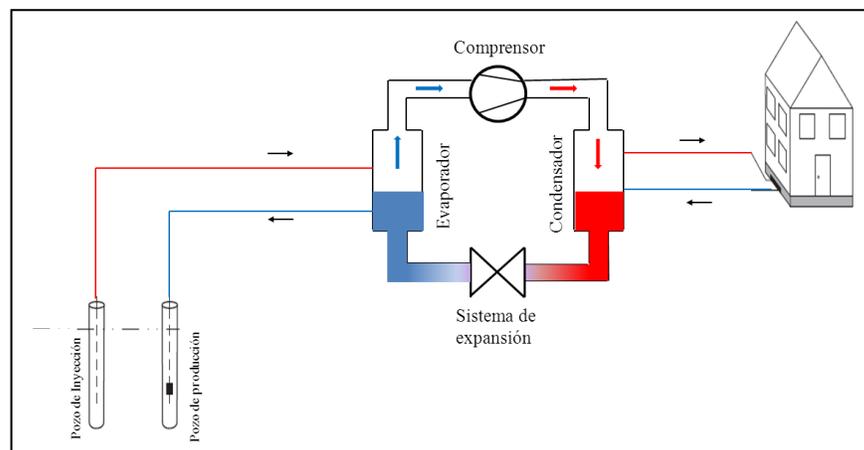


Figura 4. Componentes de una bomba de calor.

El sistema de intercambio de calor subterráneo, tiene como función extraer el calor que se encuentra almacenado en el suelo. Existen diferentes tipos de captadores, los cuales se diferencian en la forma en que captan la energía del subsuelo, estos son: sistema de captación geotérmica horizontal, vertical (abierta o cerrada) y cimientos geotérmicos. (Ver Figura 5). Por otra parte, el sistema de bomba de calor tiene por objetivo transferir y aumentar el calor del sistema externo. Este se compone por un compresor, un condensador, un sistema de expansión y un evaporador. Finalmente, el sistema de distribución tiene como finalidad dirigir el calor donde será utilizado (Self *et al.*, 2012).

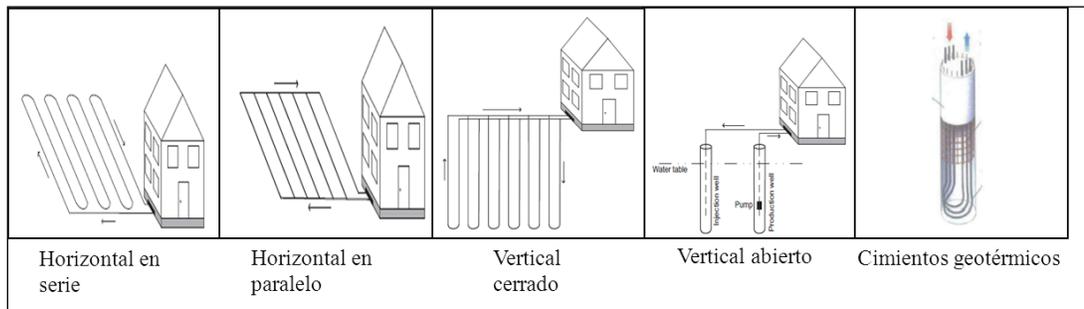


Figura 5. Tipos de sistemas de intercambiador de calor subterráneo.

### 3.2 Métodos de estimación del potencial geotérmico

Para estimar el potencial geotérmico, los métodos más utilizados a lo largo de la historia a nivel mundial son: el método de la fractura planar, el método del transporte de calor magmático, el método del flujo térmico superficial y el método del volumen (Iglesias y Torre, 2009). Estas metodologías identifican la reserva geotérmica posible, el cual corresponde a aquella reserva que ha sido identificada sólo mediante métodos con fundamentos geológicos. Por lo tanto, la identificación del recurso geotérmico a través de este tipo de metodologías es menos exacta que la identificación del recurso con métodos directos como la perforación (Williams *et al.*, 2011).

El *método de la fractura planar* consiste en estimar la cantidad de calor que extrae el agua subterránea de los planos de fracturas de las rocas impermeables en una zona determinada. Este método usa como parámetros principales la temperatura de entrada y de salida del fluido, la difusividad térmica y la distancia entre fracturas (Bodvarsson, 1970).

El *método de transporte del calor magmático* evalúa la cantidad de calor total transferido desde una cámara magmática a la superficie. Este método tiene como fundamento que en un sistema geotérmico volcánico la principal fuente de calor es el magma, el cual circula a pocas profundidades de la superficie terrestre transfiriendo el calor a estas zonas. Para esto utiliza 3 parámetros fundamentales, el volumen de la cámara, el estado de solidificación y la edad de la formación. Para evaluar el estado de solidificación es necesario estimar la temperatura inicial y final del magma, calor latente de cristalización, la capacidad calorífica y la densidad de la cámara magmática (Sanyal *et al.*, 2002). Este autor utiliza este método para realizar una estimación del potencial geotérmico de alta entalpía que existe en una zona volcánica de Nicaragua.

Por otra parte, el *método del flujo superficial* determina la cantidad de calor que se transfiere por medio del flujo de calor por conducción desde el suelo a la atmósfera y aguas superficiales, en un tiempo determinado. Para esto, el método del flujo superficial utiliza principalmente datos termodinámicos, como el flujo calórico conductivo, la temperatura del

aire, la temperatura del fluido geotérmico, densidad del fluido, capacidad calorífica del fluido y el caudal. La principal desventaja del método del flujo superficial es que sólo es aplicable en zonas donde existen manifestaciones termales. Por ende, en zonas donde no existen este tipo de manifestaciones en superficie, es posible que el potencial geotérmico no sea estimado correctamente (Muffler and Cattaldi, 1978).

Finalmente, el *método del volumen* calcula el calor que se encuentra almacenado en un determinado volumen de roca y agua (Schellschmidt and Hurter, 2003; Iglesias y Torre, 2009). Este método se basa en parámetros termodinámicos y geológicos, los cuales son: volumen del reservorio geotérmico, temperatura media, capacidad calorífica, densidad, y porosidad de la roca y del fluido geotérmico. Este método es posible aplicarlo en estudios de estimaciones del potencial geotérmico de alta, media y baja entalpía (Arkan and Parlaktuna, 2005).

De todos los métodos detallados anteriormente, el método volumétrico es el más usado en las investigaciones geotérmicas a nivel mundial. El método del volumen ha sido utilizado en estimaciones del potencial geotérmico en diferentes regiones del mundo, algunos, como por ejemplo, las estimaciones realizadas por Halldórsdóttir *et al* (2010) en Krafla (Islandia); Sarmiento and Steingrímsson (2011) en Filipinas (Mindanao); Doveria *et al.*, 2010 en Italia; Schellschmidt and Hurter (2003) en Europa; Iglesias y Torre (2009) en México; Arkan and Parlaktuna (2005) en Turquía (Balçova).

La masiva utilización del método volumétrico se debe principalmente a que los datos que necesita son sencillos de obtener, los cuales pueden ser medidos o en caso contrario estimados. Además, este método puede ser aplicado en cualquier entorno geológico (Muffler y Cattaldi, 1978). Es importante destacar que estos dos últimos métodos (flujo superficial y volumétrico) serán profundizados en la sección de metodología de la presente memoria.

### 3.3 Geotermia a nivel mundial y en Chile

Como fue mencionado anteriormente se estima que existe un potencial geotérmico de 5 millones de TJ por año a nivel mundial (WEA, 2000) y de 16.000 MW para Chile (sólo alta entalpía) (Lahsen, 1988). Respecto a la capacidad instalada para uso directo del calor es de 48.493 [MW/año] (Lund *et al.*, 2011) y de 9,11 [MW] (Lahsen *et al.*, 2010) a nivel mundial y en Chile respectivamente hasta el año 2010.

Chile cuenta con una intensa actividad volcánica (Ver Figura 6) la cual es producto de la subducción de las placas oceánicas Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana (Stern, 2004). Es importante destacar que a lo largo de la cordillera de los andes existen más de 2900 volcanes, de los cuales más de 80 se encuentran activos (González, 1995)

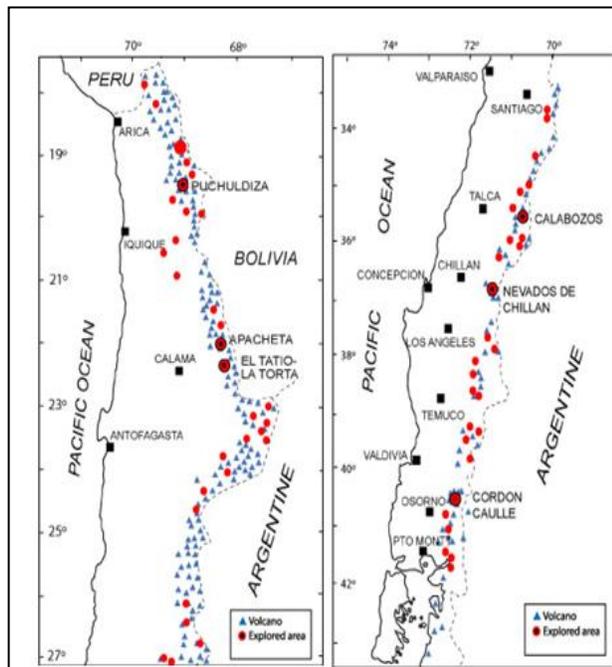


Figura 6. Zonas geotermales de Chile (Lahsen, 2008).

Por otra parte, la exploración y explotación geotérmica se encuentra regulada por la Ley N° 19.657, la cual define la energía geotérmica como aquella que se “obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin” (BCN. 2010). Esta ley establece que la energía geotérmica es “un bien del Estado, susceptible de ser explorada y explotada previo otorgamiento de una concesión geotérmica”. Hasta el año 2010, se otorgaron 52 concesiones de exploración y 6 concesiones de explotación geotérmica. Además, hasta el año 2012 sólo han ingresado dos proyectos para generar electricidad con energía geotérmica al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Área de estudio

La presente memoria se realizó en la comuna de Colina, la cual está localizada en la zona central de Chile ( $32^{\circ} 21' - 32^{\circ} 57'$  latitud Sur y  $70^{\circ} 24' - 70^{\circ} 10'$  de longitud Oeste), sector nor-este de la Región Metropolitana, provincia de Chacabuco (Ver Figura 7) (Opazo, 2005). La comuna de Colina posee una superficie total de  $985 \text{ [km}^2\text{]}$ , de los cuales sólo el 1% equivale a suelo urbano, mientras que el resto corresponde a suelo rural (SINIM, 2010).

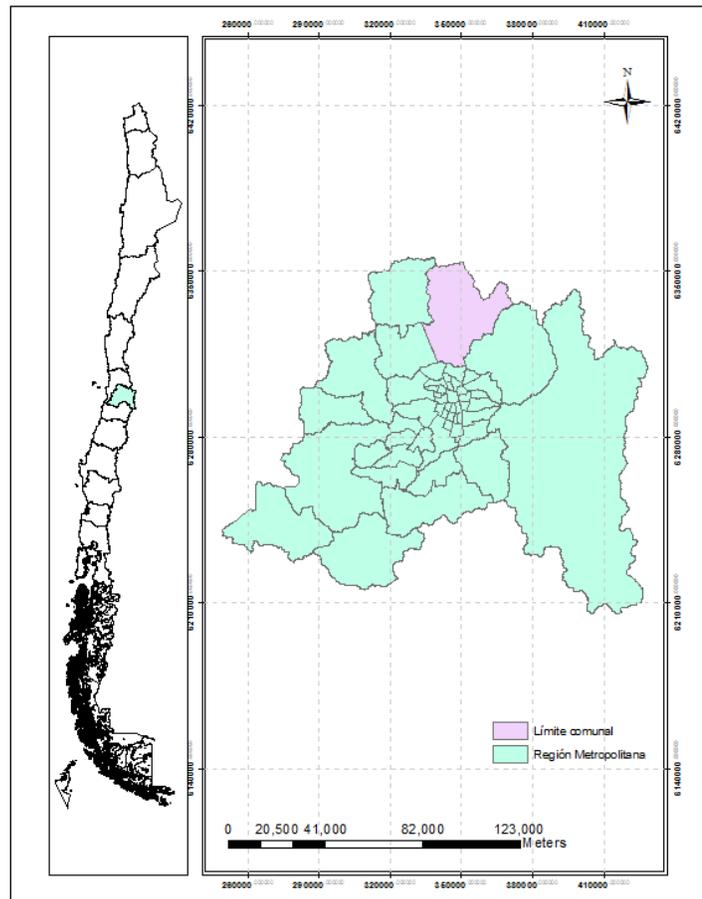


Figura 7. Ubicación geográfica de la comuna de Colina (Morlans, 2010).

En cuanto a la clasificación climática, Köppen afirma que el clima de la zona corresponde a templado cálido con lluvias invernales (Peel *et al*, 2007). El promedio anual de precipitaciones es de 300 y 400 [mm], siendo los meses más lluviosos Junio, Julio y Agosto, presentando una media mensual de precipitaciones de 90 [mm] en el mes más lluvioso. Además, en la zona la temperatura promedio anual es de  $14,5 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ , registrándose

temperaturas mínimas cercanas a los 0 [°C] en el mes más frío (julio) y máximas de 30 [°C] en el mes más cálido (enero) (Ver Figura 8).

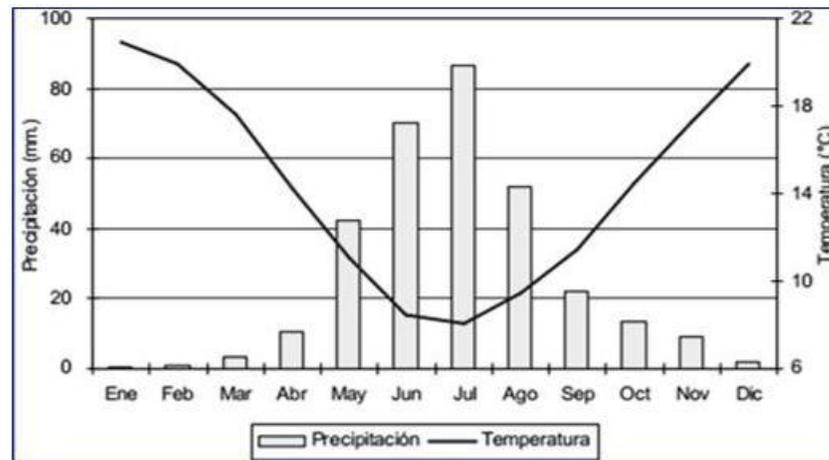


Figura 8. Climograma de Colina (DMC, 2001).

Por otra parte, hasta el año 2002 la comuna de Colina poseía una población de 77.815 habitantes, con una tasa media de crecimiento de 3,87% en el período del 1992 al 2002, habitando el 80% de la población total en la zona urbana (SINIM, 2010). La principal vocación productiva de la comuna es la producción agrícola, especialmente hortalizas y frutales, con 3.104,98 [Ha] y 2.720,7 [Ha] respectivamente, de un total de 7.025,5 [Ha] cultivadas (Censo Agropecuario, 2007).

En cuanto a las características geológicas del área de estudio, se aprecia que presenta una edad geológica de 158 a 140 Millones de años, y está compuesta por las siguientes formaciones geológicas (SERNAGEOMIN, 2003):

- A. Secuencias volcano sedimentarias continentales (Ks3a): lavas, domos y brechas basálticos a dacíticos con intercalaciones piroclásticas y epiclásiticas. Pertenece a la Era Mesozoico, Periodo Cretácico y Época Superior.
- B. Secuencias volcano sedimentarias (OM2c): lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásiticas y piroclásticas. Pertenece a la Era Cenozoico, Periodo Paleógeno y Época Oligoceno-Mioceno.
- C. Complejo volcánico parcialmente erosionado y secuencias volcánicas (M3i): lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. Pertenece a la Era Cenozoico, Periodo neógeno y Época Mioceno Inferior- Medio.
- D. Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa (Q1): en menor proporción fluvio glaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. Pertenece a la Era Cenozoico, Periodo cuaternario y Época Pleistoceno-Holoceno.

En relación a las características hidrogeológicas que presenta la zona, la cuenca formada por el Estero Colina abarca casi la totalidad del territorio de la comuna, con una superficie

de 905 [km<sup>2</sup>]. Esta cuenca hidrográfica presenta un régimen pluvial, y está comprendida por 5 subcuencas: Colina Inferior, Colina Superior, Santiago Norte, Chicureo y Colina Superior (DGA, 2004). Éste posee una superficie de 446 [km<sup>2</sup>] (Ver Figura 9) y está formado por 3 unidades estratigráficas contiguas (DGA, 2002a), estas son:

- A. Unidad Colina 1: esta unidad se encuentra a mayor profundidad, está constituida principalmente por sedimentos de fina granulometría y por una porción clástica mayor. Presenta una permeabilidad media cercana a  $10^{-6}$  [m/s] y su profundidad media es cercana a los 80 metros.
- B. Unidad Colina 2: está constituida principalmente por sedimentos cuya fracción clástica mayor está conformada por arenas, gravas y ripios. Presenta una permeabilidad media entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  [m/s] y su profundidad media es cercana a los 100 metros.
- C. Unidad Colina 3: presenta una fracción de arenas medias a finas y una matriz arcillosa. El espesor medio de esta unidad es de 70 metros y la permeabilidad media varía entre  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  [m/s].

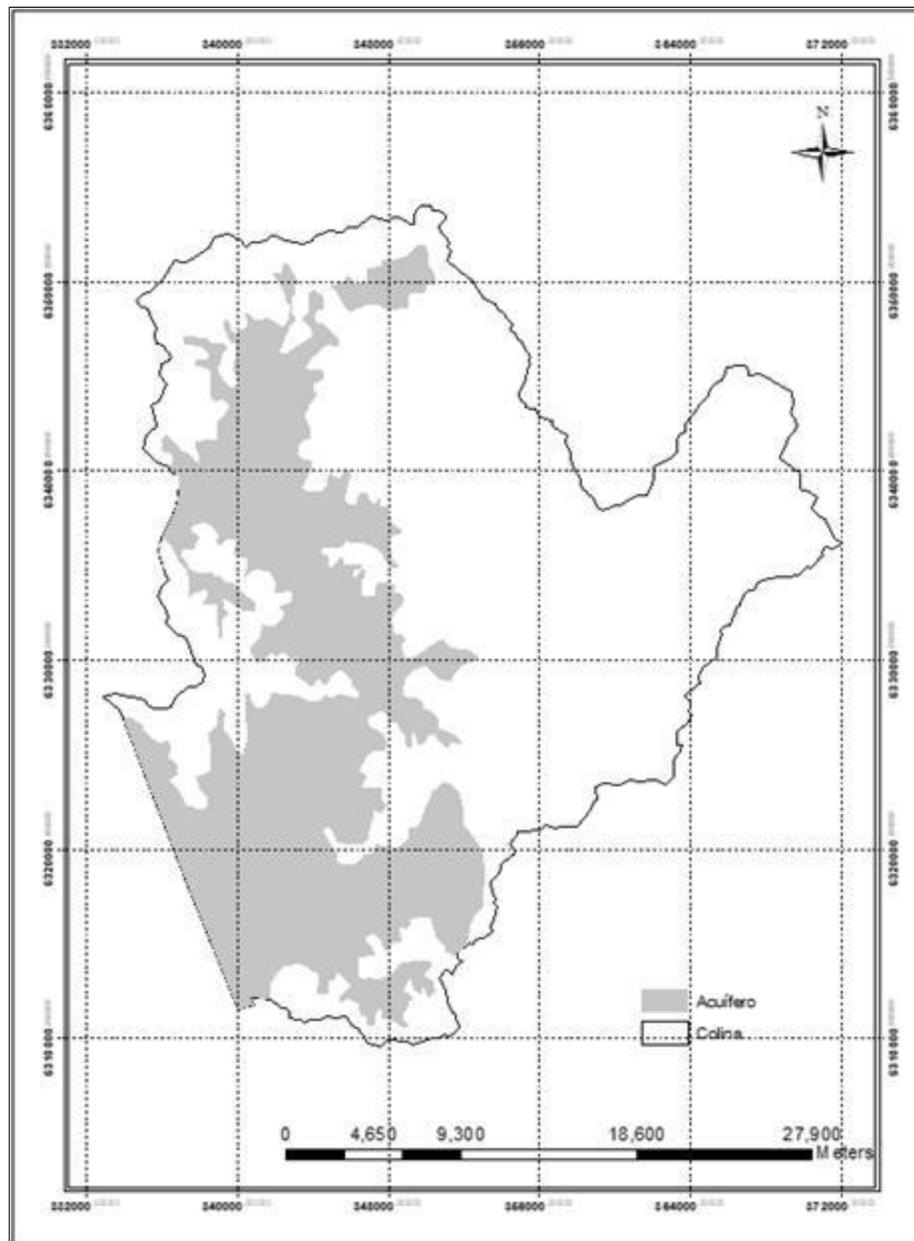


Figura 9. Acuífero presente en la comuna de Colina (DGA, 2002a).

Los sistemas termales que están presentes en el área de estudio corresponden a Colina-Peldehue y Carvajalino. La primera terma está ubicada a 948 m.s.n.m, presenta una temperatura de la fuente termal entre 29 - 32 [°C] (medida in situ) y una temperatura media anual del aire de 14,6 [°C]. La segunda fuente termal está ubicada a 813 m.s.n.m, presenta una temperatura del sistema termal de 22,9 [°C] (medida in situ), y una temperatura media anual del aire de 14,5 [°C] (Hauser, 1997; Martini, 2008).

## 4.2 Materiales

Para realizar la estimación del PGBE y evaluar la rentabilidad de proyectos que utilizan este tipo de energía calórica, se utilizaron distintas categorías de datos. Estos pueden ser clasificados en: datos del medio biofísico, datos cartográficos y datos económicos.

### 4.2.1 Datos biofísicos

Esta categoría de datos fue utilizada para estimar la cantidad de calor geotérmico que se puede aprovechar con fines antrópicos. Para esto fue necesario obtener información del fluido geotérmico (fluido termal o agua subterránea) y de la formación geotérmica (acuífero). Específicamente, se utilizaron valores de temperatura del aire, temperatura del acuífero, porosidad, capacidad calorífica, densidad del agua y de la formación geotérmica, caudal másico y flujo calórico. Además, se caracterizó la composición química del fluido termal.

En el caso de la temperatura del aire, se utilizó el promedio anual. Este fue obtenido mediante el promedio de las medias mensuales en un periodo de 3 años (2009-2011). Es importante destacar que este conjunto de datos fue medido a dos metros de altura sobre el suelo. Además, estos valores fueron adquiridos del muestreo de 2 estaciones agrometeorológicas, las cuales están ubicadas específicamente en la zona sur de la comuna de Colina (Chileclima, 2012) (Ver Figura 10).

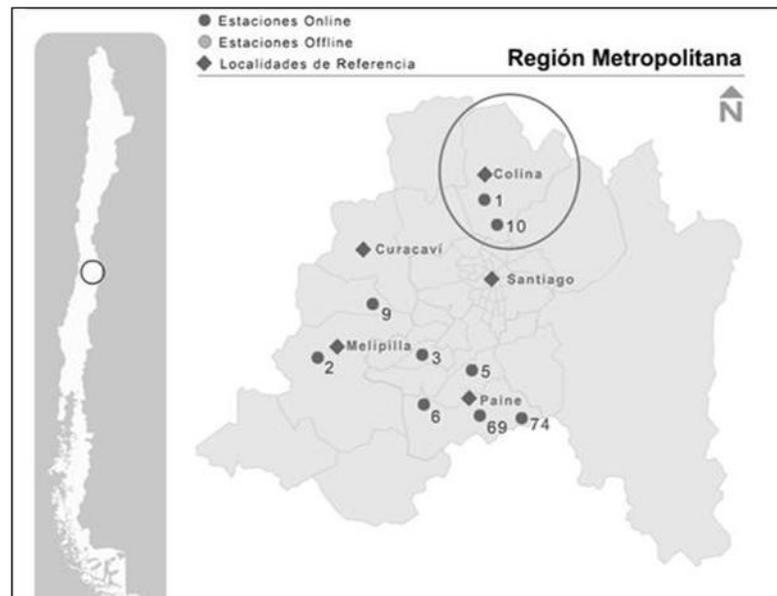


Figura 10. Localización de las estaciones meteorológicas de la comuna de Colina. (Chileclima, 2012).

Por otra parte, se utilizaron las temperaturas de las aguas subterráneas de 21 pozos, las cuales fueron medidas en superficie al momento de ser extraído el recurso hídrico. Además, los 21 pozos se encuentran distribuidos principalmente en la zona Poniente de la comuna de Colina (Ver Figura 11). Los datos fueron obtenidos de un estudio realizado por la DGA en el año 1998, el cual caracteriza la calidad de las aguas subterráneas de la Región Metropolitana (DGA, 2002b).

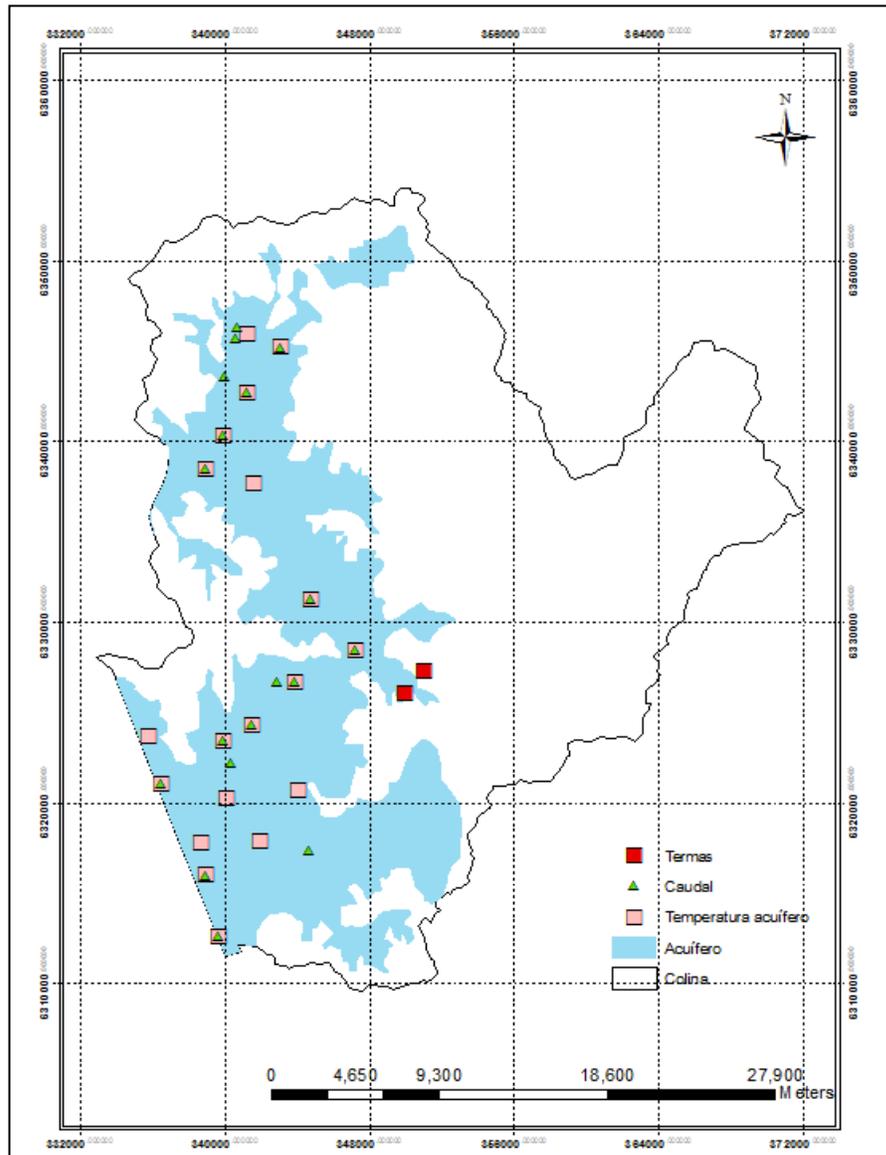


Figura 11. Localización de los pozos con información de temperatura y caudal másico de las aguas subterráneas del acuífero de la comuna de Colina.

Para evaluar cuál es la temperatura del agua subterránea en el acuífero, se utilizó el método de los geotermómetros los cuales estiman la temperatura del fluido termal a partir de la composición química de este. Por ende, fue necesario contar con datos de concentración de

los siguientes constituyentes químicos: Na, K, Mg, Ca y SiO<sub>2</sub>. Estos valores fueron obtenidos de los estudios realizados por Hauser en el año 1997 y por la DGA (2002b), en los cuales se realiza una caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile y específicamente de la Región Metropolitana.

Sumado a lo anterior, se utilizaron valores de caudal másico<sup>1</sup> de 11 pozos ubicados en el área de estudio (Ver Figura 11), obtenidos del informe de la DGA (2002b). Asimismo, la densidad corresponde a la razón entre la masa y el volumen de una sustancia en estudio (Tambutti y Muñoz, 2002), por lo tanto su unidad de medida es [Kg/m<sup>3</sup>]. La densidad del agua de la formación geotérmica fue obtenida del estudio realizado por Risacher *et al.* en el año 2011. Y la densidad de la roca de almacén de la formación geotérmica fue obtenida de Sanyal *et al.* (2002).

Otro dato necesario para la estimación del PGBE, es la capacidad calorífica definida como la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado Celsius en un kilo gramo de sustancia, su unidad de medida es [J/Kg °C]. Por lo tanto corresponde a la capacidad de una sustancia de absorber calor del entorno (Callister, 1996.). La capacidad calorífica del agua de la formación geotérmica fue obtenida de un estudio realizado por Gutiérrez y Parada en el año 2010. Y en el caso de la capacidad calorífica de la roca de almacén el valor fue obtenido de Sanyal *et al.* (2002).

La porosidad eficaz de la formación es otro dato relevante en la estimación del PGBE. Este parámetro corresponde al porcentaje de volumen de poros por los cuales puede circular el agua sobre el volumen total de roca, por lo tanto este dato no tiene unidad de medida (Muñoz y Ritter. 2005). La porosidad dependerá del tipo de roca que está presente en el área de estudio. Y este valor se obtuvo de un estudio realizado por Sanyal *et al.* en el año 2002.

En cuanto al volumen de la formación geotérmica, este fue calculado por medio del producto entre el área de una sección del acuífero y de la profundidad media de éste. La sección de área del acuífero fue estimada en base a un área mínima de influencia (30 x 30 [m]), la cual fue definida de forma arbitraria teniendo en cuenta que el PGBE y el área son directamente proporcionales. La profundidad media del acuífero presente en el área de estudio fue obtenido de un estudio realizado por la Dirección general de Aguas (DGA) (DGA, 2002a).

El flujo de calor conductivo, necesario en la estimación del potencial geotérmico, corresponde a la velocidad con que se transfiere el calor en una dirección x en un área perpendicular a la dirección de transferencia, la unidad de medida es [W/m<sup>2</sup>] (Incropera y DeWitt, 1999). Este valor fue estimado en un estudio realizado por Hamza y Muñoz en el año 1996, en cual caracterizan el flujo calórico de Sudamérica.

---

<sup>1</sup> El caudal másico corresponde a la masa de un fluido que circula en una sección por una determinada unidad de tiempo, su unidad de medida es [Kg/s] (Mott, 2006).

Por otro lado, para calcular que cantidad de la energía total extraída de los pozos geotérmicos es posible aprovecharla como calor, se debió estimar el factor de recuperación. Para esto se utilizaron datos de temperatura de producción y de inyección (Schellschmidt and Hurter, 2003). El primer dato se refiere a la temperatura a la cual ingresa el fluido al sistema de distribución donde será utilizada la energía, y el segundo es la temperatura con la cual fluido sale del sistema. Finalmente, para establecer cuáles son los tipos de suelos presentes en la comuna de Colina, se acudió al estudio agrológico de la Región Metropolitana elaborado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) en el año 1996. En este estudio realizan una caracterización de las series de suelo presente en toda la región de Metropolitana.

#### **4.2.2 Datos cartográficos**

Esta categoría de información se utilizó para generar la zonificación del PGBE de la comuna de Colina. Para esto se ocuparon las siguientes capas de información cartográfica, lo cual se puede ver en el Cuadro 1. Se utilizó el software de Sistema de Información ArcGis 9.1 para el procesamiento de las coberturas cartográficas.

Cuadro 1. Características y fuentes de los datos cartográficos utilizados<sup>2</sup>.

Dato	Característica	Escala	Fuente	Sitio de descarga
Límite administrativo	Corresponde al límite comunal.	1:250.000	BCN*	<a href="http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/">http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/</a>
Límite de la cuenca hidrográfica	Área en la cual las aguas fluyen y convergen en un punto principal	1:250.000	DGA	<a href="http://oirs.mop.gov.cl/Vista/Ingreso/Ingreso.aspx">http://oirs.mop.gov.cl/Vista/Ingreso/Ingreso.aspx</a> <sup>3</sup>
Límite del acuífero	Límite de una zona de rocas permeables, a través de las cuales el agua subterránea se mueve.	1:250.000	DGA	
Usos de suelo	Capa compuesta por diferentes usos que se dan en el territorio.	1:250.000	CONAF*	<a href="http://territorial.sinia.cl/portal/descargas.php">http://territorial.sinia.cl/portal/descargas.php</a>
Ubicación de pozos	Localización de los 32 pozos utilizados con la finalidad de obtener información de temperatura y caudal del agua subterránea.	1:250.000	DGA	<a href="http://sad.dga.cl/">http://sad.dga.cl/</a>
Serie de suelos de Colina	Representa los tipos de suelos y sus características.	1:250.000	CIREN*	No se encuentra disponible para descarga

<sup>2</sup> Las coberturas utilizadas se encontraban en proyección cartográfica UTM, Datum WGS84.

<sup>3</sup> Información disponible mediante ley de transparencia y acceso a la información pública (Ley N° 20.285)

\* Biblioteca del Congreso Nacional (BCN); Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF); Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)

### 4.2.3 Datos económicos

Esta categoría de datos fue utilizada para evaluar la rentabilidad de proyectos que usan la energía geotérmica de baja entalpía, para lo cual se utiliza como tecnología de extracción las bombas de calor geotérmicas, pudiendo usar sistemas de intercambio vertical u horizontal (ver Figura 5). El detalle de las características y fuente de obtención de la información usada para analizar esta rentabilidad se encuentra detallada en el siguiente Cuadro.

Cuadro 2. Características y fuentes de los datos económicos utilizados para evaluar la rentabilidad de un proyecto de Bomba de Calor Geotérmica.

Datos	Característica	Fuente
Costos de inversión	Este punto incluye el costo de la bomba de calor, los costos del sistema de captación (ya se perforación en caso de un sistema vertical o de los costos de excavación en el caso de un sistema horizontal). Además, los costos en materiales para el sistema de distribución. Por último, los costos de mano de obra para la instalación del sistema completo.	- ENativa (2012)
Costos de operación	Costos anuales asociados a la utilización de la bomba calor. Este sistema utiliza como fuente de energía de apoyo la electricidad.	
Costos de mantención	Costos anuales para la mantención de la bomba de calor, del sistema de distribución y de captación del recurso geotérmico.	
Costos de consumo de otra energía	Costos del gas licuado (\$ por kilogramo), del kerosene doméstico (\$ por litro) o de la electricidad (\$ por KW).	- Comisión Nacional de Energía (CNE) - Eléctrica Colina

Por otro lado, fue necesario contar con información de la demanda de energía térmica necesaria para la calefacción de una vivienda en invierno. Para obtener estos datos se necesitó contar con valores del área de la construcción, los grados días de calefacción y del coeficiente global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente de los materiales con los cuales está construida la vivienda (muro, techo, piso, ventana y puertas). Según la Norma Chilena Oficial 1960 oficial (1989) el coeficiente global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente corresponde a “Flujo térmico que se transfiere a través de la envolvente del edificio (o parte de él), referido a la unidad de volumen, impulsado por la unidad de temperatura entre el ambiente interior y el ambiente exterior” (INN, 1989). Los

valores de cada material utilizado para los diferentes componentes de la vivienda fueron obtenidos de la Norma Chilena Oficial 853 oficial (1991). El volumen y los tipos de materiales de construcción de la vivienda fueron definidos bajo diferentes supuestos los cuales serán explicados en la sección de resultados y análisis (INN, 2007). Finalmente, los grados días de calefacción es la suma de las diferencias entre la temperatura de confort térmico (14 [°C] según Fissore y Colonelli (2009)) y la temperatura media mensual (Chileclima, 2012).

### 4.3 Método

La metodología desarrollada en la presente memoria se compone de cuatro etapas fundamentales tales como: la estimación del PGBE, evaluación del método del volumen y el método de flujo térmico superficial para la estimación del PGBE, zonificación de este potencial y el análisis de la factibilidad técnica y económica para el aprovechamiento de esta energía

#### 4.3.1 Estimación del PGBE en la comuna de Colina.

Para realizar la estimación del PGBE presente en la comuna de Colina se cuantificaron las temperaturas del agua del acuífero en profundidad, para lo cual se utilizaron los siguientes métodos de estimación: los geotermómetros y la ley de Fourier. Posteriormente, se interpolaron estas temperaturas a toda el área de estudio, aplicando el método del Kriging por bloques. Finalmente, se realizó la estimación del PGBE empleando el método del Volumen y el método del flujo térmico superficial. La figura 12 muestra el diagrama de flujo realizado para la estimación del PGBE.

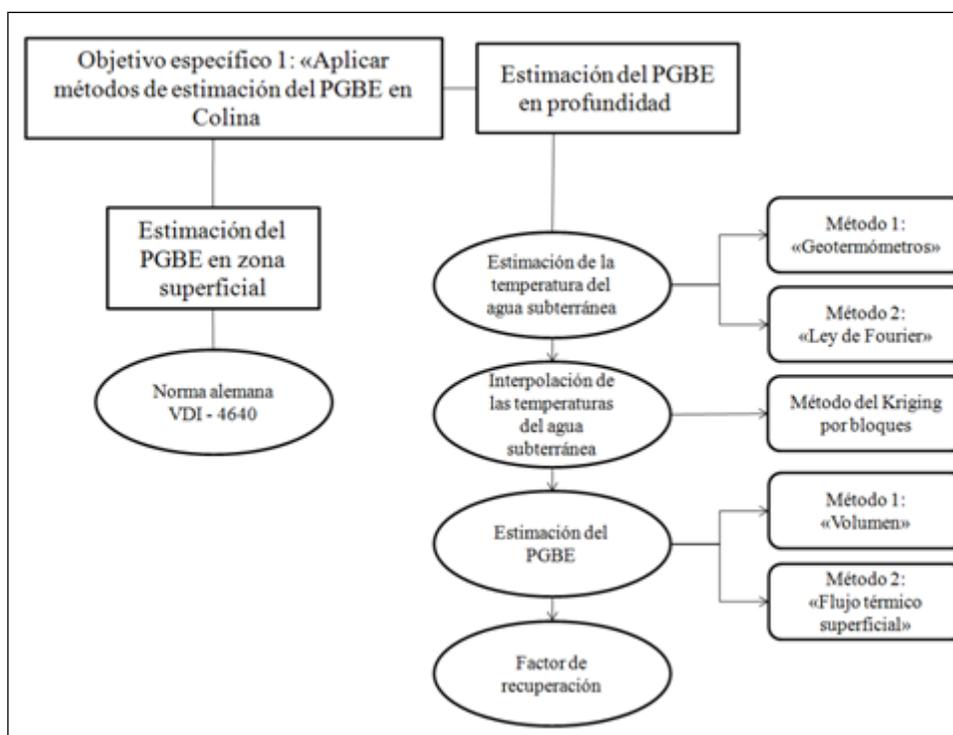


Figura 12. Diagrama de flujo del método del objetivo específico 1.

#### 4.3.1.1 Estimación de las temperaturas del acuífero.

Se utilizaron los métodos de los geotermómetros y la ley de Fourier, con la finalidad de estimar la temperatura del fluido geotérmico en profundidad, posteriormente se evaluó cuál de estos métodos no presentó sesgos para el área de estudio:

- i. *Ley de Fourier*: define que el flujo de calor que es transferido a través de una superficie es proporcional al gradiente de temperatura e inversamente proporcional a la profundidad. Además, éste queda definido en función de la conductividad térmica del medio en el cual tiene lugar el proceso (Gruber and Lesne, 2005), la ecuación de esta Ley se puede ver a continuación:

$$Q = \lambda \cdot \frac{T}{P}$$

Ecuación 1. Ley de Fourier

Donde, Q representa el flujo calórico presente en la zona, el cual es medido en  $[W/m^2]$ . T representa la temperatura  $[^{\circ}C]$  del fluido a evaluar, P la profundidad  $[m]$  a la cual se encuentra, y  $\lambda$  la conductividad térmica  $[W/m^{\circ}C]$  del medio en el cual ocurre el proceso

- ii. *Geotermometría Química*: los termómetros geoquímicos son indicadores de la temperatura a la cual se encuentra el agua subterránea en el reservorio (Arnórsson, 2000). Para determinar esto, se realiza un análisis químico del fluido termal. Estos utilizan como fundamento teórico que el tipo de minerales disueltos en el agua termal dependerá de la temperatura del acuífero donde el agua se encuentra en equilibrio químico con la roca madre (Fournier, 1977). Los métodos de cálculo geotermométricos que se han utilizado en este caso son de dos tipos: el de concentración de Sílice y el de cationes. Estos métodos fueron seleccionados porque presentan un menor error asociado en la estimación de la temperatura en profundidad, cuando un fluido tiene mayor probabilidad de contener baja entalpía (menor a  $100 [^{\circ}C]$ ) (Karingithi, 2009). Ambos métodos se presenta a continuación:
  - a. Geotermómetro de Sílice: este indicador utiliza como fundamento que la solubilidad del sílice aumenta a medida que la temperatura asciende. Fournier (1973) apreció que la dependencia de la solubilidad del sílice con la temperatura del fluido es lineal entre los  $20$  y  $250 [^{\circ}C]$  (ver Ecuación 2). La ecuación utilizada para rangos de temperaturas menores a  $100 [^{\circ}C]$  es la siguiente:

$$T(^{\circ}C) = \frac{1309}{5,19 - \log(SiO_2)} - 273$$

Ecuación 2. Geotermómetro de Sílice.

- b. Geotermómetros de Cationes: Estos indicadores se basan en las reacciones de intercambio catiónico. El cual considera como fundamento técnico que la concentración de ciertos cationes decrece a medida que aumenta la temperatura del fluido geotérmico (Xilai *et al.* 2002). En la Cuadro 3 se caracterizan 5 tipos de geotermómetros de cationes.

Cuadro 3. Caracterización de los geotermómetros de cationes para la estimación de la temperatura del agua subterránea en profundidad.

Geotermómetro	Ecuación	Referencia
Na-K Fournier	$T = \left( \frac{1217}{1,483 + \log \left( \frac{Na}{K} \right)} \right) - 273$	Fournier, 1973
Na-K Truesdell	$T = \left( \frac{855,6}{0,8573 + \log \left( \frac{Na}{K} \right)} \right) - 273$	Truesdell, 1976
Na-K Giggenbach	$T = \left( \frac{1390}{1,75 - \log \left( \frac{Na}{K} \right)} \right) - 273$	Giggenbach, 1988
K-Mg Giggenbach	$T = \left( \frac{4410}{13,95 - \log \left( \frac{K^2}{Mg} \right)} \right) - 273$	Giggenbach, 1988
	$T = \left( \frac{1647}{\log \left( \frac{Na}{K} \right) + \beta \cdot \log \left( \frac{\sqrt{Ca}}{Na} \right) + 2,24} \right) - 273$	
	$\beta$ es 4/3 si:	
Na-K-Ca Truesdell y Fournier	$\sqrt{\frac{Ca}{Na}} > 1$ y $T < 100^\circ\text{C}$	Fournier and Truesdell, 1973
	$\beta$ es 1/3 si:	
	$\sqrt{\frac{Ca}{Na}} < 1$ y $T > 100^\circ\text{C}$	

#### 4.3.1.2 Interpolación espacial de las temperaturas del acuífero.

El método Kriging por bloques fue utilizado con el objetivo de generar una interpolación espacial de las temperaturas del agua subterránea en toda el área de estudio. Este método consiste en realizar una ponderación de cada valor observado. Esta ponderación se estima buscando minimizar la varianza del valor estimado. Las ponderaciones asociadas con los puntos a estimar son determinadas por la dirección y la distancia a otros datos conocidos (Matheron, 1969).

Este método de interpolación realiza una descripción de la correlación espacial que existe entre los valores de un atributo distribuido en el espacio. Los valores desconocidos  $z(A)$  son tratados como un conjunto de variables aleatorias espacialmente dependientes (Beers and Kleijnen, 2004). Específicamente, el método Kriging por bloques busca estimar el valor de un área específica, calculando el promedio de la variable dentro del bloques (Ver Figura 13) (Matheron, 1969).

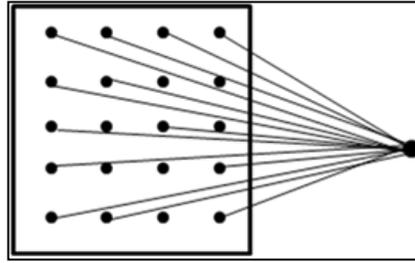


Figura 13. Método de Kriging por bloques (Armstrong, 1998).

El valor promedio dentro del bloques se estima mediante la Ecuación 3 (Armstrong, 1998). Es importante destacar que para realizar la interpolación de las temperaturas sólo se utilizó el 70% de los datos disponibles. Con el objetivo de utilizar el 30% restante para validar estadísticamente este modelo.

$$Z(A) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

Ecuación 3. Kriging por bloques

### 4.3.1.3 Estimación de PGBE:

El contenido calórico del recurso hidrogeotermal en profundidad fue determinado mediante el método del volumen y el método del flujo térmico superficial. Estos métodos estiman básicamente la cantidad de energía calórica que es posible extraer desde un recurso geotérmico a diferentes profundidades. Estas metodologías se fundamentan en parámetros termodinámicos específicos de la formación geológica para estimar el potencial geotérmico de baja entalpía.

El primer método utilizado es del volumen, el cual proporciona una estimación de la energía calórica contenida en un volumen determinado de roca, para esto utiliza parámetros termodinámicos como la temperatura, densidad calorífica, capacidad calorífica y volumen. (Schellschmidt and Hurter, 2003). Su ecuación se presenta a continuación.

$$H_0 = \{(1-\phi) \cdot \rho_r \cdot C_r + \rho_a \cdot C_a \cdot \phi\} \cdot (T_t - T_0) \cdot S \cdot E$$

Ecuación 4. Método volumétrico

El parámetro  $H_0$  representa el calor en [J] almacenado en la formación,  $\phi$  la porosidad eficaz de la formación,  $\rho_r$  y  $\rho_a$  representan la densidad de la roca de almacén y la del agua respectivamente medidos en  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ . Además,  $[\text{Kg}/\text{m}^3]$   $C_r$  y  $C_a$  son la capacidad calorífica de la formación geotérmica y del agua respectivamente utilizados en  $[\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$ . La temperatura media de la formación está definida por  $T_t$  y  $T_0$  representa la temperatura media en superficie en  $[\text{°C}]$ . Por último,  $S$  representa la superficie del acuífero en  $[\text{m}^2]$  y  $E$  es el espesor medio útil de la formación geotérmica  $[\text{m}]$ .

El segundo método en estudio es el del flujo térmico superficial, el cual consiste en medir la tasa de energía termal liberada del suelo por efectos de conducción, en un tiempo determinado, y las descargas directas de fluidos termales a la superficie (ver Ecuación 5) (Muffler and Cattaldi, 1978).

$$H_0 = [(A \cdot q) + \{Q \cdot C \cdot (T - T_a)\}] \cdot t$$

Ecuación 5. Método de flujo térmico superficial

En este caso el área de la formación en  $[\text{m}^2]$  está representada por  $A$ . Además,  $q$  es el flujo de calor conductivo medido en  $[\text{J}/\text{s}]$ ,  $Q$  representa el caudal másico en  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ,  $C$  es la capacidad calorífica del fluido descargado en  $[\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$ . Finalmente,  $T$  es la temperatura del fluido descargado en  $[\text{°C}]$ ,  $T_a$  representa la temperatura del aire en  $[\text{°C}]$  y  $t$  es el tiempo de evaluación en  $[\text{s}]$ .

Posteriormente, para establecer la fracción de energía utilizable en el caso de ambos métodos, se ocupó el factor de recuperación geotérmica, el cual representa la relación entre energía geotérmica extraída y utilizada y la total contenida originalmente en un volumen subterráneo dado de roca y agua (Doveria *et al.* 2010). Esta fracción está expresada como

aquel porcentaje extraído en función del total disponible en el reservorio. Es importante destacar que este valor será el PGBE aprovechable en la zona de estudio según la Figura 2.

Por otra parte, se utilizó la norma VDI-4640 para estimar el calor contenido en la zona más superficial del suelo. Este método consiste en cuantificar el gradiente térmico del suelo en función de la estructura y del contenido de humedad de la serie de suelo existente en el área de estudio (Ver Cuadro 4). Sin embargo, es importante destacar que este método de estimación del PGBE es exclusivo para proyectos de captaciones geotérmicas horizontales.

Cuadro 4. Clasificación del gradiente térmico de las series de suelo en base a la norma alemana VDI-4640.

Terreno	Horas de Calefacción al año	
	1800 horas	2400 horas
Seco y material no cohesivo	10 W/m <sup>2</sup>	8 W/m <sup>2</sup>
Húmedo y material cohesivo	20-30 W/m <sup>2</sup>	16-24 W/m <sup>2</sup>
Material saturado de agua, poco poroso y cohesivo	40 W/m <sup>2</sup>	32 W/m <sup>2</sup>

### 4.3.2 Evaluación de los métodos de estimación del PGBE.

En la presente sección se evaluó la significación estadística de la interpolación de las temperaturas del agua subterránea en profundidad, efectuado mediante el método Kriging por bloques, con el objetivo de validar este modelo. Por otra parte, se realizó una comparación de los resultados del PGBE obtenidos con ambos métodos de estimación nombrados anteriormente (Ver Figura 14).

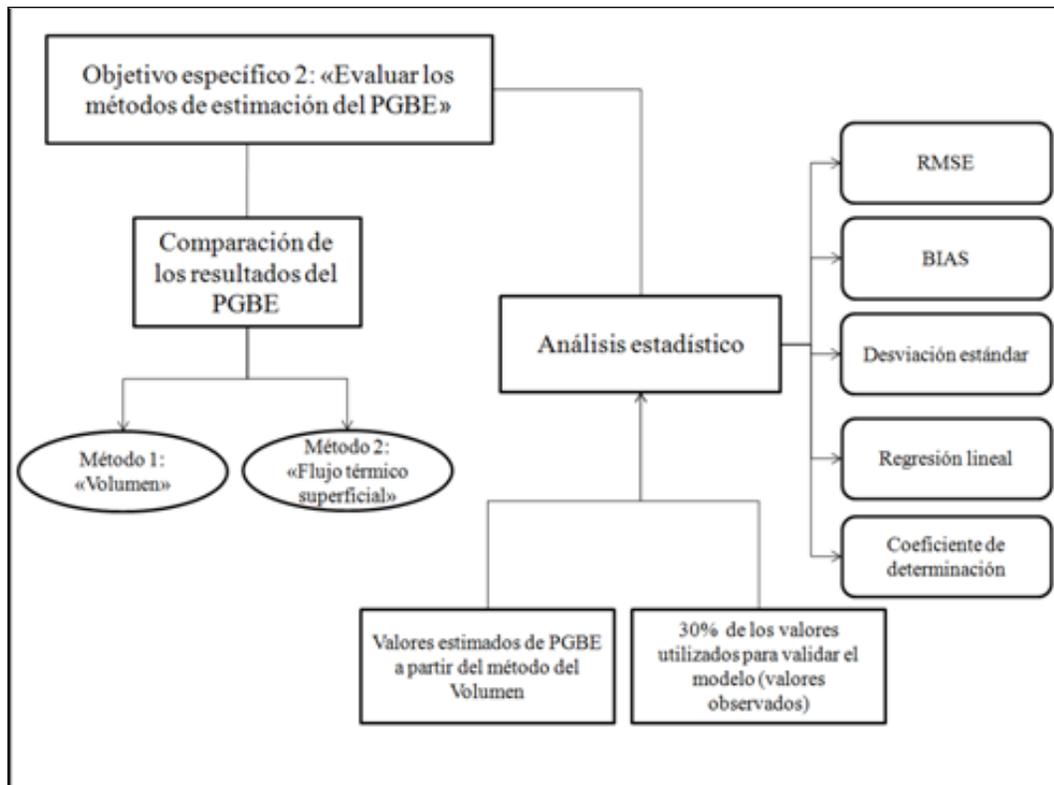


Figura 14. Diagrama de flujo del método del objetivo específico 2.

#### 4.3.2.1 Análisis estadístico

Se compararon los valores observados con los valores estimados, con el objetivo de evaluar el modelo de interpolación de las temperaturas del acuífero. En este caso se entiende por valores estimados aquella información calculada a partir del modelo de interpolación por Kriging por bloques. Por otra parte, los datos observados corresponden al 30% restante de la información obtenida mediante búsqueda bibliográfica, los cuales fueron medidos previamente en terreno. Para cumplir este objetivo se utilizaron los siguientes estadísticos:

- a. Desviación estándar: esta medida de dispersión de los datos se define como la raíz cuadrada del promedio aritmético de las diferencias entre cada uno de los valores del conjunto de datos y la media aritmética del conjunto, elevadas al cuadrado. Esta medida establece el tamaño de las desviaciones con respecto a la media aritmética (Navarro, 2003).
- b. BIAS o sesgo: Este estadístico indica el error sistemático producido por el modelo (Navarro, 2003).
- c. RMSE: corresponde a la raíz cuadrada del error medio cuadrático, el cual calcula el promedio de las diferencias entre los valores pronosticados y los valores observados. Mientras este estadístico sea más cercano a cero mejor será la estimación realizada (Navarro, 2003).
- d. Regresión lineal: modelo que evalúa la relación entre la variable independiente  $x$  con la variable dependiente  $Y$  (Montgomery, 2002).
- e. Coeficiente de determinación: mide la asociación lineal entre dos variables. Por lo tanto, si el valor de este indicador es cercano a uno las variables estudiadas tendrán mayor correlación entre sí (Montgomery, 2002).

#### **4.3.2.2 Comparación de los resultados del PGBE**

En este ítem se realizó una comparación de los resultados del PGBE obtenidos mediante la utilización del método del volumen y del método de flujo calórico superficial. La finalidad de este punto es evaluar posibles sub o sobre estimaciones del PGBE estimado por ambos métodos.

### 4.3.3 Zonificación del PGBE de la comuna de Colina.

Mediante la técnica del análisis multivariado de datos, se identificaron zonas con características similares de PGBE en la comuna de Colina. Para esto se realizó un análisis de conglomerados (*Cluster*), el cual tiene por finalidad agrupar elementos para encontrar la máxima homogeneidad en un grupo, y lograr la máxima diferencia con otros. Se utilizó el algoritmo de *peaks* de histogramas, el cual identifica los valores *peaks* de una imagen, y asigna todos los datos al *peak* más próximo. Por lo tanto, la división entre dos *Clusters* se ubica entre el punto medio de dos *peaks* (Ver Figura 15). Por otra parte, es importante destacar que un histograma corresponde a una representación gráfica en forma de barras de una variable, en la cual la altura de cada barra representa la frecuencia de la variable en estudio. Por otra parte, un *peak* es aquel valor que tiene mayor frecuencia que sus vecinos más cercanos. El histograma de una imagen de  $N \times M$  píxeles es obtenida de la siguiente Ecuación 6, donde  $h_f(i)$  representa la frecuencia de valor  $i$  (Richards, 1993).

$$h_f(t) = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M (f(x, y) = t)$$

Ecuación 6. Frecuencia del valor  $i$  para la construcción de un histograma.

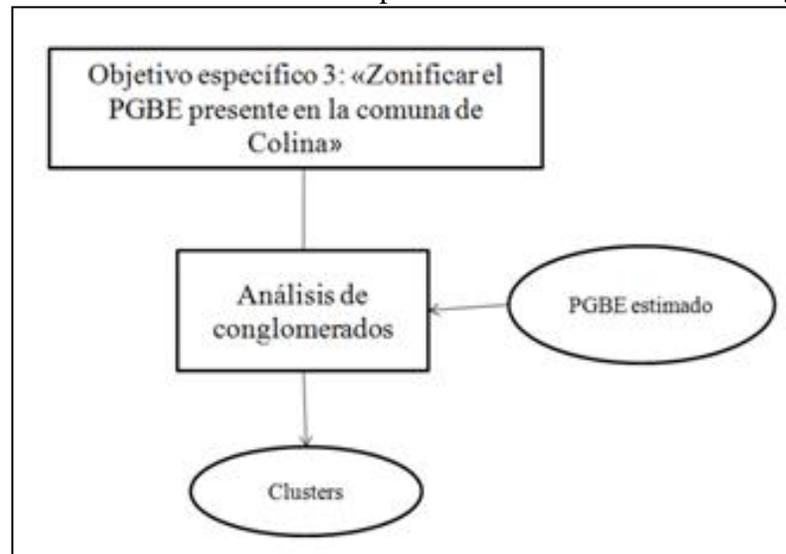


Figura 15. Diagrama de flujo del método del objetivo específico 3.

#### 4.3.4 Evaluación de factibilidad técnica –económica de posibles usos de la energía geotérmica de baja entalpía.

Durante el desarrollo del presente objetivo se evaluó la tecnología más apropiada para aprovechar la energía geotérmica de baja entalpía existente en el área de estudio. Posteriormente, se realizó un análisis de factibilidad económica de la tecnología propuesta (Ver Figura 16).

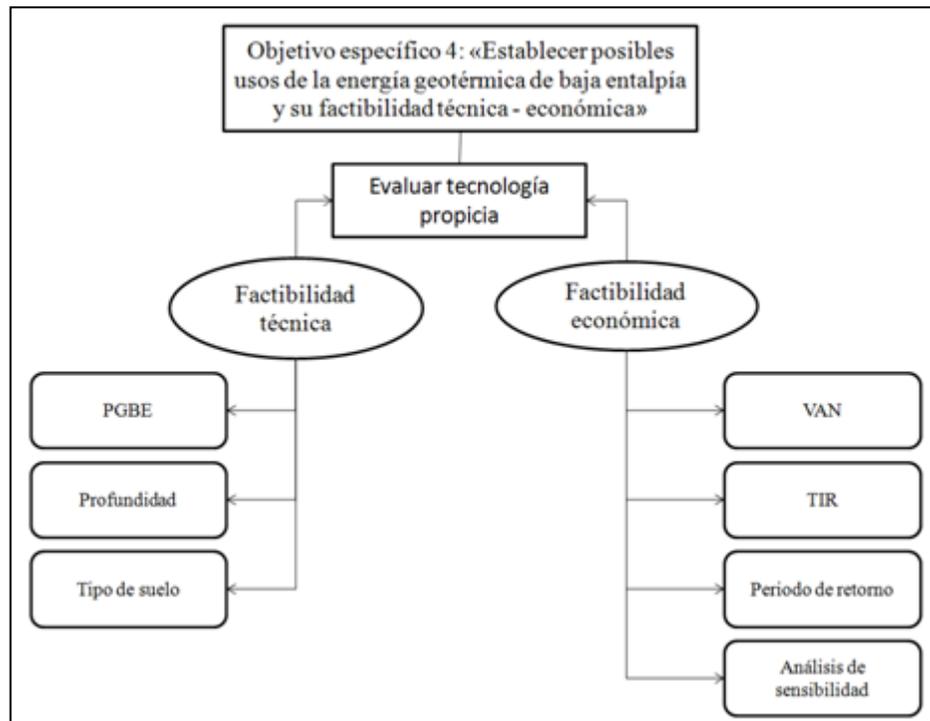


Figura 16. Diagrama de flujo del método del objetivo específico 4.

##### 4.3.4.1 Factores técnicos

Se evaluó la tecnología más propicia en función del PGBE existente en el área de estudio, la profundidad a la cual se encuentra el acuífero y del gradiente térmico de las diferentes series de suelo que están presentes en la zona de estudio.

##### 4.3.4.2 Factores económicos

Para evaluar la rentabilidad económica de utilizar la energía geotérmica de baja entalpía como energía calórica, se analizaron 3 indicadores económicos, los cuales son: el VAN, la TIR y el Periodo de Retorno. Estos indicadores fueron calculados a partir del flujo de caja, el cual fue construido comparando los costos de utilizar la energía geotérmica con 3

combustibles convencionales como fuente de calor (gas licuado, kerosene y electricidad). A continuación se explica detalladamente cada uno de los parámetros económicos utilizados.

- i. Flujo de caja: instrumento financiero que mide los movimientos de efectivos (entradas y salidas) en un periodo de tiempo determinado para la evaluación de un proyecto. Este tiene como objetivo ser la base para el cálculo de indicadores de rentabilidad. Los elementos básicos del flujo de caja que se utilizó en la presente memoria son: la inversión, los costos de mantención y operación de la energía geotérmica, y los costos de utilizar otra energía térmica convencional (Ver Figura 17). La finalidad es evaluar cuánto es el ahorro efectivo por utilizar la energía geotérmica de baja entalpía en comparación con otras energías calóricas.

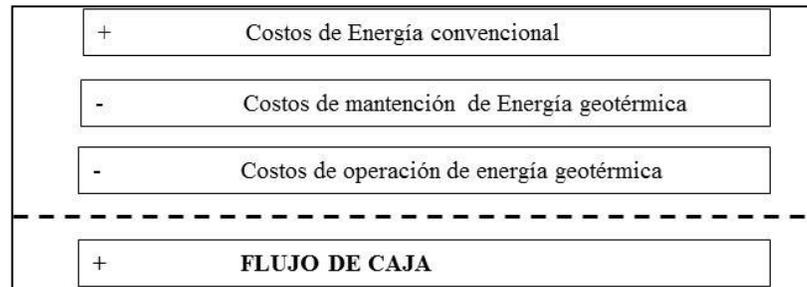


Figura 17. Estructura del flujo de caja.

A continuación se describen cada uno de los componentes del flujo de caja utilizado:

- a. Costos de mantención: son los costos que se deben desembolsar anualmente para mantener el proyecto funcionando al 100%. En este flujo de caja son considerados como egreso.
- b. Costos de operación: son los egresos que se deberán desembolsar para que el proyecto funcione diariamente (Bustamante *et al.* 2007). El cálculo de los costos de operación se fundamenta en la Ecuación 7, donde los costos de operación [\$] están representados por CO, el precio de la energía eléctrica [\$] por PE, la demanda energética para calefacción [kW] por DE y el coeficiente de eficiencia [kW] de la bomba de calor geotérmica por COP.

$$CO = \frac{DE}{COP} \cdot PE$$

Ecuación 7. Costo de operación.

El coeficiente de eficiencia de la bomba de calor geotérmica es la cantidad de energía que debe entregar la bomba al fluido geotérmico para satisfacer la potencia requerida por el usuario (ver Ecuación 8) (Bustamante *et al.* 2007). Donde,  $P_H$  es la potencia requerida en [kW] y  $P_E$  es la potencia absorbida del fluido geotérmico en [kW].

$$COP = \frac{P_H}{P_E}$$

Ecuación 8. Coeficiente de eficiencia de una bomba de calor.

La demanda energética es la cantidad de energía calórica que se necesita para la calefacción de una vivienda en un periodo determinado del año (Bustamante *et al.* 2007). Esta se calcula mediante la Ecuación 9, en la cual  $C_T$  representa el coeficiente global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente en [ $\text{kW}/\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ],  $A$  el área de la envolvente en [ $\text{m}^2$ ] y  $GD$  los grados días de calefacción para un año en [horas].

$$DE = GD \cdot A \cdot C_T$$

Ecuación 9. Demanda energética para calefacción de una vivienda.

Para el cálculo de los grados días de calefacción se utilizó la Ecuación 10, donde  $T_{prom}$  es la temperatura promedio mensual en [ $^\circ\text{C}$ ],  $U$  es la temperatura de confort térmico [ $^\circ\text{C}$ ] y  $n$  es el número de días del mes evaluado.

$$GD = (T_{prom} - U) \cdot n$$

Ecuación 10. Grados días de calefacción.

El coeficiente global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente debe ser calculado a partir de la Ecuación 11 (INN, 1998). En este caso  $U$  representa la transmitancia térmica según material de construcción de la vivienda [ $\text{kW}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ],  $V$  el Volumen de la vivienda [ $\text{m}^3$ ] y  $A$  el área de la envolvente [ $\text{m}^2$ ].

$$C_T = \frac{\sum U \cdot A}{V}$$

Ecuación 11. Coeficiente global de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente

- c. Costos de energía convencional: son los costos de utilizar algún tipo de energía convencional para la calefacción de una vivienda. Esto implica inversión y costos de operación. En este caso los costos de energía convencional se comportan como ingresos en la construcción del flujo de caja. Para estimar los costos de operación se utilizó la siguiente ecuación:

$$CO = \frac{DE \cdot PE}{CC_i} \cdot FC \cdot GD$$

Ecuación 12. Costo de operación.

Donde,  $CO$  representa el costo de operación [\$],  $PE$  el precio de la energía convencional [\$],  $DE$  la demanda energética para calefacción [ $\text{kW}$ ],  $CC_i$  la

capacidad calorífica inferior [kJ/kg], FC el factor de conversión de kW a kilocalorías, y GD los grados días de calefacción para un año [horas]. Es importante destacar que la capacidad calorífica es la energía calórica transferida a un fluido y el cambio de temperatura que se genera.

- d. Flujo de caja (ahorro): es la sumatoria de los egresos e ingresos estimados en el horizonte de evaluación (ver Ecuación 13). En la cual CO representan los costos de operación [\$], CM los costos de mantención [\$] y CEC los costos de energía convencional [\$].

$$\text{Flujo de caja} = \sum_{i=0}^n (CEC - CO - CM)$$

Ecuación 13. Flujo de caja

- e. Inversión: capital a utilizar con la finalidad de obtener ingresos en un periodo de tiempo (Sapag y Sapag, 1991). Específicamente, en el caso de un proyecto de este tipo es el costo de la tecnología a utilizar para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía.
- f. Horizonte de evaluación: corresponde al plazo en que se evaluará la inversión realizada para llevar a cabo el proyecto en estudio. Por lo general, se utilizan los años de vida útil del proyecto como el horizonte de evaluación (Sapag y Sapag, 1991).
- g. Análisis de Precios: se realizó un análisis de tendencias para estimar cuáles serán los precios de los combustibles en el futuro. Para esto se debió realizar una regresión lineal simple utilizando el tiempo como variable independiente, y la serie de los precios históricos del combustible a evaluar (electricidad, gas licuado y kerosene) como variable dependiente (Beresnson *et al.*, 2001).
- ii. VAN: es la diferencia en el valor presente de los ingresos y egresos del flujo de caja asociados a un proyecto. Por lo tanto, este indicador mide la rentabilidad de un proyecto, si el VAN es mayor que cero indica que obtendremos una mayor rentabilidad que la que exigimos a la inversión. En cambio, si éste es menor que cero indica que habrán pérdidas por lo cual el proyecto no será rentable (Sapag y Sapag, 1991).

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+i)^t}$$

Ecuación 14. Valor actual neto.

Donde,  $Q_t$  es el flujo de entrada en efectivo que se recibirá en el periodo [\$], A es la inversión inicial [\$], n es el horizonte de evaluación [\$], e i es la tasa de descuento.

- iii. TIR: corresponde a la tasa de descuento que hace que los flujos de efectivos esperados de un proyecto sean igual que la inversión inicial. Esto quiere decir, que será la tasa de descuento a la cual el VAN es cero (Ecuación 15). Por lo tanto, un proyecto será rentable cuando la TIR sea mayor a la tasa de descuento utilizada para evaluar el proyecto (Sapag y Sapag, 1991).

$$0 = -A + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+i)^n}$$

Ecuación 15. Tasa interna de retorno.

En este caso  $Q_t$  representa el flujo de entrada en efectivo que se recibirá en el periodo [\$],  $A$  la inversión inicial [\$],  $n$  el horizonte de evaluación [\$], e  $i$  es la tasa de descuento utilizada.

- iv. Periodo de Retorno: es la estimación del número de años que se requieren para que la suma de los beneficios sea igual a la inversión inicial (ver Ecuación 16) (Sapag y Sapag, 1991). En este caso  $Y_t$  es el flujo de caja en el periodo  $t$  (\$),  $I_0$  es la inversión inicial (\$), y  $t$  es el periodo de evaluación.

$$\sum_{t=0}^n Y_t = I_0$$

Ecuación 16. Periodo de retorno.

- v. Análisis de sensibilidad: este análisis corresponde a la variación de los parámetros económicos básicos (precios, inversión, costos, entre otros parámetros) que influyen en los indicadores económicos estudiados (VAN, TIR, Periodo de retorno). Por lo tanto, este análisis tiene por finalidad evaluar la significancia estadística de las conclusiones realizadas acerca de la rentabilidad del proyecto en estudio (Sapag y Sapag, 1991).

Para realizar este análisis se utilizó como variable determinante el precio de los combustibles usados en la comparación realizada. Para esto se evaluarán 3 escenarios diferentes, los cuales están determinados por el tipo de vivienda más representativo de 3 niveles socioeconómicos. Además, se analizará a partir del flujo de caja comparado con los 3 combustibles convencionales anteriormente mencionados.

Para la variación de los parámetros económicos básicos se utilizó un programa estadístico, el cual utiliza el método de Montecarlo para realizar la estimación. Éste corresponde a un “*método numérico que permite resolver problemas matemáticos mediante el muestreo aleatorio de variables aleatorias*” (AHEPE, 2006). El método de Monte Carlo consiste en la creación de un modelo matemático del proceso que se desea analizar, en el cual se identifican aquellas variables cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del proceso. Posteriormente se generan valores aleatorios para dicha variable y se evalúa el comportamiento del proceso que se

está analizando. Este proceso debe ser repetido  $n$  veces, el proceso será más preciso cuanto mayor sea el número ( $n$ ) de repeticiones que se lleven a cabo (AHEPE, 2006).

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este ítem se presentan y analizan los resultados obtenidos en el desarrollo de la presente memoria. Para esto, los resultados serán organizados en función de los 4 objetivos específicos planteados inicialmente. Por lo tanto, se analizará el PGBE de la comuna de Colina desde el punto de vista de la factibilidad técnica y económica.

### 5.1 Estimación del PGBE en la comuna de Colina.

Los resultados de este objetivo se presentan en base a la siguiente estructura: estimación de las temperaturas del acuífero en profundidad, seguido de la interpolación de estas temperaturas, para finalmente estimar el PGBE en la comuna de Colina.

#### 5.1.1 Estimación de las temperaturas del acuífero.

Los resultados de la aplicación de los geotermómetros de cationes se presentan en el Cuadro 5. En este se evidencia que sobre el 80% de las muestras del agua subterránea en profundidad presentan una temperatura mayor a los 100 [°C], utilizandolos geotermómetros de Na-K Fournier, Na-K Giggenbach y Na-K-Ca Truesdell y Fournier para estimarlas. Se observa que las temperaturas alcanzan una máxima cercana a los 300 [°C] en algunos casos, además se aprecia que la terma de Colina-Peldehue presenta la menor temperatura de todas las muestras obtenidas. Es importante destacar, que la georeferenciación de los pozos de los cuales se obtuvieron estas muestras se encuentran distribuidas en toda el área de estudio (ver Figura 11).

Por el contrario, en base a los resultados obtenidos a partir del geotermómetro de K-Mg Giggenbach, el 70 % de las muestras presenta temperaturas menores en profundidad que las temperaturas muestreadas en superficie. Por otro parte, cuando se realizó la estimación con el geotermómetro de Na-K Truesdell, se detectó que en 3 de las 20 muestras mientras mayor es la profundidad la temperatura del agua es menor, lo cual llega incluso a ser negativa en el caso particular de la terma de Colina-Peldehue.

Se debe tener en cuenta que existe un gradiente geotérmico de la Tierra, el cual establece que la temperatura y la profundidad son directamente proporcionales, a una razón promedio mundial de 0,3 [°C] por metros de profundidad (Lahsen, 2008). Por ende, los resultados de la temperatura del agua subterránea obtenidos a partir de los geotermómetros de K-Mg Giggenbach y Na-K Truesdel no serían físicamente correctos, ya que de estos se infiere que a medida que aumenta la profundidad la temperatura disminuye. Incluso la temperatura en profundidad de la terma llegaría a ser negativa, lo cual implicaría que el método utilizado presenta ciertas falencias en la estimación respectiva.

Cuadro 5. Cuadro comparativo de los resultados de estimación de la temperatura del agua subterránea en profundidad, estimada a partir de 6 métodos diferentes.

UTM este	UTM norte	pH	Na	K	Ca	Mg	Na-K Fournier [°C]	Na-K Truesdell [°C]	Na-K Giggenbach [°C]	K-Mg Giggenbach [°C]	Na-K-Ca Truesdell y Fournier [°C]	Ley de Fourier (100 m de profundidad) [°C]
351030	6327610	7,8	90	0,3	51,0	1,1	37,8	-16,4	55,8	20,3	105,3	34,0
341290	6342690	7,9	53	0,7	91,0	11,2	94,6	40,4	110,7	15,3	254,5	24,0
343110	6345170	7,4	156	1,1	163,0	15,6	66,0	11,3	83,3	19,8	286,1	25,0
344760	6331260	7,8	61	1,5	83,0	10,7	126,4	73,9	140,8	28,5	325,7	24,0
347220	6328370	7,9	39	0,8	55,0	9,7	119,0	66,0	133,8	19,3	285,7	23,7
339920	6340310	8,0	39	0,8	56,0	8,7	119,0	66,0	133,8	20,2	284,7	24,0
341620	6337670	8,5	54	1,5	49,0	13,1	133,4	81,5	147,4	26,7	197,1	24,7
339000	6338440	7,7	46	1,0	65,0	8,7	118,9	65,9	133,8	23,0	294,7	24,9
344112	6320635	7,9	34	1,0	104,0	15,1	136,8	85,2	150,6	18,5	262,4	25,6
341982	6317813	7,9	92	0,9	237,0	34,0	81,9	27,4	98,6	10,9	242,0	25,7
340100	6320200	7,3	120	0,7	216,0	34,0	58,4	3,8	75,9	6,3	232,0	25,6
339956	6323378	7,8	29	0,6	79,0	7,3	114,0	60,7	129,1	15,2	231,7	25,6
338965	6315956	8,0	48	0,7	55,0	7,8	96,6	42,4	112,6	17,3	273,0	25,5
338700	6317800	7,8	38	1,0	208,0	9,7	129,7	77,5	143,9	22,1	231,5	25,5
341230	6345960	8,4	53	1,1	20,0	2,2	117,4	64,4	132,4	37,5	189,0	22,0
343901	6326630	8,0	60	1,3	91,0	15,1	117,2	64,0	132,1	22,3	303,1	26,1
341559	6324285	7,8	29	0,9	75,0	9,7	136,6	85,0	150,4	19,5	262,6	25,0
335799	6323651	7,6	165	2,0	180,0	46,2	89,8	35,5	106,1	20,8	335,4	25,2
336507	6321030	7,3	60	1,0	176,0	26,7	107,4	53,8	122,9	14,4	253,3	26,0
339650	6312600	8,3	53	1,11	20	2,2	117,4	64,4	132,4	37,5	189	26,9

Por otra parte, basándose en el principio del gradiente geotérmico, se esperaría que la temperatura del agua en el acuífero fuera cercana a los 30-40 [°C], asumiendo que la profundidad media de éste es de 100 metros. En cambio, los resultados obtenidos con los geotermómetros de Na-K Fournier, Na-K Giggenbach, y Na-K-Ca Truesdell y Fournier plantean que las temperaturas varían entre 100 a 300 [°C]. Por lo tanto, estas temperaturas debiesen encontrarse a varios kilómetros de profundidad.

En base a los resultados obtenidos se establece que el método de los geotermómetros de cationes tiende a sobre o subestimar los valores de las temperaturas del agua subterránea presente en el área de estudio. En consecuencia, estos indicadores de la temperatura del acuífero no serían aplicables en la comuna de Colina. Unas posibles explicaciones para este fenómeno tienen relación con las temperaturas utilizadas para la estimación, las cuales deben ser cercanas al punto de ebullición, ya que esto asegura un desplazamiento rápido desde el reservorio hasta la superficie y la baja probabilidad de mezclas con napas superficiales frías (Díaz *et al.* 2008). Otra posible explicación, tiene relación con la alteración de las concentraciones normales de los constituyentes químicos utilizados por los geotermómetros (Na, Ca, Mg y K). Esto tiene una directa relación con las actividades agrícolas desarrolladas en la comuna de Colina, la cual ha tenido un fuerte desarrollo agrícola. Siendo esta actividad la principal vocación productiva de esta comuna, la cual se encuentra especialmente enfocado en los cultivos de hortalizas y frutales, con 3.104,98 [Ha] y 2.720,7 [Ha] respectivamente (Censo Agropecuario, 2007). Ello se debe a que los suelos de esta comuna presentan una aptitud adecuada para el cultivo de diferentes especies vegetales (CIREN, 1996).

Un estudio realizado por CONAMA (1999) determina que el agua subterránea en el área de estudio presenta diferentes grados de contaminación (Ver Figura 18), causado preferentemente por la actividad agrícola, actividad industrial y por problemas con el manejo de las aguas servidas del sector. Además, se debe agregar que en la zona del acuífero donde existe un mayor grado de contaminación es el sector del territorio donde se realiza con mayor intensidad la agricultura (Ver Figura 19).

Sumado a lo anterior, los elementos o compuestos principales de estos tipos de químicos son: Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y Sulfato ( $\text{SO}_4$ ) (Capilla *et al.* 1999). Por ende, se debe tener en cuenta que en el caso de que no existan prácticas de control al aplicar estos tipos de químicos, es posible que éstos infiltren al acuífero, contaminando las aguas subterráneas

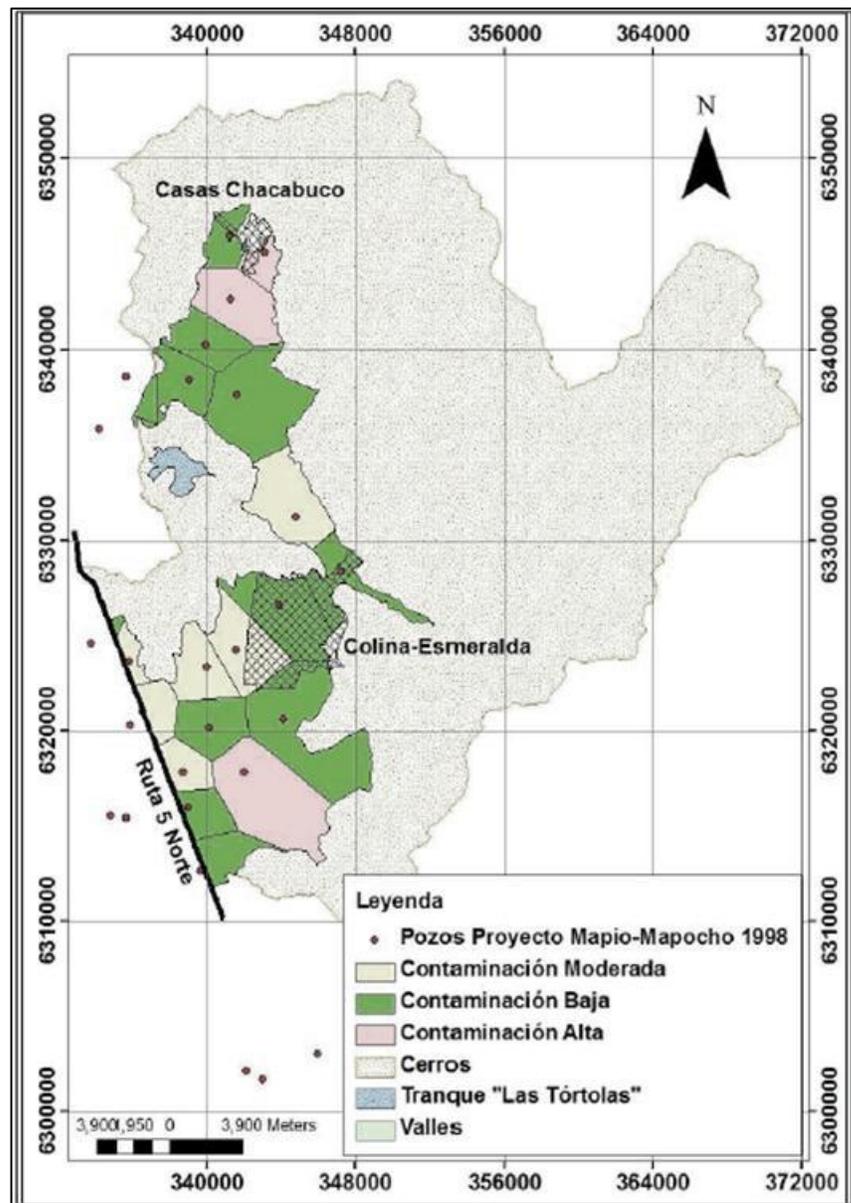


Figura 18. Zonificación de la contaminación del agua subterránea en base al estudio realizado por CONAMA (1998).

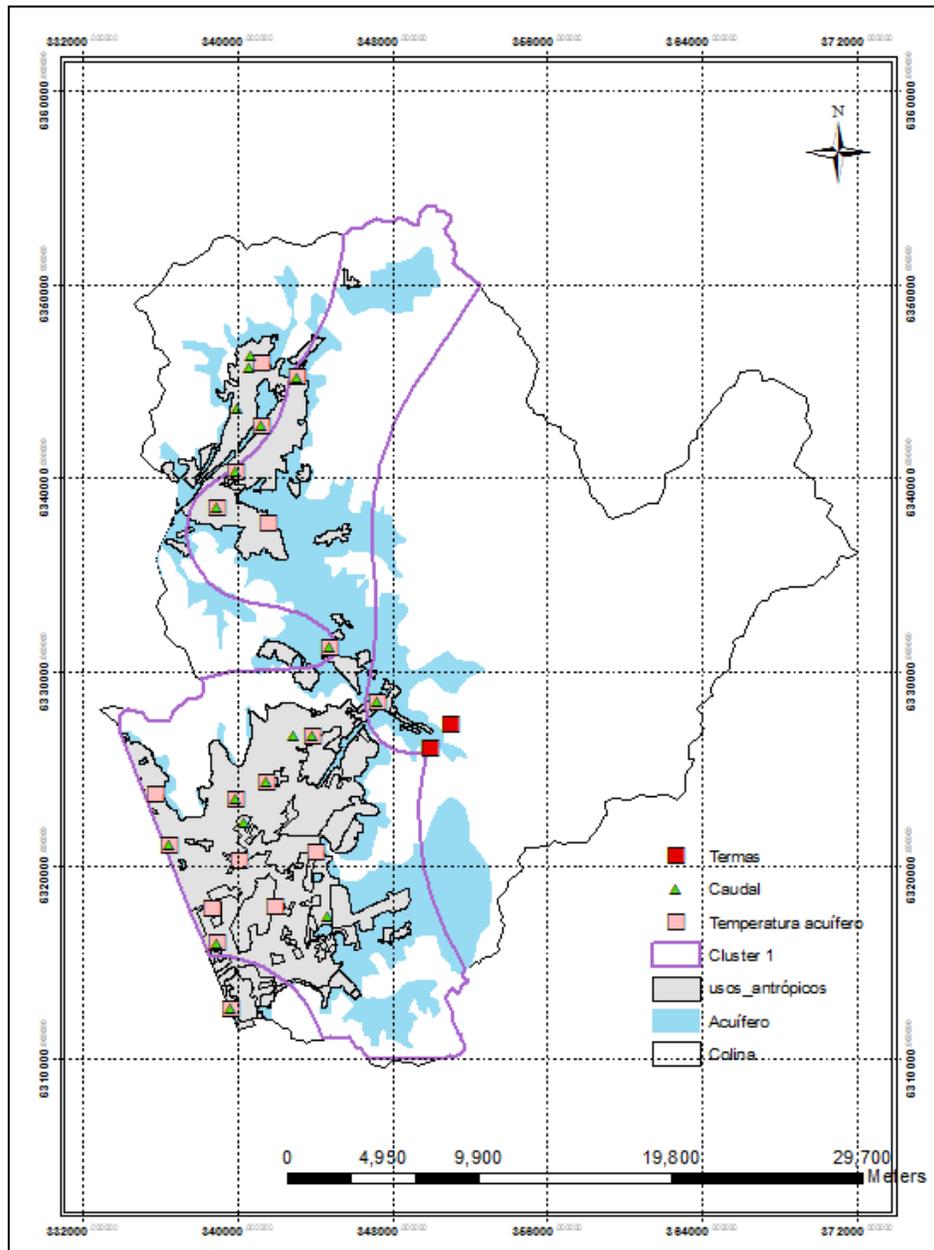


Figura 19. Usos antrópicos en la comuna de Colina.

Por otra parte, se observó la presencia del tranque de relaves “Las Tórtolas”, el cual pertenece al proyecto de explotación de cobre “Los Bronces” propiedad de la empresa Anglo American. Este relave está ubicado específicamente entre las coordenadas UTM 6336000 - 6329900 [m] Norte, y 335000 - 342200 [m] (Anglo American Sur S.A., 2007). Este es un potencial foco de contaminación, dado que no existen estudios que hayan evaluado si existen impactos negativos de infiltraciones de contaminantes a la napa subterránea.

Por último, es importante destacar que no fue posible utilizar el método del geotermómetro de Sílice para estimar la temperatura en profundidad, debido a la falta de información de la concentración de  $\text{SiO}_2$  en el agua subterránea del acuífero de Colina.

Por otro lado, los resultados obtenidos aplicando la Ley de Fourier se presentan en el Cuadro 5, en el cual se muestra que las estimaciones de las temperaturas a los 100 metros de profundidad varían entre los 22 y los 34 [°C]. Siendo el punto de mayor temperatura el ubicado bajo la terma Colina-Peldehue presente en la comuna de estudio. Para estimar cual es el gradiente geotérmico del área de estudio, se utilizó un flujo calórico de 90 [mW/m<sup>2</sup>] (Hamza y Muñoz, 1999). Por otra parte, se utilizó el promedio de los valores de conductividades térmicas propuestos como representativos para las rocas de la corteza superior presenten en la zona central de Chile según Ehlers *et al.* (2002), este valor es de 2,25 [W/m°C]. Finalmente, el método aplicado para estimar la temperatura del agua subterránea en profundidad fue la Ley de Fourier.

### **5.1.2 Interpolación de las temperaturas del acuífero**

Los resultados de la interpolación de las temperaturas del agua subterránea, realizada mediante el método de Kriging por Bloques, se presentan en la Figura 20. En ésta se aprecia que las menores temperaturas se encuentran distribuidas principalmente en la zona Nor-Oeste de la comuna de Colina. Por el contrario, las mayores temperaturas se encuentran ubicadas cercanas a la terma Colina-Peldehue.

Por otra parte, el valor mínimo de temperaturas del agua subterránea es de 22 [°C], y el valor máximo es alcanzado en la terma Colina-Peldehue con 34 [°C]. Por lo tanto, las temperaturas del acuífero de Colina se encuentran distribuidas en un rango de variación de 12 [°C]. Además, se debe mencionar que la media aritmética de las temperaturas del agua subterránea es de 25,6 [°C], con una desviación estándar de 2,5 [°C] (Ver Apéndice I).

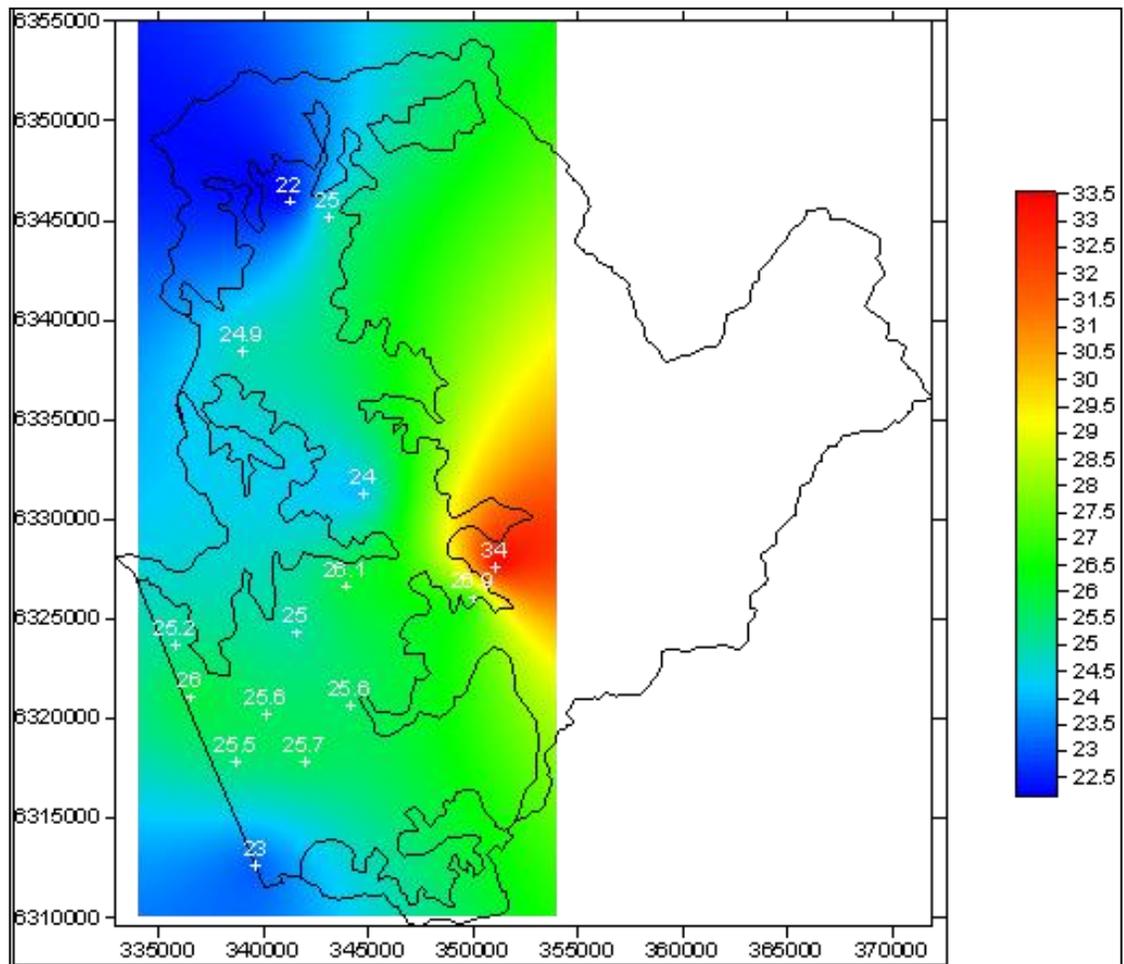


Figura 20. Interpolación de las temperaturas [°C] del acuífero, a una profundidad de 100 metros.

En la Figura 21 se puede observar las curvas de nivel de las temperaturas del acuífero de Colina, es importante destacar que estas fueron elaboradas para una profundidad de 100 metros bajo la superficie terrestre. Las isotermas y el mapa de interpolación de las temperaturas se encuentran a una resolución espacial de 30 x 30 metros.

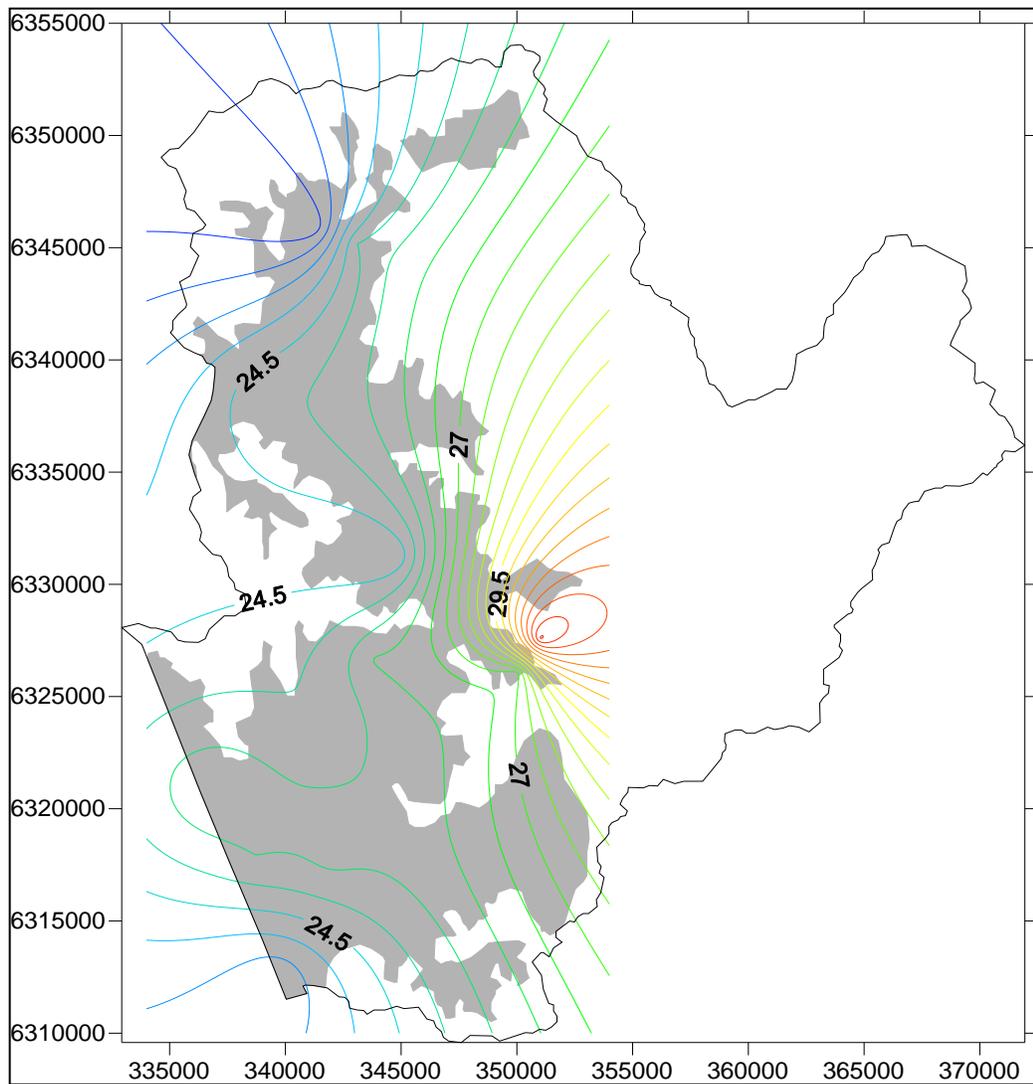


Figura 21. Isotermas [°C] del acuífero de Colina a 100 metros de profundidad, estimadas mediante el método de Kriging por bloques.

#### 5.1.2.1 Estimación del PGBE en la comuna de Colina.

En la Figura 22 se presentan los resultados de la estimación de PGBE de la comuna de Colina, calculados mediante el método del Volumen. En esta figura podemos apreciar que el PGBE se distribuye de forma homogénea en el territorio, existiendo una mínima variación de potencial entre los diferentes sectores de la comuna. Sin embargo, existe un punto de mayor potencial geotérmico de baja entalpía, el cual está ubicado en las cercanías a la terma Colina-Peldehue.

Los datos utilizados para la estimación del PGBE se presentan en el Apéndice II, en el cual se muestra que los valores de la densidad del agua y de la formación geotérmica utilizados fueron 1000 y 2700 [Kg/m<sup>3</sup>] respectivamente, los valores de capacidad calorífica del agua subterránea y de la roca son 1,45 y 1 [J/Kg°C] respectivamente. Por otra parte, la porosidad de la formación geotérmica es de un 30 % y la temperatura atmosférica promedio anual utilizada fue de 14,38 [°C].

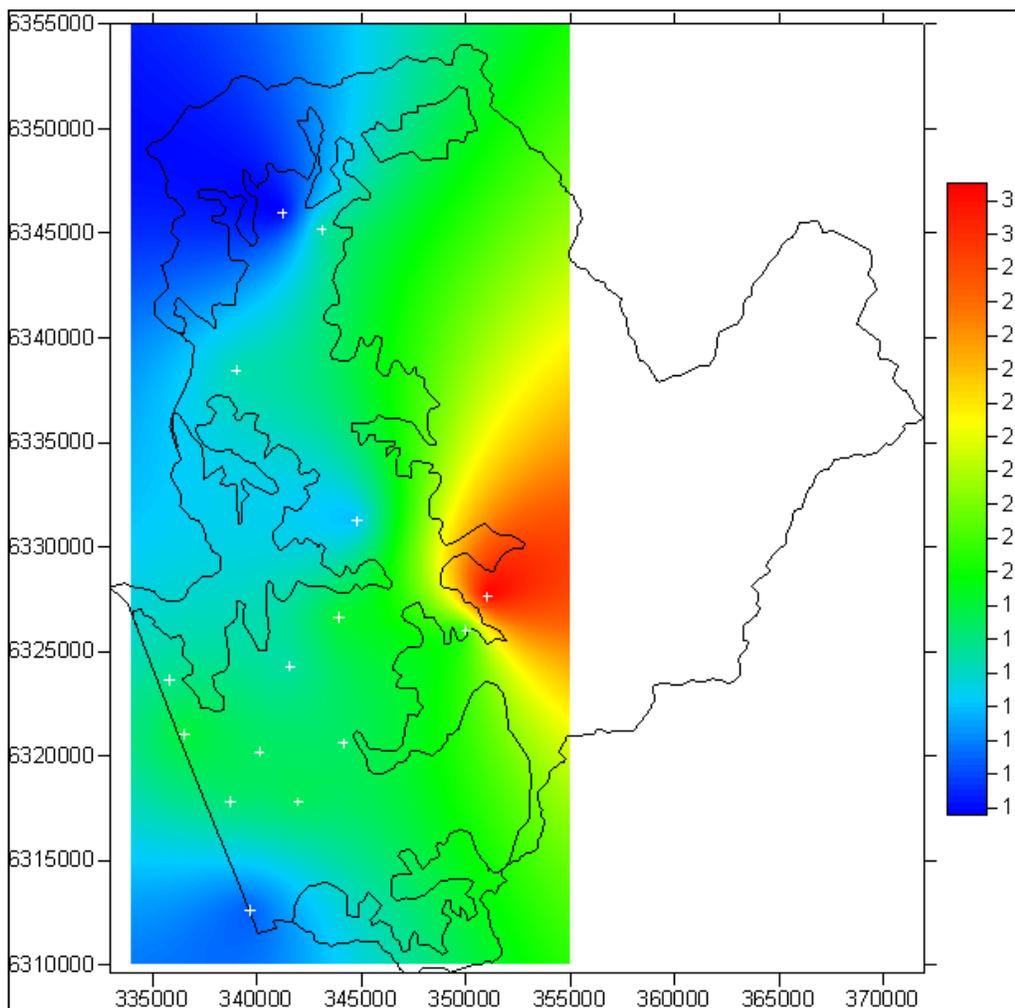


Figura 22. Espacialización del PGBE [kW] estimado a través del método del Volumen.

En relación con la energía disponible en el área de estudio, se aprecia que ésta varía entre los  $1,8 \times 10^8$  [J] y los  $4,6 \times 10^8$  [J] (Ver Apéndice II). Sumado a lo anterior, en el Cuadro 6, se muestra que el rango de variación de PGBE presente en el área de estudio es de 19,38 [kW], con un potencial mínimo de 12,3 [kW] y un potencial máximo de 31,68 [kW]. Además, es posible observar que el potencial promedio es de  $17,69$  [kW]  $\pm$   $3,69$  [kW]. Por último, el potencial con mayor frecuencia en el territorio evaluado es de 15,53 [kW].

Cuadro 6. Estadística descriptiva de los resultados obtenidos del PGBE [kW] mediante el método del Volumen.

Estadística Descriptiva	
Media	17,69
Error típico	0,80
Mediana	17,47
Moda	15,53
Desviación estándar	3,69
Varianza de la muestra	13,61
Rango	19,38
Mínimo	12,30
Máximo	31,68

En cuanto a los resultados de la aplicación del método de flujo térmico superficial, no fue posible generar una interpolación de la variable del caudal másico, dado que esta variable está definida por otros factores, y no está determinada por un comportamiento espacial. La mayor influencia de esta variable está definida por la profundidad, diámetro del pozo, y del tipo de sistema de extracción (Ballester, 2004). Por lo tanto, sólo se evaluó de forma puntual el PGBE a través del método del flujo térmico superficial. En el

Apéndice III, podemos apreciar que no existe un patrón espacial definido, y que el factor determinante del PGBE es el caudal másico que se utilice para estimarlo. Además, se puede observar la existencia de una gran variación entre los PGBE, con un rango aproximado de 62.271 [kW], presentando un potencial mínimo de 307 [kW] y un potencial máximo de 62.589 [kW]. Por otra parte, la muestra evaluada presenta una media aritmética de 28,046 [kW], con una desviación estándar de  $\pm 24,445$  [kW] (Ver Cuadro 7). Además, en términos de la energía presente en el área de estudio, se pudo determinar que varía entre  $4,43 \times 10^8$  [J] y  $9,01 \times 10^{10}$  [J]. En consecuencia, es posible apreciar que existe una alta dispersión estadística entre los resultados mediante este método de estimación del PGBE.

Cuadro 7. Estadística descriptiva de los resultados obtenidos del PGBE [kW] mediante el método del Flujo Térmico Superficial.

Estadística Descriptiva	
Media	28046,59
Error típico	7370,68
Mediana	26089,47
Moda	Sin moda
Desviación estándar	24445,79
Rango	62271,56
Mínimo	307,69
Máximo	62579,25

En base estos resultados se aprecia que el potencial geotérmico presente en el área de estudio es de baja entalpía, lo cual se debe principalmente a que las temperaturas estimadas a 100 metros de profundidad son en su mayoría menores a 30 [°C]. Esta aseveración se realiza a partir de la clasificación del recurso geotérmico según la temperatura de Muffler and Cataldi (1978). Por lo tanto, es recomendable utilizar las bombas de calor geotérmicas como tecnología de aprovechamiento del PGBE, en base a las condiciones técnicas que presenta el área estudiada.

Finalmente, se establece que el PGBE estimado a través del método del volumen, es considerado como un buen estimador del posible potencial geotérmico existente en el área de estudio. Pero para probar con mayor certeza la existencia de este recurso se debe recurrir a métodos directos de perforación.

## **5.2 Evaluación de los métodos de estimación del PGBE.**

Los resultados de este ítem se presentarán en base a la siguiente estructura: comparación de los resultados del PGBE obtenidos por los métodos del volumen y el método del flujo térmico superficial. Posteriormente, se expondrán los resultados del análisis estadístico del modelo de la interpolación de las temperaturas del acuífero.

### **5.2.1 Comparación de los resultados del PGBE**

En función de los resultados expuestos en la sección anterior podemos apreciar que existe una gran diferencia entre los potenciales geotérmicos de baja entalpía estimados a partir del método del volumen y del método del flujo térmico superficial.

Se determinó que los resultados del método del flujo superficial son aproximadamente mil veces mayor que los resultados del PGBE obtenidos mediante la aplicación del método del volumen. Además, se observa que no se puede establecer una relación directa entre la ubicación espacial y el resultado obtenido con ambos métodos. Un ejemplo de esto es que en la coordenada UTM 338965 Este y 6315956 Norte el potencial obtenido con el método del volumen fue de 17,95 [kW] (siendo un valor alto de potencial en comparación a los resultados restantes), en cambio aplicando el método del flujo superficial se obtuvo un potencial de 623,71 [kW], en este caso este valor es uno de los potenciales más bajo estimado mediante este método (Ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Tabla comparativa de los resultados de PGBE obtenidos a partir del método del volumen y con el método del flujo térmico superficial.

Este	Norte	M. volumen [kW]	M. Flujo T. S. [kW]
341290	6342690	15,53	15769,37
343110	6345170	17,15	543,67
344760	6331260	15,53	307,70
347220	6328370	15,05	56797,65
339920	6340310	15,53	11282,15
341620	6337670	16,66	-
339000	6338440	16,99	59346,26
344112	6320635	18,12	-
341982	6317813	18,28	-
340100	6320200	18,12	-
339956	6323378	18,12	26089,47
338965	6315956	17,95	623,71
338700	6317800	17,95	-
341230	6345960	12,30	-
343901	6326630	18,92	-
341559	6324285	17,15	43976,66
335799	6323651	17,47	-
336507	6321030	18,76	62579,25
339650	6312600	13,92	31196,55
349984	6326027	20,21	-
351014	6327245	31,68	-

Analizando los resultados del método del flujo térmico superficial se debe destacar que no fue posible establecer un patrón espacial que determinara la variación del PGBE en la comuna de Colina debido a los factores mencionados anteriormente. Esto se debió a que no se pudo generar una espacialización de los caudales máxicos, la cual es una variable determinante en los resultados del PGBE. Sumado a lo anterior, se debe destacar que en la aplicación de este método existió una falta de datos, por lo cual este método tiende a generar una sobre estimación del PGBE presente en el acuífero de Colina.

En consecuencia, sólo se utilizará el método del volumen como medio de estimación del PGBE para el posterior análisis de factibilidad técnica y económica, y para generar una zonificación de este potencial en la comuna en estudio.

### 5.2.2 Análisis estadístico del modelo de interpolación de las temperaturas.

En el Cuadro 9 se observa que existe un mínimo error entre los valores estimados y los valores de temperaturas del acuífero medidos en terreno. Esta aseveración es validada observando el Cuadro 10, en el cual se muestran los diferentes estadísticos utilizados para evaluar la significación del modelo en estudio.

Cuadro 9. Tabla comparativa de las temperaturas medidas en terreno, con los valores estimados a partir del método del Kriging por bloques.

Este	Norte	Observados [°C]	Estimados [°C]
339920	6340310	24	24,113148
347220	6328370	23,7	23,855038
338965	6315956	25,5	25,524862
339956	6323378	25,6	25,632952
341620	6337670	24,7	24,937008
341290	6342690	24	24,115026

El primer estadístico estudiado es el BIAS del modelo, el cual establece que existe un error sistemático producido por el modelo de 0,113 [°C]. Además, se estableció que el modelo presenta una desviación estándar de 0,079 [°C] y un RMSE de 0,113 [°C]. Por lo tanto, el error que presenta el modelo de interpolación de las temperaturas estimadas es menor a 1 [°C]. Lo cual implica la confiabilidad del modelo de interpolación generado mediante el método de Kriging por bloques

Cuadro 10. Estadísticos utilizados para validar modelo de interpolación de las temperaturas por el método del Kriging por bloques.

Estadístico	Valor
BIAS	0,113
Desviación estándar	0,079
RMSE	0,138
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	0,993

Además, en la Figura 23 es posible apreciar la línea de tendencia generada a partir de la comparación de los valores de temperatura del acuífero estimados y los medidos en terreno. Por lo tanto, en base a lo mencionado anteriormente se deduce que existe una alta correlación entre los datos estimados y los medidos en terreno. Lo cual se ve expresado en que existe un elevado porcentaje de ajuste entre las variables estudiadas, siendo el coeficiente de determinación del modelo de 0,993.

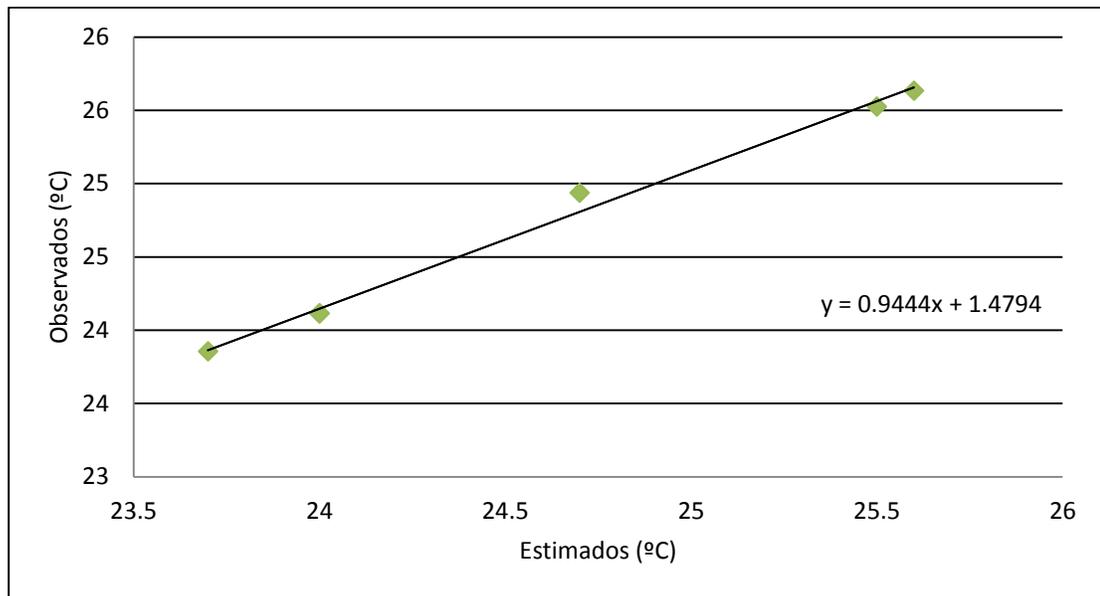


Figura 23. Regresión lineal entre valores estimados y observados.

### 5.3 Zonificación del PGBE de la comuna de Colina.

En la presente sección se generó una zonificación del PGBE mediante un análisis de conglomerados, con la finalidad de identificar las zonas del área de estudio que presentan similares características del potencial geotérmico de baja entalpía. En la Figura 24 se aprecian los 4 *Clusters* generados, los cuales ocupan diferentes proporciones del territorio, estos aglomerados fueron definidos en base al PGBE promedio estimado en cada uno. El *Cluster 1* presenta un promedio de PGBE de  $14,97 \pm 1,22$  [kW], el *Cluster 2* un promedio de  $18,29 \pm 1,01$  [kW], el *Cluster 3* está caracterizado por un potencial promedio de  $21,72 \pm 1,02$  [kW] y finalmente el *Cluster 4* posee un potencial promedio de  $26,77 \pm 2$  [kW].

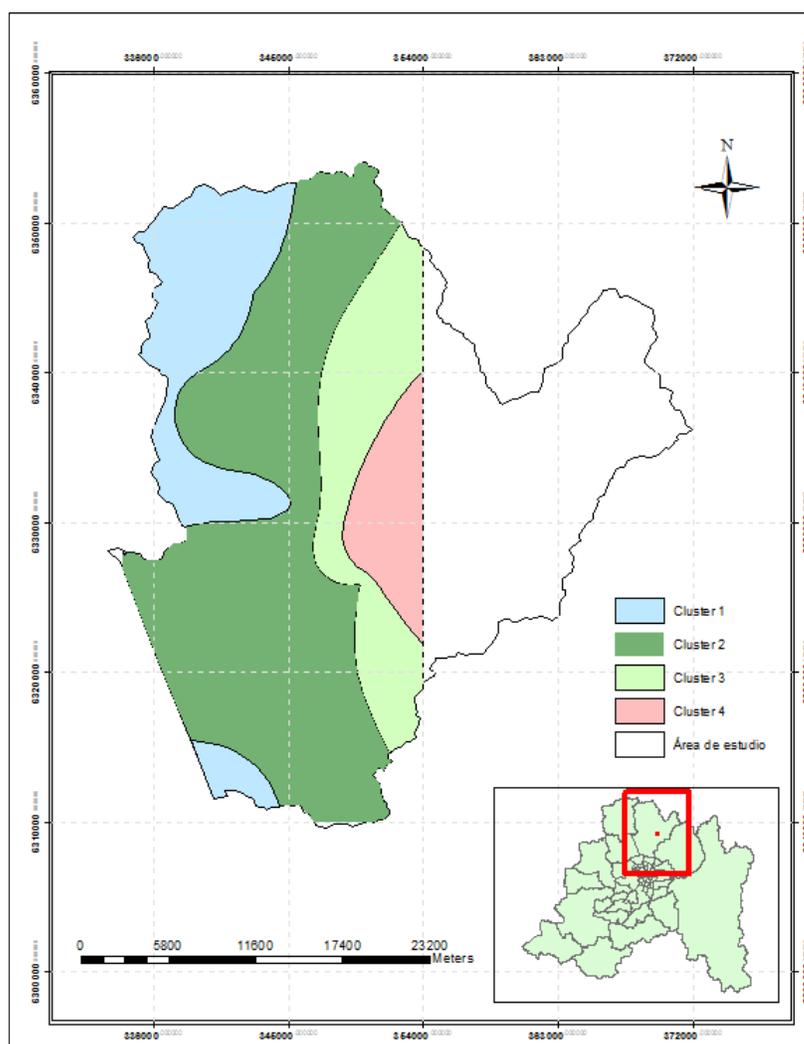


Figura 24. Zonificación del PGBE en la comuna de Colina.

### 5.3.1 Análisis de Conglomerados

A continuación se presentarán los resultados detallados de cada *Cluster*, con el objetivo de caracterizar cada zona y evaluar su representación en el territorio. En el Cuadro 11 se observa que el *Cluster 2* representa la mayor proporción del área de estudio. En cambio, el *Cluster 4* representa sólo el 7% del acuífero de Colina, con un PGBE promedio de 26,77 [kW].

Cuadro 11. Caracterización estadística de los *Cluster* generados para la zonificación del PGBE de la comuna de Colina.

Estadístico	<i>Cluster 1</i> [kW]	<i>Cluster 2</i> [kW]	<i>Cluster 3</i> [kW]	<i>Cluster 4</i> [kW]
Valor Mínimo	12,78	16,56	20,31	23,99
Valor Máximo	16,56	20,31	23,99	31,53
Rango	3,79	3,75	3,68	7,54
Promedio	14,97	18,29	21,72	26,77
Desviación Estándar	1,22	1,01	1,02	2,00
% área del total	29%	49%	15%	7%

Analizando el *Cluster 1*, se observa que la mayor frecuencia de PGBE se da entre los 16 a 17 [kW], seguido del intervalo entre los 13 a 14 [kW] (Ver Figura 25 (b)). Esta zona presenta una media aritmética de 14,97 [kW], con una desviación estándar de  $\pm 1,221$  [kW]. Por último, se debe destacar que este *Cluster* representa aproximadamente el 30% del área de estudio, y es en esta zona donde se encuentran los menores potenciales geotérmicos de baja entalpía (ver Cuadro 11).

En el caso del *Cluster 2*, se aprecia que la mayor frecuencia de PGBE se da entre los 18 a 19 [kW], seguido del intervalo entre los 17 a 18 [kW] (Ver Figura 25 (a)). Esta zona presenta una media aritmética de 18,29 [kW], con una desviación estándar de  $\pm 1,01$  [kW], representando aproximadamente el 50% de toda el área de estudio (ver Cuadro 11). Además, en este *Cluster* es donde se da con mayor intensidad la actividad antrópica.

Evaluando el *Cluster 3*, la mayor frecuencia de PGBE se da entre los 21 a 22 [kW], seguido del intervalo entre los 20 a 21 [kW] (Ver Figura 25 (c)). Esta zona presenta una media aritmética de 21,72 [kW], con una desviación estándar de  $\pm 1,02$  [kW]. Además, este *Cluster* representa aproximadamente el 15% del área de estudio (ver Cuadro 11).

Finalmente, se determinó que el *Cluster 4* presenta su mayor frecuencia de PGBE entre los 24 a 25 [kW], seguido del intervalo entre los 25 a 30 [kW] (Ver Figura 25 (d)). Éste presenta una media aritmética de 26,77 [kW], con una desviación estándar de  $\pm 2$  [kW]. Además este *Cluster* sólo representa el 7% del área de estudio, siendo el de menor representación entre todas las zonas generadas (ver Cuadro 11). Por otra parte, es en este

*Cluster* que se presentan los mayores PGBE, esto se debe a que la terma Colina-Peldehue se encuentra ubicada en esta área.

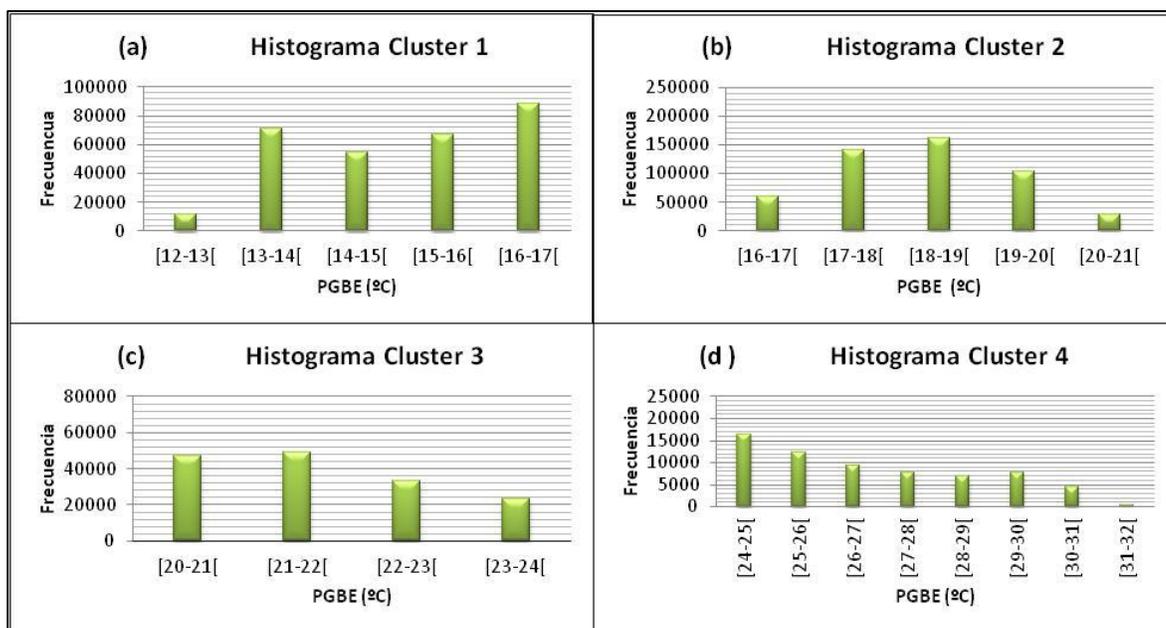


Figura 25. (a) Histograma del *Cluster* 1, (b) Histograma del *Cluster* 2, (c) Histograma del *Cluster* 3, (d) Histograma del *Cluster* 4.

## 5.4 Evaluación de factibilidad técnica – económica de posibles usos de la energía geotérmica de baja entalpía.

En este ítem se evaluó la rentabilidad económica y técnica de utilizar diferentes sistemas de captación de la energía geotérmica de baja entalpía disponible en el área de estudio. Para lo cual, previamente se estimó la demanda energética de diferentes tipos de viviendas características de Colina.

### 5.4.1 Factibilidad técnica

A continuación se evalúan 3 factores que determinan la factibilidad técnica de aprovechar el recurso geotérmico, los cuales son: PGBE, profundidad del recurso geotérmico y tipo de suelo presente en el área de estudio.

El primer factor evaluado es el PGBE, el cual presenta un promedio en toda el área de estudio de 19,38 [kW], con un potencial mínimo de 12,3 [kW] y un potencial máximo de 31,68 [kW]. Los 4 *Clusters* generados se caracterizan por presentar un potencial medio de 14,97 [kW], 18,29 [kW], 21,72 [kW] y 26,77 [kW] respectivamente para el *Cluster* 1, 2, 3 y 4. Además, se aprecia que estos *Clusters* presentan una temperatura promedio de 23,5 [°C], 25,5 [°C], 27,6 [°C] y 30,6 [°C] respectivamente.

Por lo tanto, la única tecnología apta para aprovechar el PGBE son las bombas de calor geotérmicas ya sean verticales u horizontales, dado que las temperaturas son menores a 30 [°C] (Self *et al.*, 2012), lo cual se debe a que éstas utilizan una bomba eléctrica como medio de apoyo para aumentar la entalpía del fluido geotérmico. Es importante mencionar que en la presente memoria sólo se evaluara la factibilidad técnica y económica de utilizar bombas de calor geotérmicas para calefacción residencial en base a las condiciones técnicas que presenta el área de estudio, y no para refrigeración dado que existe una baja disponibilidad de los datos necesarios para realizar este análisis.

Otro factor determinante en el análisis técnico es la profundidad a la cual debe ser extraído el recurso geotérmico, especialmente para la bomba de calor geotérmica vertical. Por lo tanto, se recurre a evaluar las profundidades del nivel freático del acuífero presente en la comuna de Colina (Ver Figura 26). En esta figura las profundidades son menores que 100 metros, por lo tanto existe una alta factibilidad técnica de aprovechar este recurso geotérmico, teniendo en cuenta que la máxima profundidad extraíble técnicamente es de 3 [Km] (Williams *et al.*, 2011).

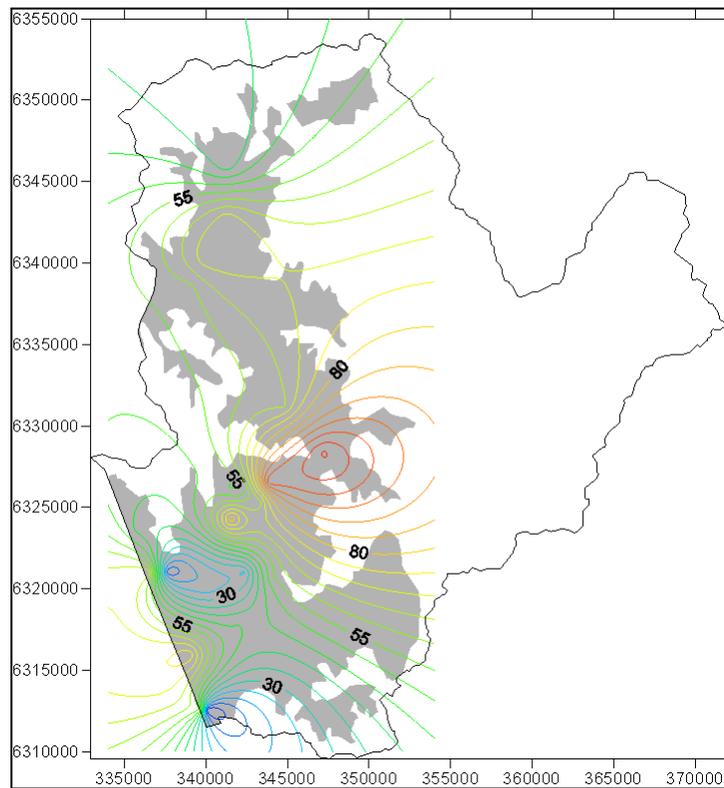


Figura 26. Isolíneas [m] del nivel freático del acuífero de la comuna de Colina.

Sumado a lo anterior, las profundidades medias por *Cluster* son de: 47,9 [m], 56,1 [m], 72,8 [m] y 88,9 [m] respectivamente (ver Cuadro 12), con una desviación estándar de 12,42 [m], 16,19 [m], 13,15 [m] y 6,82 [m] respectivamente. Asimismo, se observa en la Figura 27 que las mayores frecuencias se dan entre los 50 [m] a los 80 [m] de profundidades en 3 de las 4 zonas que fueron identificadas anteriormente. Además, la mayor profundidad es alcanzada en el *Cluster* 4 donde está situada la terma Colina-Peldehue, lo cual se puede deber al pequeño tamaño de la muestra utilizado para generar la interpolación.

Cuadro 12. Caracterización estadística del nivel freático por Cluster.

Estadístico	<i>Cluster</i> 1 [m]	<i>Cluster</i> 2 [m]	<i>Cluster</i> 3 [m]	<i>Cluster</i> 4 [m]
Valor Mínimo	5,28	11,29	44,36	72,69
Valor Máximo	75,46	107,76	23,99	104,68
Rango	70,18	96,47	110,64	31,99
Promedio	47,99	56,15	72,09	88,86
Desviación Estándar	12,42	16,19	13,15	6,82
% área del total	29%	49%	15%	7%

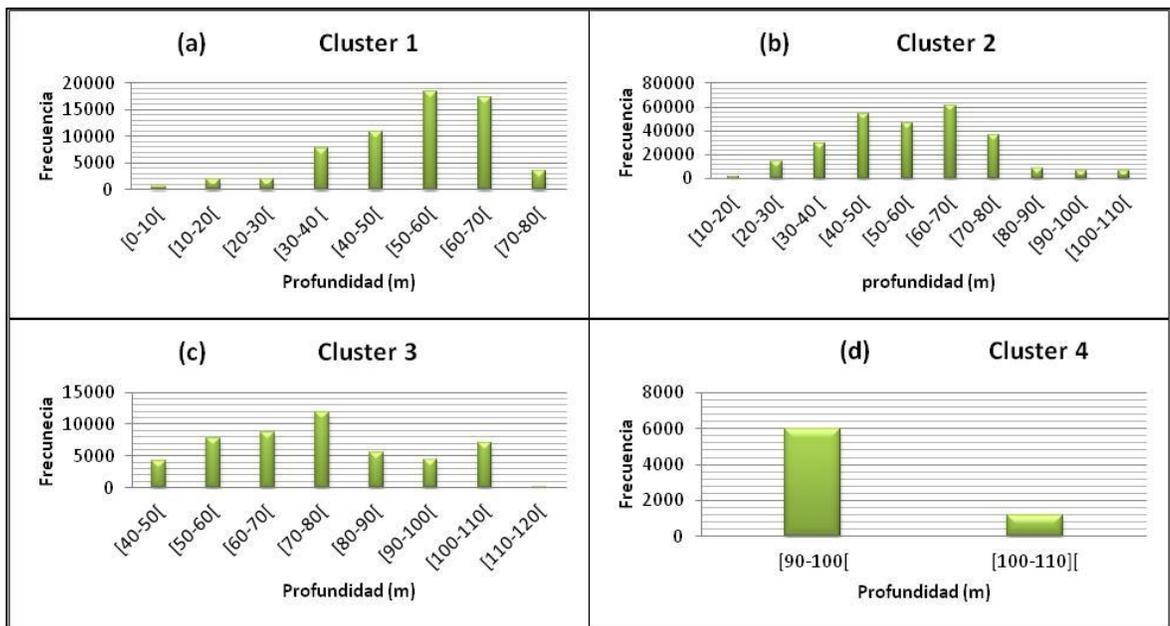


Figura 27. Histogramas de la profundidad del acuífero de los 4 *Clusters* generados.

En la Figura 28 se aprecia como varía el PGBE por metro de profundidad estimado para cada *Cluster*, lo cual fue cuantificado aplicando la ley de Fourier al PGBE promedio de cada *Cluster*. Además, en esta figura se muestra que es el *Cluster 4* la zona que presenta el mayor PGBE a medida que aumenta la profundidad.

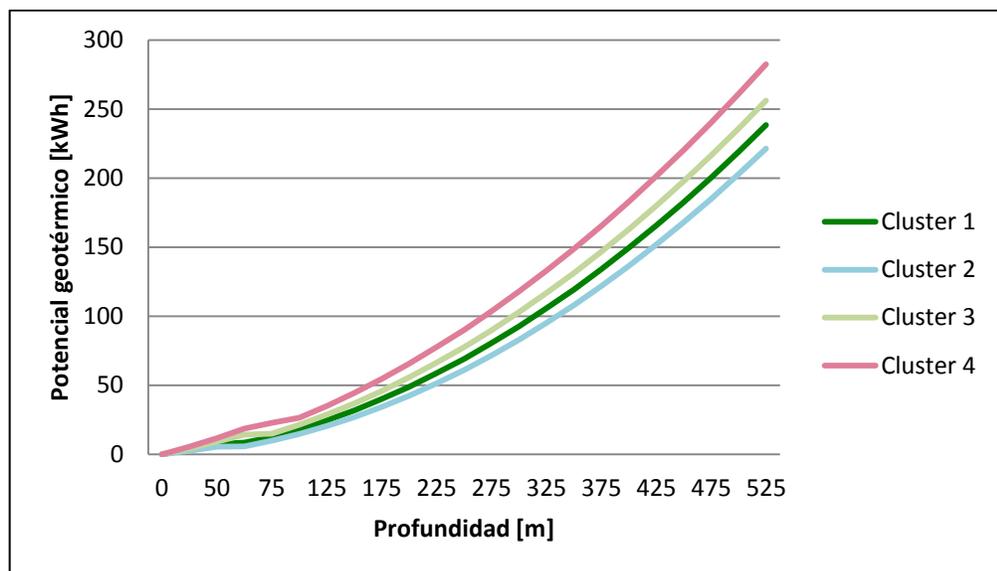


Figura 28. Gráfico de PGBE v/s la profundidad por *Cluster*.

La zona donde existe una mayor ocupación del territorio por el ser humano, ya sea para actividad agrícola, industrial o residencial se estimó un PGBE promedio de 18,29 [kW], y una profundidad promedio de 56,1 [m], esta zona es el *Cluster 1* (Ver Figura 19).

Por otra parte, el último factor determinante en la evaluación técnica es el tipo de suelo presente en el área de estudio. Esto debido a que en función de la humedad y de la textura del suelo se determina la cantidad de energía térmica por metro cuadrado presente en éste. Esta afirmación toma mayor relevancia en el caso de utilizar una bomba de calor geotérmica horizontal, dado que es necesaria una excavación de un metro de profundidad para extraer el recurso geotérmico. Por lo cual, en este tipo de tecnología no es necesario realizar pozos para extraer el agua del acuífero, sólo se aprovecha el calor del suelo a un metro de profundidad.

En base a la clasificación elaborada por el CIREN (1996), se observa que la mayor proporción de las series de suelos presentes en el área de estudio, presentan una textura arcillosa, factor determinante en la cohesividad de las partículas del suelo. Además, en base al informe del CIREN (1996) se clasifican las series de suelo presentes en la comuna de Colina según la norma alemana VD-4640. Estos resultados se presentan en el Cuadro 13; en éste se observa que la mayor proporción de los suelos presentarían un gradiente térmico entre 20 a 40 [W/m<sup>2</sup>], si la bomba de calor geotérmica se utiliza menos de 1800 horas al año, en cambio, si se utiliza 2400 horas al año, los suelos de la comuna de Colina presentarían un gradiente térmico entre 16 a 32 [W/m<sup>2</sup>].

Cuadro 13. Principales características estructurales de las series de suelo presentes en la comuna de Colina.

Nombre de la serie de suelo	Textura	% de humedad	Tipo de terreno norma VDI-4640
Colina	Franco limosa	33	2
Quilapilum	Franco	32	2
Chicureo	Arcillosa	36	3
Liray	Franco	24	2

### 5.4.2 Factores económicos

El flujo de caja utilizado para estimar los diferentes indicadores económicos fue estructurado en función de cuantificar el potencial ahorro económico anual de utilizar la energía geotérmica para calefacción sobre otros tipos de combustibles convencionales (gas licuado, kerosene y electricidad) (Ver Figura 17). Por lo tanto, cuando el flujo de caja resultante es mayor que cero se afirma que utilizar la energía geotérmica es más conveniente que utilizar una energía convencional para calefacción.

El primer componente utilizado en el flujo de caja es la inversión que se necesita desembolsar para instalar un sistema de bomba de calor geotérmico. Las bombas de calor horizontal o vertical presentan una gran diferencia en la magnitud de la inversión inicial. En el Cuadro 14 se describen los factores que determinan la inversión de un sistema vertical, siendo el componente con mayor influencia el costo asociado a la perforación de los pozos utilizados para extraer el fluido geotérmico desde el acuífero y para el pozo que se utiliza para el reingresar el fluido al acuífero. El precio aproximado de la perforación es de \$100,000 pesos por metro de profundidad (ENativa, 2012). Los metros de perforación necesarios por proyecto dependerá del PGBE requerido para satisfacer la demanda de calefacción residencial y de la profundidad a la cual se encuentre el acuífero. Es importante destacar que los resultados presentados en el Cuadro 14 son para satisfacer la demanda energética de una vivienda que requiere 27 [kW].

Cuadro 14. Costos asociados a la instalación de un sistema de bomba de calor geotérmico horizontal y vertical.

	Bomba de Calor Vertical	Bomba de Calor Horizontal
Bomba de Calor	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
Maquinaria y mano de obra	\$ 1.000.000	\$ 500.000
Materiales	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Perforación o Excavación	\$ 10.000.000	\$ 1.000.000
<b>Total Costos</b>	<b>\$ 15.000.000</b>	<b>\$ 5.500.000</b>

Los costos asociados a los sistemas de bomba de calor geotérmico horizontal se presentan en el Cuadro 14, en éste se aprecia que el factor que tiene mayor incidencia en el total de la inversión es el costo de todo el sistema de la bomba de calor a utilizar.

El detalle de los costos de inversión por superficie de la vivienda que se debe calefaccionar se presenta en el Cuadro 15. En el caso de las bombas de calor vertical los costos de inversión varían entre los \$ 7.500.000 y \$ 32.100.000, y en el caso de las bombas de calor horizontal varían entre los \$ 3.750.000 y los \$ 17.000.000.

Cuadro 15. Costos de inversión en función del área de la vivienda a calefaccionar.

Área de construcción[m <sup>2</sup> ]	Bomba de calor Vertical	Bomba de Calor Horizontal
40	\$ 7.500.000	\$ 3.750.000
60	\$ 9.000.000	\$ 4.000.000
80	\$ 10.500.000	\$ 4.250.000
100	\$ 14.000.000	\$ 4.500.000
150	\$ 14.500.000	\$ 4.750.000
200	\$ 15.000.000	\$ 5.000.000
300	\$ 15.500.000	\$ 5.500.000
400	\$ 16.000.000	\$ 6.000.000
500	\$ 16.500.000	\$ 6.500.000
1000	\$ 17.000.000	\$ 8.500.000
2000	\$ 32.100.000	\$ 17.000.000

Por otro lado, el horizonte de evaluación al cual se llevará a cabo el proyecto en estudio fue de 10 años. En cuanto a los costos de mantención de la bomba de calor geotérmica este costo corresponde al gasto que se deben desembolsar anualmente para mantener el proyecto funcionando al 100%. En la presente memoria los costos de mantención se consideraron como el 10% de la inversión total del proyecto geotérmico por año. Por lo tanto, si se evaluará una bomba de calor geotérmica vertical para satisfacer una demanda de 27 [kW], el costos de mantención anual sería de \$55.000. En cambio, para una bomba de calor vertical el costo anual de mantención sería de \$150.000.

Cabe destacar que la tasa de descuento utilizada para estimar los indicadores económicos fue del 10%, el cual se obtuvo a partir de la información según Núñez *et al*, (2008) la tasa de descuento a utilizar varían entre un 8 a un 10%. Además, es importante menciona que en proyectos con similares características las tasas de descuento utilizadas son menores (5 - 7%) (Somera *et al*, 2002; Kulcar *et al*, 2008).

En cambio, los costos de operación fueron definidos en función de la energía calórica demandada por la vivienda para su calefacción, por la cantidad de horas al año a utilizar el sistema de calefacción, por el coeficiente de eficiencia de la bomba de calor (COP) y por el precio de la electricidad (Fissore y Colonelli, 2009). Esto se debe a que las bombas de calor geotérmico utilizan como medio de apoyo para aumentar la entalpía del fluido una bomba eléctrica. La cantidad de energía eléctrica que debe utilizar la bomba de calor (COP), será sólo un quinto de la demanda necesaria para satisfacer los requerimientos del usuario. Este factor depende del modelo de bomba de calor que se utilice y está definido por el fabricante.

El cálculo de los grados días de calefacción se realizó a partir de las temperaturas atmosféricas medias mensuales, obtenidas de los datos proporcionados por la estaciones de

monitoreo agrometeorológicas presentes en la zona de estudio. Según Fissore y Colonelli (2009) la temperatura de confort utilizada para evaluar la demanda energética en la Región Metropolitana es de 14,5 [°C]. Por lo tanto, los resultados de los grados días para calefacción de la comuna de Colina se presentan en el Cuadro 16. En éste se observa que el total anual de grados días es de 639 horas de funcionamiento de la bomba de calor, para poder mantener una temperatura de confort de 14,5 [°C].

En estudios realizados por OrtizBeviá *et al.*, 2012 y McMaster, G. and W. Wilhelmb. 1997, estiman los grados días utilizando la siguiente ecuación:  $GD = (T_{max} - T_{min})/2 - U$ . Sin embargo, ésta no fue utilizada en la presente memoria por falta de datos de temperatura. Por lo tanto, los resultados de grados días podrían estar subestimados.

Cuadro 16. Grados días para calefacción en base a las temperaturas atmosféricas medias mensuales de la comuna de Colina.

Mes	Promedio Mensual [°C]	Grados Días
Enero	20,9	0
Febrero	19,9	0
Marzo	17,6	0
Abril	14,2	0
Mayo	11,1	87
Junio	8,5	165
Julio	8,1	177
Agosto	9,5	135
Septiembre	11,5	75
Octubre	14,5	0
Noviembre	17,3	0
Diciembre	19,9	0
<b>Anual</b>	<b>14,42</b>	<b>639</b>

Por ende, los costos de operación de utilizar una bomba de calor geotérmica para satisfacer una demanda de 27 [kW], se presentan en el Cuadro 17. Es posible apreciar que el costo anual es cercano a los \$56.000 pesos, para esta demanda energética.

Cuadro 17. Costos de operación de una bomba de calor geotérmica.

Mes	Grados días	Potencia [kW]	COP	Potencia eléctrica [kW]	Demanda energética [kW]	Precio anual [\$/kW]	Costo de la Energía [\$]
Enero	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	-	-	-	-	-	-	-
Abril	-	-	-	-	-	-	-
Mayo	87	3,75	5	0,7	65,2	73	\$ 4.758
Junio	165	7,10	5	1,4	234,4	73	\$ 17.114
Julio	177	7,62	5	1,5	269,8	73	\$ 19.694
Agosto	135	5,81	5	1,2	156,9	73	\$ 11.457
Septiembre	75	3,23	5	0,6	48,4	73	\$ 3.536
Octubre	-	-	-	-	-	-	-
Noviembre	-	-	-	-	-	-	-
Diciembre	-	-	-	-	-	-	-
<b>Anual</b>	<b>639</b>	<b>27,1</b>					<b>\$ 56.559</b>

Además, para cuantificar la demanda energética necesaria para la calefacción de un hogar es necesario estimar el coeficiente global de pérdidas térmicas de la vivienda en estudio, el área de la construcción y los grados días a utilizar este sistema en el año. Para esto, se establecieron 264 casos diferentes de tipos de viviendas presentes en la comuna de Colina. Esto se realizó variando los tipos de materiales de construcción y la cantidad de [m<sup>2</sup>] construidos, estos supuestos se explican a continuación:

- i. En cuanto a los tipos de materiales de construcción se establecieron 24 combinaciones de los más utilizados en la construcción de las viviendas en la comuna de Colina, definidos en función a la información proporcionada por el INE (2002). Los materiales de construcción más utilizados en los muros de la vivienda son: ladrillo, hormigón y madera. En el caso del techo de la vivienda se definió: Zinc, pizarreño y hormigón. En cuanto a los materiales más utilizados para construir el piso de las viviendas son: madera, plástico (Flexit) y cerámica. Finalmente, se definió que las puertas siempre estas elaboradas de madera y las ventanas de vidrio. Las combinaciones establecidas se pueden apreciar en el Apéndice IV.

Las transmitancias térmicas de cada material de construcción utilizado fueron obtenidas de Bustamante *et al.* (2007) (Ver Cuadro 18).

Cuadro 18. Transmitancia térmica por tipo de material de construcción.

	Material de construcción	Transmitancia térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]
Muro	Ladrillo	2,22
	Hormigón	1,02
	Madera	5,26
	<b>Promedio</b>	<b>2,84</b>
Techo	Pizarreño	4,35
	Zinc	0,01
	Loza de hormigón	1,09
	<b>Promedio</b>	<b>1,81</b>
Piso	Entablado (madera)	5,26
	Cerámica	0,92
	Plástico (Flexit)	0,83
	<b>Promedio</b>	<b>2,34</b>
Ventanas	Vidrios	0,77
Puerta	Madera	5,26

- ii. En cuanto a la superficie construida se definieron 11 casos diferentes, los cuales son: 40  $[\text{m}^2]$ , 60  $[\text{m}^2]$ , 80  $[\text{m}^2]$ , 100  $[\text{m}^2]$ , 150  $[\text{m}^2]$ , 200  $[\text{m}^2]$ , 300  $[\text{m}^2]$ , 400  $[\text{m}^2]$ , 500  $[\text{m}^2]$ , 1000  $[\text{m}^2]$  y 2000  $[\text{m}^2]$ .

Los resultados de los coeficientes globales de pérdidas térmicas por transmisión de la envolvente de la vivienda se presentan a continuación en las Figura 29 y Apéndice V. Se aprecia que mientras menor es la superficie utilizada por la vivienda mayor será el coeficiente de pérdida de calor. Además, cuando el muro está construido de madera se establece un gran diferencial entre los coeficientes de pérdidas de una vivienda de 40  $[\text{m}^2]$  y una vivienda de 2000  $[\text{m}^2]$ . Esta situación se repite cuando el techo de la vivienda está construido con Zinc. Sin embargo, los menores coeficientes de pérdidas de calor se dan cuando la vivienda se construye con hormigón y ladrillos.

En cuanto a la demanda energética es posible apreciar los resultados obtenidos en la Figura 30 y el Apéndice VI. Se destaca que las menores demandas energéticas se dan en cuando la vivienda está construida de hormigón y ladrillo, y a menor superficie construida. Además, existe un notable aumento de la demanda energética cuando la superficie construida es de 2000  $[\text{m}^2]$  y los muros de las viviendas están contruidos por madera.

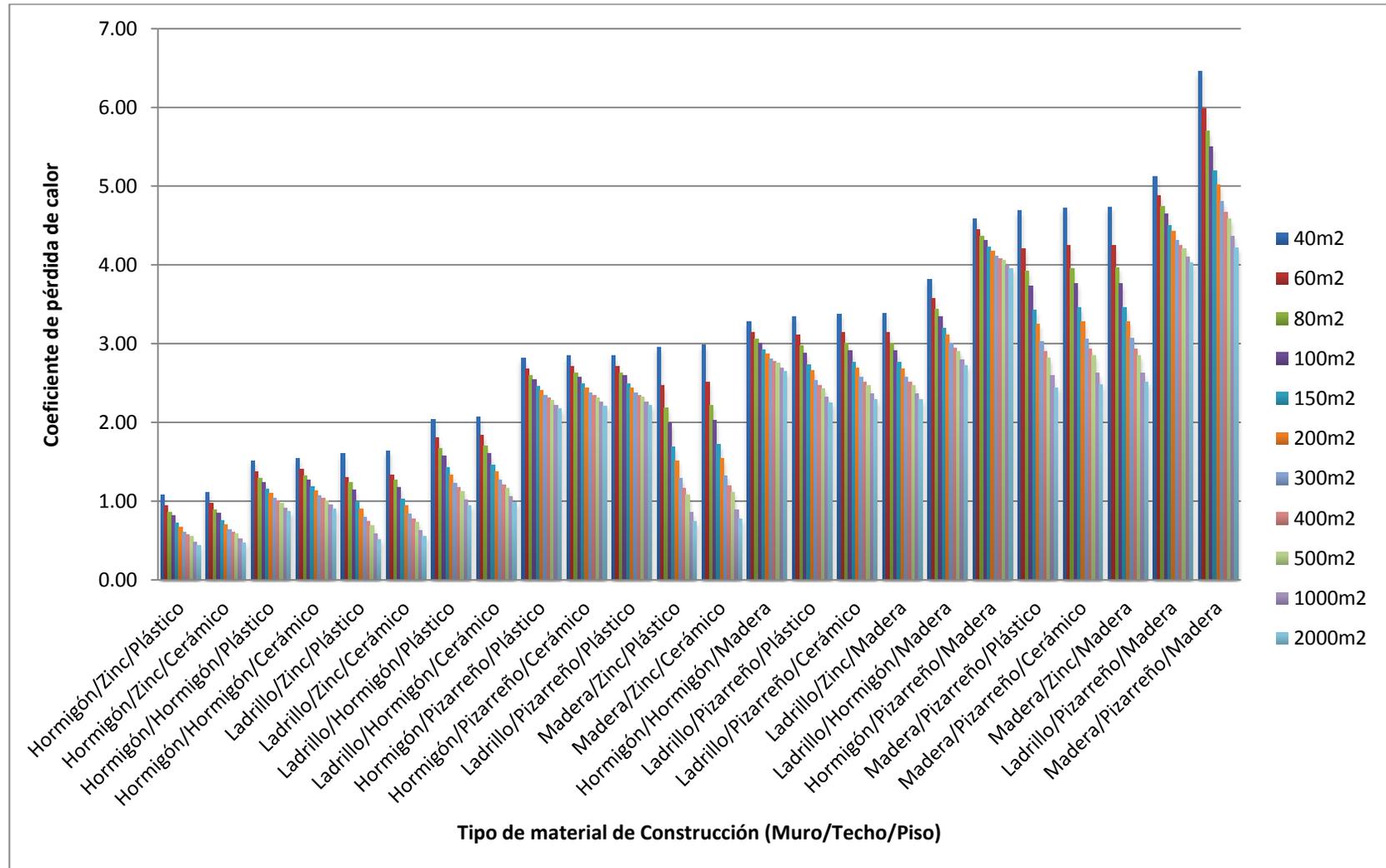


Figura 29. Gráfico del coeficiente de pérdidas térmicas [kW/m<sup>2</sup> °C] por tipo de construcción y superficie de la vivienda.

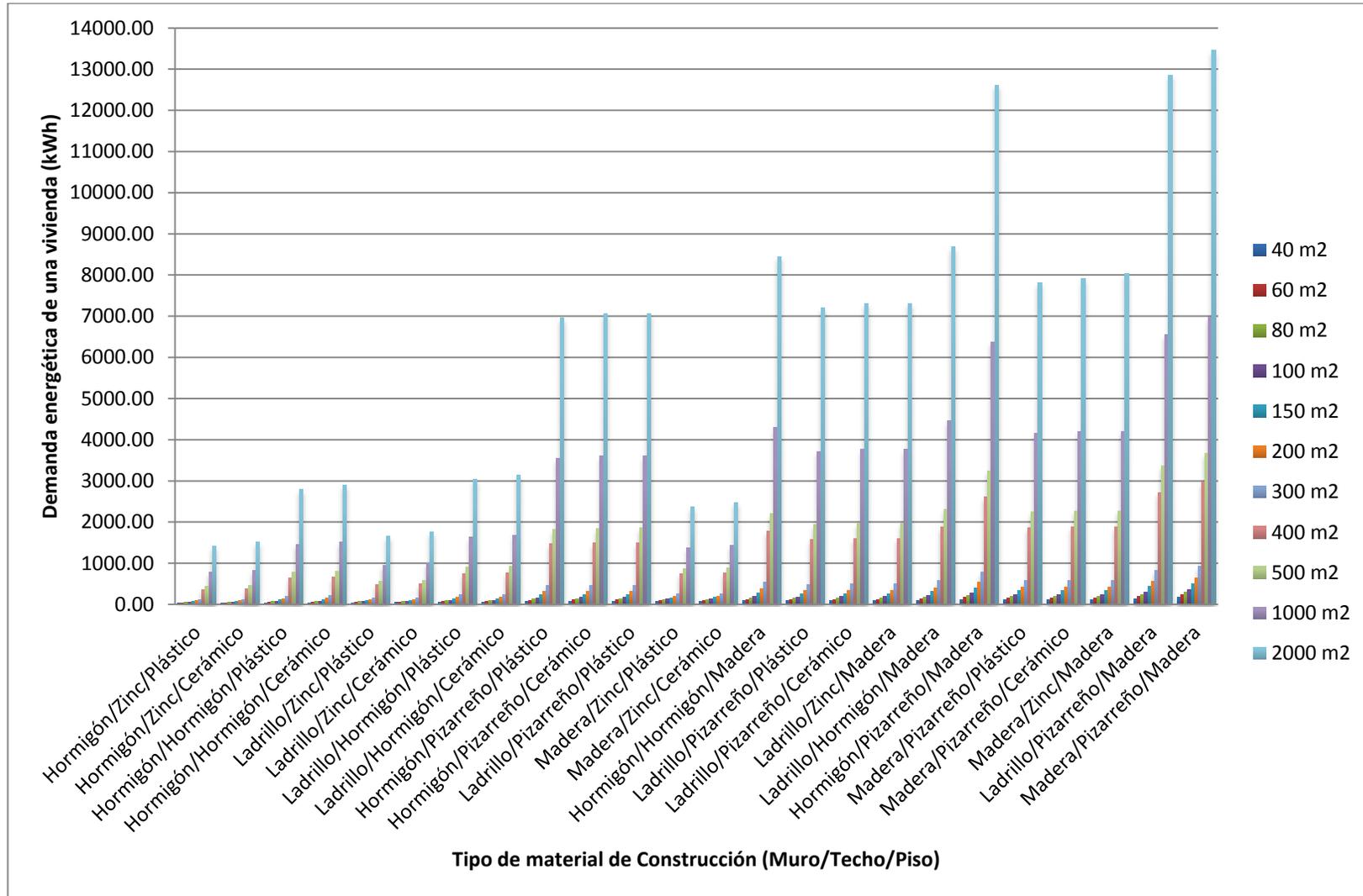


Figura 30. Demanda energética [kW] por tipo de construcción y superficie de la vivienda.

En el Cuadro 19 se presentan los costos de utilizar gas licuado, kerosene y electricidad respectivamente para satisfacer una demanda energética de 27 [kW]. Es posible observar que la energía convencional más costosa es la energía eléctrica y la más conveniente es el kerosene. Si se comparan con los costos de operación anuales de la bomba de calor geotérmica que son aproximadamente \$57.000 es posible apreciar que es notablemente menor que utilizar los otros combustibles convencionales. Por lo tanto, utilizar la energía geotérmica es aproximadamente 8 veces más conveniente que usar kerosene y gas licuado, y al compararlo con la energía eléctrica es 40 veces más conveniente.

Cuadro 19. Costos de calefacción utilizando el gas licuado, kerosene y electricidad como combustible.

Mes	Grados días	Demanda potencia [kW]	Consumo gas licuado[\$]	Consumo de kerosene[\$]	Consumo de electricidad [\$]
Enero	-	-	-	-	-
Febrero	-	-	-	-	-
Marzo	-	-	-	-	-
Abril	-	-	-	-	-
Mayo	87	3,75	\$ 41.111	\$ 37.413	\$ 42.466
Junio	165	7,1	\$ 147.871	\$ 134.570	\$ 152.747
Julio	177	7,62	\$ 170.161	\$ 154.855	\$ 175.772
Agosto	135	5,81	\$ 98.988	\$ 90.084	\$ 102.252
Septiembre	75	3,23	\$ 30.552	\$ 27.804	\$ 31.559
Octubre	-	-	-	-	-
Noviembre	-	-	-	-	-
Diciembre	-	-	-	-	-
<b>Anual</b>	<b>639</b>	<b>27,51</b>	<b>\$ 488.683</b>	<b>\$ 444.725</b>	<b>\$ 2.290.895</b>

Con el objetivo de establecer la variación en el tiempo del precio de los combustibles utilizados para evaluar la rentabilidad económica de utilizar la energía geotérmica de baja entalpía, se realizó un análisis tendencial de la variación histórica de estos precios. Este análisis se elaboró en función del horizonte de evaluación planteado anteriormente. La línea de tendencia generada para la variación del precio del gas licuado entre los años 2012 al 2022 a partir de los datos obtenidos entre el año 2000 y el año 2011 se presenta en la Figura 31. Es aquí donde se aprecia que existe una tendencia al incremento de los precios por kilogramos de este combustible.

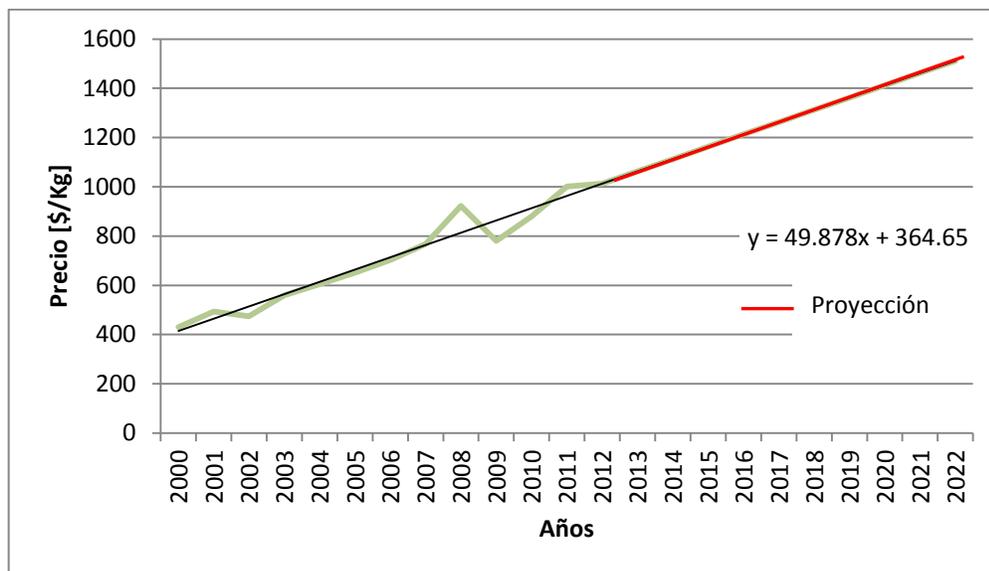


Figura 31. Línea de tendencia de la variación histórica de los precios del gas licuado.

En cuanto al kerosene se establece que existe una tendencia a que el precio por litro de este combustible aumenta año a año. La ecuación de la regresión lineal utilizada para estimar los precios del año 2012 al 2022 se presentan en la Figura 32, estos fueron estimados a partir de la serie de datos entre los años 1994 al 2011.

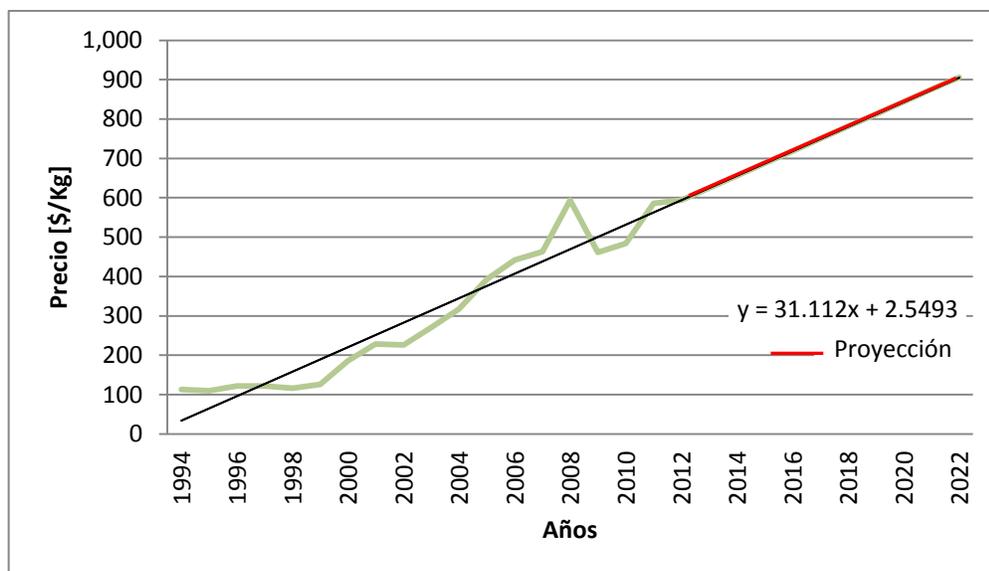


Figura 32. Línea de tendencia de la variación histórica de los precios del kerosene.

Por último, la línea de tendencia establecida para la electricidad se presenta en la Figura 33. En ésta se muestra la existencia de una tendencia a la disminución de los precios por kiloWatt de este combustible. Lo cual se debe al reducido tamaño de la muestra utilizado para realizar la estimación de los precios.

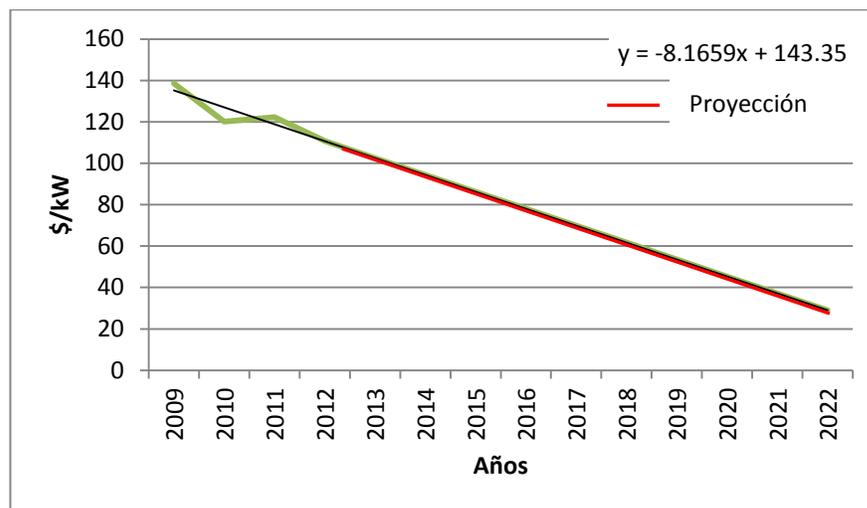


Figura 33. Línea de tendencia de la variación histórica de los precios de la electricidad.

Los resultados del VAN, la TIR y el periodo de retorno para un sistema de bomba de calor vertical comparada con gas licuado como combustible convencional, se presentan en el Apéndice VII. En base a estos resultados podemos concluir que utilizar las bombas de calor vertical resulta más rentable en 209 de los 264 casos evaluados que utilizar el gas licuado como combustible de calefacción. Además, se observa que en la mayoría de los casos el periodo de retorno es menor a 10 años con un promedio de 4 años. Por otro lado, la TIR promedio es del 52 %, y el VAN promedio es de \$33.000.000.

Los resultados del VAN, la TIR y el periodo de retorno para un sistema de bomba de calor vertical comparada con kerosene se presentan en el Apéndice VIII. Observando estos resultados se infiere que utilizar las bombas de calor vertical resulta más rentable en 159 de los 264 casos evaluados que utilizar el kerosene como combustible para la calefacción de la vivienda. Además, es posible apreciar que en la mayoría de los casos el periodo de retorno es menor a 10 años con un promedio de 3,7 años. Además, presentan una TIR promedio de 48 % y un VAN promedio de \$52.000.000.

Los resultados del último caso de comparación de un sistema de bomba de calor vertical con electricidad, del VAN, la TIR y el periodo de retorno se presentan en el Apéndice IX. A partir de estos anexos se concluye que en los 264 casos evaluados existe un ahorro económico cuando se utiliza una bomba de calor vertical en vez de electricidad como combustible para la calefacción de la vivienda. Además, se aprecia que el promedio de los periodos de retornos es de 1,3 año. En el cuanto a la TIR el promedio de ésta es del 300 %, y el VAN promedio es de \$260.000.000.

Por otra parte, cuando se evalúa un sistema de bomba horizontal, los resultados obtenidos de la comparación entre este sistema con un sistema que utilice gas licuado para calefacción se presentan en el Apéndice X. En estos anexos se aprecia que existe una alta

tasa de rentabilidad para proyectos de este tipo, en 253 casos el VAN es mayor que cero y la TIR es mayor que la tasa de descuento utilizada para evaluar el proyecto. Además, se determina que el promedio de los VAN para estos 253 casos es de \$ 62.000.000, el promedio de las TIR es de 118%, y por último el promedio de los periodos de retornos es de 2,52 años.

En cuanto a la comparación del ahorro producido de un sistema de bomba de calor geotérmico horizontal con un sistema que utilice kerosene, se presentan los resultados obtenidos del VAN, TIR y periodo de retorno en los Apéndice XI. A partir de los resultados expuestos en estos anexos se infiere que estos proyectos poseen un alto grado de rentabilidad, dado que 236 de los casos presentan un VAN mayor a cero y un TIR mayor al 10 %. El promedio de los VAN obtenidos en estos 236 casos es de \$43.000.000 y de la TIR es del 84%, además el promedio de los periodos de retornos es 2,63 años.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de la comparación de un sistema de bomba de calor horizontal con un sistema que utiliza la electricidad para calefacción residencial en el Apéndice XII. Es posible concluir que este tipo de proyecto en todos los casos evaluados resulta con un alto grado de rentabilidad económica, dado que presenta un promedio del VAN de \$ 271.000.000 y de las TIR es del 716 %. Además, el promedio de tiempo que se demoran en recuperar la inversión bajo estas condiciones es de 1 año.

En cuanto al tipo de material utilizado para la construcción de los muros se estableció que las viviendas construidas con hormigón presentan una menor rentabilidad. Esto se debe a que al producirse menores pérdidas de calor se necesitan menos horas de calefacción, por lo cual resulta más conveniente utilizar otro tipo de combustible convencional para la climatización del hogar. En cambio, las construcciones realizadas con muros de madera resultan más rentables, lo cual se debe al alta demanda energética que necesitan para la calefacción de la vivienda, en este caso si se justificaría la alta inversión inicial necesaria para llevar a cabo un proyecto geotérmico.

Además, se estableció que otro factor que determina la rentabilidad de un proyecto de bomba de calor geotérmica es la superficie de la vivienda. Se observó que en todos los casos evaluados mientras mayor es la superficie evaluada mayor es la rentabilidad económica. Por lo tanto, se debe invertir bajo estas condiciones en un proyecto de geotermia de baja entalpía, ya que la inversión realizada es recuperada en un periodo menor a 10 años.

Los proyectos de bombas de calor geotérmicas vertical u horizontal presentan mayor rentabilidad cuando se comparan con proyectos que utilizan la electricidad como combustible convencional, esto se debe a que estos proyectos tienen altos costos de operación. Por otra parte, se estableció que los proyectos geotérmicos comparados con el gas licuado como combustible para la calefacción resultan menos rentables que cuando se comparan con la electricidad, pero resultan más rentables cuando se comparan con proyectos que utilicen el kerosene como combustible convencional.

Por último, se puede concluir que los proyectos de bombas de calor horizontal presentan un mayor grado de rentabilidad que los proyectos de bombas de calor vertical. Esto se debe principalmente a que los proyectos geotérmicos verticales necesitan una mayor inversión inicial para empezar a funcionar, lo cual está determinado por los costos de perforación.

#### **5.4.2.1 Rentabilidad por Cluster**

A continuación se evaluó para cada *Cluster* la rentabilidad de realizar un proyecto geotérmico que utiliza una bomba de calor geotérmica vertical comparada con los combustibles convencionales (gas licuado, kerosene y electricidad). Esto fue realizado en función de las condiciones del PGBE y profundidad existe en cada zona. Para esto, se utilizó como factor de comparación, entre los diferentes *Clusters*, el mismo tipo de vivienda a la cual es posible satisfacer su demanda energética para calefacción. Siendo ésta una vivienda construida con muros de hormigón, techo de pizarreño y piso de madera, la superficie construida es de 1000 [m<sup>2</sup>].

Se determinó que en el *Cluster 1* el VAN resultante es de \$898.719.443, la TIR es de 553% y el periodo de retorno es de 1 años, cuando se comparan las bombas de calor con el gas licuado. Estos datos fueron calculados en base a una profundidad de 35 [m] y una inversión de \$16.000.000. Por otra parte, cuando se compara las bombas de calor con el kerosene, el VAN resultante es de \$647.747.297, la TIR es de 368 % y el periodo de retorno es mayor de 1 años. Por último, el VAN resultante es de \$787.959.887, la TIR es de 785 % y el periodo de retorno es más de 1 años, cuando se compara las bombas de calor con la electricidad.

Para el caso del *Cluster 2* la profundidad necesaria para extraer el recurso geotérmico es de 45 [m] y la inversión inicial a realizar es de \$17.000.000. Cuando se compara con el gas licuado como combustible para la calefacción del hogar, el VAN resultante es de \$884.310.311, la TIR es de 445 % y el periodo de retorno es más de 1 años. En el caso de compararlo con el kerosene el VAN resultante es de \$643.501.515, la TIR es de 312 % y el periodo de retorno es más de 1 años. Por último, cuando se contrasta con la electricidad el VAN resultante es de \$783.714.104, la TIR es de 659% y el periodo de retorno es más de 1 años.

En el caso del *Cluster 3* la profundidad necesaria para extraer el recurso geotérmico es de 25 [m] y la inversión es de \$15.000.000. En este caso el VAN resultante es de \$894.924.768, la TIR es de 732 % y el periodo de retorno es de 1 años cuando se compara con el gas licuado como combustible para la calefacción del hogar. En el caso de compararlo con el kerosene el VAN resultante es de \$654.115.971, la TIR es de 508 % y el periodo de retorno es más de 1 años. Además, cuando se compara con la electricidad el VAN resultante es de \$794.328.561, la TIR es de 1101 % y el periodo de retorno es más de 1 años.

Por último, en el *Cluster 4* la profundidad necesaria para extraer el recurso geotérmico es de 20 [m] y la inversión es de \$14.000.000. En este caso el VAN resultante es de \$895.986.213, la TIR es de 784% y el periodo de retorno es de 1 años, cuando se compara con el gas licuado como combustible para la calefacción del hogar. Cuando se compara con el kerosene el VAN resultante es de \$655.177.471, la TIR es de 543% y el periodo de retorno es más de 1 años. Finalmente, cuando se compara con la electricidad el VAN resultante es de \$795.390.007, la TIR es de 1179 % y el periodo de retorno es más de 1 años.

#### 5.4.2.2 Análisis de sensibilidad

A continuación se presentan los tres escenarios analizados:

i. Primer escenario: “Vivienda del nivel socioeconómico E”.

Para este nivel socioeconómico se definió como vivienda estándar aquella que está construida de muros de madera, techo de pizarreño, piso de madera y una superficie construida de 40 [m<sup>2</sup>]. Además, ésta posee un coeficiente de pérdida de calor de 6,46 [W/m<sup>2</sup> °C], considerando \$7.500.000 como inversión inicial de un proyecto geotérmico vertical. En el caso de ser un proyecto horizontal la inversión inicial es de \$3.750.000 y la superficie necesaria para instalar las cañerías en un proyecto de este tipo es de 1650 [m<sup>2</sup>]. La afirmación anterior se fundamenta en que según la norma alemana VDI-4640 es posible extraer 20 [W/m<sup>2</sup>] en el suelo de la zona urbana de la comuna de Colina, este dato se obtuvo en función de la serie de suelo Colina (CIREN, 1996).

a. Bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción.

El VAN para un proyecto de este tipo tiene una probabilidad del 64% de ser mayor a cero, presenta una media aritmética de \$8.656.998 y una desviación estándar de ± \$21.023.251. En el caso de la TIR, la probabilidad de que ésta sea mayor que la tasa de descuento utilizada es del 79%, con una media aritmética del 25% y una desviación estándar del ± 18%. Por otra parte, se observa que existe una probabilidad del 74% de que el periodo de retorno de un proyecto de este tipo sea menor a 10 años, con un promedio de 6,86 años y una desviación estándar de ± 2,83 años (ver Cuadro 20). Finalmente, se concluye que existe una alta probabilidad de que un proyecto bajo estas condiciones resulte rentable y que la inversión sea recuperada en un periodo menor a 10 años.

Cuadro 20. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 1.

Estadísticos	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 8.656.998	25%	6,86
Desv. estándar	\$ 21.023.251	18%	2,83
Mínimo	\$ -118.425.227	-18%	2
Máximo	\$ 257.263.468	97%	11
Mediana	\$ 5.093.885	25%	6

Es importante destacar que la barra de frecuencia del histograma que presenta un valor de 11, significa que en el flujo de caja efectuado el periodo de retorno fue mayor a 10 años.

b. Bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción.

En este caso, la probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 56 %, presentando una media aritmética de \$10.934.285, con una desviación estándar de  $\pm$  \$34.684.976. La probabilidad de tener una TIR mayor al 10% es del 74,84%, con un promedio del 25% y una desviación estándar de  $\pm$  20%. Además, se aprecia que existe una probabilidad del 66% de que el periodo de retorno sea menor a 10 años. En este caso, se estima que el promedio de los periodos de retornos evaluados es de 7,64 años y la desviación estándar es de  $\pm$  2,83 años (ver Cuadro 21). Por lo tanto, se concluye que existe una probabilidad mayor al 50% de que un proyecto de este tipo resulte rentable económicamente, y que la inversión se devuelva en un plazo menor a 10 años.

Cuadro 21. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción para el escenario 1.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 10.934.285	25%	7,64
Desv. estándar	\$ 34.634.976	20%	2,83
Mínimo	\$ - 60.965.971	-17%	2
Máximo	\$ 645.109.528	111%	11
Mediana	\$ 2.520.185	24%	7

c. Bomba de calor vertical comparada con electricidad para calefacción.

En el Cuadro 22 se muestra que existe un 100% de probabilidad de que el VAN sea mayor a cero, con un promedio de \$39.963.120 y una desviación estándar de  $\pm$  \$24.567.603. Por otra parte, la probabilidad de que la TIR sea mayor al 10%, es del 100%, con una media aritmética del 116% y una desviación estándar del  $\pm$  22%. Además, se aprecia que el periodo de retorno presenta un promedio de 3,34 años, y una desviación estándar de  $\pm$  1 año. Por lo tanto, es posible afirmar que este tipo de proyectos tiene una muy alta probabilidad (cercana al 100 %) de ser rentable.

Cuadro 22. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción para el escenario 1

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 39.963.120	116%	3,34
Desv. estándar	\$ 24.567.603	22%	1,01
Mínimo	\$ 6.506.624	51%	2
Máximo	\$ 472.359.565	251%	11
Mediana	\$ 34.122.913	115%	3

d. Bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción.

La probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 74,8 %, con un promedio de \$12.651.152 y una desviación estándar de  $\pm$  \$21.811.605. Por otra parte, existe una probabilidad del 90 % de que la TIR sea mayor a la tasa de descuento utilizada, con una media del 44 % y una desviación estándar del  $\pm$  25 %. Además, la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es del 78 %, con una media aritmética del 5,6 % con una desviación estándar de  $\pm$  3,17 % (ver Cuadro 23). Por último, se infiere que existe una probabilidad mayor al 70 % de que un proyecto con las características estudiadas sea rentable.

Cuadro 23. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 1

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 12.651.152	44%	5,6
Desv. estándar	\$ 21.811.605	25%	3,17
Mínimo	\$ -93.027.263	-19%	2
Máximo	\$ 434.687.915	150%	11
Mediana	\$ 9.241.941	44%	4

e. Bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción.

En el Cuadro 24 se observa que existe una probabilidad del 66 % de que el VAN sea mayor o igual a cero, con un promedio de \$15.080.455 y una desviación estándar de  $\pm$  \$36.380.321. Además, se establece que existe una probabilidad del 86 % de que la TIR sea mayor al 10 %, con un promedio del 40 % y una desviación estándar de  $\pm$  26 %. Por otra parte, se muestra que existe una probabilidad del 71 % de que el periodo de retorno sea menor a 10 años, con una media aritmética de 6,61 años y una desviación estándar de  $\pm$  3,18 años. Por lo tanto, este tipo de proyectos resulta menos rentable que el caso anterior, pero igualmente posee una probabilidad mayor al 60 % de que la rentabilidad económica sea alta.

Cuadro 24. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción para el escenario 1.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 15.080.445	40%	6,61
Desv. estándar	\$ 36.380.321	26%	3,18
Mínimo	\$ - 71.479.529	-15%	2
Máximo	\$ 977.424.239	167%	11
Mediana	\$ 6.788.485	38%	5

f. Bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción.

La probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 100%, con una media aritmética de \$43.167.469 y una desviación estándar de  $\pm$  \$23.072.335. Además, se observa que existe un 100 % de probabilidad de que la TIR sea mayor al 10 %, con una media aritmética del 241 % y una desviación estándar de  $\pm$  34%. Por otro lado, la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es de 100 %, esto se debe a que bajo estas condiciones el periodo de retorno siempre será de 1 año. Finalmente, se establece que un proyecto de bomba de calor geotérmico horizontal comparada con la electricidad como combustible para la calefacción de una vivienda del nivel socioeconómico E siempre resulta rentable económicamente. Además, la probabilidad de recuperar la inversión en un periodo de 1 año es del 100%. La principal limitante es que en un proyecto de bomba de calor horizontal bajo las condiciones evaluadas requiere de 1650 [m<sup>2</sup>], lo cual no es de fácil acceso en este nivel socioeconómico.

Cuadro 25. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción para el escenario 1.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 43.167.469	241%	1
Desv. estándar	\$ 23.072.335	34%	0
Mínimo	\$ 8.991.424	129%	1
Máximo	\$ 440.747.964	417%	1
Mediana	\$ 37.001.408	239%	1

ii. Segundo escenario: “Vivienda del nivel socioeconómico C2”.

Los supuestos establecidos para una vivienda del nivel socioeconómico C2 son: muros de ladrillos, techo de zinc, piso de cerámica, además posee una superficie construida de 100 [m<sup>2</sup>], y un coeficiente de pérdida de calor de 1,17 [W/m<sup>2</sup> °C]. La inversión inicial de un proyecto geotérmico vertical es de \$14.000.000, y en el caso de ser un proyecto horizontal la inversión inicial es de \$3.750.000. El área necesaria para llevar a cabo un proyecto horizontal es de 500 [m<sup>2</sup>]. La afirmación anterior se fundamenta en que según la norma alemana VDI-4640 es posible extraer 30 [W/m<sup>2</sup>], dado que la mayor proporción de este tipo de viviendas se encuentre en el centro urbano de la comuna de Colina, el cual está ubicado en la serie de suelo Quilapilun (CIREN, 1996).

a. Bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción.

La probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 17 %, con una media aritmética de -\$7.152.264 y una desviación estándar de  $\pm$  \$9.265.371. Además, se muestra que la probabilidad de que la TIR sea mayor a 10 % es del 23,66%, con una media aritmética del 2 % y una desviación estándar de  $\pm$  11 %. Por otra parte, se aprecia que la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es de 38,6 %, con una media aritmética de 9,94 años y una desviación estándar de  $\pm$  1,57 años (ver Cuadro 26). Finalmente, un proyecto de bomba de calor vertical comparado con gas licuado bajo las condiciones planteadas anteriormente presenta una baja probabilidad de que sea rentable económicamente.

Cuadro 26. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ - 7.152.264	2%	9,54
Desv. estándar	\$ 9.265.371	11%	1,57
Mínimo	\$ - 54.172.554	-18%	4
Máximo	\$ 119.813.728	51%	11
Mediana	\$ - 8.851.400	1%	11

b. Bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción.

En el Cuadro 27 se muestra que existe una probabilidad del 19 % de que el VAN sea mayor a cero, con una media aritmética de -\$6.421.048 y una desviación estándar de  $\pm$  \$16.062.851. Además, existe una probabilidad del 30% de que la TIR sea mayor a la tasa de descuento, con un promedio del 4% y una desviación estándar de  $\pm$  13%. Por otra parte, se observa que la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es del 36,9 %, con una media aritmética de 9,92 años y una desviación estándar de  $\pm$  1,65 años. Por lo tanto, se infiere que existe una probabilidad cercana al 30 % de que un proyecto de este tipo resulte rentable económicamente.

Cuadro 27. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ - 6.421.048	4%	9,92
Desv. estándar	\$ 16.062.851	13%	1,65
Mínimo	\$ - 59.340.947	-15%	4
Máximo	\$ 437.697.447	66%	11
Mediana	\$ - 10.112.697	2%	11

c. Bomba de calor vertical comparada con electricidad para calefacción.

En el Cuadro 28 se muestra que existe un 74 % de probabilidad, con una media aritmética de \$6.542.194 y una desviación estándar de  $\pm$  \$10.226.305. Además, se puede apreciar que existe una probabilidad del 74 % de que la TIR resulte mayor a la tasa de descuento utilizada, con una media aritmética del 18 % y una desviación estándar de  $\pm$  13 %. Por otra parte, se observa que existe una probabilidad del 92,8 % de que la inversión realizada se recupere en un periodo de 10 años, con una media aritmética de 5,09 años y una desviación estándar de  $\pm$  4 años. Por lo tanto, se establece que al realizar esta comparación la

probabilidad de que el proyecto resulte rentable y de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es alta.

Cuadro 28. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con electricidad para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 6.542.194	18%	5.09
Desv. estándar	\$ 10.226.305	13%	4
Mínimo	\$ - 5.575.039	-100%	3
Máximo	\$ 110.543.531	69%	11
Mediana	\$ 4.063.856	10%	4

d. Bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción.

En el Cuadro 29 se muestra que existe un 72 % de probabilidad de que el VAN sea mayor a cero, con un promedio de \$11.986.335 y una desviación estándar de  $\pm$  \$21.899.868. Además, se observa que la probabilidad de que la TIR sea mayor a 10 % es del 72.7 %, con una media aritmética del 20 % y una desviación estándar de  $\pm$  16%. Por otro lado, se afirma que la probabilidad de que la inversión se recupere antes de 10 años es del 70 %, con una media de 7,47 años y una desviación estándar de  $\pm$  2,69 años. Por lo tanto, se infiere que existe una alta probabilidad de que un proyecto bajo estas condiciones resulte rentable.

Cuadro 29. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 11.986.335	20%	7,47
Desv. estándar	\$ 21.899.868	16%	2,69
Mínimo	\$ - 74.740.906	-10%	3
Máximo	\$ 278.523.518	92%	11
Mediana	\$ 8.147.985	20%	7

e. Bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción.

La probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 64 %, con un promedio de \$14.088.649 y una desviación estándar de  $\pm$  \$35.903.772. Además, se muestra que la probabilidad de que la TIR sea mayor a la tasa de descuento es de 72,7 %, con una media aritmética del 35% y una desviación estándar de  $\pm$  25%. Por otra parte, se observa que la probabilidad de que el periodo de recuperación sea menor a 10 años es del 70 %, con una media aritmética de 8,06 años y una desviación estándar de  $\pm$  2,66 años. Por lo tanto, existe una probabilidad cercana al 60 % de que un proyecto de este tipo resulte rentable económicamente.

Cuadro 30. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 14.088.649	35%	8,06
Desv. estándar	\$ 35.903.772	25%	2,66
Mínimo	\$ - 76.134.540	-16%	3
Máximo	\$ 730.714.656	143%	11
Mediana	\$ 5.418.669	34%	8

f. Bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción.

En el Cuadro 31 se aprecia que la probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 64%, con un promedio de \$10.266.820 y una desviación estándar de  $\pm$  \$7.226.388. Además, existe una probabilidad del 84 % de que la TIR sea mayor al 10 %, con una media aritmética del 56 % y una desviación estándar de  $\pm$  16 %. Por otra parte, se muestra que la probabilidad de recuperar la inversión en un plazo menor a 10 años es del 63 %, con un promedio de 1,54 años y una desviación estándar de  $\pm$  0,16 años. Finalmente, este tipo de proyectos presenta una alta probabilidad mayor al 60 % de resultar rentable económicamente.

Cuadro 31. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción para el escenario 2.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 10.266.820	56%	1,54
Desv. estándar	\$ 7.226.388	16%	0,16
Mínimo	\$ - 1.178.600	-6%	1,06
Máximo	\$ 82.945.221	122%	244
Mediana	\$ 8.432.426	55%	1,54

iii. Tercer escenario: “Vivienda del nivel socioeconómico ABC1”.

Finalmente, en el tercer escenario se utilizó una vivienda tipo bajo los siguientes supuestos: los muros y el techo de la vivienda están contruidos de hormigón y el piso es de cerámica, la superficie construida es de 300 [m<sup>2</sup>], y posee un coeficiente de pérdida de calor de 1,07 [W/m<sup>2</sup> °C]. La inversión realizada en caso de establecer un proyecto de bomba de calor geotérmica vertical es de \$15.500.000. Por otra parte, en el caso de ser un proyecto horizontal la inversión inicial es de \$5.500.000 y el área necesaria para llevar a cabo un proyecto de este tipo es de 1030 [m<sup>2</sup>]. La afirmación anterior se fundamenta en que según la norma alemana VDI-4640 es posible extraer 40 [W/m<sup>2</sup>], dado que la mayor proporción de este tipo de viviendas se encuentre en el sector de Chicureo, el cual está ubicado en la serie de suelo Chicureo (CIREN, 1996).

a. Bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción.

En el Cuadro 32 se observa que la probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 51%, con un promedio de \$4.586.559 y una desviación estándar de  $\pm$  \$27.060.266. Además, se muestra que la probabilidad de que la tasa de descuento sea menor a la TIR es del 64%, con una media aritmética del 15 % y una desviación estándar de  $\pm$  15%. Por otra parte, se observa que existe una probabilidad del 65 % de que la inversión se recupere en un plazo menor a los 10 años, con una media aritmética de 8,1 años y una desviación estándar de  $\pm$  2,52 años. Por lo tanto, existe una probabilidad cercana al 50 % de que un proyecto de bomba de calor geotérmico vertical sea rentable económicamente.

Cuadro 32. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 4.586.559	15%	8,1
Desv. estándar	\$ 27.060.266	15%	2,52
Mínimo	\$ - 156.178.274	-18%	3
Máximo	\$ 336.564.959	72%	11
Mediana	\$ 199.855	15%	8

b. Bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción.

La probabilidad de que la VAN sea mayor a cero es del 44%, con una media aritmética del \$7.375.796 y una desviación estándar de  $\pm$  \$45.662.227. Por otra parte, se muestra que existe un 60 % de probabilidad de que la tasa interna de retorno sea mayor a la tasa de descuento, con una media aritmética del 16 % y una desviación estándar de  $\pm$  18 %. Además, se observa que existe una probabilidad del 58 % de que el periodo de recuperación de la inversión sea menor a 10 años. Con una media aritmética de 8,52 años y una desviación estándar de  $\pm$  2,46 años. Por lo tanto, existe una probabilidad mayor al 40 % de que un proyecto de este tipo sea rentable económicamente.

Cuadro 33. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con kerosene para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 7.375.796	16%	8,52
Desv. estándar	\$ 45.662.227	18%	2,46
Mínimo	\$ -100.343.906	-17%	5
Máximo	\$ 932.773.566	94%	11
Mediana	\$ - 3.629.906	15%	9

c. Bomba de calor vertical comparada con electricidad para calefacción.

En el Cuadro 33 se muestra que la probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es del 100% con un promedio de \$42.586.483 y una desviación estándar de  $\pm$  \$29.186.297. Por otra parte, se observa que existe un 100 % de probabilidad de que la tasa interna de retorno sea mayor a 10 %, con una media aritmética del 66 % y una desviación estándar de  $\pm$  17 %. Además, la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es del 100 %, con una media de 2,01 años y una desviación estándar de  $\pm$  0,11 años. Por lo cual, este tipo

de proyecto presenta una alta probabilidad de ser rentable económicamente, recuperando la inversión en menos de 2 años.

Cuadro 33. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor vertical comparada con electricidad para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 42.586.483	66%	2,01
Desv. estándar	\$ 29.186.297	17%	0,11
Mínimo	\$ - 1.115.809	6%	1
Máximo	\$ 365.158.086	139%	3
Mediana	\$ 35.317.445	65%	2

d. Bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción.

La probabilidad de que la VAN sea menor a cero es del 73%, con una media aritmética de \$15.066.636 y una desviación estándar de  $\pm$  \$26.527727. Además, se aprecia que la tasa interna de retorno tiene una probabilidad del 89 % de ser mayor que la tasa de descuento, con un promedio del 39 % y una desviación estándar de  $\pm$  23 %. Por otra parte, la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es del 79 %, con un promedio de 5,79 años y una desviación estándar de  $\pm$  3,09 años (ver Cuadro 34). En conclusión, existe una alta probabilidad de resultar rentable económicamente un proyecto de este tipo.

Cuadro 34. Análisis de sensibilidad de un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con gas licuado para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 15.066.636	39%	5,79
Desv. estándar	\$ 26.527.727	23%	3,09
Mínimo	\$ -90.287.404	-10%	2
Máximo	\$ 290.762.591	122%	11
Mediana	\$ 10.560.489	39%	4

e. Bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción.

En el Cuadro 35 se muestra que la probabilidad de que el VAN sea mayor a cero es de 65 %, con una media aritmética de \$18.372.118 y una desviación estándar de  $\pm$  \$50.750.836. Por otro lado, la probabilidad de que la TIR sea mayor al 10% es del 84%, con un promedio del 36% y una desviación estándar de  $\pm$  25%. Además, se observa que la probabilidad de que el periodo de retorno sea menor a 10 años es de 71 %, con un promedio de 6,78 años y una desviación estándar de  $\pm$  3,1 años. Por lo tanto, existe una alta probabilidad (mayor al 60 %) de que un proyecto de bomba geotérmica horizontal bajo las condiciones planteadas anteriormente resulte rentable.

Cuadro 35. Análisis de sensibilidad un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con kerosene para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 18.372.118	36%	6,78
Desv. estándar	\$ 50.750.836	25%	3,1
Mínimo	\$ - 109.054.735	-16%	2
Máximo	\$ 1.432.113.421	156%	11
Mediana	\$ 7.516.738	54%	6

f. Bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción.

Se muestra en la el Cuadro 36 que la probabilidad de que el VAN sea mayor que cero es del 100 %, con una media de \$53.421.947 y una desviación estándar de  $\pm$  \$29.494.909. Además, existe una probabilidad del 100% de que la TIR sea mayor al 10%, con una media aritmética del 203% y una desviación estándar de  $\pm$  31%. Por otra parte, se aprecia que existe una probabilidad del 100 % de que la inversión se recupere en el primer año. Finalmente, este tipo de proyectos presenta una alta probabilidad de resultar económicamente rentable.

Cuadro 36. Análisis de sensibilidad un proyecto de bomba de calor horizontal comparada con electricidad para calefacción para el escenario 3.

Estadístico	VAN [\$]	TIR [%]	Periodo de retorno [Años]
Promedio	\$ 53.421.947	203%	1
Desv. estándar	\$ 29.494.909	31%	0
Mínimo	\$ 12.043.028	112%	1
Máximo	\$ 489.318.575	552%	1
Mediana	\$ 46.141.506	202%	1

## 6 CONCLUSIONES

Mediante la realización de la presente memoria se concluyó que en la comuna de Colina existe un PGBE promedio por pixel de  $17,69 \pm 3,69$  [kW]. En relación a los métodos utilizados para estimar este potencial se determinó que el método del volumen es la metodología más adecuada para cuantificar el PGBE de la comuna de Colina, dado que los resultados estimados con el método del flujo térmico superficial presentan una alta dispersión estadística y no son posibles de espacializar. Por otro lado, en cuanto a la estimación de las temperaturas del agua subterránea en profundidad el método que resultó ser el más adecuado fue la Ley de Fourier.

Además, de las cuatro zonas establecidas en el presente trabajo el *cluster 2* se da con mayor intensidad la actividad antrópica ya sea residencial o agroindustrial, presentando un PGBE promedio de  $18,29 \pm 1,01$  [kW] y una profundidad promedio de la napa subterránea de  $56,15 \pm 16,19$  [m]. El mayor PGBE se encuentra en el *cluster 4* ( $26,77 \pm 2$  [kW]) en éste se encuentran ubicadas las dos termas existente en el área de estudio y esta zona posee un uso residencial nulo.

En base a los resultados de la factibilidad técnica se recomienda utilizar las bombas de calor horizontal o vertical con fines de climatización residencial. En relación a la factibilidad económica se concluyó que existe una mayor rentabilidad en proyectos que utilicen las bombas de calor horizontal que las bombas de calor vertical.

Respecto al análisis de sensibilidad las viviendas pertenecientes a los niveles socioeconómicos E y ABC1 presentan una mayor rentabilidad económica cuando utilizan las bombas de calor (vertical u horizontal) en comparación con utilizar kerosene o gas licuado para calefacción. En cambio, cuando se compara con la electricidad los 3 escenarios socioeconómicos (E, C2, ABC1) resultan con alta probabilidad de ser rentable utilizar las bombas de calor.

## 7 PERSPECTIVAS

Es importante trabajar en el desarrollo de una base de datos de temperatura de los diferentes sistemas geotermales presentes en Chile. Dada la principal limitación que se desarrollaron en el transcurso de la presente memoria que fue la falta de información de los datos necesarios para realizar la estimación del potencial geotérmico de baja entalpía. Debido al bajo desarrollo de la investigación científica relacionada con la energía geotérmica de baja entalpía en Chile, las principales líneas investigativas se enfocan en la energía geotérmica de alta entalpía utilizada para la generación de electricidad. Además, dada esta limitación no fue posible comparar los resultados obtenidos en la presente memoria con otros estudios realizados en la comuna de Colina o en su defecto en la región Metropolitana.

La principal ventaja de la presente memoria es que se desarrolló y evaluó una metodología para la estimación del PGBE, permitiendo conocer las potencialidades del recurso geotérmico y al mismo tiempo, la factibilidad económica para su aprovechamiento. Por lo cual, esta metodología puede ser replicada en diferentes territorios del país con el objetivo de cuantificar el PGBE, incentivando el uso de esta energía limpia y renovable.

Como trabajo futuro es necesario cuantificar los efectos en el acuífero de Colina al utilizar el agua subterránea para la calefacción de viviendas, evaluando la dinámica de recarga del acuífero y estimando los posibles impactos en la variación de las temperaturas de éste. Por lo cual, es necesario establecer una capacidad de carga máxima que puede soportar el acuífero sin que se alteren sus parámetros normales de funcionamiento. Por otra parte, es necesario que se establezcan políticas públicas de incentivos a la utilización de estos sistemas de energía renovables, estableciendo sistemas de subvenciones o una franquicia tributaria similar a la establecida para fomentar el uso de paneles solares (ley 20.365) para los niveles socioeconómicos más bajos. Dado que los altos costos de inversión que se deben realizar sólo podrían ser alcanzables para la calefacción de viviendas de la ABC1 o para usos industriales.

Finalmente, es necesario realizar un análisis de los costos y beneficios de utilizar este tipo de energía renovable, en el escenario de las viviendas pertenecientes al nivel socioeconómico C2 que resultaron tener una baja probabilidad de rentabilidad económica ( $VAN < 0$ ,  $TIR < 10\%$  y periodo de retorno  $> 10$  años), con la finalidad de cuantificar los beneficios ambientales y sociales que generan la utilización de la energía geotérmica.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D y D. Sweeney. 2008. Estadística Para Administración y Economía. 10ª ed. Editorial Cengage Learning Editores.1056p.
- Andritsos, N., P. Dalabakis, G. Karydakis, N. Kolios and M. Fytikas. 2011. Characteristics of low-enthalpy geothermal applications in Greece. *Renewable Energy* 36: 1298-1305.
- Anglo American Sur S.A., 2007. Proyectos: Desarrollo los Bronces. Disponible en: [http://www.anglochile.cl/es/la\\_empresa/proyectos.htm](http://www.anglochile.cl/es/la_empresa/proyectos.htm) Leído el 12 de Octubre de 2012.
- Antics, M., and B. Sanner. 2007. Status of Geothermal Energy Use and Resources. 9Pp. *In: Europe Proceedings European Geothermal Congress, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June, 2007.*
- Arkan, S. and M. Parlaktuna. 2005. Resource Assessment of Balçova Geothermal Field. 10Pp. *In: Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.*
- Arnórsson, S, 2000. Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use: sampling methods, data handling, interpretation. Editorial International Atomic Energy Agency. 351p.
- Armstrong, M. 1998. Basic linear Geostatistics. 2ª ed. Editado por Springer. 183p.
- Asociación de Historia de la Estadística y de la Probabilidad en España (AHEPE).2006. Historia de la probabilidad y la estadística. Editorial Delta Publicaciones. 329p.
- Axelsson, G. and E. Gunnlaugsson. 2000. Background: geothermal utilization, management and monitoring. 9-10 Pp. *In: Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation, World Geothermal Congress Short Course, Japan, 2000.*
- Ballester, V. 2004. Diseño de pozos profundos. 1ª ed. Universidad Santo Tomas. 74p.
- Barbacki, A. 2012. Classification of geothermal resources in Poland by exergy analysis-Comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16:123-128.
- BCN. 2010. Ley 19.657: Sobre concesiones de energía geotérmica. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=150669>. Leído el 16 de Julio de 2012.
- Bendritter, Y., and G. Cormy. 1990. Possible approach to geothermal research and relative costs, in Dickson, M.H., and Fanelli, M., ed., *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York. 59-69p.
- Berenson, M., D. Levine y T. Krehbie. 2001. Análisis de Series de Tiempo. En *Estadística para la administración*. 2ª ed. Editorial Prentice Hall. 943p.

Bertani, R. 2012. Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report. *Geothermics* 41: 1-29.

Bodvarsson, C. 1970. An estimate of the natural heat resources in a thermal area in Iceland. *Geothermics* 2 (2): 1287- 1293.

Bustamante, W., F. Encinas, Y. Rozas y F. Victorero. 2007. Manuales de referencias técnicas: fundamentos técnicos. Para: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Licitación Pública N° 587-605-LP06. Disponible en: [http://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.minvu.cl%2Fincjs%2Fdownload.aspx%3Fglb\\_cod\\_nodo%3D20070212164420%26hdd\\_nom\\_archivo%3DFundamentos%2520Tecnicos\\_88125153586193299.pdf&ei=sqeXULmbGOqW0QHb5YGoAQ&usg=AFQjCNFDCZNwZdEcBSFfpwu4zYWEFaz1Sw](http://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&sqi=2&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.minvu.cl%2Fincjs%2Fdownload.aspx%3Fglb_cod_nodo%3D20070212164420%26hdd_nom_archivo%3DFundamentos%2520Tecnicos_88125153586193299.pdf&ei=sqeXULmbGOqW0QHb5YGoAQ&usg=AFQjCNFDCZNwZdEcBSFfpwu4zYWEFaz1Sw) Leído el 30 de septiembre del 2012.

Can, M. 2007. Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 1596-1606.

Callister, W. 1996. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Editorial Reverte. 416p.

Capilla, J., J. Gómez y A. Sahuquillo. 1999. La contaminación de las aguas subterráneas, un problema pendiente: Textos de las Jornadas celebradas en Valencia. Editorial IGME. 621 p.

Castro, C. 2005. Impacto de la dispersión urbana de la ciudad de Santiago en la calidad del suelo en la periferia norte: Colina y Lampa. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*. Universidad de Barcelona. IX número 194.

CENSO AGROPECUARIO. 2007. Resultados Censo Agropecuario 2007. Disponible en: <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html> Leído el 23 de febrero de 2012.

CENTRAL ENERGÍA. 2011. Capacidad bruta instalada en Chile. Disponible en: <http://www.centralenergia.cl/centrales/> Leído el 23 de febrero de 2012.

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN), 1996. Estudio agrológico Región Metropolitana. Descripciones de suelos. Materiales y símbolos. Publicación CIREN 115. 431p.

Chilès, J.P. and P. Delfiner. 2012. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. 2ª ed. Editado por John Wiley & Sons. 579 p.

CHILECLIMA. 2012. Estaciones meteorológicas de la Región Metropolitana. Disponible en: <http://www.chileclima.cl/DetalleEstacion/estaciones.aspx?region=13> Leído el 22 de febrero de 2012.

Crespo, C. 2005. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5ª Ed. Editorial Limusa. 650p.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 1999. Análisis de contaminación de aguas subterráneas en la Región Metropolitana, por aguas servidas. Santiago.

DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE (DMC). 2001. Climatología regional. Disponible en: <http://164.77.222.61/climatologia/> Leído el 10 de marzo de 2012.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), 2002a. Informe de zonificación hidrogeológica para las regiones Metropolitana y V. Disponible en: [http://www.dga.cl/administracionrecursos\\_hidricos/informestecnicos/Series%20de%20Informes%20Tcnicos/sdt133.pdf](http://www.dga.cl/administracionrecursos_hidricos/informestecnicos/Series%20de%20Informes%20Tcnicos/sdt133.pdf) Leído el 20 de febrero de 2012.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), 2002b. Modelo de simulación hidrológico operacional de las cuencas de los ríos Maipo y Mapocho. Disponible en: <http://sad.dga.cl/ipac20/ipac.jsp?session=1L0B7P9444093.958&profile=cirh&page=11&group=1&term=CUENCA+HIDROGRAFICA+MAIPO&index=.SW&uindex=&aspect=subtab13&menu=search&ri=1&source=~!biblioteca&1307759444390> Leído el 23 de febrero de 2012.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Maipo. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-31018\\_Maipo.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Maipo.pdf) Leído el 20 de febrero de 2012.

Díaz, L., E. Santoyo y J. Reyes. 2008. Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquimiométricas: aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas* 25 (3): 465- 482.

Doveria, M., M. Lelli, L. Marinib and B. Racoa. 2010. Revision, calibration, and application of the volume method to evaluate the geothermal potential of some recent volcanic areas of Latium, Italy. *Geothermics* 39: 260-269.

Ehlers, T., P. Armstrong and D. Chapman. 2002. Normal fault thermal regimes and the interpretation of low-temperature thermochronometers. *Physics of the earth and planetary interiors* 126 (3-4): 179- 194.

Enativa. 2012. Equipos geotérmicos para calefacción. Disponible en: <http://www.enativa.cl/> Leído el 30 de septiembre de 2012.

Fissore, A. y P. Colonelli. 2009. Sistema de certificación energética de viviendas. Para: Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Licitación Pública Número 587-466-LP07. Disponible en: [http://www.barriosustentablecoronel.cl/PDF/SISTEMA\\_DE\\_CERTIFICACION\\_ENERGICA\\_DE\\_VIVIENDAS.pdf](http://www.barriosustentablecoronel.cl/PDF/SISTEMA_DE_CERTIFICACION_ENERGICA_DE_VIVIENDAS.pdf) Leído el 25 de septiembre del 2012.

Fournier, R. 1973. Silica in thermal water: laboratory and field investigations. Proceedings of the International Symposium on Hydrogeochemistry and Biochemistry, Japan 1970, vol. 122–139p.

Fournier, R. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics* 5: 41-50.

Fournier, R. and A. Truesdell. 1973. An empirical Na–K–Ca chemical geothermometers for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37 (5):1255-1275.

Fridleifsson, I. 2003. Status of geothermal energy amongst the world's energy sources. *Geothermics* 32: 379-388.

Giggenbach, W. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52 (12): 2749 - 2765.

González, O. 1995. Volcanes de Chile. Editado por Instituto Geográfico Militar. 640p.

Gruber, C. and A. Lesne. 2005. Hamiltonian model of heat conductivity and Fourier law. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 351: 358–372.

Gutiérrez, F. y M. Parada. 2010. Numerical Modeling of Time-dependent Fluid Dynamics and Differentiation of a Shallow Basaltic Magma Chamber. *Journal of Petrology* 51(3): 731-762.

Halldórsdóttir, S., H. Björnsson, G. Axelsson, A. Gudmundsson, and A. Mortensen. 2010. Temperature model and volumetric assessment of the Krafla geothermal field in N-Iceland. 10Pp. In: Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.

Hamza, V. y M. Muñoz. 1996. Heat flow map of South America. *Geothermics* 25: 599-646.

Hauser, A. (1997). Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile. *Revista geológica de Chile* 59: 50-90.

Hochstein, M. 1988. Assessment and modeling of geothermal reservoirs (small utilization schemes). *Geothermics* 17(1): 15-49.

Iglesias, E., y R. Torres. 2009. Primera estimación de las reservas geotérmicas de temperatura intermedia a baja en veinte estados de México. *Geotermia* 22: 54-65.

Incropera, I., y D. DeWitt. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4ta ed. Editorial Pearson Educación. 886p.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). 2002. Resultados del XVII Censo nacional de población y VI censo de vivienda. 235p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 1989. NORMA CHILENA OFICIAL 1960: “Aislación térmica - Cálculo de coeficientes volumétricos globales de pérdidas térmicas”. 9p.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (INN). 2007. NORMA CHILENA OFICIAL 853: “Acondicionamiento térmico – Envoltorio térmico de edificios –Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas. 51p.

Karingithi, C. 2009. Chemical geothermometers for geothermal exploration. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources ,organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya. 12p.

Kulcar, B., D. Goricanec and J. Krope. 2008. Economy of exploiting heat from low-temperature geothermal sources using a heat pump. *Energy and Buildings* 40: 323-329.

Lahsen, A. 1988. Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics* 17: 401-410.

Lahsen, H. 2008. La energía geotérmica: posibilidades de utilización en Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile. 33p.

Lahsen, A., N. Muños and M.A. Parada. 2010. Geothermal development in Chile. 7Pp. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.*

Lee, K. 2001. Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics* 30 (4): 431-442.

Lee, Y. Sungho Park. J. Kim, H. Chan Kim and M.H. Koo. 2010. Geothermal resource assessment in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2392–2400.

Llopis, G. y V. Angulo. 2008. Guía de la energía geotérmica. Dirección general de la industria energía, y minas, consejería de economía y consumo, España 185p.

Lund, J. 2010. Direct utilization of geothermal energy. *Energies* 3: 1443-1471.

Lund, J., D. Freeston and T. Boyd. 2010. Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review. 23Pp. In: *Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.*

Marini, L. 2001. Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. Università degli Studi di Genova, Italy. 81p. Disponible en: <http://cabierta.uchile.cl/revista/11/articulos/pdf/articulo6.pdf> Leído el 30 de Agosto del 2012.

Martini, S. 2008. Sistemas Estructurales y Recursos Geotermales en la Cordillera Principal de Chile Central. (32°30' - 34°00' de Latitud Sur). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Geología. 151p.

- Matheron, G. 1969. Part 1 of Cahiers du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau. Le krigeage universel. École nationale supérieure des mines de Paris.
- Mckelvey, V. 1972. Mineral Resource estimates and public policy. Geological Survey. U.S. Government Printing Office. Estados Unidos. 713p.
- McMaster, G. & W. Wilhelmb. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87 (4): 291-300.
- Morlans, A. 2010. Contaminación difusa en acuíferos: estudio de caso en la comuna de Colina, Región Metropolitana. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniería civil. 104p.
- Mott, M. 2006. Mecánica de fluidos. 6ta ed. Editorial Pearson Educación. México. 626p.
- Montgomery, D., E. Peck, y G. Vining. 2002. Introducción al análisis de regresión lineal. 3ª edición. Compañía editorial continental S.A. 742p.
- Muñoz, R., y A. Ritter. 2005. Hidrología agroforestal. Editorial Mundi-Prensa Libros. 348p.
- Muffler, L. y R. Cataldi. 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7: 53-89.
- Navarro, J. 2003. Estadística Aplicada. 3ª edición. Illustrated. 376p
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids*, Springer Verlag, Berlin, XVIII. 264 p.
- Núñez, P., D. Díaz y P. Velásquez. 2008. Geotermia. Disponible en: <http://bibliotecaverde.wikieco.org/wp-content/plugins/downloads-manager/upload/Geotermia.pdf>. Leído el 01 de marzo del 2013.
- Opazo, N. 2005. Estimación de la producción de los residuos sólidos domiciliarios de tipo vegetal urbanos, base para un modelo de reciclaje bajo gestión municipal, comuna de Colina, región Metropolitana.
- OrtizBeviá, M., G. Sánchez-López, F. Alvarez-García & A. Ruiz de Elvira. Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability. *Global and Planetary Change* 92: 236-247.
- Peel, M., B. Finlayson, and T. McMahon. 2007. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology Earth System Sciences* 11: 1633–1644.
- Popovski K. and S. Popovska. 2003. Prospects and problems for geothermal use in agriculture in Europe. *Geothermics* 32: 545-555.
- Ramos, A. 2011. Evaluación del potencial geotérmico de muy baja entalpía de la Región de Murcia mediante el uso de información geográfica y ACS. Disponible en:

<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1867/1/pfm233.pdf> Leído el 20 de septiembre de 2012.

Richards, J. 1993. Remote sensing digital image analysis: An introduction. Second edition. Springer-Verlag. Berlin. 416p.

Risacher, F. B. Fritz and A. Hauser. 2011. Origin of components in Chilean thermal waters. *Journal of South American Earth Sciences* 31(1): 153-170.

Sanyal, S., R. Henneberger, C. Hlein, and R. Decker. 2002. A methodology for assessment of Geothermal energy Reserves Associated with Volcanic Systems. *Geothermal Resources Council Transactions* 23: 22-25.

Sanyal, S. 2005. Classification of geothermal systems - a possible scheme. Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California.

Sarmiento, Z., and B. Steingrímsson. 2011. Resource assessment I: Introduction and volumetric assessment. Presented at “Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants”, Santa Tecla, El Salvador, 11p.

Sapag, N. y R. Sapag. 1991. Preparación y Evaluación de proyectos. 2ª ed. Editorial Mc Graw Hill. México. 388 p.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (SERNAGEOMIN). 2003. Mapa geológico de Chile, escala 1:1.000.000. Disponible en: [http://www.ipgp.fr/~carrizo/julia/geol\\_chile.pdf](http://www.ipgp.fr/~carrizo/julia/geol_chile.pdf) Leído el 07 de Agosto de 2012.

Schellschmidt, R., and S. Hurter. 2003. Atlas of geothermal resources in Europe. *Geothermics* 32: 779-787.

Self, S., B. Reddy and M. Rosen. 2012. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy* 111: 341-348.

SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL MUNICIPAL (SINIM). 2010. Ficha comunal de Colina. Disponible en: <http://www.sinim.cl/> Leído el 6 de febrero de 2012.

Sommerer, C., M. Kubyb and G. Bloomquist. 2002. The spatial economics of geothermal district energy in a small, low-density town: a case study of Mammoth Lakes, California. *Geothermics* 32: 3-19

Stefansson, V. 2005. World Geothermal Assessment. 24-29 Pp. In: Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.

Stern, C. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile* 31(2):161-206.

Tambutti, R., y H. Muñoz. 2002. Introducción a la Física y a la Química. 4<sup>a</sup> ed. Editorial Limusa. 2759.

Truesdell, A. 1976. Summary of Section III: geochemical techniques in exploration. In: Proceedings of the 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, vol. 1, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Van Beers, W. and J. Kleijnen. 2004. Kriging interpolation in simulation: a survey. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Washington, DC, USA. 8 p.

WEA. 2000. World Energy Assessment: energy and the challenge of sustainability. Prepared by UNDP, UN-DESA and the World Energy Council United Nations Development Programme, New York. 508p.

Williams, C., R. Marshall and A. Arlene. 2011. Updating the classification of geothermal resources. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. 7p.

Xilai, Z., H. Armannsson, L.Yongle and Q. Hanxue.2002. Chemical equilibria of thermal waters for the application of geothermometers from the Guanzhong basin, China. Journal of Volcanology and Geothermal Research 113 (1-2):119-127.

## 9 APÉNDICES

### Apéndice I. Reporte estadístico sobre la interpolación de las temperaturas del agua subterránea mediante el método Kriging por bloques.

Cuadro 37. Estadística de las variables en estudio: X (UTM Este), Y (UTM norte) y Z (Temperatura en °C).

	X	Y	Z (Temperatura °C)
Mínimo	335799	6312600	22
Percentil 25	339000	6320200	24,9
Mediana	341559	6324285	25,5
Percentil 75	344112	6331260	26
Máximo	351030	6345960	34
Rango	15231	33360	12
Rango intercuartil	5112	11060	1,1
Desviación absoluta de la mediana	2553	4085	0,5
Promedio	342094,9333	6326607,4	25,63333333
Media truncada (10%):	341891,9231	6326196,231	25,26923077
Desviación estándar	4167,410634	9505,007549	2,533947294
Varianza	17367311,4	90345168,51	6,420888889
Coef. De variación	0,098853601		
Coef. de Skewness	2,115488442		

Cuadro 38 Correlación entre variables en estudio: X (UTM Este), Y (UTM norte) y Z (Temperatura en °C).

	X	Y	Z
X	1	0,167	0,593
Y		1	-0,144
Z			1

Cuadro 18. Covarianza entre las variables en estudio.

	X	Y	Z
X	17367311,4	6613521,36	6260,68
Y		90345168,51	-3472,65
Z			6,42

Cuadro 39. ANOVA entre las variables de estudio: X (UTM Este), Y (UTM norte) y X (Temperatura en °C).

Recurso	df	Suma de los cuadrados	Media Cuadrática	F
Regresión	2	39,712	19,856	4,209
Residual	12	56,602	4,717	
Total	14	96,313		

Cuadro 40. Estadística entre los vecinos más cercanos.

Estadísticos	Separación	Delta Z
Mínimo	1897,367914	0,1
Percentil 25	2039,240055	0,1
Mediana	2778,488798	1,1
Percentil 75	3535,616495	3
Máximo	7843,678984	7,1
Rango	5946,31107	7
Rango intercuartil	1496,376441	2,9
Desviación absoluta de la mediana	739,2487434	1
Promedio	3326,837001	2,126666667
Media truncada (10%)	3089,346778	1,9
Desviación estándar	1528,179517	2,217946999
Varianza	2335332,637	4,919288889
Coef. De variación	0,45934908	1,042921786
Coef. de Skewness	1,707372818	1,269311468
Raíz media cuadrática	3661,034972	3,072783754
Media cuadrática	13403177,07	9,442

**Apéndice II. Parámetros a utilizar para la estimación del PGBE mediante el método del Volumen.**

Cuadro 41. Primera parte de la tabla explicativa con los parámetros a utilizar para la estimación del PGBE mediante el método del Volumen.

Este	Norte	Temperatura acuífero [°C]	Temperatura atmosférica [°C]	Densidad de la roca [Kg/m <sup>3</sup> ]	Capacidad calorífica de la roca [J/Kg°C]	porosidad [Adimensional]	Capacidad calorífica del agua [J/Kg°C]
341290	6342690	24	14,38	2700	1	0,3	1,45
343110	6345170	25	14,38	2700	1	0,3	1,45
344760	6331260	24	14,38	2700	1	0,3	1,45
347220	6328370	23,7	14,38	2700	1	0,3	1,45
339920	6340310	24	14,38	2700	1	0,3	1,45
341620	6337670	24,7	14,38	2700	1	0,3	1,45
339000	6338440	24,9	14,38	2700	1	0,3	1,45
344112	6320635	25,6	14,38	2700	1	0,3	1,45
341982	6317813	25,7	14,38	2700	1	0,3	1,45
340100	6320200	25,6	14,38	2700	1	0,3	1,45
339956	6323378	25,6	14,38	2700	1	0,3	1,45
338965	6315956	25,5	14,38	2700	1	0,3	1,45
338700	6317800	25,5	14,38	2700	1	0,3	1,45
341230	6345960	22	14,38	2700	1	0,3	1,45
343901	6326630	26,1	14,38	2700	1	0,3	1,45
341559	6324285	25	14,38	2700	1	0,3	1,45
335799	6323651	25,2	14,38	2700	1	0,3	1,45
336507	6321030	26	14,38	2700	1	0,3	1,45
339650	6312600	23	14,38	2700	1	0,3	1,45
349984	6326027	26,9	14,38	2700	1	0,3	1,45
351014	6327245	34	14,38	2700	1	0,3	1,45

Cuadro 42. Segunda parte de la tabla explicativa con los parámetros a utilizar para la estimación del PGBE mediante el método del Volumen.

Este	Norte	Densidad del agua [Kg/m <sup>3</sup> ]	Área [m <sup>2</sup> ]	Profundidad [m]	Energía [J]	Potencia [kW]	Factor de recuperación
341290	6342690	1000	100	100	223665000	62,13	15,53
343110	6345170	1000	100	100	246915000	68,59	17,15
344760	6331260	1000	100	100	223665000	62,13	15,53
347220	6328370	1000	100	100	216690000	60,19	15,05
339920	6340310	1000	100	100	223665000	62,13	15,53
341620	6337670	1000	100	100	239940000	66,65	16,66
339000	6338440	1000	100	100	244590000	67,94	16,99
344112	6320635	1000	100	100	260865000	72,46	18,12
341982	6317813	1000	100	100	263190000	73,11	18,28
340100	6320200	1000	100	100	260865000	72,46	18,12
339956	6323378	1000	100	100	260865000	72,46	18,12
338965	6315956	1000	100	100	258540000	71,82	17,95
338700	6317800	1000	100	100	258540000	71,82	17,95
341230	6345960	1000	100	100	177165000	49,21	12,30
343901	6326630	1000	100	100	272490000	75,69	18,92
341559	6324285	1000	100	100	246915000	68,59	17,15
335799	6323651	1000	100	100	251565000	69,88	17,47
336507	6321030	1000	100	100	270165000	75,05	18,76
339650	6312600	1000	100	100	200415000	55,67	13,92
349984	6326027	1000	100	100	291090000	80,86	20,21
351014	6327245	1000	100	100	456165000	126,71	31,68

**Apéndice III. Parámetros utilizados para la estimación del PGBE mediante el método del flujo térmico superficial.**

Cuadro 43. Tabla con los parámetros utilizados para la estimación del PGBE mediante el método del flujo térmico superficial.

Este	Norte	Temperatura acuífero [°C]	Temperatura atmosférica [°C]	Capacidad calorífica del agua [J/Kg°C]	Área [m <sup>2</sup> ]	Flujo calórico [W/m <sup>2</sup> ]	Caudal másico [Kg/s]	Tiempo [s]	Energía [J]	Potencia [kW]	Factor de recuperación
341290	6342690	24	14,38	1,45	100	0,09	4,27	9,46x 10 <sup>8</sup>	2,27x10 <sup>10</sup>	63080	15770
343110	6345170	25	14,38	1,45	100	0,09	0,13	9,46x 10 <sup>8</sup>	7,83 x10 <sup>8</sup>	2170	540
344760	6331260	24	14,38	1,45	100	0,09	0,08	9,46x 10 <sup>8</sup>	4,43 x10 <sup>8</sup>	1230	310
347220	6328370	23,7	14,38	1,45	100	0,09	16,25	9,46x 10 <sup>8</sup>	8,18 x10 <sup>10</sup>	227190	56800
339920	6340310	24	14,38	1,45	100	0,09	3,06	9,46x 10 <sup>8</sup>	1,62 x10 <sup>10</sup>	45130	11280
341620	6337670	24,7	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
339000	6338440	24,9	14,38	1,45	100	0,09	13,85	9,46x 10 <sup>8</sup>	8,55 x10 <sup>10</sup>	237390	59350
344112	6320635	25,6	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
341982	6317813	25,7	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
340100	6320200	25,6	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
339956	6323378	25,6	14,38	1,45	100	0,09	5,50	9,46x 10 <sup>8</sup>	3,76 x10 <sup>10</sup>	104360	26090
338965	6315956	25,5	14,38	1,45	100	0,09	0,13	9,46x 10 <sup>8</sup>	8,98 x10 <sup>8</sup>	2490	620
338700	6317800	25,5	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
341230	6345960	22	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
343901	6326630	26,1	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
341559	6324285	25	14,38	1,45	100	0,09	10,11	9,46x 10 <sup>8</sup>	6,33 x10 <sup>10</sup>	175910	43980
335799	6323651	25,2	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
336507	6321030	26	14,38	1,45	100	0,09	12,50	9,46x 10 <sup>8</sup>	9,01 x10 <sup>10</sup>	250320	62580
339650	6312600	23	14,38	1,45	100	0,09	10,28	9,46x 10 <sup>8</sup>	4,49 x10 <sup>10</sup>	124790	31200
349984	6326027	26,9	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-
351014	6327245	34	14,38	1,45	100	0,09	-	9,46x 10 <sup>8</sup>	-	-	-

### Apéndice IV

Cuadro 44. Combinaciones de materiales de construcción para el muro, techo, piso, ventanas y puertas de una vivienda.

<b>Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera

### Apéndice V. Coeficiente de pérdida de calor.

Cuadro 45. Coeficiente de pérdidas de calor por la envolvente [kW/m<sup>2</sup> °C] según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	1,08	0,94	0,86	0,82	0,72	0,67	0,61	0,57	0,55	0,48	0,44
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	1,11	0,97	0,89	0,85	0,75	0,70	0,64	0,60	0,59	0,52	0,47
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	1,51	1,37	1,29	1,24	1,15	1,10	1,04	1,00	0,98	0,92	0,87
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	1,54	1,41	1,32	1,27	1,18	1,13	1,07	1,04	1,01	0,95	0,91
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	1,61	1,30	1,24	1,14	0,99	0,91	0,80	0,74	0,70	0,59	0,52
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	1,64	1,34	1,27	1,17	1,03	0,94	0,83	0,77	0,73	0,62	0,55
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	2,04	1,81	1,67	1,57	1,42	1,34	1,23	1,17	1,13	1,02	0,95
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	2,07	1,84	1,70	1,61	1,46	1,37	1,27	1,20	1,16	1,06	0,98
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	2,81	2,68	2,60	2,54	2,45	2,40	2,34	2,31	2,28	2,22	2,18
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	2,85	2,71	2,63	2,57	2,49	2,44	2,38	2,34	2,32	2,25	2,21
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	2,85	2,71	2,63	2,59	2,49	2,44	2,38	2,34	2,32	2,26	2,21
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	2,95	2,47	2,19	1,99	1,69	1,51	1,29	1,16	1,08	0,86	0,74
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	2,99	2,51	2,22	2,03	1,72	1,54	1,33	1,20	1,11	0,89	0,78
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	3,28	3,14	3,06	3,01	2,92	2,87	2,81	2,77	2,75	2,69	2,64
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	3,34	3,11	2,97	2,88	2,73	2,66	2,54	2,47	2,43	2,33	2,25
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	3,38	3,14	3,01	2,91	2,76	2,69	2,57	2,51	2,47	2,36	2,29
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	3,38	3,15	3,01	2,91	2,77	2,68	2,57	2,51	2,47	2,36	2,29
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	3,81	3,58	3,44	3,34	3,20	3,11	3,00	2,94	2,90	2,79	2,72
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	4,58	4,45	4,37	4,31	4,23	4,18	4,11	4,08	4,05	3,99	3,95
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	4,69	4,21	3,92	3,73	3,42	3,24	3,03	2,90	2,81	2,60	2,44
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	4,72	4,24	3,96	3,76	3,46	3,28	3,06	2,93	2,85	2,63	2,48
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	4,73	4,25	3,96	3,76	3,46	3,28	3,06	2,94	2,85	2,63	2,51
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	5,12	4,88	4,74	4,65	4,50	4,43	4,31	4,25	4,20	4,10	4,02
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	6,46	5,98	5,70	5,50	5,20	5,02	4,80	4,67	4,58	4,37	4,21

### Apéndice VI. Demanda energética

Cuadro 46. Demanda energética [kW] según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	28	36	44	52	69	85	116	146	177	310	564
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	28	37	46	55	72	90	123	154	187	331	607
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	39	53	66	79	110	140	199	256	312	585	1115
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	39	54	68	81	113	145	205	265	323	607	1158
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	41	50	63	73	95	116	154	189	222	378	660
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	42	51	65	75	98	120	160	197	233	399	703
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	52	69	85	100	137	171	236	299	360	653	1212
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	53	71	87	103	140	175	243	308	371	675	1255
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	72	103	133	162	235	307	449	590	729	1419	2782
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	73	104	134	164	238	311	456	598	740	1440	2825
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	73	104	135	166	239	312	456	599	743	1442	2828
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	76	95	112	127	162	193	248	298	344	550	948
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	76	96	114	129	165	197	254	306	355	571	991
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	84	121	157	192	280	367	539	709	878	1718	3380
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	85	119	152	184	262	339	486	633	777	1487	2878
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	86	121	154	186	265	344	493	641	788	1508	2921
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	86	121	154	186	265	342	493	642	789	1510	2925
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	97	137	176	214	306	397	576	752	926	1786	3476
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	117	171	223	276	405	534	789	1042	1295	2551	5047
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	120	161	201	238	328	415	581	741	899	1659	3122
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	121	163	202	240	331	419	587	750	910	1680	3165
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	121	163	202	241	332	419	587	751	910	1682	3213
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	131	187	243	297	431	566	826	1085	1343	2619	5143
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	165	229	291	351	498	641	920	1194	1465	2791	5386

**Apéndice VII. VAN, TIR y Periodo de retorno de un sistema de bomba de calor comparada con gas licuado para un sistema vertical.**

Cuadro 47. Parte 1: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>],

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$6.275.631	-\$6.862.321	-\$7.527.444	-\$10.249.991	-\$8.841.761	-\$7.441.955
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$6.174.534	-\$6.710.674	-\$7.325.249	-\$9.997.247	-\$8.462.645	-\$6.936.468
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$4.978.729	-\$4.916.967	-\$4.933.639	-\$7.123.325	-\$3.978.377	-\$957.443
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$4.877.631	-\$4.765.321	-\$4.731.443	-\$6.870.581	-\$3.599.261	-\$451.955
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$4.676.585	-\$5.249.089	-\$5.266.050	-\$7.837.267	-\$5.745.221	-\$3.866.379
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$4.575.487	-\$5.072.219	-\$5.063.855	-\$7.584.523	-\$5.366.105	-\$3.360.891
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$3.379.682	-\$2.958.543	-\$2.672.245	-\$4.595.010	-\$881.837	<b>\$2.618.134</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$3.278.585	-\$2.806.897	-\$2.470.050	-\$4.342.266	-\$502.721	<b>\$3.123.622</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-\$1.058.700	<b>\$963.075</b>	<b>\$2.906.418</b>	<b>\$2.676.746</b>	<b>\$10.721.729</b>	<b>\$18.642.698</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$957.603	<b>\$1.114.722</b>	<b>\$3.108.613</b>	<b>\$2.929.490</b>	<b>\$11.100.845</b>	<b>\$19.148.186</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-\$950.353	<b>\$1.125.596</b>	<b>\$3.123.112</b>	<b>\$3.063.205</b>	<b>\$11.128.031</b>	<b>\$19.184.435</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$630.537	<b>\$51.480</b>	<b>\$455.926</b>	-\$1.439.903	<b>\$2.089.917</b>	<b>\$5.180.860</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$529.439	<b>\$203.126</b>	<b>\$658.121</b>	-\$1.187.159	<b>\$2.469.033</b>	<b>\$5.686.348</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$346.549</b>	<b>\$3.070.950</b>	<b>\$5.716.918</b>	<b>\$6.189.870</b>	<b>\$15.991.416</b>	<b>\$25.668.948</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$540.346</b>	<b>\$2.921.499</b>	<b>\$5.167.811</b>	<b>\$5.205.060</b>	<b>\$13.818.269</b>	<b>\$22.441.970</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$641.444</b>	<b>\$3.073.146</b>	<b>\$5.370.006</b>	<b>\$5.457.804</b>	<b>\$14.197.385</b>	<b>\$22.947.458</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$648.693</b>	<b>\$3.084.020</b>	<b>\$5.384.506</b>	<b>\$5.475.928</b>	<b>\$14.224.572</b>	<b>\$22.760.011</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$1.945.596</b>	<b>\$5.029.374</b>	<b>\$7.978.311</b>	<b>\$8.718.185</b>	<b>\$19.087.956</b>	<b>\$29.244.524</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.266.578</b>	<b>\$8.950.992</b>	<b>\$13.556.974</b>	<b>\$15.989.941</b>	<b>\$30.691.522</b>	<b>\$45.269.089</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$4.586.394</b>	<b>\$7.876.876</b>	<b>\$10.889.787</b>	<b>\$11.602.424</b>	<b>\$21.653.408</b>	<b>\$31.265.513</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$4.687.492</b>	<b>\$8.028.522</b>	<b>\$11.091.982</b>	<b>\$11.855.168</b>	<b>\$22.032.523</b>	<b>\$31.771.001</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.694.741</b>	<b>\$8.039.397</b>	<b>\$11.106.482</b>	<b>\$11.873.292</b>	<b>\$22.059.710</b>	<b>\$31.807.250</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$5.865.624</b>	<b>\$10.909.416</b>	<b>\$15.818.367</b>	<b>\$18.518.255</b>	<b>\$33.788.062</b>	<b>\$49.068.361</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$9.911.672</b>	<b>\$15.864.793</b>	<b>\$21.540.343</b>	<b>\$24.915.619</b>	<b>\$41.623.200</b>	<b>\$57.891.904</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 48. Parte 2: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$4.326.420	-\$1.386.266	<b>\$1.700.277</b>	<b>\$16.811.674</b>	<b>\$30.677.637</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$3.568.188	-\$375.290	<b>\$2.963.997</b>	<b>\$19.339.113</b>	<b>\$35.732.515</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$5.400.350</b>	<b>\$11.582.760</b>	<b>\$17.653.091</b>	<b>\$49.234.237</b>	<b>\$95.522.764</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$6.158.581</b>	<b>\$12.593.735</b>	<b>\$18.916.810</b>	<b>\$51.761.677</b>	<b>\$100.577.643</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$52.750</b>	<b>\$3.670.363</b>	<b>\$7.095.292</b>	<b>\$24.806.906</b>	<b>\$41.984.603</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$810.981</b>	<b>\$4.681.339</b>	<b>\$8.359.011</b>	<b>\$27.334.345</b>	<b>\$47.039.481</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$9.779.519</b>	<b>\$16.639.388</b>	<b>\$23.306.574</b>	<b>\$57.229.470</b>	<b>\$106.829.730</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$10.537.750</b>	<b>\$17.650.364</b>	<b>\$24.570.293</b>	<b>\$59.756.909</b>	<b>\$111.884.609</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$34.800.561</b>	<b>\$50.783.041</b>	<b>\$66.653.443</b>	<b>\$147.234.942</b>	<b>\$291.524.174</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$35.558.793</b>	<b>\$51.794.017</b>	<b>\$67.917.162</b>	<b>\$149.762.381</b>	<b>\$296.579.052</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$35.613.166</b>	<b>\$51.866.515</b>	<b>\$68.266.253</b>	<b>\$149.943.625</b>	<b>\$296.941.540</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$11.133.309</b>	<b>\$16.465.090</b>	<b>\$21.400.232</b>	<b>\$45.037.146</b>	<b>\$75.865.600</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$11.891.540</b>	<b>\$17.476.066</b>	<b>\$22.663.951</b>	<b>\$47.564.586</b>	<b>\$80.920.479</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$45.339.935</b>	<b>\$64.835.540</b>	<b>\$84.219.066</b>	<b>\$182.366.189</b>	<b>\$361.786.667</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$39.179.730</b>	<b>\$55.839.670</b>	<b>\$72.306.926</b>	<b>\$155.230.175</b>	<b>\$302.831.140</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$39.937.962</b>	<b>\$56.850.646</b>	<b>\$73.570.646</b>	<b>\$157.757.614</b>	<b>\$307.886.018</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$39.992.335</b>	<b>\$56.923.144</b>	<b>\$73.661.267</b>	<b>\$157.938.858</b>	<b>\$308.248.506</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$49.719.104</b>	<b>\$69.892.169</b>	<b>\$89.872.549</b>	<b>\$190.361.421</b>	<b>\$373.093.633</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$74.740.146</b>	<b>\$104.035.822</b>	<b>\$133.219.419</b>	<b>\$280.366.894</b>	<b>\$557.788.077</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$50.260.289</b>	<b>\$68.634.398</b>	<b>\$86.611.866</b>	<b>\$175.460.415</b>	<b>\$331.441.020</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$51.018.521</b>	<b>\$69.645.374</b>	<b>\$87.875.586</b>	<b>\$177.987.854</b>	<b>\$336.495.899</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$51.072.894</b>	<b>\$69.717.871</b>	<b>\$87.966.208</b>	<b>\$178.169.098</b>	<b>\$342.129.504</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$79.119.316</b>	<b>\$109.092.451</b>	<b>\$138.872.902</b>	<b>\$288.362.126</b>	<b>\$569.095.043</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$90.199.875</b>	<b>\$121.887.179</b>	<b>\$153.177.842</b>	<b>\$308.592.367</b>	<b>\$597.704.923</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 49. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	indefinido	-11%	-10%	-11%	-6%	-2%	4%	8%	<b>12%</b>	<b>28%</b>	<b>28%</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	indefinido	-11%	-9%	-10%	-5%	-1%	5%	9%	<b>14%</b>	<b>31%</b>	<b>30%</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-7%	-4%	-1%	-3%	4%	9%	<b>17%</b>	<b>24%</b>	<b>29%</b>	<b>57%</b>	<b>58%</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-7%	-3%	-1%	-2%	4%	9%	<b>18%</b>	<b>25%</b>	<b>31%</b>	<b>59%</b>	<b>60%</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-6%	-5%	-2%	-4%	1%	4%	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>18%</b>	<b>36%</b>	<b>33%</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-6%	-4%	-2%	-4%	1%	5%	<b>11%</b>	<b>16%</b>	<b>20%</b>	<b>38%</b>	<b>36%</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-1%	2%	4%	2%	9%	<b>14%</b>	<b>22%</b>	<b>29%</b>	<b>35%</b>	<b>64%</b>	<b>63%</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	0%	3%	5%	3%	9%	<b>14%</b>	<b>23%</b>	<b>30%</b>	<b>36%</b>	<b>66%</b>	<b>65%</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	7%	<b>12%</b>	<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>24%</b>	<b>32%</b>	<b>47%</b>	<b>61%</b>	<b>73%</b>	<b>137%</b>	<b>143%</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	7%	<b>13%</b>	<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>24%</b>	<b>33%</b>	<b>48%</b>	<b>62%</b>	<b>74%</b>	<b>139%</b>	<b>145%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	7%	<b>13%</b>	<b>16%</b>	<b>14%</b>	<b>24%</b>	<b>33%</b>	<b>48%</b>	<b>62%</b>	<b>74%</b>	<b>139%</b>	<b>145%</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	8%	<b>10%</b>	<b>11%</b>	8%	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>24%</b>	<b>29%</b>	<b>33%</b>	<b>53%</b>	<b>49%</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	9%	<b>10%</b>	<b>11%</b>	8%	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>24%</b>	<b>30%</b>	<b>34%</b>	<b>55%</b>	<b>52%</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>11%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>	<b>19%</b>	<b>30%</b>	<b>39%</b>	<b>57%</b>	<b>73%</b>	<b>88%</b>	<b>165%</b>	<b>173%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>11%</b>	<b>16%</b>	<b>20%</b>	<b>17%</b>	<b>27%</b>	<b>36%</b>	<b>51%</b>	<b>65%</b>	<b>78%</b>	<b>143%</b>	<b>148%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>12%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>	<b>18%</b>	<b>28%</b>	<b>37%</b>	<b>52%</b>	<b>66%</b>	<b>79%</b>	<b>145%</b>	<b>150%</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>12%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>	<b>18%</b>	<b>28%</b>	<b>36%</b>	<b>52%</b>	<b>66%</b>	<b>79%</b>	<b>146%</b>	<b>150%</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>15%</b>	<b>21%</b>	<b>24%</b>	<b>22%</b>	<b>33%</b>	<b>43%</b>	<b>61%</b>	<b>78%</b>	<b>93%</b>	<b>172%</b>	<b>178%</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>21%</b>	<b>28%</b>	<b>33%</b>	<b>31%</b>	<b>45%</b>	<b>59%</b>	<b>84%</b>	<b>107%</b>	<b>129%</b>	<b>245%</b>	<b>257%</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>22%</b>	<b>26%</b>	<b>29%</b>	<b>25%</b>	<b>36%</b>	<b>45%</b>	<b>62%</b>	<b>76%</b>	<b>90%</b>	<b>160%</b>	<b>160%</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>22%</b>	<b>26%</b>	<b>29%</b>	<b>26%</b>	<b>36%</b>	<b>45%</b>	<b>62%</b>	<b>77%</b>	<b>91%</b>	<b>162%</b>	<b>162%</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>22%</b>	<b>26%</b>	<b>29%</b>	<b>26%</b>	<b>36%</b>	<b>46%</b>	<b>62%</b>	<b>77%</b>	<b>91%</b>	<b>162%</b>	<b>165%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>24%</b>	<b>31%</b>	<b>36%</b>	<b>33%</b>	<b>49%</b>	<b>62%</b>	<b>88%</b>	<b>112%</b>	<b>134%</b>	<b>251%</b>	<b>262%</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>33%</b>	<b>40%</b>	<b>44%</b>	<b>40%</b>	<b>56%</b>	<b>70%</b>	<b>98%</b>	<b>123%</b>	<b>145%</b>	<b>268%</b>	<b>274%</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor del 10%.

Cuadro 50. Periodo de retorno según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	> 10	> 10	> 10	> 10	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	> 10	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	> 10	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>9,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>7,0</b>	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>6,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>5,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>4,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>4,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser menor de 10 años.

**Apéndice VIII. VAN, TIR y Periodo de retorno de una bomba de calor comparada con kerosene para un sistema vertical.**

Cuadro 51. Parte I: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>],

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$7.292.719	-\$8.195.536	-\$9.152.126	-\$12.186.723	-\$11.388.109	-\$10.595.270
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$7.223.407	-\$8.091.568	-\$9.013.502	-\$12.013.443	-\$11.128.189	-\$10.248.709
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$6.403.568	-\$6.861.810	-\$7.373.824	-\$10.043.095	-\$8.053.794	-\$6.149.516
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$6.334.256	-\$6.757.841	-\$7.235.200	-\$9.869.814	-\$7.793.873	-\$5.802.956
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$6.196.420	-\$7.089.511	-\$7.601.724	-\$10.532.570	-\$9.265.134	-\$8.143.870
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$6.127.108	-\$6.968.250	-\$7.463.100	-\$10.359.290	-\$9.005.214	-\$7.797.310
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$5.307.269	-\$5.519.123	-\$5.823.423	-\$8.309.693	-\$5.930.819	-\$3.698.116
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$5.237.957	-\$5.415.155	-\$5.684.799	-\$8.136.413	-\$5.670.899	-\$3.351.556
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-\$3.716.014	-\$2.830.478	-\$1.998.716	-\$3.324.209	<b>\$2.024.535</b>	<b>\$7.288.255</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$3.646.702	-\$2.726.510	-\$1.860.092	-\$3.150.929	<b>\$2.284.455</b>	<b>\$7.634.815</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-\$3.641.732	-\$2.719.055	-\$1.850.151	-\$3.059.255	<b>\$2.303.094</b>	<b>\$7.659.667</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$3.422.467	-\$3.455.464	-\$3.678.763	-\$6.146.565	-\$3.893.398	-\$1.941.123
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$3.353.155	-\$3.351.496	-\$3.540.138	-\$5.973.285	-\$3.633.477	-\$1.594.562
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	-\$2.752.581	-\$1.385.328	-\$71.850	-\$915.626	<b>\$5.637.409</b>	<b>\$12.105.421</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-\$2.619.715	-\$1.487.791	-\$448.315	-\$1.590.808	<b>\$4.147.509</b>	<b>\$9.893.019</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$2.550.403	-\$1.383.823	-\$309.690	-\$1.417.528	<b>\$4.407.429</b>	<b>\$10.239.580</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	-\$2.545.432	-\$1.376.368	-\$299.750	-\$1.405.102	<b>\$4.426.068</b>	<b>\$10.111.067</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	-\$1.656.282	-\$42.642	<b>\$1.478.552</b>	<b>\$817.775</b>	<b>\$7.760.384</b>	<b>\$14.556.821</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	-\$65.027	<b>\$2.646.003</b>	<b>\$5.303.259</b>	<b>\$5.803.259</b>	<b>\$15.715.737</b>	<b>\$25.543.192</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$154.238</b>	<b>\$1.909.593</b>	<b>\$3.474.647</b>	<b>\$2.795.197</b>	<b>\$9.519.246</b>	<b>\$15.942.402</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$223.550</b>	<b>\$2.013.561</b>	<b>\$3.613.271</b>	<b>\$2.968.477</b>	<b>\$9.779.166</b>	<b>\$16.288.962</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$228.520</b>	<b>\$2.021.017</b>	<b>\$3.623.212</b>	<b>\$2.980.903</b>	<b>\$9.797.805</b>	<b>\$16.313.814</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$1.031.273</b>	<b>\$3.988.690</b>	<b>\$6.853.660</b>	<b>\$7.536.661</b>	<b>\$17.838.712</b>	<b>\$28.147.956</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$3.805.225</b>	<b>\$7.386.074</b>	<b>\$10.776.622</b>	<b>\$11.922.665</b>	<b>\$23.210.448</b>	<b>\$34.197.339</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 52. Parte 2: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>], comparada con kerosene para un sistema vertical.

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$8.626.133	-\$6.777.238	-\$4.827.980	<b>\$5.365.466</b>	<b>\$9.832.690</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$8.106.293	-\$6.084.118	-\$3.961.579	<b>\$7.098.268</b>	<b>\$13.298.293</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$1.957.503	<b>\$2.114.269</b>	<b>\$6.109.200</b>	<b>\$27.594.234</b>	<b>\$54.290.226</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$1.437.663	<b>\$2.807.389</b>	<b>\$6.975.600</b>	<b>\$29.327.036</b>	<b>\$57.755.829</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$5.623.794	-\$3.310.436	-\$1.129.181	<b>\$10.846.963</b>	<b>\$17.584.697</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$5.103.954	-\$2.617.315	-\$262.781	<b>\$12.579.764</b>	<b>\$21.050.299</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$1.044.836</b>	<b>\$5.581.071</b>	<b>\$9.985.203</b>	<b>\$33.075.731</b>	<b>\$62.042.233</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$1.564.677</b>	<b>\$6.274.192</b>	<b>\$10.851.603</b>	<b>\$34.808.532</b>	<b>\$65.507.835</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$18.199.154</b>	<b>\$28.989.811</b>	<b>\$39.703.627</b>	<b>\$94.783.089</b>	<b>\$188.667.936</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$18.718.994</b>	<b>\$29.682.931</b>	<b>\$40.570.028</b>	<b>\$96.515.890</b>	<b>\$192.133.538</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$18.756.272</b>	<b>\$29.732.635</b>	<b>\$40.809.362</b>	<b>\$96.640.150</b>	<b>\$192.382.058</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$1.972.989</b>	<b>\$5.461.574</b>	<b>\$8.678.223</b>	<b>\$24.716.727</b>	<b>\$40.813.361</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$2.492.829</b>	<b>\$6.154.694</b>	<b>\$9.544.624</b>	<b>\$26.449.528</b>	<b>\$44.278.963</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$25.424.902</b>	<b>\$38.624.142</b>	<b>\$51.746.542</b>	<b>\$118.868.918</b>	<b>\$236.839.594</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$21.201.493</b>	<b>\$32.456.613</b>	<b>\$43.579.630</b>	<b>\$100.264.586</b>	<b>\$196.419.943</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$21.721.333</b>	<b>\$33.149.734</b>	<b>\$44.446.031</b>	<b>\$101.997.387</b>	<b>\$199.885.545</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$21.758.611</b>	<b>\$33.199.438</b>	<b>\$44.508.161</b>	<b>\$102.121.647</b>	<b>\$200.134.065</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$28.427.242</b>	<b>\$42.090.945</b>	<b>\$55.622.545</b>	<b>\$124.350.415</b>	<b>\$244.591.601</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$45.581.559</b>	<b>\$65.499.684</b>	<b>\$85.340.969</b>	<b>\$186.057.773</b>	<b>\$371.217.304</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$28.798.276</b>	<b>\$41.228.623</b>	<b>\$53.387.035</b>	<b>\$114.134.350</b>	<b>\$216.034.751</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$29.318.116</b>	<b>\$41.921.743</b>	<b>\$54.253.435</b>	<b>\$115.867.151</b>	<b>\$219.500.354</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$29.355.394</b>	<b>\$41.971.447</b>	<b>\$54.315.565</b>	<b>\$115.991.411</b>	<b>\$223.362.729</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$48.583.898</b>	<b>\$68.966.487</b>	<b>\$89.216.972</b>	<b>\$191.539.270</b>	<b>\$378.969.311</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$56.180.681</b>	<b>\$77.738.496</b>	<b>\$99.024.377</b>	<b>\$205.409.034</b>	<b>\$398.584.120</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 53. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>], comparada con kerosene para un sistema vertical.

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	indefinido	indefinido	indefinido	indefinido	-13%	-10%	-4%	0%	3%	<b>16%</b>	<b>16%</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	indefinido	indefinido	indefinido	indefinido	-12%	-9%	-3%	1%	5%	<b>18%</b>	<b>18%</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	indefinido	-11%	-9%	-10%	-4%	0%	7%	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>38%</b>	<b>39%</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	indefinido	-11%	-9%	-9%	-4%	1%	8%	<b>14%</b>	<b>18%</b>	<b>39%</b>	<b>41%</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	indefinido	-13%	-10%	-12%	-7%	-4%	1%	5%	9%	<b>22%</b>	<b>21%</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-14%	-12%	-9%	-11%	-6%	-3%	2%	6%	10%	<b>24%</b>	<b>22%</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-9%	-6%	-4%	-5%	0%	4%	<b>11%</b>	<b>17%</b>	<b>22%</b>	<b>43%</b>	<b>43%</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-9%	-5%	-4%	-5%	1%	5%	<b>12%</b>	<b>18%</b>	<b>22%</b>	<b>44%</b>	<b>44%</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-2%	3%	6%	5%	<b>13%</b>	<b>19%</b>	<b>31%</b>	<b>41%</b>	<b>49%</b>	<b>94%</b>	<b>98%</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	-2%	3%	6%	5%	<b>13%</b>	<b>20%</b>	<b>31%</b>	<b>41%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	-2%	3%	6%	5%	<b>13%</b>	<b>20%</b>	<b>32%</b>	<b>41%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-1%	1%	2%	-1%	4%	7%	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>20%</b>	<b>35%</b>	<b>33%</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-1%	1%	2%	0%	4%	8%	<b>13%</b>	<b>18%</b>	<b>21%</b>	<b>37%</b>	<b>34%</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	2%	7%	10%	9%	<b>18%</b>	<b>25%</b>	<b>38%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>	<b>113%</b>	<b>119%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	2%	6%	9%	8%	<b>16%</b>	<b>22%</b>	<b>34%</b>	<b>44%</b>	<b>53%</b>	<b>98%</b>	<b>101%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	2%	7%	9%	8%	<b>16%</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>	<b>45%</b>	<b>54%</b>	<b>100%</b>	<b>103%</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	2%	7%	9%	8%	<b>16%</b>	<b>23%</b>	<b>35%</b>	<b>45%</b>	<b>54%</b>	<b>100%</b>	<b>103%</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	5%	10%	<b>13%</b>	<b>11%</b>	<b>20%</b>	<b>28%</b>	<b>41%</b>	<b>53%</b>	<b>63%</b>	<b>117%</b>	<b>122%</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	10%	<b>16%</b>	<b>20%</b>	<b>18%</b>	<b>29%</b>	<b>39%</b>	<b>57%</b>	<b>73%</b>	<b>88%</b>	<b>167%</b>	<b>176%</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>17%</b>	<b>14%</b>	<b>22%</b>	<b>29%</b>	<b>41%</b>	<b>52%</b>	<b>61%</b>	<b>109%</b>	<b>110%</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>11%</b>	<b>14%</b>	<b>17%</b>	<b>14%</b>	<b>23%</b>	<b>30%</b>	<b>42%</b>	<b>53%</b>	<b>62%</b>	<b>111%</b>	<b>111%</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>11%</b>	<b>14%</b>	<b>17%</b>	<b>14%</b>	<b>23%</b>	<b>30%</b>	<b>42%</b>	<b>53%</b>	<b>62%</b>	<b>111%</b>	<b>113%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>13%</b>	<b>19%</b>	<b>22%</b>	<b>20%</b>	<b>32%</b>	<b>42%</b>	<b>60%</b>	<b>76%</b>	<b>91%</b>	<b>171%</b>	<b>179%</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>20%</b>	<b>25%</b>	<b>28%</b>	<b>26%</b>	<b>38%</b>	<b>48%</b>	<b>67%</b>	<b>84%</b>	<b>100%</b>	<b>182%</b>	<b>187%</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor del 10%.

Cuadro 54. Periodo de retorno según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>], comparada con kerosene para un sistema vertical.

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	2
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	3	2	2	2	1	1
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	4	3	3	2	1	1
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	4	3	2	2	2	1	1
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	4	4	4	4	3	3	2	2	2	1	1

**Apéndice IX. VAN, TIR y periodo de retorno para una bomba de calor comparada con la electricidad para un sistema vertical.**

Cuadro 55.Parte 1: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$3.813.821	\$6.363.092	\$8.589.307	\$8.962.282	\$16.417.856	\$23.838.736
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$4.230.229	\$6.987.704	\$9.422.123	\$10.003.302	\$17.979.386	\$25.920.776
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$9.155.597	\$14.375.758	\$19.272.860	\$21.840.621	\$36.449.520	\$50.547.620
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$9.572.006	\$15.000.370	\$20.105.677	\$22.881.641	\$38.011.050	\$52.629.660
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$10.400.090	\$13.007.790	\$17.903.698	\$18.899.985	\$29.172.112	\$38.566.082
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$10.816.498	\$13.736.293	\$18.736.514	\$19.941.005	\$30.733.642	\$40.648.122
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$15.741.867	\$22.442.257	\$28.587.252	\$32.254.427	\$49.203.775	\$65.274.966
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$16.158.275	\$23.066.869	\$29.420.068	\$33.295.447	\$50.765.305	\$67.357.006
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$25.301.696	\$38.594.905	\$51.565.057	\$62.205.866	\$96.997.388	\$131.278.111
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$25.718.104	\$39.219.517	\$52.397.873	\$63.246.886	\$98.558.918	\$133.360.151
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$25.747.965	\$39.264.308	\$52.457.595	\$63.797.641	\$98.670.896	\$133.509.456
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$27.065.248	\$34.840.159	\$41.471.791	\$45.249.913	\$61.444.052	\$75.830.508
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$27.481.656	\$35.464.771	\$42.304.607	\$46.290.934	\$63.005.582	\$77.912.549
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$31.089.741	\$47.276.973	\$63.141.148	\$76.675.981	\$118.702.559	\$160.218.340
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$31.887.965	\$46.661.404	\$60.879.448	\$72.619.673	\$109.751.644	\$146.926.830
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$32.304.373	\$47.286.016	\$61.712.264	\$73.660.693	\$111.313.174	\$149.008.871
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$32.334.234	\$47.330.808	\$61.771.986	\$73.735.345	\$111.425.152	\$148.236.802
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$37.676.011	\$55.343.473	\$72.455.540	\$87.089.787	\$131.456.815	\$174.945.686
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$47.235.840	\$71.496.121	\$95.433.345	\$117.041.226	\$179.250.428	\$240.948.831
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$48.553.123	\$67.071.971	\$84.447.541	\$98.969.601	\$142.023.584	\$183.269.884
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$48.969.531	\$67.696.583	\$85.280.357	\$100.010.621	\$143.585.114	\$185.351.924
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$48.999.392	\$67.741.375	\$85.340.079	\$100.085.273	\$143.697.092	\$185.501.228
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$53.822.109	\$79.562.620	\$104.747.736	\$127.455.032	\$192.004.683	\$256.597.550
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$70.487.267	\$99.973.187	\$128.315.829	\$153.804.961	\$224.276.623	\$292.940.603

Cuadro 56. Parte 2: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$38.326.490	\$52.091.866	\$66.460.201	\$130.357.382	\$237.458.287
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$41.449.550	\$56.255.946	\$71.665.302	\$140.767.583	\$258.278.689
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$78.389.816	\$105.509.635	\$132.167.814	\$263.901.804	\$504.547.131
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$81.512.877	\$109.673.715	\$137.372.915	\$274.312.005	\$525.367.533
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$56.363.731	\$72.919.478	\$88.681.582	\$163.288.729	\$284.030.244
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$59.486.791	\$77.083.559	\$93.886.682	\$173.698.930	\$304.850.646
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$96.427.058	\$126.337.247	\$155.453.793	\$296.833.151	\$551.119.088
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$99.550.118	\$130.501.327	\$160.658.893	\$307.243.352	\$571.939.490
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$199.485.553	\$266.970.617	\$333.994.042	\$667.554.259	\$1.311.852.041
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$202.608.613	\$271.134.697	\$339.199.142	\$677.964.460	\$1.332.672.443
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$202.832.569	\$271.433.305	\$340.637.001	\$678.710.980	\$1.334.165.483
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$102.003.146	\$125.619.336	\$147.601.813	\$246.614.519	\$423.581.770
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$105.126.207	\$129.783.416	\$152.806.914	\$257.024.720	\$444.402.172
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$242.895.896	\$324.851.074	\$406.344.613	\$812.255.402	\$1.601.254.327
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$217.522.794	\$287.798.229	\$357.280.020	\$700.485.606	\$1.358.423.998
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$220.645.855	\$291.962.309	\$362.485.121	\$710.895.807	\$1.379.244.400
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$220.869.811	\$292.260.918	\$362.858.381	\$711.642.327	\$1.380.737.441
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$260.933.137	\$345.678.686	\$429.630.592	\$845.186.749	\$1.647.826.285
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$363.991.632	\$486.312.056	\$608.170.841	\$1.215.907.857	\$2.408.559.238
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$263.162.209	\$340.498.086	\$416.200.252	\$783.811.396	\$1.476.264.462
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$266.285.270	\$344.662.167	\$421.405.352	\$794.221.597	\$1.497.084.863
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$266.509.226	\$344.960.775	\$421.778.612	\$794.968.118	\$1.520.288.967
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$382.028.874	\$507.139.668	\$631.456.819	\$1.248.839.204	\$2.455.131.195
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$427.668.289	\$559.839.526	\$690.377.051	\$1.332.164.995	\$2.572.971.658

Cuadro 57. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	23%	27%	30%	26%	37%	47%	66%	83%	99%	176%	170%
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	24%	29%	32%	28%	40%	50%	71%	88%	106%	189%	184%
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	39%	47%	53%	47%	67%	85%	121%	153%	183%	341%	345%
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	40%	49%	54%	48%	69%	88%	125%	159%	190%	354%	359%
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	43%	44%	50%	42%	56%	68%	91%	110%	128%	217%	201%
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	44%	46%	51%	44%	59%	71%	95%	116%	134%	230%	214%
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	58%	67%	72%	63%	86%	106%	146%	181%	213%	382%	376%
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	59%	68%	73%	64%	88%	109%	150%	186%	219%	395%	389%
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	85%	105%	118%	108%	155%	199%	285%	365%	440%	840%	873%
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	87%	106%	120%	110%	158%	202%	289%	371%	447%	852%	887%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	87%	106%	120%	110%	158%	202%	290%	371%	449%	853%	888%
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	90%	96%	98%	82%	104%	121%	153%	180%	203%	320%	292%
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	92%	97%	99%	84%	106%	124%	157%	185%	209%	333%	306%
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	102%	125%	141%	130%	187%	239%	344%	441%	532%	1018%	1062%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	104%	124%	137%	124%	174%	221%	310%	393%	470%	880%	904%
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	105%	125%	138%	125%	176%	224%	314%	398%	476%	893%	917%
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	105%	125%	138%	125%	176%	223%	314%	399%	477%	894%	918%
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	120%	144%	160%	146%	205%	260%	369%	469%	562%	1059%	1093%
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	147%	182%	206%	191%	275%	352%	508%	653%	789%	1517%	1590%
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	151%	171%	184%	163%	221%	272%	372%	462%	545%	983%	981%
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	152%	173%	186%	165%	223%	274%	376%	467%	551%	996%	994%
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	152%	173%	186%	165%	223%	275%	376%	468%	552%	997%	1009%
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	166%	201%	224%	206%	293%	374%	533%	681%	819%	1557%	1621%
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	212%	248%	272%	246%	340%	425%	594%	750%	894%	1660%	1698%



**Apéndice X. VAN, TIR y periodo de retorno para una bomba de calor comparada con gas licuado para un sistema horizontal.**

Cuadro 59. Parte 1: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$2.295.210	-\$1.555.092	-\$893.408	-\$166.257	<b>\$1.507.334</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$2.194.112	-\$1.403.446	-\$691.213	<b>\$86.487</b>	<b>\$1.886.450</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$998.307	<b>\$390.261</b>	<b>\$1.700.397</b>	<b>\$2.960.409</b>	<b>\$6.370.719</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$897.210	<b>\$541.908</b>	<b>\$1.902.592</b>	<b>\$3.213.153</b>	<b>\$6.749.834</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$696.163	<b>\$58.140</b>	<b>\$1.367.985</b>	<b>\$2.246.467</b>	<b>\$4.603.874</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$595.066	<b>\$235.009</b>	<b>\$1.570.180</b>	<b>\$2.499.211</b>	<b>\$4.982.990</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$600.739</b>	<b>\$2.348.685</b>	<b>\$3.961.790</b>	<b>\$5.488.724</b>	<b>\$9.467.259</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$701.837</b>	<b>\$2.500.332</b>	<b>\$4.163.985</b>	<b>\$5.741.467</b>	<b>\$9.846.375</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$2.921.721</b>	<b>\$6.270.304</b>	<b>\$9.540.453</b>	<b>\$12.760.480</b>	<b>\$21.070.824</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$3.022.818</b>	<b>\$6.421.950</b>	<b>\$9.742.648</b>	<b>\$13.013.223</b>	<b>\$21.449.940</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$3.030.068</b>	<b>\$6.432.825</b>	<b>\$9.757.148</b>	<b>\$13.146.938</b>	<b>\$21.477.127</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$3.349.885</b>	<b>\$5.358.708</b>	<b>\$7.089.961</b>	<b>\$8.643.831</b>	<b>\$12.439.013</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$3.450.982</b>	<b>\$5.510.355</b>	<b>\$7.292.156</b>	<b>\$8.896.575</b>	<b>\$12.818.128</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.326.971</b>	<b>\$8.378.178</b>	<b>\$12.350.953</b>	<b>\$16.273.604</b>	<b>\$26.340.511</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$4.520.767</b>	<b>\$8.228.728</b>	<b>\$11.801.846</b>	<b>\$15.288.794</b>	<b>\$24.167.364</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$4.621.865</b>	<b>\$8.380.374</b>	<b>\$12.004.042</b>	<b>\$15.541.538</b>	<b>\$24.546.480</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.629.115</b>	<b>\$8.391.249</b>	<b>\$12.018.541</b>	<b>\$15.559.662</b>	<b>\$24.573.667</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$5.926.017</b>	<b>\$10.336.602</b>	<b>\$14.612.346</b>	<b>\$18.801.919</b>	<b>\$29.437.051</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$8.246.999</b>	<b>\$14.258.221</b>	<b>\$20.191.009</b>	<b>\$26.073.675</b>	<b>\$41.040.617</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$8.566.815</b>	<b>\$13.184.104</b>	<b>\$17.523.823</b>	<b>\$21.686.158</b>	<b>\$32.002.503</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$8.667.913</b>	<b>\$13.335.751</b>	<b>\$17.726.018</b>	<b>\$21.938.902</b>	<b>\$32.381.619</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$8.675.163</b>	<b>\$13.346.625</b>	<b>\$17.740.517</b>	<b>\$21.957.026</b>	<b>\$32.408.805</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$9.846.045</b>	<b>\$16.216.645</b>	<b>\$22.452.403</b>	<b>\$28.601.989</b>	<b>\$44.137.157</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$13.892.093</b>	<b>\$21.172.021</b>	<b>\$28.174.379</b>	<b>\$34.999.353</b>	<b>\$51.972.296</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 60. Parte 2: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$2.295.210	-\$1.555.092	-\$893.408	-\$166.257	<b>\$1.507.334</b>	<b>\$3.172.501</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$2.194.112	-\$1.403.446	-\$691.213	<b>\$86.487</b>	<b>\$1.886.450</b>	<b>\$3.677.989</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$998.307	<b>\$390.261</b>	<b>\$1.700.397</b>	<b>\$2.960.409</b>	<b>\$6.370.719</b>	<b>\$9.657.014</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$897.210	<b>\$541.908</b>	<b>\$1.902.592</b>	<b>\$3.213.153</b>	<b>\$6.749.834</b>	<b>\$10.162.502</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$696.163	<b>\$58.140</b>	<b>\$1.367.985</b>	<b>\$2.246.467</b>	<b>\$4.603.874</b>	<b>\$6.748.078</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$595.066	<b>\$235.009</b>	<b>\$1.570.180</b>	<b>\$2.499.211</b>	<b>\$4.982.990</b>	<b>\$7.253.566</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$600.739</b>	<b>\$2.348.685</b>	<b>\$3.961.790</b>	<b>\$5.488.724</b>	<b>\$9.467.259</b>	<b>\$13.232.591</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$701.837</b>	<b>\$2.500.332</b>	<b>\$4.163.985</b>	<b>\$5.741.467</b>	<b>\$9.846.375</b>	<b>\$13.738.078</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$2.921.721</b>	<b>\$6.270.304</b>	<b>\$9.540.453</b>	<b>\$12.760.480</b>	<b>\$21.070.824</b>	<b>\$29.257.155</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$3.022.818</b>	<b>\$6.421.950</b>	<b>\$9.742.648</b>	<b>\$13.013.223</b>	<b>\$21.449.940</b>	<b>\$29.762.643</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$3.030.068</b>	<b>\$6.432.825</b>	<b>\$9.757.148</b>	<b>\$13.146.938</b>	<b>\$21.477.127</b>	<b>\$29.798.892</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$3.349.885</b>	<b>\$5.358.708</b>	<b>\$7.089.961</b>	<b>\$8.643.831</b>	<b>\$12.439.013</b>	<b>\$15.795.316</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$3.450.982</b>	<b>\$5.510.355</b>	<b>\$7.292.156</b>	<b>\$8.896.575</b>	<b>\$12.818.128</b>	<b>\$16.300.804</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.326.971</b>	<b>\$8.378.178</b>	<b>\$12.350.953</b>	<b>\$16.273.604</b>	<b>\$26.340.511</b>	<b>\$36.283.404</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$4.520.767</b>	<b>\$8.228.728</b>	<b>\$11.801.846</b>	<b>\$15.288.794</b>	<b>\$24.167.364</b>	<b>\$33.056.427</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$4.621.865</b>	<b>\$8.380.374</b>	<b>\$12.004.042</b>	<b>\$15.541.538</b>	<b>\$24.546.480</b>	<b>\$33.561.915</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.629.115</b>	<b>\$8.391.249</b>	<b>\$12.018.541</b>	<b>\$15.559.662</b>	<b>\$24.573.667</b>	<b>\$33.374.468</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$5.926.017</b>	<b>\$10.336.602</b>	<b>\$14.612.346</b>	<b>\$18.801.919</b>	<b>\$29.437.051</b>	<b>\$39.858.981</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$8.246.999</b>	<b>\$14.258.221</b>	<b>\$20.191.009</b>	<b>\$26.073.675</b>	<b>\$41.040.617</b>	<b>\$55.883.545</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$8.566.815</b>	<b>\$13.184.104</b>	<b>\$17.523.823</b>	<b>\$21.686.158</b>	<b>\$32.002.503</b>	<b>\$41.879.970</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$8.667.913</b>	<b>\$13.335.751</b>	<b>\$17.726.018</b>	<b>\$21.938.902</b>	<b>\$32.381.619</b>	<b>\$42.385.458</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$8.675.163</b>	<b>\$13.346.625</b>	<b>\$17.740.517</b>	<b>\$21.957.026</b>	<b>\$32.408.805</b>	<b>\$42.421.707</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$9.846.045</b>	<b>\$16.216.645</b>	<b>\$22.452.403</b>	<b>\$28.601.989</b>	<b>\$44.137.157</b>	<b>\$59.682.817</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$13.892.093</b>	<b>\$21.172.021</b>	<b>\$28.174.379</b>	<b>\$34.999.353</b>	<b>\$51.972.296</b>	<b>\$68.506.360</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 61. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-5%	1%	6%	9%	16%	22%	30%	36%	42%	59%	55%
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-4%	2%	7%	10%	18%	23%	32%	39%	45%	63%	59%
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	4%	12%	18%	22%	33%	42%	56%	68%	77%	112%	108%
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	5%	13%	18%	23%	34%	44%	58%	70%	79%	116%	112%
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	6%	10%	16%	19%	27%	33%	42%	49%	54%	72%	64%
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	7%	11%	17%	20%	29%	35%	44%	51%	57%	76%	68%
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	13%	21%	27%	31%	43%	52%	68%	79%	89%	125%	117%
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	14%	21%	27%	32%	44%	54%	69%	82%	91%	129%	121%
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	24%	36%	46%	55%	77%	97%	130%	158%	180%	270%	267%
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	24%	37%	47%	56%	79%	98%	132%	160%	183%	274%	271%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	24%	37%	47%	56%	79%	99%	132%	160%	184%	274%	271%
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	26%	33%	38%	42%	52%	60%	71%	79%	85%	105%	92%
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	26%	34%	39%	43%	53%	61%	73%	81%	87%	109%	96%
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	30%	44%	56%	66%	93%	116%	157%	190%	218%	327%	323%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	31%	44%	54%	63%	86%	108%	141%	169%	192%	283%	276%
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	31%	44%	55%	64%	88%	109%	143%	171%	195%	287%	280%
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	31%	44%	55%	64%	88%	108%	143%	172%	195%	287%	280%
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	37%	51%	63%	74%	102%	126%	168%	201%	230%	340%	333%
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	46%	65%	82%	96%	135%	170%	230%	280%	321%	485%	482%
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	47%	61%	73%	83%	109%	132%	169%	198%	223%	316%	299%
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	47%	62%	74%	83%	110%	133%	171%	201%	225%	320%	303%
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	47%	62%	74%	84%	110%	133%	171%	201%	226%	320%	308%
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	52%	72%	89%	104%	144%	181%	241%	291%	333%	498%	491%
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	67%	89%	108%	123%	167%	205%	269%	320%	363%	531%	514%

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor del 10%.

Cuadro 62. Periodo de retorno según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	> 10	<b>9,00</b>	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	> 10	<b>9,00</b>	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>9,00</b>	<b>7,00</b>	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>9,00</b>	<b>7,00</b>	<b>5,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>7,00</b>	<b>7,00</b>	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>6,00</b>	<b>5,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>5,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>5,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>5,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>2,00</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>						
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>						
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>						
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>						
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>3,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>						
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>1,00</b>								

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser menor de 10 años.

**Apéndice XI. VAN, TIR y periodo de retorno para una bomba de calor con kerosene para un sistema horizontal.**

Cuadro 63. Parte 1. VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$3.312.298	-\$2.888.307	-\$2.518.090	-\$2.102.989	-\$1.039.013	<b>\$19.187</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$3.242.986	-\$2.784.339	-\$2.379.466	-\$1.929.709	-\$779.093	<b>\$365.747</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$2.423.147	-\$1.554.581	-\$739.789	<b>\$40.639</b>	<b>\$2.295.302</b>	<b>\$4.464.941</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$2.353.835	-\$1.450.613	-\$601.165	<b>\$213.919</b>	<b>\$2.555.222</b>	<b>\$4.811.501</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-\$2.215.999	-\$1.782.282	-\$967.689	-\$448.836	<b>\$1.083.961</b>	<b>\$2.470.587</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$2.146.686	-\$1.661.021	-\$829.065	-\$275.556	<b>\$1.343.881</b>	<b>\$2.817.147</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-\$1.326.848	-\$211.894	<b>\$810.613</b>	<b>\$1.774.041</b>	<b>\$4.418.276</b>	<b>\$6.916.340</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-\$1.257.536	-\$107.926	<b>\$949.237</b>	<b>\$1.947.321</b>	<b>\$4.678.196</b>	<b>\$7.262.901</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$264.407</b>	<b>\$2.476.750</b>	<b>\$4.635.320</b>	<b>\$6.759.525</b>	<b>\$12.373.630</b>	<b>\$17.902.712</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$333.719</b>	<b>\$2.580.718</b>	<b>\$4.773.944</b>	<b>\$6.932.805</b>	<b>\$12.633.550</b>	<b>\$18.249.272</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$338.690</b>	<b>\$2.588.174</b>	<b>\$4.783.884</b>	<b>\$7.024.479</b>	<b>\$12.652.189</b>	<b>\$18.274.124</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$557.954</b>	<b>\$1.851.764</b>	<b>\$2.955.273</b>	<b>\$3.937.168</b>	<b>\$6.455.698</b>	<b>\$8.673.334</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$627.266</b>	<b>\$1.955.732</b>	<b>\$3.093.897</b>	<b>\$4.110.449</b>	<b>\$6.715.618</b>	<b>\$9.019.894</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$1.227.840</b>	<b>\$3.921.900</b>	<b>\$6.562.186</b>	<b>\$9.168.108</b>	<b>\$15.986.504</b>	<b>\$22.719.878</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$1.360.706</b>	<b>\$3.819.437</b>	<b>\$6.185.721</b>	<b>\$8.492.926</b>	<b>\$14.496.604</b>	<b>\$20.507.476</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$1.430.018</b>	<b>\$3.923.405</b>	<b>\$6.324.345</b>	<b>\$8.666.206</b>	<b>\$14.756.525</b>	<b>\$20.854.036</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$1.434.989</b>	<b>\$3.930.861</b>	<b>\$6.334.286</b>	<b>\$8.678.632</b>	<b>\$14.775.164</b>	<b>\$20.725.524</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$2.324.140</b>	<b>\$5.264.587</b>	<b>\$8.112.587</b>	<b>\$10.901.509</b>	<b>\$18.109.479</b>	<b>\$25.171.277</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$3.915.394</b>	<b>\$7.953.231</b>	<b>\$11.937.294</b>	<b>\$15.886.993</b>	<b>\$26.064.833</b>	<b>\$36.157.649</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>\$4.134.659</b>	<b>\$7.216.822</b>	<b>\$10.108.683</b>	<b>\$12.878.931</b>	<b>\$19.868.341</b>	<b>\$26.556.859</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>\$4.203.971</b>	<b>\$7.320.790</b>	<b>\$10.247.307</b>	<b>\$13.052.211</b>	<b>\$20.128.261</b>	<b>\$26.903.419</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$4.208.942</b>	<b>\$7.328.245</b>	<b>\$10.257.248</b>	<b>\$13.064.637</b>	<b>\$20.146.900</b>	<b>\$26.928.271</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$5.011.694</b>	<b>\$9.295.918</b>	<b>\$13.487.696</b>	<b>\$17.620.395</b>	<b>\$28.187.807</b>	<b>\$38.762.413</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>\$7.785.647</b>	<b>\$12.693.303</b>	<b>\$17.410.657</b>	<b>\$22.006.399</b>	<b>\$33.559.544</b>	<b>\$44.811.796</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor que cero.

Cuadro 64. Parte 2: VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$1.988.323	\$3.837.218	\$5.786.477	\$14.387.754	\$25.860.520
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$2.508.164	\$4.530.339	\$6.652.878	\$16.120.556	\$29.326.122
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$8.656.954	\$12.728.725	\$16.723.656	\$36.616.522	\$70.318.056
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$9.176.794	\$13.421.846	\$17.590.057	\$38.349.324	\$73.783.658
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$4.990.663	\$7.304.021	\$9.485.276	\$19.869.251	\$33.612.526
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$5.510.503	\$7.997.141	\$10.351.676	\$21.602.052	\$37.078.129
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$11.659.293	\$16.195.528	\$20.599.660	\$42.098.019	\$78.070.062
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$12.179.133	\$16.888.649	\$21.466.060	\$43.830.820	\$81.535.665
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$28.813.610	\$39.604.267	\$50.318.084	\$103.805.377	\$204.695.766
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$29.333.451	\$40.297.388	\$51.184.484	\$105.538.179	\$208.161.368
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$29.370.729	\$40.347.092	\$51.423.819	\$105.662.439	\$208.409.888
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$12.587.445	\$16.076.030	\$19.292.680	\$33.739.015	\$56.841.190
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$13.107.286	\$16.769.151	\$20.159.081	\$35.471.817	\$60.306.793
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$36.039.359	\$49.238.599	\$62.360.998	\$127.891.207	\$252.867.424
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$31.815.949	\$43.071.070	\$54.194.087	\$109.286.874	\$212.447.772
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$32.335.790	\$43.764.191	\$55.060.488	\$111.019.675	\$215.913.375
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$32.373.068	\$43.813.895	\$55.122.618	\$111.143.935	\$216.161.895
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$39.041.698	\$52.705.402	\$66.237.002	\$133.372.703	\$260.619.431
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$56.196.016	\$76.114.141	\$95.955.426	\$195.080.062	\$387.245.134
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$39.412.732	\$51.843.079	\$64.001.491	\$123.156.638	\$232.062.581
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$39.932.573	\$52.536.200	\$64.867.892	\$124.889.439	\$235.528.184
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$39.969.851	\$52.585.904	\$64.930.022	\$125.013.699	\$239.390.559
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$59.198.355	\$79.580.944	\$99.831.429	\$200.561.558	\$394.997.140
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$66.795.138	\$88.352.953	\$109.638.834	\$214.431.322	\$414.611.949

Cuadro 65. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	indefinido	-8%	-4%	-1%	5%	<b>10%</b>	<b>17%</b>	<b>22%</b>	<b>26%</b>	<b>39%</b>	<b>36%</b>
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	indefinido	-7%	-3%	0%	7%	<b>11%</b>	<b>19%</b>	<b>24%</b>	<b>28%</b>	<b>42%</b>	<b>39%</b>
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	-6%	1%	6%	<b>10%</b>	<b>19%</b>	<b>26%</b>	<b>37%</b>	<b>45%</b>	<b>51%</b>	<b>76%</b>	<b>74%</b>
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	-5%	2%	7%	<b>11%</b>	<b>20%</b>	<b>27%</b>	<b>38%</b>	<b>46%</b>	<b>53%</b>	<b>79%</b>	<b>77%</b>
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	-4%	0%	5%	8%	<b>14%</b>	<b>19%</b>	<b>26%</b>	<b>31%</b>	<b>35%</b>	<b>48%</b>	<b>43%</b>
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	-3%	1%	6%	9%	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>28%</b>	<b>33%</b>	<b>37%</b>	<b>51%</b>	<b>46%</b>
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	2%	9%	<b>14%</b>	<b>17%</b>	<b>27%</b>	<b>34%</b>	<b>45%</b>	<b>53%</b>	<b>60%</b>	<b>85%</b>	<b>80%</b>
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	3%	9%	<b>14%</b>	<b>18%</b>	<b>27%</b>	<b>35%</b>	<b>46%</b>	<b>55%</b>	<b>62%</b>	<b>88%</b>	<b>83%</b>
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>11%</b>	<b>21%</b>	<b>29%</b>	<b>35%</b>	<b>51%</b>	<b>65%</b>	<b>88%</b>	<b>107%</b>	<b>122%</b>	<b>184%</b>	<b>182%</b>
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>12%</b>	<b>22%</b>	<b>30%</b>	<b>36%</b>	<b>52%</b>	<b>66%</b>	<b>89%</b>	<b>108%</b>	<b>124%</b>	<b>186%</b>	<b>185%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>12%</b>	<b>22%</b>	<b>30%</b>	<b>36%</b>	<b>52%</b>	<b>66%</b>	<b>90%</b>	<b>109%</b>	<b>125%</b>	<b>187%</b>	<b>185%</b>
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	<b>13%</b>	<b>19%</b>	<b>23%</b>	<b>26%</b>	<b>33%</b>	<b>39%</b>	<b>47%</b>	<b>53%</b>	<b>57%</b>	<b>71%</b>	<b>63%</b>
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>13%</b>	<b>19%</b>	<b>23%</b>	<b>26%</b>	<b>34%</b>	<b>40%</b>	<b>48%</b>	<b>54%</b>	<b>59%</b>	<b>74%</b>	<b>66%</b>
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>16%</b>	<b>27%</b>	<b>36%</b>	<b>43%</b>	<b>62%</b>	<b>78%</b>	<b>106%</b>	<b>129%</b>	<b>148%</b>	<b>222%</b>	<b>220%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>17%</b>	<b>27%</b>	<b>35%</b>	<b>41%</b>	<b>58%</b>	<b>72%</b>	<b>96%</b>	<b>115%</b>	<b>131%</b>	<b>192%</b>	<b>188%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>17%</b>	<b>27%</b>	<b>35%</b>	<b>42%</b>	<b>59%</b>	<b>73%</b>	<b>97%</b>	<b>116%</b>	<b>132%</b>	<b>195%</b>	<b>191%</b>
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>17%</b>	<b>27%</b>	<b>35%</b>	<b>42%</b>	<b>59%</b>	<b>73%</b>	<b>97%</b>	<b>116%</b>	<b>133%</b>	<b>195%</b>	<b>191%</b>
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	<b>21%</b>	<b>32%</b>	<b>41%</b>	<b>49%</b>	<b>68%</b>	<b>85%</b>	<b>113%</b>	<b>137%</b>	<b>156%</b>	<b>231%</b>	<b>227%</b>
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>28%</b>	<b>42%</b>	<b>54%</b>	<b>64%</b>	<b>91%</b>	<b>115%</b>	<b>156%</b>	<b>190%</b>	<b>218%</b>	<b>330%</b>	<b>328%</b>
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	<b>29%</b>	<b>40%</b>	<b>48%</b>	<b>55%</b>	<b>73%</b>	<b>89%</b>	<b>114%</b>	<b>135%</b>	<b>151%</b>	<b>215%</b>	<b>204%</b>
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	<b>29%</b>	<b>40%</b>	<b>49%</b>	<b>56%</b>	<b>74%</b>	<b>90%</b>	<b>116%</b>	<b>136%</b>	<b>153%</b>	<b>217%</b>	<b>207%</b>
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	<b>29%</b>	<b>40%</b>	<b>49%</b>	<b>56%</b>	<b>74%</b>	<b>90%</b>	<b>116%</b>	<b>136%</b>	<b>153%</b>	<b>218%</b>	<b>210%</b>
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>33%</b>	<b>47%</b>	<b>59%</b>	<b>70%</b>	<b>97%</b>	<b>122%</b>	<b>163%</b>	<b>197%</b>	<b>226%</b>	<b>338%</b>	<b>334%</b>
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	<b>44%</b>	<b>59%</b>	<b>72%</b>	<b>83%</b>	<b>113%</b>	<b>139%</b>	<b>182%</b>	<b>217%</b>	<b>247%</b>	<b>361%</b>	<b>350%</b>

- Los valores marcados en negrita cumplen con la condición de ser mayor del 10%.



**Apéndice XII. VAN, TIR y periodo de retorno para una bomba de calor comparada con la electricidad para un sistema horizontal.**

Cuadro 67. Parte 1. VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>200</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$7.794.242	\$11.670.321	\$15.223.342	\$19.046.015	\$26.766.952	\$34.453.193
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$8.210.650	\$12.294.933	\$16.056.158	\$20.087.035	\$28.328.482	\$36.535.233
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$13.136.019	\$19.682.986	\$25.906.896	\$31.924.355	\$46.798.615	\$61.162.077
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$13.552.427	\$20.307.598	\$26.739.712	\$32.965.375	\$48.360.145	\$63.244.117
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$14.380.511	\$18.315.018	\$24.537.734	\$28.983.719	\$39.521.207	\$49.180.539
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$14.796.919	\$19.043.522	\$25.370.550	\$30.024.739	\$41.082.737	\$51.262.579
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$19.722.288	\$27.749.485	\$35.221.287	\$42.338.161	\$59.552.871	\$75.889.423
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$20.138.696	\$28.374.098	\$36.054.103	\$43.379.181	\$61.114.401	\$77.971.463
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$29.282.117	\$43.902.133	\$58.199.092	\$72.289.600	\$107.346.483	\$141.892.568
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$29.698.525	\$44.526.745	\$59.031.908	\$73.330.620	\$108.908.013	\$143.974.608
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$29.728.386	\$44.571.536	\$59.091.630	\$73.881.375	\$109.019.991	\$144.123.912
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$31.045.669	\$40.147.387	\$48.105.826	\$55.333.647	\$71.793.147	\$86.444.965
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$31.462.077	\$40.771.999	\$48.938.642	\$56.374.667	\$73.354.677	\$88.527.005
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$35.070.163	\$52.584.202	\$69.775.184	\$86.759.715	\$129.051.655	\$170.832.797
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$35.868.386	\$51.968.633	\$67.513.484	\$82.703.406	\$120.100.739	\$157.541.287
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$36.284.794	\$52.593.245	\$68.346.300	\$83.744.426	\$121.662.269	\$159.623.327
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$36.314.655	\$52.638.036	\$68.406.021	\$83.819.079	\$121.774.247	\$158.851.258
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$41.656.432	\$60.650.701	\$79.089.575	\$97.173.521	\$141.805.910	\$185.560.143
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$51.216.261	\$76.803.349	\$102.067.380	\$127.124.960	\$189.599.523	\$251.563.288
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$52.533.544	\$72.379.200	\$91.081.576	\$109.053.335	\$152.372.679	\$193.884.340
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$52.949.952	\$73.003.812	\$91.914.393	\$110.094.355	\$153.934.209	\$195.966.381
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$52.979.813	\$73.048.603	\$91.974.114	\$110.169.007	\$154.046.187	\$196.115.685
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$57.802.530	\$84.869.849	\$111.381.772	\$137.538.766	\$202.353.779	\$267.212.007
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$74.467.688	\$105.280.416	\$134.949.864	\$163.888.695	\$234.625.719	\$303.555.060

Cuadro 68. Parte 2. VAN según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

<b>(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m<sup>2</sup>])</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$48.940.946	\$62.706.323	\$77.074.658	\$139.379.670	\$253.486.117
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$52.064.007	\$66.870.403	\$82.279.759	\$149.789.871	\$274.306.518
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$89.004.273	\$116.124.091	\$142.782.271	\$272.924.092	\$520.574.960
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$92.127.333	\$120.288.172	\$147.987.371	\$283.334.293	\$541.395.362
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$66.978.188	\$83.533.935	\$99.296.038	\$172.311.017	\$300.058.074
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$70.101.248	\$87.698.015	\$104.501.139	\$182.721.218	\$320.878.475
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	\$107.041.514	\$136.951.704	\$166.068.249	\$305.855.439	\$567.146.918
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	\$110.164.575	\$141.115.784	\$171.273.350	\$316.265.640	\$587.967.319
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$210.100.010	\$277.585.073	\$344.608.498	\$676.576.547	\$1.327.879.871
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$213.223.070	\$281.749.154	\$349.813.599	\$686.986.748	\$1.348.700.272
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$213.447.026	\$282.047.762	\$351.251.457	\$687.733.268	\$1.350.193.313
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	\$112.617.603	\$136.233.792	\$158.216.270	\$255.636.808	\$439.609.600
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	\$115.740.663	\$140.397.873	\$163.421.371	\$266.047.009	\$460.430.002
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$253.510.352	\$335.465.531	\$416.959.070	\$821.277.690	\$1.617.282.157
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$228.137.251	\$298.412.686	\$367.894.477	\$709.507.894	\$1.374.451.828
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$231.260.311	\$302.576.766	\$373.099.577	\$719.918.095	\$1.395.272.230
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$231.484.267	\$302.875.374	\$373.472.837	\$720.664.615	\$1.396.765.270
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	\$271.547.594	\$356.293.143	\$440.245.048	\$854.209.037	\$1.663.854.114
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$374.606.089	\$496.926.513	\$618.785.297	\$1.224.930.145	\$2.424.587.067
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	\$273.776.666	\$351.112.543	\$426.814.709	\$792.833.685	\$1.492.292.291
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	\$276.899.726	\$355.276.624	\$432.019.809	\$803.243.886	\$1.513.112.693
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	\$277.123.683	\$355.575.232	\$432.393.069	\$803.990.406	\$1.536.316.796
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$392.643.330	\$517.754.125	\$642.071.276	\$1.257.861.492	\$2.471.159.024
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	\$438.282.746	\$570.453.983	\$700.991.508	\$1.341.187.283	\$2.588.999.488

Cuadro 69. TIR según el material de construcción y la superficie construida [m<sup>2</sup>].

(Muro/Techo/Piso/Ventanas/Puertas) \ (Área[m <sup>2</sup> ])	40	60	80	100	150	200	300	400	500	1000	2000
Hormigón/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	58%	76%	90%	104%	133%	160%	202%	234%	264%	359%	328%
Hormigón/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	60%	79%	94%	109%	140%	168%	214%	249%	281%	385%	354%
Hormigón/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	88%	118%	143%	164%	222%	272%	355%	421%	476%	689%	658%
Hormigón/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	91%	121%	147%	169%	229%	281%	367%	436%	493%	715%	684%
Ladrillo/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	95%	111%	136%	150%	190%	222%	271%	307%	336%	441%	386%
Ladrillo/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	98%	115%	140%	155%	197%	230%	283%	322%	353%	466%	411%
Ladrillo/Hormigón/Plástico/Vidrio/Madera	125%	161%	189%	213%	278%	334%	424%	494%	552%	771%	716%
Ladrillo/Hormigón/Cerámico/Vidrio/Madera	128%	164%	193%	217%	285%	342%	436%	509%	568%	796%	741%
Hormigón/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	179%	245%	303%	352%	490%	611%	817%	986%	1128%	1686%	1655%
Hormigón/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	181%	249%	307%	357%	496%	620%	829%	1001%	1145%	1712%	1681%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	181%	249%	307%	360%	497%	620%	830%	1002%	1150%	1714%	1682%
Madera/Zinc/Plástico/Vidrio/Madera	189%	226%	253%	273%	332%	378%	445%	492%	526%	647%	558%
Madera/Zinc/Cerámico/Vidrio/Madera	191%	229%	257%	278%	339%	387%	457%	506%	543%	672%	584%
Hormigón/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	211%	291%	360%	420%	586%	732%	983%	1189%	1362%	2044%	2012%
Ladrillo/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	216%	288%	349%	401%	546%	677%	886%	1059%	1203%	1767%	1712%
Ladrillo/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	218%	291%	353%	406%	553%	685%	898%	1074%	1220%	1793%	1738%
Ladrillo/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	218%	291%	353%	406%	553%	682%	899%	1075%	1221%	1795%	1740%
Ladrillo/Hormigón/Madera/Vidrio/Madera	248%	333%	406%	468%	642%	794%	1052%	1262%	1437%	2125%	2070%
Hormigón/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	302%	418%	519%	608%	853%	1071%	1445%	1754%	2014%	3040%	3009%
Madera/Pizarreño/Plástico/Vidrio/Madera	309%	395%	465%	524%	689%	829%	1060%	1244%	1394%	1973%	1858%
Madera/Pizarreño/Cerámico/Vidrio/Madera	312%	398%	469%	529%	695%	838%	1072%	1258%	1410%	1999%	1884%
Madera/Zinc/Madera/Vidrio/Madera	312%	399%	469%	529%	696%	839%	1073%	1259%	1412%	2001%	1912%
Ladrillo/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	339%	461%	565%	657%	909%	1137%	1514%	1827%	2089%	3122%	3067%
Madera/Pizarreño/Madera/Vidrio/Madera	432%	568%	682%	780%	1052%	1290%	1688%	2011%	2279%	3328%	3212%

