

Guía práctica Uso de geotermia somera para climatización





UNIVERSIDAD
DE CHILE



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA)

Editor general

Diego Morata Céspedes

Coordinador general

Mauricio Muñoz Morales

Coordinadora capítulo social

Sofía Vargas Payera

Coordinadora capítulo recursos

Karin García Sanders

Coordinador capítulo técnico

Nicolás Hurtado Arroyo

Coordinador capítulo económico

Esteban Micco Hernández

Autores

Bárbara Bravo Rivera

Diego Aravena Noemi

Diego Morata Céspedes

Esteban Micco Hernández

Gloria Arancibia Hernández

Karin García Sanders

Mauricio Muñoz Morales

Nicolás Hurtado Arroyo

Nicolás Pérez Estay

Pablo Valdenegro Cid

Patricio Alarcón San Martín

Sofía Vargas Payera

Víctor Rodríguez Núñez

Edición

Bárbara Bravo Rivera

José Ojeda Vargas

Diseño

M. Giselle Ozaz Norambuena

Recambio de sistemas de calefacción,
un tema más allá de algo tecnológico



Recambio de sistemas de calefacción, un tema más allá de algo tecnológico

Tabla de contenido

Introducción

Proyectos comunitarios

1. Diagnóstico social: conociendo las necesidades y percepciones locales
2. Apropiación tecnológica: empoderamiento comunitario
3. Transferencia tecnológica: generando espacios de diálogo social
4. Monitoreo y acompañamiento del sistema
5. Campaña de sensibilización social, cambio climático y crisis medioambiental

Bibliografía

Recambio de sistemas de calefacción, un tema más allá de algo tecnológico

Autores

- Sofía Vargas Payera
- Bárbara Bravo Rivera
- Víctor Rodríguez Núñez
- Esteban Micco Hernández

Introducción

La actual crisis climática exige reemplazar las fuentes contaminantes por energías renovables, apuntando a una matriz energética resiliente y sustentable, tanto para generación de electricidad como para necesidades térmicas. En ese marco, Chile enfrenta el gran desafío de promover el uso de energías limpias para cambiar los sistemas de calefacción tradicionales, principalmente asociados al uso de leña en la zona centro y sur del país. Esto, porque generan grandes problemas de contaminación atmosférica, afectando la calidad de vida de sus habitantes y generando altos niveles de deforestación.

El recambio de un sistema de calefacción -junto con requerir un cambio tecnológico- exige cambios culturales (Boso, 2017). Somos las personas quienes nos relacionamos con el nuevo sistema y, por lo mismo, se requiere incorporar distintas estrategias para hacer de ellos herramientas más amigables y cercanas. Esta sección aborda las distintas variables sociales vinculadas a un proyecto de climatización con **Bombas de Calor Geotérmicas (BGC)**. Si bien existen distintos manuales y acercamientos para guiar el trabajo comunitario y de transferencia tecnológica, aquí se incluye un modelo de trabajo social y comunitario desarrollado por el área Geotermia y Sociedad de CEGA, entre 2016 y 2020.

Uno de los principales énfasis del trabajo comunitario de CEGA ha sido disminuir la resistencia a los cambios. La experiencia de los proyectos desarrollados demostró que las bombas de calor pueden generar una distancia con las y los usuarios, debido a que parecen más complejas de lo que realmente son. A esto se suma que los sistemas de distribución de calor, como los fancoils (muy similares a un sistema de aire acondicionado), no siempre son conocidos, sobre todo en un contexto donde la leña es el energético más comúnmente utilizado para calefacción.

Otro factor a considerar en un recambio de sistema de calefacción es que, en algunos casos, al poco tiempo de ser implementados quedan en desuso o abandonados. Esto, justamente, porque no se han incorporado prácticas de acercamiento a la tecnología y la distancia es tal que se prefiere volver a los sistemas tradicionales.

Es por esto que los principales objetivos del trabajo comunitario, asociado a un recambio de calefacción, son integrar a la comunidad beneficiaria del proyecto de forma temprana; incorporar sus inquietudes en el diseño del proyecto; promover actividades para acercar y hacer suyos los saberes técnicos, e incentivar, así, el uso adecuado del sistema después de finalizado el proyecto de recambio de calefacción.

Considerando todas estas variables, esta sección describe – a partir de la experiencia del área Geotermia y Sociedad de CEGA – las fases que incorporan el relacionamiento comunitario, con el propósito de integrar a la comunidad participante, proponiendo un trabajo colaborativo y participativo. El equipo que desarrolla estas estrategias -que se propone diseñar junto a la comunidad participante- lo componen científicos sociales de distintas disciplinas. Veamos ahora cómo se presenta la incorporación del factor social en el diseño y desarrollo de un proyecto de uso directo de geotermia. Cabe resaltar que esta dimensión acompaña de manera transversal, el desarrollo de las actividades descritas en los capítulos relativos al recurso geotérmico, aspectos técnicos, económicos y legales.

Proyectos comunitarios

El enfoque central de esta sección será referido a los proyectos comunitarios. Llamaremos así a aquellos que integran a un grupo de personas más amplio que una familia. Con esto nos referimos a proyectos en comunidades escolares, juntas de vecinos, centros asistenciales, etc. En el marco del relacionamiento comunitario se propone utilizar distintas fases: diagnóstico social, apropiación tecnológica, transferencia tecnológica, monitoreo/acompañamiento y sensibilización social. Hablaremos del grupo de involucrados(as) directos(as) para referirnos a quienes interactúan estrechamente con el sistema de climatización. En tanto, nos referiremos como involucrados(as) de forma indirecta a quienes pueden verse impactados positivamente por el proyecto, aunque estén más distantes al sistema. Es importante destacar que las etapas pueden ser simultáneas, como se representa en la Figura 1.

1. Diagnóstico social: conociendo las necesidades y percepciones locales

La experiencia de CEGA en proyectos de climatización de espacios comunitarios ha sido, principalmente, en establecimientos educacionales. En ese marco, esta sección describe las estrategias utilizadas en los proyectos de recambio de calefacción en los establecimientos Liceo Altos del Mackay, de Coyhaique, y en la Escuela Luis Cruz Martínez, de Curacautín.

En ambos casos confirmamos que la primera fase, antes de diseñar cualquier proyecto, consiste en conocer, escuchar y

entender las motivaciones y necesidades de la comunidad, integrando así, desde etapas muy tempranas, a las localidades. Esta fase de diagnóstico social es clave para conocer a los y las integrantes de la comunidad, saber cómo funciona el sistema actual de calefacción, identificar las principales necesidades energéticas de la comunidad y diagnosticar su predisposición y posibles aprensiones sobre el proyecto.

Herramientas

Se propone que el levantamiento de información en esta fase sea realizado con metodologías cualitativas y participativas, como entrevistas en profundidad, focus groups, mapeo de actores, observaciones participantes y/u otras similares. Esto permite comprender en profundidad las características socioculturales de la comunidad y, así, entender cómo el proyecto podría “hacerle sentido” y/o beneficiarla, identificando su interés en participar de la iniciativa. En esta fase es clave comprender si el proyecto pudiera establecer un diálogo con prácticas locales, historia social y política del territorio. Dentro de la información crítica que se requiere conocer está:

a) Necesidades energéticas de la comunidad: Si bien el eje fundamental del proyecto es responder a necesidades de climatización, es importante que la comunidad describa sus intereses y mayores carencias en la materia energética, no sólo térmicas, sino también eléctricas o lumínicas. Posteriormente, esta información será clave para diseñar un proyecto con pertinencia local. Para comprender este punto, revisemos un ejemplo. De acuerdo a la información inicial, en el Liceo Altos

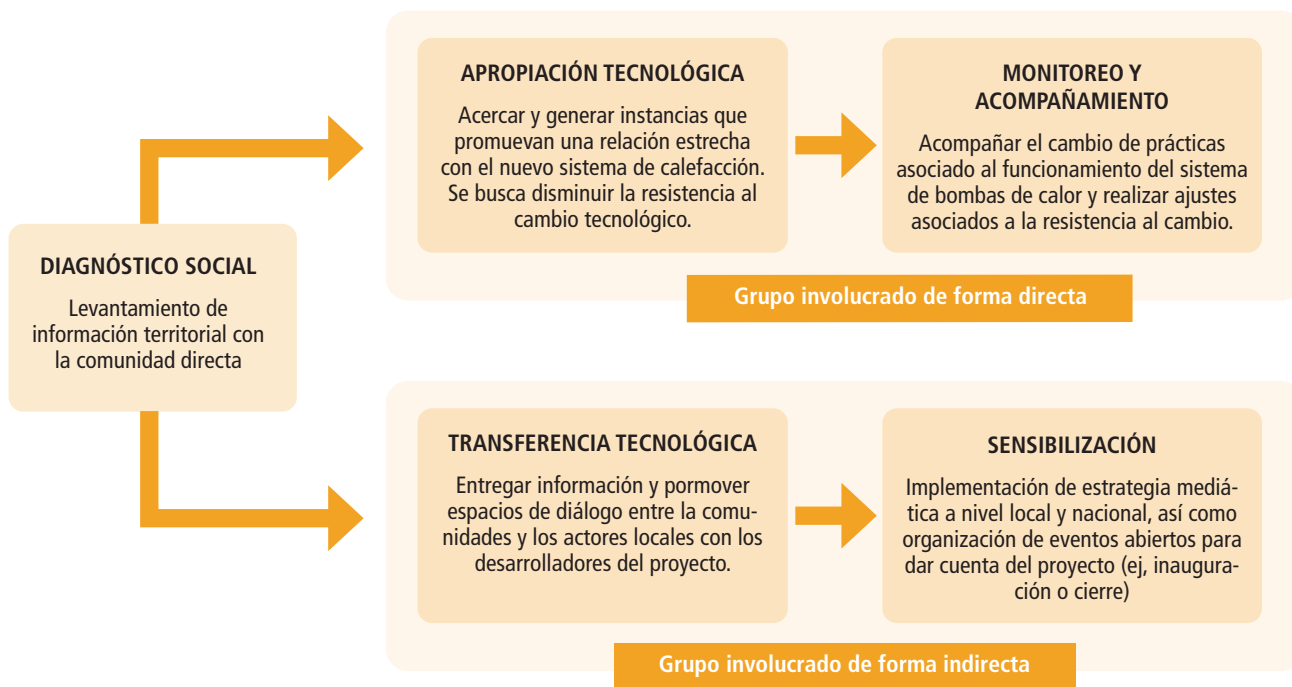


Figura 1. Fases de acercamiento comunitario. Comenzado con un diagnóstico social de la comunidad luego se diseñan e implementan las siguientes fases. Fuente: Equipo social CEGA.

del Mackay, de Coyhaique, la principal necesidad del establecimiento correspondía a las salas del último pabellón construido, calefaccionado con estufas de combustión lenta instaladas en cada una de las salas. Sin embargo, no fue sino hasta que se entrevistó en profundidad a la comunidad, que se constató que la zona del establecimiento con mayores necesidades energéticas no era la inicialmente identificada, sino que eran las salas más alejadas de la caldera del primer pabellón construido en el colegio. Esta información fue clave para el diseño del sistema que, finalmente, apuntó a satisfacer la mayor necesidad local.

b) Nivel de cercanía con cambios tecnológicos: Este eje busca recopilar antecedentes acerca del conocimiento, las experiencias previas y disposición de los actores que interactuarán con cambios, no sólo tecnológicos. Esta información permitirá ejecutar una adecuada estrategia de apropiación para evitar que el proyecto quede abandonado luego de finalizar las obras, además de incluir acciones que promuevan el cambio. Por ejemplo, en uno de los establecimientos educacionales se constató que la calefacción a leña era ocupada también para secar la ropa de los estudiantes en el invierno y, dado que el sistema geotérmico no entregaba esa opción, generó rechazo. Para abordar esta variable, se promovieron nuevas prácticas culturales, como, por ejemplo, llevar ropa de cambio.

c) Mapeo de actores clave: Esta actividad permite identificar todos los actores y/o instituciones que serán parte del proyecto. Las iniciativas desarrolladas por CEGA han confirmado la importancia de la gestión de alianza entre los actores locales,

permitiendo así contar con apoyo intersectorial. La interacción con cada actor dependerá de las necesidades de cada iniciativa y no se requiere que todos participen de todas las fases o de forma simultánea. En el caso de CEGA, los actores clave identificados en un rol fundamental han sido los gobiernos regionales, municipios, secretarías regionales ministeriales de Medio Ambiente, Energía, Educación, Minería y Agricultura.

Resultados

El principal resultado de esta etapa es contar con información detallada y robusta sobre la comunidad, sus prácticas culturales, sus intereses y motivaciones. Esta etapa requiere de trabajo en terreno, en contacto directo con la comunidad participante. De esta forma se busca identificar, en profundidad, las variables que no son descritas ni perceptibles a primera vista en los encuentros iniciales. Esta información se obtiene a través de la convivencia, el trabajo diario y la interacción con los diferentes actores de la comunidad.

Recomendación

Se aconseja iniciar la fase de diagnóstico social en cuanto se identifica una comunidad interesada en ser parte del proyecto. En este sentido, se propone que desde una etapa previa se utilicen herramientas participativas para identificar si las necesidades e intereses territoriales son coherentes con el proyecto de recambio de calefacción.



Foto 1. Localidad de Puyuhuapi, comuna de Puerto Cisnes, Región de Aysén. CEGA.

2. Apropiación tecnológica: empoderamiento comunitario

Utilizando la información obtenida en la etapa anterior, la apropiación tecnológica se enfoca directamente en la comunidad involucrada y su empoderamiento. El objetivo de esta fase es acercar y generar instancias que promuevan una relación estrecha entre la tecnología de bombas de calor geotérmicas y los distintos usuarios o usuarias. De esta forma, se promueve una mayor cercanía, disminuyendo los miedos a la utilización y manipulación del sistema, integrando, además, sus inquietudes, necesidades y preocupaciones en el diseño del proyecto.

Para diseñar estrategias adecuadas es importante distinguir dos tipos de usuarios. Por una parte, está el equipo que opera directamente el sistema de climatización y, por otra, la comunidad que recibe el calor o usa el sistema. Por ejemplo, en las iniciativas enfocadas en el cambio de mecanismos de calefacción para una comunidad escolar, interactúan el equipo técnico, que opera el sistema, y también los y las usuarias, entre los que están estudiantes, profesores y equipo directivo. En ese sentido, cada grupo de actores necesita una estrategia de apropiación específica.

Destacamos que en esta etapa se requiere identificar qué motiva a los usuarios y usuarias a cambiar sus prácticas. Esto es fundamental para generar cambios significativos. Por ejemplo, luego de un año de acompañamiento a los y las estudiantes del Liceo Altos del Mackay (Aysén), se constató que su principal motivación para adoptar el nuevo sistema geotérmico era transformarse en "agentes de cambio" y ser personas que aportaban a la descontaminación de la ciudad. Luego de comprender eso, se realizaron actividades que promovieron esa actitud, logrando así un mayor involucramiento y aceptación al nuevo sistema.

Herramientas

En esta fase se busca generar cercanía y promover una postura positiva a los cambios de prácticas asociados a nuevo sistema de calefacción. Si bien las actividades dependerán de cada proyecto, las comúnmente realizadas por CEGA son:

1. **Diagnóstico sobre confort térmico.** Se ejecuta al comienzo del proyecto y una vez terminada la fase de marcha blanca del nuevo sistema. Se propone que el instrumento cuente con información cualitativa y cuantitativa. Conocer la percepción sobre el calor o frío de las y los usuarios ayuda a medir el impacto del proyecto y percepción de sus beneficiarias y beneficiarios.
2. **Formación de un equipo de embajadores geotérmicos en la comunidad.** Esto permite contar con un grupo de líderes locales que promoverán mayor cercanía con el nuevo sistema y esto, a su vez, permitirá diagnosticar nuevas necesidades.
3. **Realización de talleres didácticos** para difundir los beneficios de la tecnología en el contexto local.



Foto 2. Taller con la comunidad del Jardín Infantil Los Conejitos Blancos de Chiu Chiu, Región de Antofagasta. CEGA.

4. **Implementación de campaña gráfica** dentro de las salas de clases. Herramienta visual que busca fomentar el cambio de prácticas de uso y ventilación del espacio climatizado.
5. **Ejecución de actividades basadas en principios de Ciencia Ciudadana.** Esto quiere decir, actividades científicas donde participe la comunidad, como mediciones ciudadanas o participación de terrenos científicos. Estas iniciativas permiten acercar la ciencia a la comunidad y generar lazos entre el equipo desarrollador y la comunidad local. Por ejemplo, en el caso del Liceo Altos del Mackay, los y las estudiantes registraron la temperatura de la sala durante un mes, acercándose así al proceso realizado por el equipo desarrollador y generando información útil para el diagnóstico.

Resultados esperados

Dentro de los resultados esperados de estas estrategias se destaca:

- a. Conocer los niveles de confort térmico en los y las usuarias, antes y después de la implementación del nuevo sistema calefacción.
- b. Disminuir la resistencia a los cambios culturales asociados a nuevo sistema socio-tecnológico.
- c. Contar con un grupo de personas, dentro de la comunidad, que lideren los procesos y cambios del sistema.
- d. Conocer las motivaciones de las y los usuarios por cambiar su sistema de calefacción.

Recomendaciones

Se propone que la duración de esta fase se extienda desde el comienzo del proyecto hasta al menos un año después de la puesta en marcha del sistema.

3. Transferencia tecnológica: generando espacios de diálogo social

También enfocada en acercar la nueva tecnología a la comunidad, esta etapa está dirigida a un grupo más amplio, que integra tanto a las y los usuarios directos e indirectos.

En esta fase no solo se busca entregar información, sino también promover espacios de diálogo entre la comunidad y actores locales vinculados con los desarrolladores del proyecto. Un sistema de climatización con geotermia es una excelente oportunidad para desarrollar un robusto plan de educación energética, ya que su impacto puede alcanzar a la comunidad directamente relacionada y también al público a nivel regional.

Por otra parte, si consideramos que las bombas de calor geotérmicas son una tecnología incipiente en Chile, es clave difundir el impacto de estos sistemas dentro de la localidad o municipio. Lo importante -y lo que ha sido nuestra propuesta-, es dar a conocer las ventajas y los cambios de los distintos sistemas, a través de instancias participativas, donde se integre la visión de los y las ciudadanas, para entender sus preocupaciones y necesidades.

Herramientas

Considerando la participación de los actores clave identificados en el diagnóstico social, las actividades comúnmente realizadas por CEGA en esta fase son:

1. **Talleres a nivel comunal y regional.** Espacios de diálogo entre equipo desarrollador y comunidad local.
2. **Mapeos energéticos comunitarios.** Esta instancia de co-creación permite identificar, junto a actores locales, sus principales necesidades energéticas.

Recomendaciones

Se propone utilizar herramientas participativas y actividades que promuevan el diálogo entre distintos actores. Esto permitirá enriquecer el proyecto, identificar nuevas necesidades locales y expandir la red de actores involucrados. Se aconseja implementar esta etapa durante toda la ejecución de la iniciativa.



Foto 3. Taller con niños y niñas en el Liceo Altos del Mackay, Coyhaique, Región de Aysén. CEGA.

4. Monitoreo y acompañamiento del sistema

Esta fase permite promover un cambio de prácticas culturales asociadas a la nueva tecnología. A través de los proyectos realizados por CEGA, hemos notado que se requiere un constante acompañamiento para disminuir resistencia al cambio y realizar adecuadamente la fase de marcha blanca de los sistemas.

En este caso, las acciones están orientadas a acompañar a las y los usuarios del sistema una vez que entran en funcionamiento las bombas de calor. Este proceso se desarrolla en tres niveles: a) funcionamiento de la bomba de calor, llevando registro de fallas y ajustes; b) sistema de distribución de calor, registrando la operación, ajustes y fallas de los fancoils y/o radiadores, y c) prácticas culturales alrededor del equipo de calefacción, enfocándose en la percepción e interacción de la comunidad usuaria del sistema. Esto es clave cuando se ha pasado de un sistema a leña a uno geotérmico, debido a que el cambio en la percepción del sistema y el calor en la sala es inevitable. En este sentido, se recomienda trabajar con dos grupos: el equipo operador, quien se hará cargo del registro y funcionamiento de sistema, y la comunidad beneficiaria, quien interactuará directamente con la nueva calefacción. Las estrategias para ambos actores son diferentes, pero se aplican de forma simultánea.

Es clave comprender que los sistemas de climatización implican prácticas culturales. Por ejemplo, en una escuela que cuenta con un sistema de calefacción a leña, con combustión lenta, los y las estudiantes están acostumbrados a una temperatura sobre los 22°C, ventilan la sala varias veces al día, abriendo las ventanas, y ocupan el calor de la estufa no sólo para calefacción sino también para secar su ropa mojada los días de lluvia. En ese sentido, la fase de acompañamiento es clave para promover el cambio de prácticas, como nuevas formas de ventilación dentro de la sala de clases o, incluso, adaptar su vestimenta a temperaturas que bordean los 20°C.

Uno de los ejes clave de este proceso es acompañar un aprendizaje que no es igual para todos y todas las usuarias del nuevo sistema, debido a que el confort térmico -estado donde la persona encuentra un balance de temperatura y puede realizar sus actividades cómodamente- es una percepción personal. Esto quiere decir que, dentro de una sala de clases, por ejemplo, lo más común es que algunas personas estén cómodas con 18 grados, mientras otras pasan frío. En ese contexto, es clave comunicar estos procesos, para poder generar adaptaciones individuales y grupales.

Por otra parte, se realizan esfuerzos especiales para que el equipo a cargo de la operación del sistema se empodere en sus labores y pueda sentirse cercano a la tecnología. Es importante darle relevancia al seguimiento y acompañamiento del equipo operador, pues cambia su rutina cotidiana, que ya no consistirá en prender el fuego todas las mañanas en cada una de las salas, sino que manejar un sistema centralizado, por ejemplo.

Herramientas

Para acompañar al equipo operador del sistema se propone:

1. Realizar variadas **capacitaciones** sobre el sistema.
2. **Acompañamiento directo** durante las primeras semanas de funcionamiento.
3. Implementación de **sistema de registro**, estilo bitácora, incluyendo ajustes y fallas (para complementar los ítems a incluir en el sistema de registro, se recomienda revisar los elementos detallados en el capítulo de esta Guía sobre aspectos técnicos acerca de los componentes de un sistema de calefacción geotérmica).
4. Promover canales de **comunicación** directa con la empresa instaladora.

Para acompañar a la comunidad que usa el sistema -en el caso de escuelas, a estudiantes y profesores- se proponen las siguientes actividades:

1. **Observación participante** de la rutina de las y los beneficiarios. Esto quiere decir, acompañar uno o varios días a la comunidad de forma directa en el lugar calefaccionado. De esa forma, se puede comprender en profundidad los cambios que se generan y las percepciones que en ellas y ellos provocan.
2. **Reuniones periódicas** para comunicar ajustes y fallas, dirigidas principalmente, a los equipos directivo y docente.
3. Generar un **canal de comunicación directo** entre usuarios, usuarias y operadores. Esto permite solucionar rápidamente una duda o consulta sobre el sistema.
4. Integrar a usuarios y usuarias en el **monitoreo** del sistema.

Resultados esperados

Incorporar las actividades antes descritas, permitirá diagnosticar y solucionar de manera oportuna las fallas y necesidades de ajustes al sistema, así como también generar estrategias adecuadas para nuevas demandas sociales.

Recomendaciones

Se aconseja que el acompañamiento y monitoreo se extienda por al menos un año, desde que comienza la operación del nuevo sistema.

5. Campaña de sensibilización social: cambio climático y crisis medioambiental

El plan de sensibilización busca dar a conocer el proyecto a nivel regional. En este sentido, se entrega información a beneficiarios externos y actores variados. El foco de esta fase es difundir el proyecto, situándolo en un contexto regional y global. Para este efecto, se sugiere comunicar cómo los proyectos de uso de geotermia somera, por una parte, benefician directamente la calidad y salud de vida de las personas y, por otra, se insertan en un contexto de crisis climática que requiere utilizar energías renovables, no solo para generar electricidad, sino también para satisfacer necesidades térmicas y promover ambientes limpios. Lo que diferencia esta fase de la de transferencia, es que los participantes no necesariamente son activos. La información se entrega a un público amplio, de forma general, sin el propósito de medir su impacto, más allá de la cifra de receptores.

Herramientas

Las herramientas que se utilizan en esta fase incluyen:

1. **Seminarios** de inauguración y cierre de los proyectos.
2. **Campañas de difusión** en medios de comunicación y redes sociales.

Resultados

Mediante estas actividades, se busca que gran parte de la comunidad -a nivel comunal, por ejemplo- conozca la iniciativa y su impacto a nivel local y nacional. Esto permite comprender el contexto socioambiental en el cual se desarrolla el proyecto y el papel que juegan energías renovables, como la geotermia, en la descontaminación de ciudades. En general, esta fase está a cargo de los equipos de comunicación o *outreach* de las instituciones desarrolladoras. En el caso del CEGA, la institución cuenta con un área de divulgación de la geotermia, reconocida a nivel nacional e internacional.

Recomendaciones

Esta fase se debe implementar durante toda la extensión del proyecto, considerando la utilización de medios de comunicación locales. En zonas aisladas, las radios comunitarias son importantes aliadas para comunicar los proyectos.



Foto 4. Localidad de Puyuhuapi, comuna de Puerto Cisnes, Región de Aysén. CEGA.

Geotermia, generando alianzas intersectoriales

Si bien en Chile no existe información sobre la percepción social de los sistemas con bombas de calor geotérmicas, sí existe consenso sobre su estado incipiente en el mercado nacional, por lo que es clave generar una campaña de comunicación efectiva sobre su funcionamiento y sus potencialidades entre la comunidad beneficiaria directa e indirecta.

En la misma línea, uno de los aprendizajes adquiridos por el área Geotermia y Sociedad de CEGA durante los últimos años, es el alto potencial de gestión de alianzas que presenta la tecnología de bombas de calor. Esto quiere decir que el carácter tecnológico del proceso de innovación permite que distintas instituciones, tanto públicas como privadas, se vean motivadas a vincularse y participar de un proyecto. Por ejemplo, el recambio del sistema de calefacción de una escuela que tradicionalmente usa leña puede ser de interés para el Ministerio de Medio Ambiente, pues es una iniciativa que contribuye a políticas públicas que apuntan a la descontaminación de ciudades. A su vez, un proyecto de este tipo fomenta el uso de una fuente de energía limpia, siendo este uno de los objetivos que promueve el Ministerio de Energía, a través de la Ruta Energética 2022-2026. Al mismo tiempo, el acceso a energía de calidad impacta directamente en la salud de las personas, siendo un eje clave para el Ministerio de Salud. De esta forma, los sistemas de calefacción limpios, como las bombas de calor geotérmicas, son una oportunidad para la articulación de esfuerzos intersectoriales.

Geotermia, mejorando la salud de las personas

Considerar el impacto positivo de sistemas limpios en la salud de las personas, nos ayuda a dimensionar el amplio alcance que un proyecto de climatización con geotermia puede tener, trascendiendo a los pilares energéticos y medioambientales que resultan evidentes.

Podemos observar la experiencia CEGA en el proyecto de climatización de la Escuela Luis Cruz Martínez, llevado a cabo entre 2019 y 2022, en Curacautín, Región de La Araucanía (proyecto financiado por el Ministerio de Energía). El sistema de climatización original, basado en leña, no solo no era capaz de entregar una calefacción de calidad- reflejado en el hecho de que un 50% de las y los alumnos decía sentir frío- sino que, además, la combustión de leña provocaba una significativa emisión de diversos gases contaminantes nocivos para la salud, entre los cuales destaca el material particulado 2,5 (PM_{2,5}). Gracias a la instalación de sensores de material particulado en una de las salas de la escuela, se detectó que la concentración de PM_{2,5} alcanzaba concentraciones diarias de 50ug/m³, con un peak de 180ug/m³ al momento de encendido de los calefactores, lo cual superaba el límite de 25 ug/m³, recomendado por la OMS.

Esto es especialmente preocupante, debido a los adversos efectos en la salud de este y otros gases emitidos al combustión de leña (OMS, 2005), como irritación de las vías respiratorias, disminución de la función pulmonar, agudización del asma y bronquitis crónica. Asimismo, en menores de edad puede provocar un bajo desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio.

A partir de los proyectos de climatización geotérmica desarrollados por el CEGA en las escuelas Altos de Mackay, de Coyhaique, y Luis Cruz Martínez, de Curacautín, y el consiguiente desuso de leña para calefacción, se pudieron evitar diversas enfermedades respiratorias entre sus usuarios, implicando un ahorro anual de \$2,8 millones de pesos y \$5,2 millones de pesos, respectivamente.

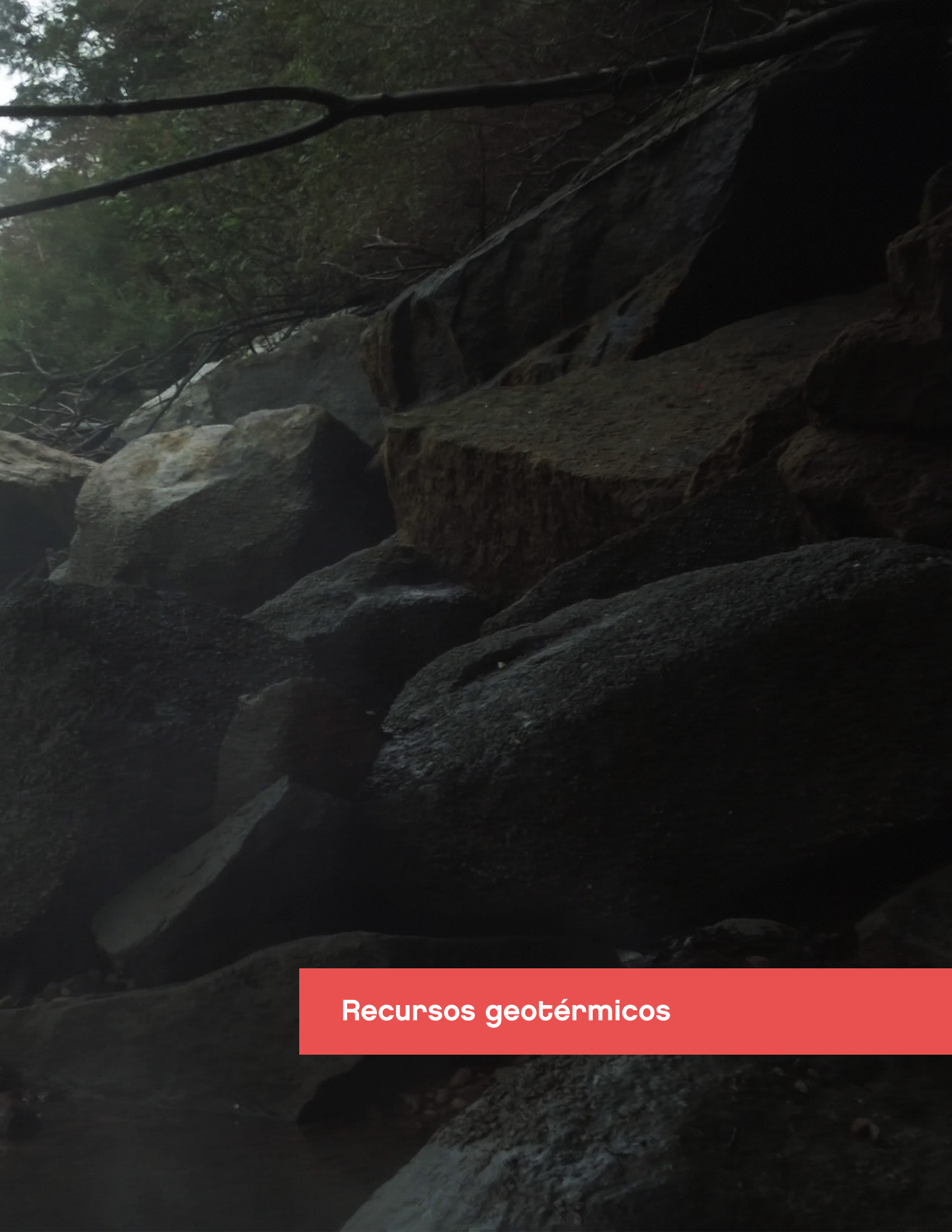
Proyectos familiares

Si bien esta sección profundiza en proyectos comunitarios, en proyectos individuales, como la climatización de una casa, se pueden aplicar algunos aprendizajes adquiridos por CEGA. En ese sentido, el cambio de prácticas sociales vinculadas a un nuevo sistema de calefacción que enfrenta una familia, por ejemplo, podrían ir en la misma línea que lo descrito en la sección anterior: miedo a la manipulación del sistema, dudas sobre su manejo. En este sentido, es clave acercarse a la tecnología, considerando los aspectos técnicos de su uso y también el aporte que genera en el contexto climático global, para motivar así los ajustes en las prácticas cotidianas que su uso eficiente requiere (ventilación de espacios, abrigo individual y grupal para alcanzar el confort térmico, etc). Además, se recomienda, tal como en los proyectos comunitarios, tener un sistema de registro que permita contar con la información sobre ajustes y fallas. Para estos casos, se recomienda también, tener una relación directa con la empresa desarrolladora, para poder contar con respuestas rápidas en la etapa de marcha blanca.

Bibliografía

1. À. Boso, T. Ariztía, and F. Fonseca. Usos, resistencias y aceptación de tecnologías energéticas emergentes en el hogar: El caso de la política de recambio de estufas en Temuco, Chile. *Rev. Int. Sociol.*, vol. 75, no. 4, 2017.
2. OMS. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre - Resumen de evaluación de riesgos. pp. 1–21, 2005.





Recursos geotérmicos

Recursos geotérmicos

Tabla de contenido

1. Recursos geotérmicos

1.1 ¿De dónde viene el calor?

1.2 El terreno bajo nuestros pies: Rocas, sedimentos, ríos y agua subterránea

1.3 Tipos de recursos y sistemas de intercambio de calor

2. Exploración

2.1 Reconocimiento geológico

2.2 Métodos para determinar la geometría del recurso

2.3 Medición de propiedades físicas de unidades geológicas y químicas del agua subterránea

2.4 Consideraciones para implementar un sistema geotérmico abierto conectado a un acuífero

3. Impacto ambiental

3.1 Consecuencias físicas

3.2 Impactos en calidad del agua

2.3 Medición de propiedades físicas de unidades geológicas y químicas del agua subterránea

2.4 Consideraciones para implementar un sistema geotérmico abierto conectado a un acuífero

4. Bibliografía

Recursos geotérmicos

Autores

- Karin García Sanders
- Gloria Arancibia Hernández
- Diego Aravena Noemi
- Pablo Valdenegro Cid
- Mauricio Muñoz Morales
- Diego Morata Céspedes

1. Recursos geotérmicos

La geotermia (del griego “geos” y “thermos”, “calor de la tierra”) es toda la energía contenida en el subsuelo. Esta energía tiene diversos orígenes y abarca desde el calor primordial, que asciende desde el núcleo y manto de la Tierra, hasta la energía solar que se almacena en el subsuelo cercano a la superficie. Los **recursos geotérmicos** son la fracción almacenada de esta energía que está disponible para su utilización en rocas, sedimentos, agua subterránea y cuerpos de agua superficial. El calor de la Tierra es una energía natural, renovable y siempre disponible.

En Chile, así como en el mundo, este recurso siempre está presente en alguna de sus formas. En los sitios en que se cuenta con recursos de alta temperatura (termas, fumarolas, volcanes, etc.), la geotermia puede aprovecharse para generar electricidad, para climatizar espacios y para procesos productivos que requieren calor. Si se cuenta con temperaturas menores a 25 °C; pueden utilizarse **Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)** que con su enorme versatilidad, permiten aprovechar la energía disponible en rocas, sedimentos, acuíferos someros y cuerpos

de agua superficiales (Foto 5), los que pueden estar ubicados en cualquier punto del territorio.

Este manual se enfoca en los recursos geotérmicos de baja temperatura, que pueden ser aprovechados con una BCG.

Los objetivos de este capítulo son:

1. Identificar las distintas formas en que están presentes los recursos geotérmicos de muy baja temperatura (< 25 °C) en los territorios.
2. Conocer las herramientas que se utilizan para encontrar y cuantificar los recursos geotérmicos de muy baja temperatura.
3. Reconocer los posibles impactos ambientales del aprovechamiento de la geotermia de muy baja temperatura.



Foto 5. Agua termal en Liquiñe, Región de Los Ríos. CEGA.

1.1 ¿De dónde viene el calor?

La Tierra se formó hace aproximadamente 4.540 millones de años, con la unión de enormes cantidades de gas y polvo en una gran masa de material fundido. Si bien el planeta se ha estado enfriando desde entonces, su interior sigue estando muy caliente ($>6.700^{\circ}\text{C}$). Este calor fluye hasta la superficie, generando lo que se conoce como **gradiente geotérmico**; un aumento continuo de temperatura de aproximadamente 3°C cada 100 m de profundidad. Además del gradiente geotérmico, la superficie terrestre recibe una enorme cantidad de energía solar. Las rocas y sedimentos que están en la superficie tienen una difusividad térmica moderada, que les permite almacenar la energía solar, comportándose en la práctica como una **batería de calor**, capaz de mantener una temperatura estable durante todo el año. Gracias a esta temperatura constante, las BCG son capaces de climatizar ambientes de manera extremadamente eficiente. Esa es la importancia del terreno bajo nuestros pies.

1.2 El terreno bajo nuestros pies: Rocas, sedimentos, ríos y agua subterránea.

Las rocas en las cumbres de las montañas se ven muy sólidas. Sin embargo, algunas llevan millones de años sometidas a la lluvia, el viento y los cambios de temperatura. Estos factores debilitan las rocas y, eventualmente, las rompen, formando fragmentos que se conocen como sedimentos, los que, en tamaño decreciente, se clasifican como grava, arena y arcilla, entre otros.

A medida que los sedimentos son transportados desde las montañas hasta los valles o cuencas, suele ocurrir una transición desde procesos "secos", donde el agente movilizador es principalmente la fuerza gravitacional, a procesos "húmedos", donde el agua actúa como el principal medio de transporte. Las mayores máquinas transportadoras de sedimentos, en la parte central de los valles, son los ríos, que cumplen su rol depositando capa tras capa de material. Cuando los sedimentos permiten el paso del agua subterránea, se forman acuíferos, donde se almacena y transmite este recurso hídrico (Figura 2).

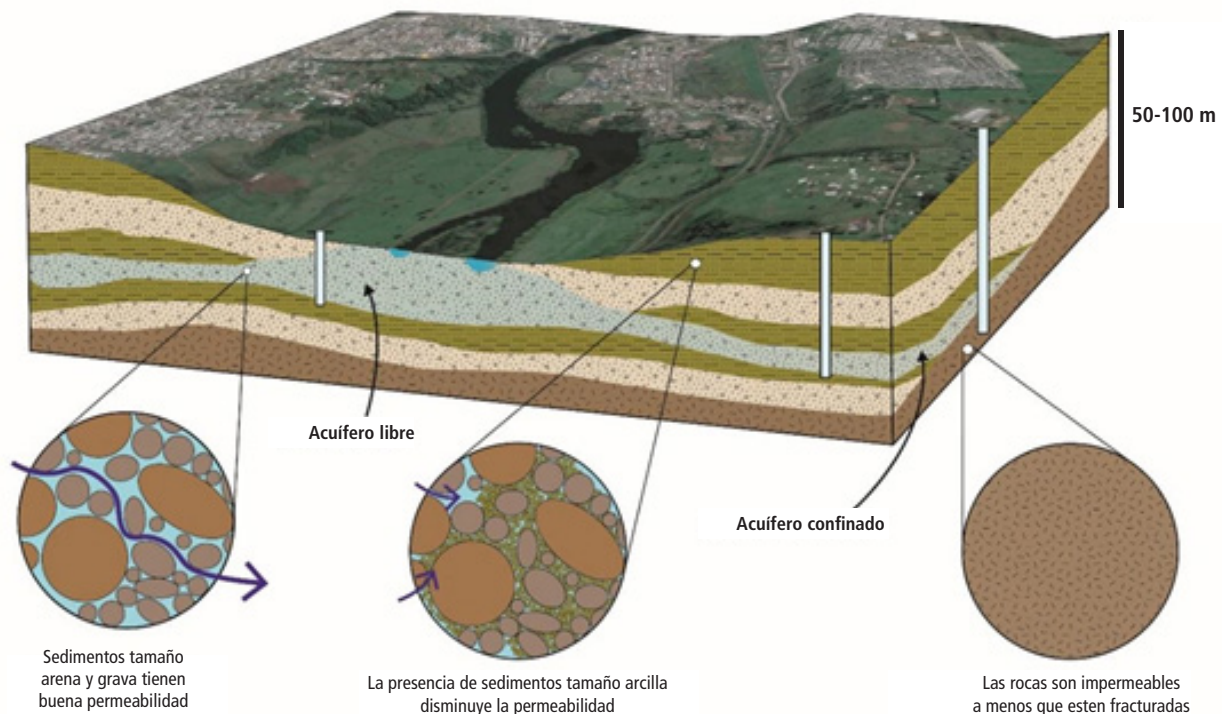


Figura 2. Esquema que muestra cómo se disponen los sedimentos y la facilidad con que el agua subterránea circula entre los sedimentos.

La capacidad de un acuífero de almacenar y transmitir agua dependerá principalmente de 3 propiedades físicas:

- **Porosidad:** Volumen de espacios en un medio poroso. Estos podrían ser, entre otros, los espacios entre las partículas de un depósito sedimentario o las fracturas en un medio rocoso.
- **Permeabilidad (K):** Se puede entender como la facilidad con que se mueve el agua u otro fluido a través del suelo y se relaciona con la conectividad de los poros. Los sedimentos constituidos por partículas de mayor tamaño suelen ser más permeables. En la medida que aumenta la proporción de sedimentos de grano fino, se reduce la permeabilidad (tabla 1).

Permeabilidad (m/día)	10 ⁴ 10 ³ 10 ² 10 ¹ 1 10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶			
Tipos de terreno	Grava limpia	Arena limpia; mezcla de grava y arena	Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas	Arcillas no meteorizadas
Calificación	Buenos acuíferos		Acuíferos pobres	Impermeables

Tabla 1. Clasificación de acuíferos de acuerdo con la permeabilidad Modificado de Custodio (Custodio, 1983).

- **Transmisividad (T):** Capacidad de un acuífero para ceder agua. Equivale a la permeabilidad de un acuífero (K) multiplicado por el espesor de este acuífero (E):

$$T [m^2] = K [m] \cdot E [m]$$

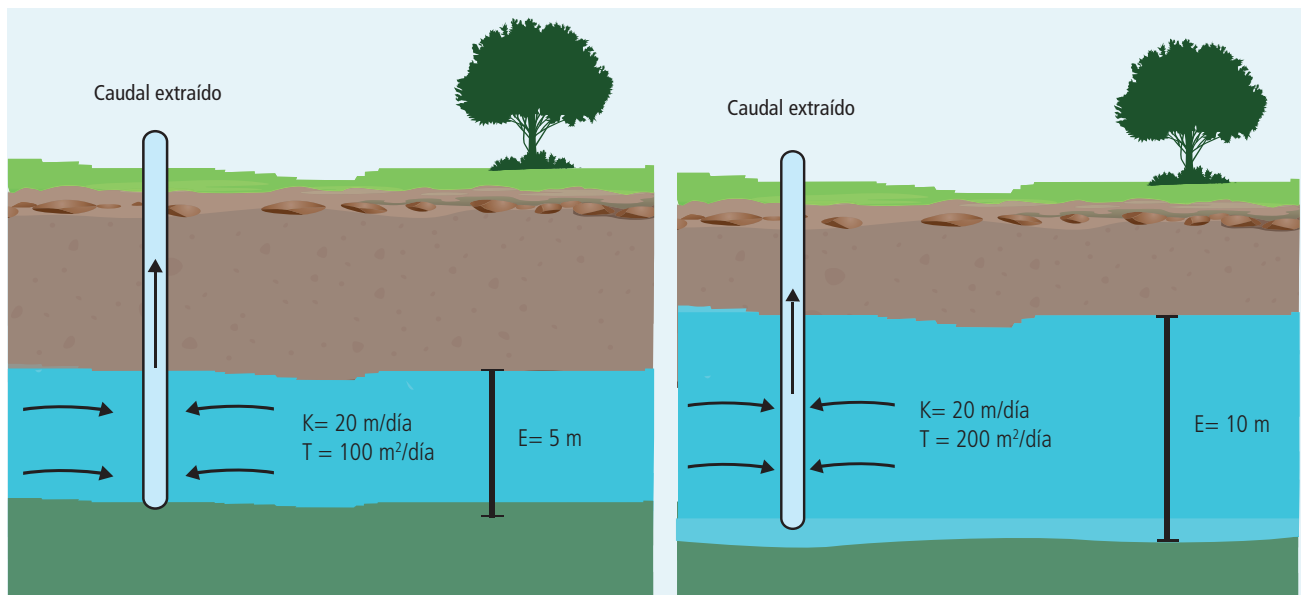


Figura 3. Esquema que ilustra la relación entre permeabilidad, transmisividad y espesor del acuífero.

En el centro sur de Chile la mayoría de los acuíferos, desde donde se extrae agua subterránea, están conformados por sedimentos. En base a las características descritas previamente y la forma en cómo se disponen las distintas capas de sedimentos, se pueden definir 3 tipos:

1. **Acuífero confinado.** Capa de sedimentos permeables, cubierta por una de sedimentos impermeables (**acuicludo**), que impide que el agua suba o baje.
2. **Acuífero libre.** No está limitado por capas impermeables, su techo corresponde a la superficie libre del agua, por lo que puede recibir recarga directa desde la superficie (por ejemplo, lluvia). De la misma forma, está expuesto a la contaminación por actividades superficiales (por ejemplo, productos agrícolas) y puede generar zonas pantanosas cuando el nivel de agua está muy cerca de la superficie.
3. **Acuífero semi-confinado.** Capa de sedimentos permeables que tienen encima una capa de sedimentos semi-impermeables (**acuitardo**) por donde pasa agua, muy lentamente.

La Figura 3 muestra la relación entre permeabilidad, transmisividad y espesor; la Figura 4 muestra la relación entre capas de sedimentos con distintas permeabilidades.

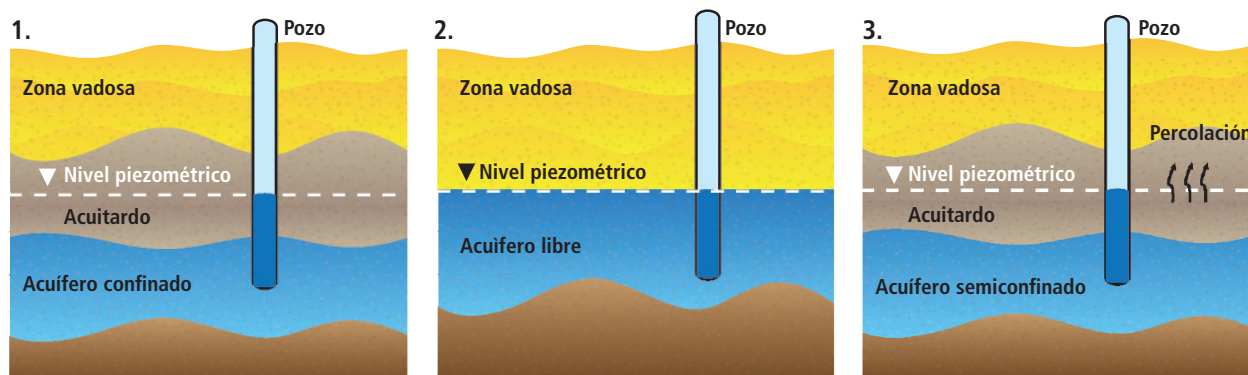


Figura 4. Esquema de distintos tipos de acuíferos: 1. Acuífero confinado, 2. Acuífero libre y 3. Acuífero semiconfinado.

1.3 Tipos de recursos y Sistemas de intercambio de calor.

Existen dos sistemas de intercambio de calor que debemos conocer:

1. **Sistema abierto:** La conexión al recurso geotérmico consiste en la extracción de agua desde un acuífero o cuerpo de agua superficial, que posteriormente será reinyectada para no afectar la disponibilidad del recurso hídrico. El agua extraída sirve como excelente fuente o suministro de calor pues, generalmente, mantiene una temperatura constante a lo largo del año. El sistema abierto suele ser más eficiente, pero requiere que el volumen de agua no disminuya a lo largo del tiempo. Cuando se intercambia calor con acuíferos, el arreglo de pozos se conoce como colector geotérmico vertical abierto.

2. **Sistema cerrado:** Consiste en circular agua (usualmente con anticongelante) en un circuito cerrado de tuberías enterradas en el subsuelo o sumergidas en un cuerpo de agua.

El sistema cerrado puede ser un **colector geotérmico horizontal**, que consiste en un arreglo de tuberías enterradas de forma horizontal a 1-2 de metros de profundidad. El sistema cerrado también puede ser un **colector geotérmico vertical**, que consiste en tuberías en forma de U insertadas en pozos profundos (>30 m). Si el recurso geotérmico es un cuerpo de agua superficial, la configuración el colector geotérmico se conoce como **pond loop**, un arreglo de tuberías sumergidas en el cuerpo de agua.

La Tabla 2 muestra los sistemas de intercambio de calor, de acuerdo con el tipo de recurso geotérmico.

Tipo de Recurso Geotérmico	Sistemas de intercambiador de calor				
	Sistema Cerrado			Sistema Abierto	
	Horizontal	Vertical	Pond loop	Vertical	Cuerpo de agua
Cuerpo de agua [Lago/laguna o mar]			✓		✓
Sedimentos secos	✓	✓			
Sedimentos saturados en agua [Sedimentos o agua subterránea]	✓	✓		✓	
Rocas [Ígneas, metamórficas o sedimentarias]	✓			✓	

Tabla 2. Sistemas de intercambio de calor según el tipo de recurso geotérmico.

En el capítulo correspondiente a la dimensión técnica se verán en detalle los métodos para extraer o disipar calor del recurso geotérmico, como también herramientas para calcular el caudal de extracción necesario para un sistema abierto y, en el caso de un sistema cerrado, los metros de instalación subterránea requeridos para satisfacer la demanda energética.

A continuación, se describen los cuatro tipos distintos de recurso geotérmico:

Cuerpo de agua superficial

Para efectos de esta guía, entenderemos que un cuerpo de agua superficial puede ser un lago/laguna, el mar o un río. En los casos de laguna y río, es importante que el volumen de agua sea suficiente para que el intercambio de calor no afecte significativamente la temperatura. Al mismo tiempo, es importante que la variación de temperatura y volumen de agua no tenga cambios significativos con las épocas del año. Por ejemplo, no es recomendable utilizar ríos que se secan o lagunas de volumen pequeño.

Para cuantificar este recurso, es necesario conocer su temperatura y composición química. Con esto, también se puede determinar la configuración más apropiada (sistema abierto o cerrado). La principal ventaja de este recurso es que es conocido y, por lo tanto, no requiere de métodos exploratorios para inferir su existencia, dimensiones y propiedades térmicas.

Cuando el recurso geotérmico es un cuerpo de agua superficial, existen dos tipos de colector geotérmico que pueden utilizarse 1) **abierto** o 2) **pond loop**. Un cuerpo de agua puede ser muy atractivo como recurso geotérmico, dada la simpleza y bajo costo de intervención. Sin embargo, es un recurso que no está presente en todos los ambientes.

Rocas

A partir de su génesis, las rocas se clasifican en ígneas, metamórficas o sedimentarias. Para evaluar el recurso geotérmico disponible en las rocas es necesario conocer las propiedades térmicas de estas, especialmente su **conductividad térmica** (capacidad de conducción de calor; ver Tabla 3). Esta propiedad depende de los minerales que constituyen la roca, además de su textura y el contenido de agua. Las rocas también pueden constituir acuíferos, sin embargo, en Chile la explotación de acuíferos en rocas es leve. Debido a esto, se recomienda el uso de **colectores geotérmicos verticales cerrados**.

Depósitos de sedimentos secos

Como se explicó anteriormente, los depósitos sedimentarios se forman, normalmente, por el efecto de la degradación de las rocas y posterior transporte por gravedad, viento y agua como principales agentes transportadores.

Cuando los depósitos sedimentarios no están saturados de

agua, el recurso geotérmico debe ser implementado mediante colectores cerrados, ya sean horizontales o verticales. Para cuantificar la energía aprovechable mediante un sistema cerrado, se deben conocer las **propiedades térmicas** de los sedimentos. En particular, la **conductividad térmica** describe la **capacidad de los sedimentos de transmitir calor** por conducción. Por su parte, la **difusividad térmica** describe la **velocidad a la que ocurre esta transferencia de calor**.

Como se observa en la Tabla 3, en general, los sedimentos secos tienen baja conductividad térmica respecto de otras unidades geológicas, como son los sedimentos saturados en agua o rocas. Esto se debe a la menor cohesión entre los sedimentos y la presencia de aire (aislante térmico) entre los mismos. Debido a su menor costo, y si la disponibilidad de espacio lo permite, se recomienda usar **colectores geotérmicos horizontales cerrados**, ya sea para viviendas unifamiliares o pequeños edificios. Ante la ausencia de espacio, solo queda la alternativa de **colectores geotérmicos verticales cerrados**, más costosos, debido a la perforación de pozos.

Depósitos de sedimentos saturados en agua (acuíferos)

Cuando los depósitos sedimentarios contienen agua, usualmente se denominan saturados o parcialmente saturados de agua. Es importante destacar que el contenido de agua depende de la cantidad de poros disponibles y no, necesariamente, tiene directa relación con la permeabilidad. Como se mencionó anteriormente, al aumentar el contenido de sedimentos finos, como por ejemplo el contenido de arcillas, baja la permeabilidad.

La presencia de agua en los depósitos sedimentarios mejora la conductividad térmica. Por lo tanto, los depósitos sedimentarios saturados en agua tienen una mayor conductividad térmica con respecto a los depósitos secos (Tabla 3). Por esta razón, el aprovechamiento de la geotermia mediante un sistema cerrado es más eficiente en sedimentos saturados.

Cuando los depósitos sedimentarios tienen suficiente permeabilidad para conformar un acuífero, podemos aprovechar este recurso mediante un **colector geotérmico vertical abierto**; compuesto por extracción y reinyección de agua subterránea. Este colector geotérmico se recomienda en depósitos sedimentarios constituidos principalmente por arenas y gravas, ubicados junto a los cursos de ríos (sedimentos fluviales) y en abanicos aluvionales (sedimentos aluviales). Debido a las variaciones locales en el tamaño de grano de los sedimentos, incluso en los depósitos sedimentarios favorables para colectores geotérmicos verticales abiertos, se recomienda una exploración del recurso a escala de sitio.

Fuente de energía		Conductividad térmica [W/mK]	Difusividad térmica [m ² /día]
Cuerpo de agua superficial (10°C)		0,6	0,01
Sedimentos secos	Gravas	0,4	0,02
	Arenas	0,4	0,02
	Arcillas/Limos	0,5	0,03
Sedimentos saturados	Gravas	1,8	0,06
	Arenas	2,4	0,08
	Arcillas/Limos	1,8	0,06
Rocas	Sedimentarias	2,4	0,09
	Metamórficas	2,3	0,02
	Ígneas félsicas	3,1	0,11
	Ígneas máficas	1,8	0,06

Tabla 3. Tabla de propiedades térmicas más importantes en la evaluación del recurso geotérmico.

*Rocas sedimentarias: promedio entre areniscas y argilitas y limonitas. Rocas metamórficas: promedio entre gneis, micasquistos y esquistos arcillosos. Rocas ígneas félsicas: promedio entre diorita, granito y riolita. Rocas ígneas máficas: promedio entre gabro y basalto.

**Modificado de (Pahud, 2002).



Foto 6. Trabajo en terreno CEGA en la Región de Aysén. CEGA.

2. Exploración

A continuación describiremos el procedimiento, las herramientas y recomendaciones útiles en el proceso de identificar el recurso geotérmico descrito en la sección anterior. El recurso está constituido por la geometría de las unidades geológicas en profundidad, sus propiedades físicas, la disponibilidad de agua subterránea y la composición química de esta. La exploración del recurso puede dividirse en tres etapas (Figura 6), de acuerdo con el grado de certeza con que se identifican cada una de las variables que constituyen el recurso geotérmico. Esta secuencia de etapas permite enfocar apropiadamente los esfuerzos hasta llegar a la medición de la geometría y propiedades físicas y químicas del recurso geotérmico.

El proceso de exploración depende del tipo de colector que se proyecta en la solución energética. La Tabla 4 muestra las actividades de exploración, de acuerdo al tipo de recurso y colector geotérmico y, a partir de ella, se puede inferir que lo más sencillo es la utilización de colector geotérmico horizontal cerrado en sedimentos, o *pond loop*, en un cuerpo de agua. De la misma forma, se observa que los colectores verticales requieren más actividades de exploración, siendo el colector geotérmico vertical abierto la alternativa que más exploración requiere.

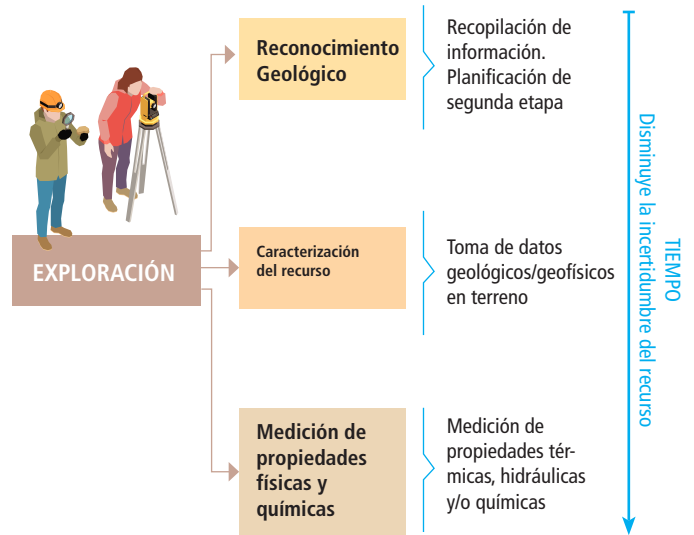


Figura 6. Etapas en la exploración del recurso geotérmico. Tres etapas ordenadas.

Cuerpo de agua superficial	Vertical abierto	Vertical cerrado	Horizontal cerrado
2.3.1. Propiedades térmicas del agua (solo temperatura)	2.1. Reconocimiento geológico	2.1. Reconocimiento geológico	2.3.1. Propiedades térmicas
2.3.3. Geoquímica de aguas	2.2. Geometría del recurso	2.2. Geometría del recurso	
	2.3.2. Propiedades hidráulicas	2.3.1. Propiedades térmicas	
	2.3.3. Geoquímica de aguas		

Tabla 4. Pasos en la exploración del recurso geotérmico dependiendo de la configuración deseada.

2.1 Reconocimiento geológico

Como veremos a continuación, el reconocimiento geológico comienza con una recopilación de información disponible y termina con la información de interés clasificada y ordenada. Es altamente recomendable, en esta etapa, realizar una visita de reconocimiento con el objetivo de confirmar y acotar características relevantes para el proyecto.

2.1.1 Experiencia en el área de interés

Siendo el espíritu de esta guía facilitar el trabajo para implementar proyectos geotérmicos de baja temperatura, resulta útil recomendar, en esta etapa de reconocimiento geológico, la incorporación de asesoría y posterior colaboración de empresas o personas naturales con conocimientos en construcción de po-

zos o excavaciones, para, de este modo, recolectar información disponible y acotar en detalle las técnicas de exploración. Se recomienda levantar información acerca de las unidades geológicas hasta 200 m de profundidad, respecto a sus propiedades térmicas e hidráulicas, así como de la disponibilidad de agua subterránea y su composición química. La información recopilada, a partir de este proceso preliminar, debe tratarse con precaución y debe ser verificada en la exploración detallada.

2.1.2 Información de interés

Se recomienda buscar mapas geológicos y topográficos, información de exploraciones geofísicas, fotografías aéreas, imágenes satelitales o mapas hidrogeológicos entre otras fuentes de información.

La Tabla 5 resume fuentes de información de interés para la etapa de reconocimiento geológico y las instituciones donde esta información podría estar disponible. Además, podría haber información relevante en servicios públicos relacionados a

Energía, Medio Ambiente y Recursos Geológicos. También existe información de interés en artículos científicos o informes de organizaciones internacionales dedicadas a Recursos Hídricos, Energía y/o cuidado del Medio Ambiente.

Institución	Datos e información
Universidades: Departamentos de geociencias	Mapas geológicos, investigación local en el área de interés.
Centros de investigación	Investigación específica en el área de interés.
Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (Sernageomin)	Mapas geológicos e hidrogeológicos y exploración geofísica en el área de interés.
Dirección General de Aguas (DGA)	Bases de datos de pozos, además de informes y modelos de circulación de agua subterránea y superficial.
Instituto Geográfico Militar (IGM), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM), entre otros.	Mapas topográficos o un modelo de elevación digital.
Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)	Antecedentes hidrogeológicos. Catastro de pozos.
Escenarios Hídricos 2030 Chile	Elaboración de escenarios posibles y hojas de ruta con medidas, acciones y soluciones concretas para dar inicio a una Transición Hídrica que permita la sustentabilidad del recurso hídrico en Chile.
Servicios públicos regionales y municipios	Bases de datos de pozos y estudios de suelo en base a excavaciones para obras civiles.
Artículos científicos u organizaciones internacionales	Investigación específica en el área de interés.

Tabla 5. Diferentes instituciones útiles para recolectar información de interés.

2.1.3 Trabajo con fuentes de información de la Dirección General de Aguas (DGA)

Una de las fuentes de información más relevantes del subsuelo, son las bases de datos de la Dirección General de Aguas (DGA). Además de contar con la descripción de las unidades geológicas en profundidad, es posible, mediante las pruebas de bombeo, calcular las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas. En su sitio web (www.dga.cl), se muestra información completa sobre los derechos de agua concedidos por la DGA en cada región del país. Dentro de los archivos descargables se encuentran el diseño del pozo, estratigrafía, prueba de bombeo y caudal asignado. En algunos casos incluso se presentan los cálculos de la transmisividad del acuífero.

Si bien el Gobierno de Chile está trabajando para regularizar la extracción de agua con fines de climatización, a la fecha de edición de esta guía la DGA es el organismo encargado de regular su uso. En el sitio web señalado anteriormente, se debe chequear que:

1. No existan restricciones para la extracción de agua subterránea en la cuenca donde se ubica el recurso. Esto,

considerando que, por ejemplo, no está permitido extraer agua subterránea en zonas protegidas o donde el recurso se haya declarado agotado.

2. No exista un usuario a menos de 200 m que ya tenga inscrito el uso de aguas subterráneas.

2.1.4 Evidencia de la existencia de agua subterránea

Los valles son más favorables que las colinas para la presencia de aguas subterráneas poco profundas. Hay plantas y árboles que pueden ser buenos indicadores de su existencia como los álamos o sauces. Las áreas donde el agua está en la superficie (lagunas, humedales o lagos) sugieren la presencia de agua subterránea, aunque no necesariamente en grandes cantidades o de calidad utilizable. Es de especial cuidado el contexto en áreas donde existen sedimentos impermeables (como arcillas), porque los cuerpos de agua superficial no reflejan necesariamente una conexión con acuíferos saturados en el subsuelo. Esto es algo que podría ser frecuente en la zona sur y austral de Chile.

2.1.5 Visita de reconocimiento geológico

Se deben visitar diferentes puntos en el área de interés y sus alrededores, para obtener una visión representativa de la composición y geometría de las unidades geológicas en profundidad. Si el agua subterránea es importante para el proyecto, se deben visitar las zonas de recarga y descarga de agua subterránea, además de sitios que permitan inferir la relación entre acuíferos y cuerpos de agua superficial, tales como los ríos. En este contexto, se recomienda hacer una visita cuando ocurran situaciones anómalas con los recursos hídricos. Por ejemplo, durante el apogeo de la estación seca o en momentos de anegación en superficie por la no infiltración de agua de lluvia. Se recomienda recopilar mapas y antecedentes geológicos previamente, para obtener mejores resultados, cumpliendo con el objetivo de cubrir mucho terreno y obtener rápidamente un reconocimiento geológico.

2.1.6 Información de interés organizada en mapas

Al fin de la etapa de reconocimiento geológico, es importante clasificar y ordenar la información en mapas señalando en ellos la ubicación del proyecto, la información geológica disponible, la información de pozos disponible, los indicios de presencia de agua subterránea y los hallazgos relevantes de la primera visita a terreno. Esto permite reconocer las unidades geológicas en el área de interés y su extensión espacial, la presencia de fallas y fracturas, además de la disponibilidad y profundidad a partir de la cual se puede encontrar agua subterránea. En caso de llevarse a cabo el proyecto de geotermia, este mapa permite determinar la distancia y relación espacial entre el proyecto con geotermia y otras instalaciones subterráneas. Lo anterior, es imprescindible para anticipar posibles interferencias con instalaciones subterráneas cercanas.

2.2. Métodos para determinar la geometría del recurso.

Los métodos de exploración que se presentan a continuación miden la respuesta eléctrica de las unidades geológicas en profundidad. En este contexto, es importante tener en cuenta que el agua subterránea es un conductor eléctrico -debido a los iones disueltos- a diferencia de la mayoría de las rocas o sedimentos, que son aislantes eléctricos (salvo minerales como el cobre, el grafito o las arcillas). Esto quiere decir que la conducción eléctrica predominante en el subsuelo es electrolítica. Por lo tanto, los métodos de exploración que midan la resistividad eléctrica (inverso de conductividad eléctrica) pueden inferir la presencia de agua subterránea. Los métodos más utilizados en la exploración de aguas subterráneas poco profundas son los de corriente continua (SEV y ERT) y de transiente electromagnético (TEM).

2.2.1 Método de corriente continua (SEV o ERT)

Este método geofísico consiste en la instalación de cuatro electrodos dispuestos en una línea. La Figura 7 muestra el arreglo de Wenner, en el cual se inyecta corriente (I) a través de un par

de electrodos y, con otro par, se mide el voltaje (V) resultante. La profundidad alcanzada por este método está relacionada con la separación entre los electrodos de inyección de corriente, mientras más separados estén, mayor será la profundidad penetrada. Esta relación es, aproximadamente, $0.2L$ (para algunos tipos de arreglos como Wenner o dipolo-dipolo), siendo L la distancia entre los electrodos de inyección de corriente. Un ejemplo representativo para la distancia entre electrodos es de 200 m. En este ejemplo, la profundidad máxima penetrada será de unos 40 m que es compatible con la profundidad de las instalaciones de geotermia somera.

Dentro de los métodos de corriente continua, existen el método de sondeo eléctrico vertical (SEV), que obtiene una imagen unidimensional de resistividades en profundidad, y el método de tomografía de resistividad eléctrica (conocido por sus siglas en inglés ERT), que obtiene una imagen bidimensional de re-

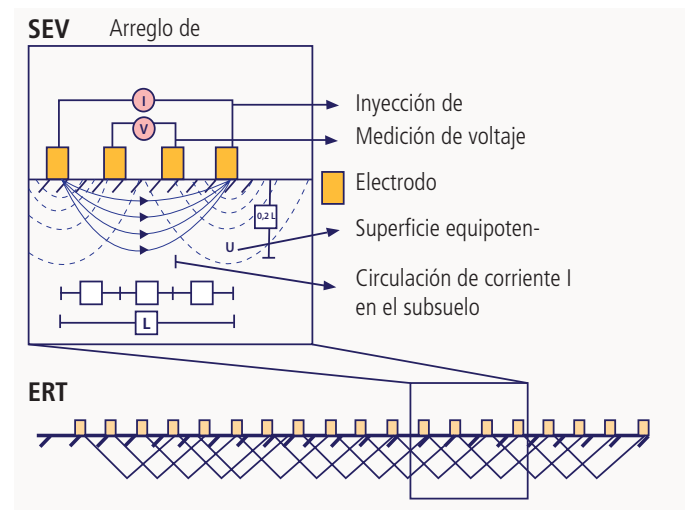


Figura 7. Arreglo tipo Wenner para SEV y ERT

2.2.2 Método de transiente electromagnético (TEM)

En este método se aplica un pulso de corriente (Figura 8) a una espira o bobina transmisora ubicada sobre el suelo, generando un campo electromagnético (campo primario). Al interrumpir el pulso de corriente, la disminución del campo magnético primario induce una fuerza electromotriz que, a su vez, genera corrientes eléctricas que se propagan a través del subsuelo e induce un campo electromagnético (campo secundario). Este transiente magnético produce una disminución de voltaje variable (en el tiempo), medido en una espira o bobina receptora que contiene información sobre la resistividad del subsuelo. Normalmente, la disposición de estos equipos en terreno es en áreas cuadradas de decenas de metros por cada lado (ver figura 8). Si la profundidad de penetración esperada es inferior a 150 m, comúnmente se utiliza un área de $40 \times 40 \text{ m}^2$ para la bobina transmisora y de $1 \times 1 \text{ m}^2$ para la bobina receptora.

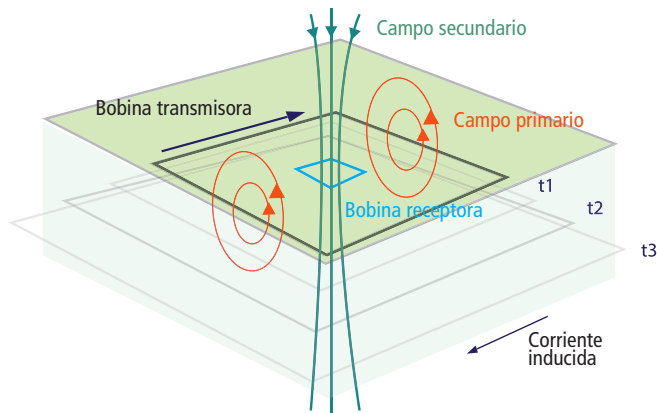


Figura 8. Disposición en terreno de TEM. Basado en Hersir (1991).

2.2.3 Análisis de resultados

Con estos métodos, e integrando toda la información detallada anteriormente, se puede inferir la zona de contacto de distintas unidades geológicas cuando estas tienen variaciones composicionales y/o variaciones en el contenido de agua. Si las unidades geológicas en profundidad no contienen agua, es menos probable encontrar los contrastes y poder discriminar entre las unidades. Se puede inferir la presencia de agua subterránea, la profundidad en la que se encuentra y, si el método alcanza mayor profundidad que la base del acuífero, se podrá determinar su espesor (parámetros requeridos para la evaluación de la factibilidad de uso sustentable del recurso, Tabla 7). En ciertos casos se puede determinar la presencia de arcillas en el medio, lo que indica una reducción en la permeabilidad.

2.3 Medición de propiedades físicas de unidades geológicas y químicas del agua subterránea

2.3.1 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas son de especial importancia en el caso de los colectores geotérmicos cerrados. Las principales propiedades que se miden en rocas o sedimentos son: densidad, conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico. En paralelo al proceso de medición o cálculo de propiedades térmicas en el sitio de interés, es importante describir las condiciones de saturación de agua del terreno y determinar las direcciones de flujo de agua subterránea, cuando existe.

Medición con sonda térmica

Para excavaciones de poca profundidad (hasta 2 metros), utilizadas mayoritariamente en las instalaciones de colectores cerrados horizontales, las propiedades térmicas se pueden medir directamente en terreno, insertando una sonda térmica diferentes profundidades. Es importante tener mediciones en las distintas capas del suelo y sobre aquellas dónde se emplazará el colector geotérmico. En la Foto 7 se aprecia el procedimiento

con una sonda KD2Pro de *Decacon Device*. Este instrumento sube la temperatura de los sedimentos para, posteriormente, medir cómo se enfrían. A partir de estas mediciones el equipo determina las propiedades térmicas de los sedimentos. En el caso de las rocas, se recomienda sacar muestras, cortarlas y analizarlas en el laboratorio, antes de hacer las mediciones.



Foto 7. Exploración propiedades térmicas del suelo. Sonda KD2Pro de Decacon Device. CEGA.

Considerando que estas mediciones son puntuales y representativas de una porción reducida de sedimentos o rocas, se recomienda hacer numerosas mediciones y luego construir una estadística. Con lo anterior, se determinan valores promedio y desviación estándar de cada una de las propiedades térmicas.

Test de Respuesta Térmica (TRT)

El TRT se lleva a cabo una vez que el colector geotérmico cerrado se ha construido inyectando agua caliente en sus tuberías. Al mismo tiempo se registran las temperaturas de entrada y salida del agua inyectada (ver Figura 9).

Las variaciones de temperatura del agua son ajustadas con un modelo matemático para estimar las propiedades termales (Carslaw 1945; Ingersoll et al. 1954).

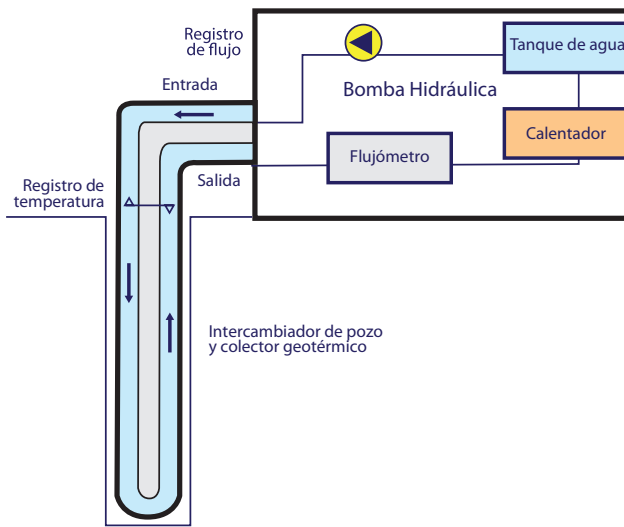


Figura 9. Procedimiento test de respuesta térmica TRT.

El test de respuesta térmica es una práctica habitual y recomendada en el caso de colectores verticales cerrados. Sin embargo, también se aplica a colectores horizontales abiertos. En el caso del test de respuesta térmica, las mediciones son totalmente representativas del comportamiento de los colectores geotérmicos y del medio en el que se encuentran emplazados.

2.3.2 Propiedades hidráulicas

Los sedimentos permeables son capaces de formar acuíferos, los que pueden tener distintas capacidades de transmitir y retener el agua. Estas son conocidas como **propiedades hidráulicas** y corresponden a la permeabilidad (o conductividad hidráulica) y transmisividad hidráulica (explicadas en la primera parte de este capítulo). Las propiedades hidráulicas de los acuíferos son importantes para proyectar el transporte de calor por efecto del agua subterránea. El caudal que puede requerir un sistema geotérmico abierto depende de la demanda del sistema de calefacción y/o refrigeración. Sin embargo, existe un límite en el volumen de agua que se puede extraer y reinyectar en un acuífero, el que está determinado por las propiedades hidráulicas del mismo. Para determinar dichas propiedades hidráulicas, el método más estandarizado se denomina **prueba de pozo o prueba de bombeo** (Foto 8).

Esta prueba consiste en medir el nivel del agua dentro del pozo y luego bombear agua del mismo, midiendo el descenso del nivel del agua, a medida que pasa el tiempo. El instrumento utilizado para medir el nivel del agua dentro del pozo suele llamarse "sonda", "freatímetro" o "pozómetro", y consiste en una cinta con un sensor en su extremo que suena al entrar en contacto con el agua dentro del pozo. También existen equipos que se ubican en la base del pozo y miden los descensos en el nivel de agua en el interior del pozo por cambios en la presión de la columna de agua.

Normalmente, la correcta aplicación de una prueba de bombeo implica hacer un pozo más pequeño (*pozo de observación*) y, a partir de este, observar la respuesta al estímulo hidráulico del pozo principal de interés. Ejemplos para el cálculo correcto de la prueba de bombeo se pueden encontrar en el libro de Fundamentos de la Hidrogeología Martínez et al. (2006). De esta manera se pueden obtener parámetros como la transmisividad (requeridos para la evaluación de la factibilidad de uso sustentable del recurso, Tabla 7). Debido a los costos de perforación, en Chile los pozos de observación no son frecuentes. En este contexto, normalmente se trabaja con niveles medidos en el mismo pozo del que se bombea agua.

La prueba de bombeo es un servicio que debe ser incluido por la empresa de perforación para inscribir debidamente el pozo en la DGA. La forma en que varía el nivel del agua dentro del pozo durante la prueba de bombeo permite determinar qué tan productivo será el mismo.



Foto 8. Prueba de bombeo en Liceo Altos del Mackay, Coyhaique. CEGA.

Una forma aproximada para obtener la transmisividad a partir de la prueba de bombeo con un solo pozo es la siguiente:

$$T = \text{caudalespecifico} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{día}} \right] * 1.2, \quad \text{Caudalespecifico} = \frac{\text{caudal} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right]}{\text{descenso} [\text{m}]}$$

Donde el descenso es la diferencia entre la profundidad del agua subterránea del sistema que está en reposo (nivel estático) y la profundidad que alcanza el agua en equilibrio dinámico, para un determinado caudal de extracción.

La información obtenida permitirá determinar el caudal máximo de trabajo para el pozo construido (o un futuro pozo en el lugar). Este caudal máximo permite calcular la energía térmica disponible (Q) de la siguiente forma:

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

Donde m es la masa de la sustancia (en el caso del agua 1 L = 1 kg), Cp es el calor específico del agua (4,2 J/kg·°C), y ΔT corresponde a la diferencia de temperatura que se requiere para el funcionamiento de la bomba de calor. Entre el circuito de agua subterránea y la bomba de calor, se recomienda utilizar un intercambiador de calor para evitar corrosión, precipitación de minerales y/o acumulación de sedimentos en la bomba de calor.

2.3.3 Geoquímica de aguas

Cuando bombeamos agua subterránea desde un pozo a la superficie pueden ocurrir una serie de procesos químicos, causados por cambios en la temperatura, acidez y concentración de gases disueltos en el agua (CO₂ principalmente). Estos procesos pueden afectar negativamente el funcionamiento de los equipos, a causa de la precipitación de minerales o generando la corrosión (Foto 9).



Foto 9. CEGA.

A. Cámara donde se acumula agua utilizada para climatizar una escuela en Llifén, Región de Los Ríos. Toda la base de la cámara está cubierta de precipitados de óxido de hierro que forman un sedimento.

B. Incrustaciones de hierro (Fe) en el interior de una tubería de un pozo de extracción y en la bomba sumergible (C.) en un pozo somero (Burté 2019).

En este contexto, es importante conocer la composición química del agua que se quiere utilizar en un sistema geotérmico. Con esto, podemos definir medidas de mitigación para reducir los posibles efectos de corrosión o precipitación de minerales. De la misma forma, se pueden agendar mantenencias preventivas y procedimientos específicos que garanticen el cumplimiento de la vida útil de los equipos. Para esto, proponemos usar los siguientes 4 criterios para prever efectos negativos en las instalaciones geotérmicas:

1) Algunas características fisicoquímicas del agua subterránea (conductividad eléctrica, salinidad y pH) se pueden medir, de manera relativamente sencilla, usando sondas que se encuentran disponibles en tiendas especializadas. A continuación, se indican valores que permiten identificar si el agua es apta para su aprovechamiento con BCG:

Parámetro	Unidad	Rango apto para BCG
Temperatura	°C	5 < T < 20
Conductividad eléctrica	mS/cm	< 3000
Salinidad	g/l de [NaCl]	< 1.5
pH		> 6
Oxígeno disuelto	mg/L	< 4

Tabla 6. Valores a considerar para identificar si el agua es apta para su aprovechamiento con BCG.

2) Una de las causas más comunes de obstrucción en sistemas de extracción de aguas subterráneas es la mineralización de Hierro [Fe] y Manganeseo [Mn]. Estas obstrucciones se forman cuando el agua subterránea que se encuentra en un ambiente con poco oxígeno (subsuelo) interactúa con un ambiente rico en oxígeno (ambiente abierto). Por esta razón, siempre se busca que el descenso del agua dentro de un pozo no baje del techo de un acuífero. Lamentablemente es muy complejo predecir si ocurrirá o no este fenómeno, pues no depende solamente de las concentraciones de Fe y Mn, sino que también de variables como el oxígeno o la presencia de bacterias, las que pueden acelerar el proceso de mineralización.

En primera instancia, sugerimos identificar pozos aledaños y observar si ocurre precipitación de minerales. Si no hay pozos, sugerimos hacer el pequeño experimento de almacenar un volumen de agua durante un tiempo (días a semanas) y observar si ocurre precipitación de un "barro" rojizo. De ser así, se deben tomar consideraciones especiales en el diseño del sistema para facilitar la limpieza y reemplazo de los equipos que podrían verse afectados. Este diseño debe ser asesorado por un especialista en hidroquímica.

3) Cuando bombeamos agua subterránea desde un pozo, es común que ocurra un cambio en la concentración de CO₂ disuelto en el agua. Como consecuencia, se desencadena precipitación de Carbonato de Calcio, también conocido como

calcita (CaCO₃). La concentración de CaCO₃ es lo que comúnmente se conoce como **dureza** del agua subterránea, y existen análisis rápidos que permiten estimarla (estos análisis se pueden adquirir en tiendas especializadas).

Una vez que se conoce la dureza del agua, recomendamos usar la herramienta propuesta en la sección 4, para determinar la favorabilidad de implementar geotermia con un sistema abierto.

4) Por último, la información más confiable se obtiene a partir de análisis químicos del agua de interés, en un laboratorio especializado (e.g. www.cega-uchile.cl/laboratorios).

Si ya se cuenta con los análisis de la composición química del agua subterránea, recomendamos utilizar el **índice de Langelier (I_L)** (Benefield L, 1982). Este número considera las concentraciones de Calcio (Ca) y carbonatos (HCO₃) en el agua subterránea, y nos entrega una herramienta relativamente sencilla para identificar si ocurrirá precipitación o disolución de carbonato de calcio (CaCO₃).

Este índice se calcula de la siguiente forma (Milenic et al., 2010):

$$I_L = pH - \left(9.92 - \frac{T}{40} - \log(Ca) - \log(HCO_3) + 0.2 \log(RS) \right)$$

Donde: *T* = Temperatura del agua subterránea, en °C; *[Ca]* = Contenido de calcio en el agua, en mg/L.

[HCO₃] = Contenido de carbonatos en el agua, en mg/L.

RS = Residuo seco, en mg/L.

Si *I_L* es mayor a cero, entonces ocurrirá precipitación de CaCO₃, generando incrustaciones del mineral en los equipos. Si *I_L* es mayor a 2 podría ser limitante, por lo que recomendamos consultar con un especialista en hidroquímica.

Si se cumplen todos los criterios presentados en esta sección, es altamente probable que el agua subterránea sea apta para ser aprovechada mediante bombas de calor geotérmico. Sin embargo, si se van a bombear caudales mayores a 5 L/s, recomendamos consultar con un especialista en hidroquímica.

2.4 Consideraciones para implementar un sistema geotérmico abierto conectado a un acuífero

Hay una serie de consideraciones que se deben tener en cuenta para que la operación de un sistema abierto sea sostenible. Por esto, hemos dedicado un apartado específico, dentro de capítulo del Recurso Geotérmico, con herramientas para diseñar y proyectar una operación sostenible de un colector geotérmico vertical abierto. Además, se entrega una clasificación que permitirá determinar la factibilidad de implementar este tipo de captación en un acuífero.

Adicionalmente, en este apartado se muestra el recurso disponible en la zona centro sur de Chile para la implementación de un colector geotérmico vertical abierto. Si bien el recurso no se detalla a la escala de instalaciones individuales, la información aquí presentada permite identificar áreas favorables.

2.4.1 Factibilidad de implementar un sistema geotérmico abierto conectado a un acuífero

De acuerdo con la experiencia, la mayoría de los sistemas geotérmicos abiertos extraen y reinyectan caudales de 10 - 20 L/s. Sin embargo, hay instalaciones que operan con más de 50 L/s (Fry, 2009). La extracción de agua subterránea es habitual, tanto para consumo humano como para la agricultura, sin embargo, la reinyección de agua es poco frecuente. Entonces, existen desafíos asociados con la reinyección de agua, similares a los experimentados en la recarga artificial de acuíferos (Bouwer, 2002). Uno de ellos es el riesgo de interferencia térmica entre los pozos de extracción y reinyección. En el caso de los pozos de una instalación individual, la afectación térmica entre ellos es limitada y, por lo tanto, aceptable para una separación entre pozos de 30 - 40 m (Andrews, 1978).

A continuación, se describe una metodología para evaluación de factibilidad geotermal, desarrollada para la Région Ile-de-France (Schomburgk, 2005). Dicha factibilidad se evalúa en función de la profundidad hasta el **nivel estático**, espesor del acuífero saturado, transmisividad y dureza del agua subterránea (Tabla 7). Usando los rangos y los coeficientes de ponderación, se indican 5 clases de factibilidad, desde "muy débilmente factible" hasta "muy altamente factible" (Tabla 8).

Coefficiente de ponderación	1	2	3
Profundidad nivel estático (m)	0 - 5 o >50	25 - 50	5 - 25
Espesor del acuífero saturado (m)	0 - 5m	5 - 20m	> 20m
Transmisividad (m ² /s)	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³	10 ⁻³ - 10 ⁻²	> 10 ⁻²
Hidroquímica del acuífero Dureza (mg CaCO ₃ /l de agua)	> 32 (altamente mineralizada)	22- 32	< 22 (débilmente mineralizada)

Tabla 7. Rangos de parámetros y coeficientes de ponderación (Schomburgk 2005).

Transmisividad	1			2			3		
Espesor del acuífero saturado	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Profundidad nivel estático	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Hidroquímica del acuífero	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Factibilidad	4	7	10	5	8	11	6	9	12
	Muy débilmente factible	Débilmente factible	Factible	Altamente factible	Muy altamente factible				

Tabla 8. Calificaciones de factibilidad inferida basado en parámetros hidráulicos del acuífero y la composición química del agua subterránea (Schomburgk, 2005).

Transmisividad: Es necesario garantizar que se puede extraer agua subterránea a un caudal determinado para la operación del sistema con bomba de calor. La transmisividad es un indicador de la facilidad del agua para circular en una formación geológica y, por lo tanto, entrega información para determinar la factibilidad de extraer agua al caudal requerido. De esta manera, mientras más alta la transmisividad, es mejor. Por otro lado, si la transmisividad es baja (menor a 10^{-3} [m²/s]) podrían existir problemas para la extracción de agua subterránea. Así mismo, la reinyección de agua al acuífero será más sencilla con una alta transmisividad. Un método para el cálculo de la transmisividad en el pozo se encuentra en la sección 3.2.

Espesor del acuífero saturado: El espesor del acuífero indica, a grosso modo, sus dimensiones. Espesores menores que 5 m son indicador de un acuífero muy pequeño, que eventualmente puede ser agotado. En la segunda etapa de exploración se infiere la geometría del recurso - sección 2 -. Allí se sugieren métodos para inferir el espesor del acuífero saturado.

Profundidad nivel estático: Cuando la profundidad del nivel estático es muy superficial -entre 0 y 5 m- pueden existir problemas en la deformación del suelo, existir daños en la cercanía del pozo o inundaciones en el caso de una reinyección (Abesser 2010). Por otro lado, si es muy profundo -mayor que 50m- comienzan a haber problemas para extraer el agua subterránea y la bomba sumergible, necesaria para extraer agua a esa profundidad, reduce la eficiencia del sistema, llegando en algunos casos a la eficiencia de un sistema aerotérmico. En la segunda etapa de exploración se infiere la geometría del recurso - sección 2 -. Allí se sugieren métodos para inferir la profundidad del nivel estático.

Hidroquímica del acuífero: Cuando el agua subterránea llega a la superficie, pueden ocurrir reacciones químicas que modifican su composición, pudiendo generar precipitación de minerales en las instalaciones o corrosión de estas. Estos procesos tienen el potencial de causar problemas como obstrucción, abrasión o corrosión de la bomba hidráulica, las cañerías y/o el evaporador de la bomba de calor (D. Banks, 2008). Por lo anterior, se recomiendan limpiezas periódicas, de acuerdo con

la composición química del agua subterránea. Estas labores son idénticas a la mantención en pozos de extracción de agua convencionales y pozos para la recarga artificial de acuíferos. Para evitar problemas en la bomba de calor, debido a la química de aguas, se recomienda un intercambiador de calor agua-agua externo al equipo, que debe limpiarse periódicamente, al igual que las cañerías y pozos del sistema. Sin embargo, si la concentración de minerales es muy alta, este procedimiento será insuficiente. Por ejemplo, en el caso de carbonatos disueltos es ideal que la concentración en el agua sea menor a 32 mg de CaCO₃/l. En la sección 3.3 se analiza con mayor profundidad la química de aguas.

La combinación de estos 4 factores indica la factibilidad de implementar un sistema geotérmico abierto conectado a un acuífero.

La Figura 10 muestra la productividad de los principales acuíferos en el centro y sur de Chile. Este mapa fue elaborado por el Ministerio de Obras Públicas y la Dirección General de Aguas (DGA 1986), en base a información de productividad de pozos. Si bien es probable que la productividad real de los acuíferos sea menor que en el año 1986, debido al cambio en el régimen de precipitaciones y a la explotación del recurso, la diferencia entre acuíferos sigue siendo un indicador útil. Por lo tanto, se recomienda complementar esta guía con información actualizada y específica de la cuenca de interés. Algunas fuentes recomendables son el observatorio georreferenciado de la DGA, la plataforma "Escenarios Hídricos 2030 Chile" y la biblioteca del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).

En la zona central de Chile, entre Santiago y Los Ángeles, las cuencas de los ríos son muy amplias, debido al desarrollo de la depresión intermedia entre las cordilleras. Además, la nieve en la Cordillera de Los Andes permite que esta actúe como una gran reserva de agua, que recarga los acuíferos ubicados en la base de valles y cuencas. Al mismo tiempo, la diferencia de altura entre la cordillera y el mar hace que el agua se mueva rápidamente de oriente a poniente. Hacia el sur de Linares (36°S) comienza a ocurrir un aumento progresivo de las precipitaciones, lo que junto a una reducción de la altura de la cordillera se traduce en ríos más tranquilos, que transportan un caudal considerable de agua.

Desde el río Bío-Bío hacia el sur, aumenta la proporción de sedimentos tamaño arcilla en el suelo, lo que indica una disminución de la permeabilidad y transmisividad. La razón de este cambio en el tamaño de los sedimentos es que, hace varios miles de años, toda esta zona del sur de Chile estaba cubierta por glaciares, los que, al retirarse, dejaron depósitos de sedimentos muy finos. Esta disminución de la permeabilidad es muy importante, pues quiere decir que hay que ser muy cuidadosos si es que se quiere extraer caudales altos (>3 l/s). También será más difícil reinyectar el agua al acuífero.

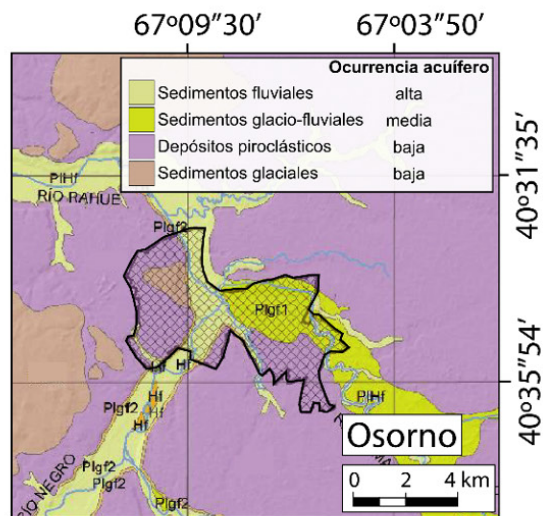
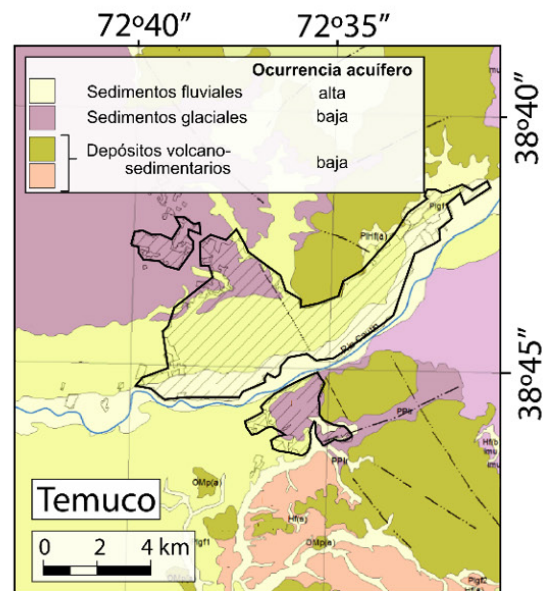
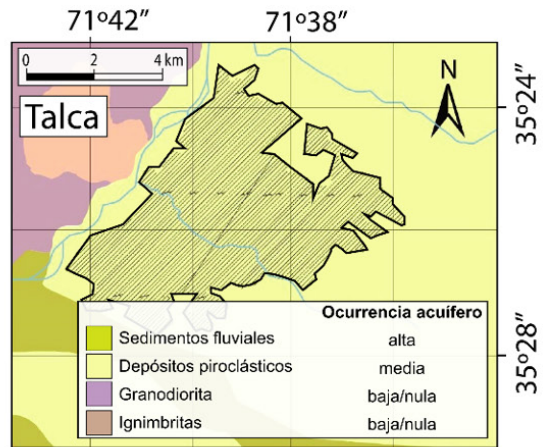
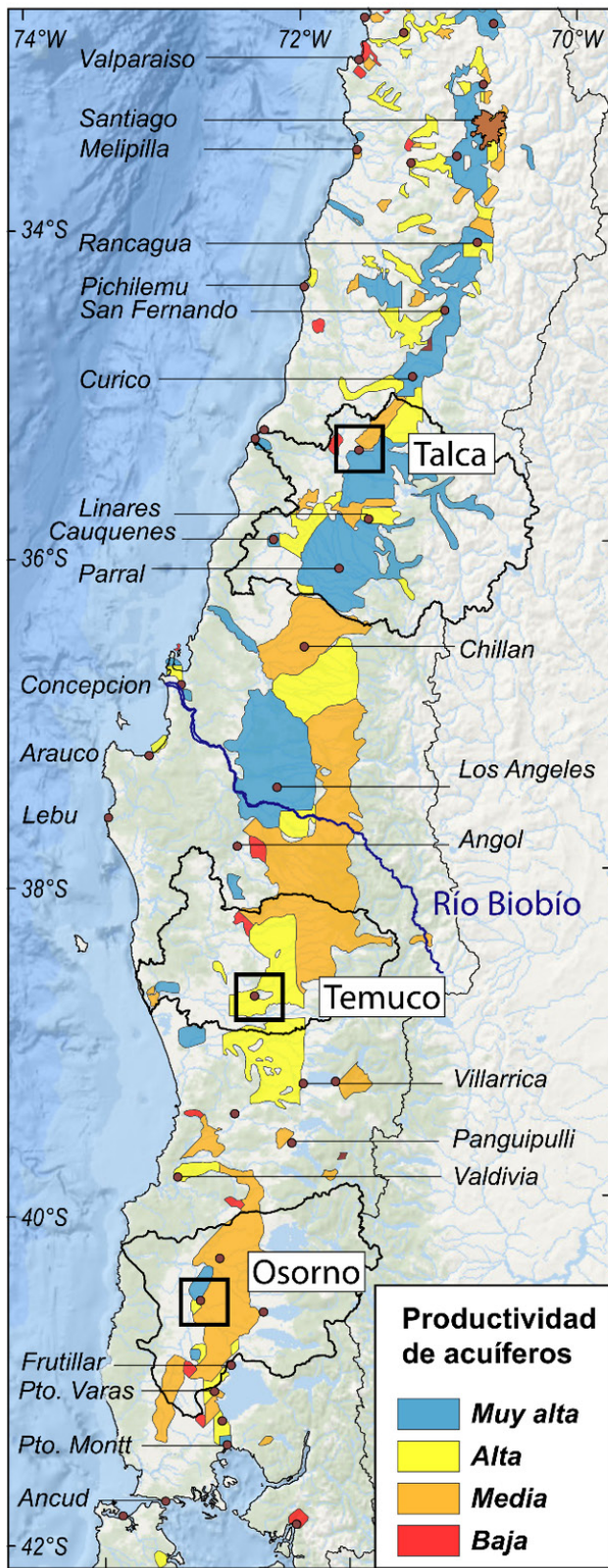


Figura 10. Izquierda: Mapa construido en base a la información de productividad de pozos y elaborado por el Ministerio de Obras Públicas y la Dirección General de Aguas. Derecha: Mapas con tres ciudades del sur de Chile con la probabilidad de ocurrencia de un acuífero en base a geología. (DGA 1986).

2.4.2 Herramientas para diseñar y proyectar una operación sostenible

Comprender la interacción entre la extracción y reinyección de agua subterránea para un sistema geotérmico abierto y su interacción con instalaciones subterráneas cercanas es esencial para garantizar la sostenibilidad del sistema y reducir el riesgo ambiental. Para esto, se utilizan los modelos numéricos que consisten en una representación del espacio en tres dimensiones y donde se puede simular el funcionamiento de estos sistemas. El modelado numérico para el transporte de agua y calor se puede utilizar para determinar la factibilidad de los sistemas geotérmicos y sus condiciones de funcionamiento (Gandy, 2010), probar configuraciones (Banks, 2009b) e investigar la magnitud del impacto de un sistema geotérmico en el medio (Lo Russo, 2009).



Foto 10. "Yo elijo la geotermia porque es la energía más limpia y amigable con el medioambiente". CEGA.

3. Impacto ambiental

Para planificar, diseñar, construir y operar soluciones de climatización mediante el uso directo de geotermia, es necesario conocer los posibles impactos de los colectores geotérmicos en el subsuelo, considerando criterios ambientales y técnicos. Las consecuencias en el recurso geotérmico por la construcción y funcionamiento de los colectores geotérmicos se puede dividir en: físicas, químicas y biológicas (Hähnlein, 2013).

En general, el uso e instalación de sistemas geotermiales con bomba de calor en países como Alemania, donde es una tecnología madura, se puede considerar bastante seguro en comparación con otras tecnologías (Fleuchaus, 2017). Sin embargo, anticipar impactos en el recurso es fundamental para garantizar el desarrollo sostenible de la tecnología. La Figura 11 muestra los impactos en el recurso geotérmico, considerando sus causas y consecuencias. En el desarrollo de este apartado se describen las consecuencias, evaluando aspectos físicos, químicos y biológicos. En cada consecuencia se considera el tipo de recurso y la forma de extracción.

Estos impactos están asociados a la construcción y operación de sistemas verticales. No hay registro de afectaciones en sistemas horizontales que sean consecuencia de la construcción de los colectores u operación de estos.

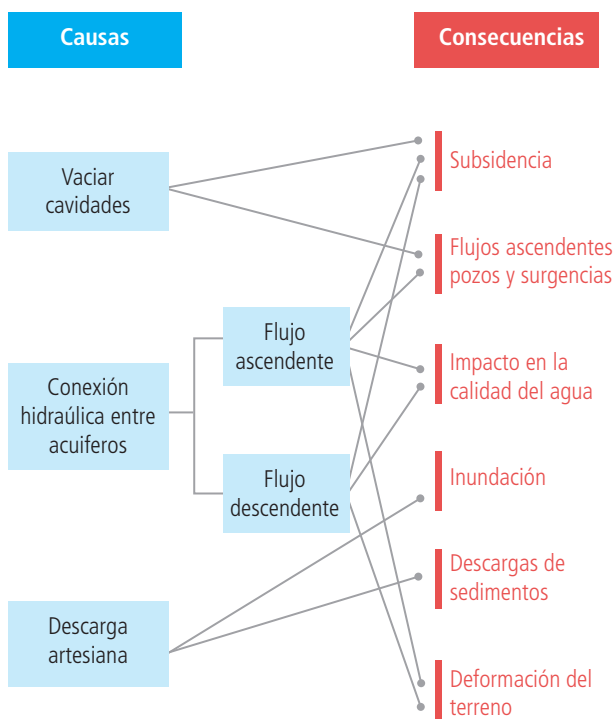


Figura 11. Diagrama de causas y consecuencias por la construcción y operación de colectores verticales en Alemania. Modificado de Fleuchaus y Blum 2017 (Fleuchaus, 2017).

3.1. Consecuencias Físicas

Las consecuencias físicas se refieren a las alteraciones del subsuelo que afectan a las estructuras en superficie, tales como hundimiento o deformación del terreno. También se incluyen en este apartado las alteraciones en los flujos de agua que podrían, eventualmente, generar inundaciones o subsidencia de terreno.

La subsidencia del terreno se debe a la generación de cavidades que afectan la estabilidad del suelo. Esta situación se podría generar al extraer el agua de un acuífero. Además, al conectar acuíferos de porosidad/permeabilidad muy distinta, si el flujo de agua es hacia el acuífero de mayor porosidad/permeabilidad, los sedimentos finos del acuífero de menor permeabilidad serán transportados junto con el flujo de agua, pudiendo generar hundimiento del terreno.

Los flujos ascendentes de agua, en pozos y surgencias asociadas, se generan por conectar con la superficie un acuífero artesiano (caso particular de un acuífero confinado). Dependiendo del volumen de agua descargada, esta situación puede generar inundaciones y dañar las estructuras en superficie. Junto con la descarga de agua, los sedimentos pueden ser trasladados a la superficie, generando posibles procesos de suberosión y aumentando el riesgo de hundimiento del terreno. Sin embargo, esto último es muy poco probable. En algunos casos, se puede utilizar a favor la surgencia del agua -si esta sale a un caudal igual o superior al requerido-, ya que podemos ahorrar el costo de bombear agua con una bomba sumergible (en muchos casos, el ahorro es considerable respecto del costo de operación total).

Existen minerales específicos que, al entrar en contacto con el agua, incorporan iones a su estructura y cambian de volumen, generando deformaciones del terreno. Por ejemplo, la anhidrita se convierte en yeso cuando entra en contacto con el agua y este proceso de transformación produce un aumento de volumen de hasta el 61% (Butsher, 2018).

3.2. Impactos en calidad de agua

Es importante mantener la calidad de agua con la menor alteración posible, porque es un recurso vital que podría ser utilizado para consumo o, eventualmente, ser la reserva de agua dulce de las próximas generaciones. Si bien existe una interrelación, los cambios en la calidad de agua se pueden dividir en cambios de la composición química y contenido o concentración microbiológica.

3.2.1 Químicos

Los impactos químicos generados a partir del uso del suelo (o el agua subterránea) como fuente de energía para sistemas geotérmicos de baja temperatura, son un campo relativamen-

te nuevo de investigación, donde no existe una clara relación de causa-efecto entre los distintos factores que componen un sistema de colectores abiertos o cerrados y las diferentes consecuencias que esto podría causar. Las investigaciones realizadas hasta ahora se basan en casos particulares, donde la instalación de estos sistemas ha generado problemas o exacerbado los existentes, como, por ejemplo, la precipitación de sales (SO_2^{-4} , Cl^- y NO^{-3}) o liberación de gases (N_2O y CH_4), debido a cambios en la tasa de evaporación de agua. Los impactos devienen directamente del cambio en las condiciones en las se encuentran determinados elementos, tales como descender la temperatura entre 2 y 5°C o generar nuevas condiciones de pH, entre otras causas. A modo de ejemplo, al cambiar la temperatura y concentración de oxígeno disuelto en un sistema abierto, se puede generar una acumulación de hierro y mineralización de agua en el área circundante de pozos de inyección (Wu, 2014).

La temperatura del suelo y el agua subterránea pueden oscilar, por lo general, entre 6 °C y 31 °C, dependiendo de la ubicación geográfica y la época del año (Davidson, 1998), (Wildung, 1975). Adicionalmente, se estima que acuíferos profundos de mayor temperatura (bajo 80 metros) tienen una fuerte influencia en la temperatura del subsuelo (Wu, 2014). Por esta razón, el enfriamiento o calentamiento repentino por la instalación de un sistema geotérmico tiene el potencial de alterar condiciones estacionarias que se hayan desarrollado en condiciones inalteradas.

Cambios químicos de largo plazo también pueden producirse al interconectar dos acuíferos previamente separados a través de una perforación, alterando la calidad del agua (lo que se hace más complejo si esta se utiliza para consumo humano). Por esta razón, deben considerarse, detalladamente, la degradación de químicos en el agua subterránea.

3.2.2 Biológicos

Los impactos biológicos que produce la implementación de sistemas geotérmicos de baja temperatura -al igual que los impactos químicos- son materia de investigación actual y no están determinados en su totalidad, pues se trata de una tecnología incipiente en el mundo (no necesariamente nueva, pero sí de baja utilización en comparación con otras alternativas convencionales). Estos sistemas generan anomalías de temperatura que pueden cambiar las características químicas, físicas y microbiológicas del acuífero. En el subsuelo, entre el 70% y el 90% de los microorganismos son bacterias, de varias especies, y que ayudan a la fertilidad y estructura mineral de las capas superficiales. De acuerdo con el estudio realizado por Briemann (2009), pequeños cambios de temperatura del agua subterránea, inducidos por sistemas geotérmicos abiertos, la diversidad bacteriana y la composición de la comunidad bacteriana y faunística se ve alterada. Esto se verificó, también, en modelos donde se mostraba que la tasa de crecimiento bacteriano, próxima a las zonas de extracción y reinyección desde el acuí-

fero, cambiaba al implementar estos sistemas. Los inputs para estos modelos son datos de largo plazo sobre la calidad del agua donde se desarrollan estos proyectos, a diferentes escalas.

Nuevas investigaciones al respecto han descubierto que estos problemas no están solamente supeditados a sistemas abiertos, sino que también existe una vecindad de afectación termal alrededor de las tuberías del circuito cerrado, por donde circula el fluido que intercambia calor con el subsuelo. Estos cambios de temperatura pueden afectar la tasa de crecimiento de plantas y materia vegetal microscópica, pues parámetros como la solubilidad de oxígeno se ven alterados. Otro riesgo asociado a este tipo de sistemas es la utilización de anticongelante (glicol, principalmente) y aditivos anticorrosión dentro de las tuberías en un sistema cerrado, ya que estos componentes son potencialmente tóxicos para el crecimiento de distintos organismos y, en caso de existir un derrame o fuga en el lugar de implementación, el ambiente orgánico del subsuelo se ve alterado a largo plazo, incluyendo los acuíferos (Heinonen, 1997).

Los cambios químicos pueden tener influencia en el desarrollo de microbios y bacterias. Sin su desarrollo normal, el balance ecológico puede destruirse, pues las condiciones fisicoquímicas y biológicas son interdependientes. Se ha encontrado que la reproducción de los microorganismos en el agua subterránea ocurre más rápido entre 25 y 70°C. Adicionalmente, se sabe que la degradación de materia orgánica por bacterias se favorece a mayores temperaturas, lo que se cumple cuando un sistema cerrado se utiliza en verano alrededor del pozo (o pozos). Este crecimiento acelerado de bacterias en el subsuelo y agua subterránea incrementa la dureza y la concentración de sulfatos, considerados contaminantes. Cuando el sistema extrae calor desde el subsuelo en invierno, se hace más difícil remover la contaminación por nitrógeno y contaminantes orgánicos del agua subterránea (Wu, 2014). De acuerdo con Briemann (Briemann, 2009), existen diferentes ejemplos donde la productividad bacteriana no se ve afectada significativamente por cambios en la temperatura circundante a un sistema de calefacción con bomba de calor geotérmica. Finalmente, se debe considerar que en la actualidad no existe el volumen de datos suficiente para extraer conclusiones determinantes en esta materia y se requieren más estudios.

3.2.3 Relación entre impacto y costos en la inversión

La Figura 12 muestra la relación relativa entre los costos de inversión del colector geotérmico y el impacto ambiental del mismo.

Para un estudio de detalle de los costos reales, en el contexto chileno, se puede consultar el capítulo relacionado con la dimensión económica en la implementación de proyectos geotérmicos incluido en esta guía.

En Chile la perforación de pozos profundos es muy costosa (Figura 12), lo que hace los sistemas verticales sean los de mayor inversión. Además, los sistemas verticales cerrados requieren más metros de perforación que los abiertos, por lo tanto, su costo es aún mayor. Sin embargo, no utiliza directamente el agua y, de esta manera, el impacto será menor. En un sistema vertical cerrado se ilustran tres tipos de recursos, aquel con sedimentos secos requerirá más metros para extraer o disipar calor, ya que la conductividad térmica es muy baja respecto de la conductividad térmica en rocas o sedimentos saturados en agua.

Un sistema vertical abierto requiere menos metros en la perforación vertical que en un sistema vertical cerrado, ya que solo se perfora lo suficiente para extraer agua subterránea a un caudal requerido, por lo que su precio será menor. Sin embargo, al utilizar directamente el agua subterránea su impacto será mayor. Los sistemas horizontales están dentro de los más económicos y de menor impacto. El más económico de los horizontales es el que se encuentra en sedimentos saturados en agua, ya que su conductividad térmica es mayor y se requerirán menos metros de cañerías enterradas.

Por último, el cuerpo de agua en la configuración de *pond loop* es menos económica que un sistema abierto en un cuerpo de agua, pero tiene un menor impacto ambiental, debido a que se deben sumergir cañerías por donde se intercambia calor con el medio y no se utiliza agua directamente.

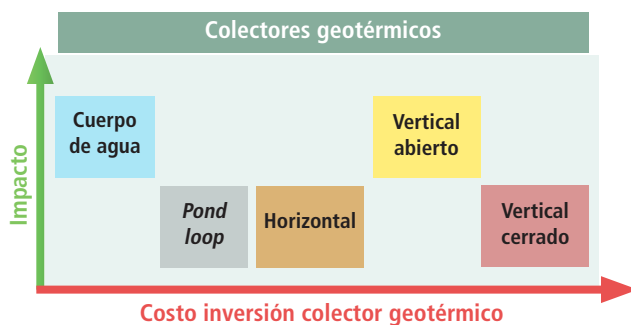


Figura 12. Relación entre el impacto ambiental y el costo de inversión del colector geotérmico

4. Bibliografía

1. Abesser, C. «Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems.» Nottingham, 2010.
2. Andrews, C.B. «The Impact of the Use of Heat Pumps on Ground-Water Temperatures.» *Groundwater*, 1978: vol 16., no. 6, pp. 437-443.
3. Banks, D. «An introduction to thermogeology and the exploitation of ground source heat.» *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 2009: vol. 42, no. 3, pp. 283-293.
4. Banks, D.1. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling.* Oxford: Blackwell, 2008.
5. Banks, D.2. «Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches.» *Hydrogeol. J.*, 2009b: vol. 17, no. 5, pp. 1149-1155.
6. Benefield, L., Judkins, J. & Weand, B. 1982. *Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment.* PrenticeHall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
7. Bouwer, H. «Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering.» *Hydrogeol. J.*, 2002: vol. 10, no. 1, pp. 121-142.
8. Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., and Lueders, T. «Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems.» *FEMS Microbiol. Ecol.*, 2009: vol. 68, no. 3, pp. 273-286.
9. Burté, L., Cravotta, C., Bethencourt, L., Farasin, J., Pédrot, M., Dufresne, A., Gérard, M., Baranger, C., Le Borgne, T., Aquilina, L. «Kinetic Study on Clogging of a Geothermal Pumping Well Triggered by Mixing-Induced Biogeochemical Reactions.» *Environmental Sciences & Technology*, 2019: vol. 53, pp. 5848-5857.
10. Butsher, C., Breuer, S., and Blum, P. «Swelling laws for clay-sulfate rocks revisited.» *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2018: vol. 77, no. 1, pp. 399-408.
11. Carslaw, H.S. 1945. *Introduction to the Mathematical Theory of the Conduction of Heat in Solids.* New York: Dover.
12. Christensen, A., Auken, E., and Sorensen, K. «The transient electromagnetic method.» *Groundwater Geophysics*, 2006: vol. 71, pp. 179-225.
13. Clauser, C. «Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers: SHEMAT and Processing SHEMAT.» Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Verlag), 2003.
14. Custodio, E., and Llamas, M. R. *Hidrogeología subterránea.* Barcelona: Omega, 1983.
15. Davidson, EA., Belk, E., and Boone, RD. «Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest.» *Global Change Biology*, 1998: vol. 4, no. 2, pp. 217-227.
16. DGA. «Mapa hidrogeológico de Chile. Escala 1:2.500.000.» Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas, 1986.
17. Diersch, H.-J. «Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media.» Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
18. Fleuchaus, P., and Blum, P. «Damage event analysis of vertical ground source heat pump systems in Germany.» *Geotherm. Energy*, 2017: vol. 5, no. 1, p. 10.
19. Fry, V.A. «Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London.» *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 2009: vol. 42, no. 3, pp. 325-334.
20. Gandy, C. J., Clarke, L., Banks, D., and Younger, P. L. «Predictive modelling of groundwater abstraction and artificial recharge of cooling water.» *Q.J.Eng.Geol.Hydrogeol.*, 2010: vol. 43, no. 3, pp. 279LP-288.
21. Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., and Blum. «Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy.» *Energy Policy*, 2013: vol. 59, pp. 914-925.
22. Heinonen, E. W., Wildin, M. W., Beall, A. N., Tapscott, R. E. «Assessment of antifreeze solutions for ground source heat pump systems.» *ASHRAE Transactions*, 1997: vol. 103, pp. 747-756.
23. Hersir, G. P., and Björnsson. «Geophysical exploration for geothermal resources. Principles and applications.» UNU-GTP, Iceland, 1991: report 15, 94 ppS.
24. Ingersoll, L.R., O.J. Zobel, and A.C. Ingersoll. 1954. *Heat Conduction, with Engineering, Geological, and Other Applications.* New York: McGraw-Hill.
25. Kipp, K. L. «Guide to the revised heat and solute transport simulator; HST3D, Version 2.» Denver, 1997.
26. Lo Russo, S., Civita, M. V. «Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study.» *Geothermics*, 2009: vol. 38, no. 3, pp. 335-345.
27. MacDonald, A. M., Davies, J., and Dochartaigh, B. É. Ó. «Simple methods for assessing groundwater resources in low permeability areas of Africa.» Keyworth, Nottingham, 2002.
28. Martínez, P. E., Martínez, P., and Castaño, S. *Fundamentos de hidrogeología.* Madrid: Mundi-Prensa, 2006.
29. Milenic, D., Vasiljevic, P. and Vranješ, A., 2010. Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes. *Energy and Buildings*, 42(5), pp.649-657.
30. Pahud, D. «Geothermal energy and heat storage.» *Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana*, 2002.
31. Schomburgk, S., Goyeneche, O., Gateau, C., Vernoux, J., and Denis L. «Guide d'aide a la decision pour l'installation de pompes a chaleur sur nappe aquifere en region Ile-de- France: Partie 1-Atlas hydrogeologique.» 2005.
32. USEPA. *Manual on Environmental Issues Related to Geothermal Heat Pump Systems.* Washington, 1997.
33. Wildung, R. E., Garland, T. R., Buschbom, R. L. «The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils.» *Soil Biology and Biochemistry*, 1975: vol. 7, pp. 373-378.
34. Wu, Y. «The research on environmental problems and key technologies of shallow geothermal energy.» *China University of Geosciences*, 2014.





Aspectos técnicos

ecoFOREST

FOREST

Aspectos técnicos

Tabla de contenido

1. Nomenclatura
2. Bomba de calor geotérmica
 - 2.1 Niveles de eficiencia
3. Dimensionamiento de un Sistema de Calefacción Geotérmica
 - 3.1 Demanda térmica
 - 3.2 Sistemas de distribución de calor
 - 3.3 Dimensionar el colector geotérmico
 - 3.4 Equipos complementarios del sistema
 - 3.5 Operación y Mantenimiento del sistema
4. Bibliografía
5. Anexos
 - 5.1 Anexo A: COP vs temperatura
 - 5.2 Anexo B: Zonas climáticas
 - 5.3 Anexo C: Cálculo de ganancias solares
 - 5.4 Anexo D: Resultados de dimensionamiento de colectores cerrados horizontales y verticales para cada zona climática

Aspectos técnicos

Autores

- Nicolás Hurtado Arroyo
- Víctor Rodríguez Núñez
- Nicolás Perez Estay

Este capítulo presenta los aspectos técnicos más relevantes a la hora de estudiar, diseñar y ejecutar un proyecto de energía geotérmica de baja temperatura. En las siguientes páginas se relevarán las funciones de los diversos componentes mecánicos y eléctricos relacionados con la transformación de calor extraído del recurso geotermal para la calefacción de ambientes. Entre los tópicos a caracterizar, se encuentran las **Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)**, los colectores geotérmicos, los procesos de dimensionamiento de la demanda térmica y cálculo de demanda eléctrica, y los diferentes sistemas disponibles para la distribución de calor.

1. Nomenclatura

Símbolo	Magnitud representada	Unidad
A	Área o superficie	m^2
ACH	Renovación aire por hora	1/h
C	Caudal	L/s
c_p	Calor específico	J/(kg·K)
q'	Calor por área	W/m ²
Q'	Calor	W _t
Q	Demanda	Wh _t
T	Temperatura	°C
t	Tiempo	s
U	Transmitancia térmica	W/(m ² ·K)
V	Volumen	m ³
W	Potencia de trabajo	kW
α	Difusividad térmica	m ² /día
η	Eficiencia	%
λ	Conductividad térmica	W/(m·K)
ρ	Densidad	kg/m ³
φ	Latitud	°
\varnothing	Diámetro	m

Tabla 9. Nomenclatura del capítulo.

2. Bomba de calor geotérmica

Una **bomba de calor** es una máquina térmica que, mediante un trabajo mecánico, transfiere calor desde un foco frío a una zona caliente. Si bien existen modelos que operan en base a gas, en su mayoría este trabajo es alimentado por electricidad. Las bombas de calor pueden calentar un espacio aprovechando la energía de un foco externo o refrigerar liberando la energía a un foco caliente, mediante un sistema que opera en base a un ciclo termodinámico cerrado de compresión/evaporación de un fluido refrigerante. El aprovechamiento de los cambios de temperatura del refrigerante, producto de los cambios de presión y el calor latente de sus cambios de fase, permite el traspaso de energía desde el foco frío al foco caliente (Figura 13).

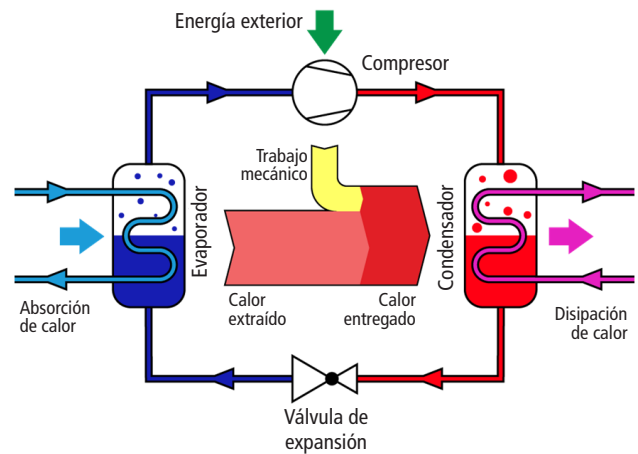


Figura 13. Esquema de funcionamiento de bomba de calor y sus componentes.

Clasificación de las bombas de calor

Dependiendo de su aplicación, las bombas de calor pueden generar frío o calor. Existen también las “reversibles”, capaces de realizar ambas funciones, por medio de una válvula inversa o de cuatro vías, que permite revertir la función del equipo (Figura 14), y las “termofrigobombas”, que son capaces de producir frío y calor de forma simultánea.



Foto 11. Imagen bombas de calor de proyecto Makay. CEGA.

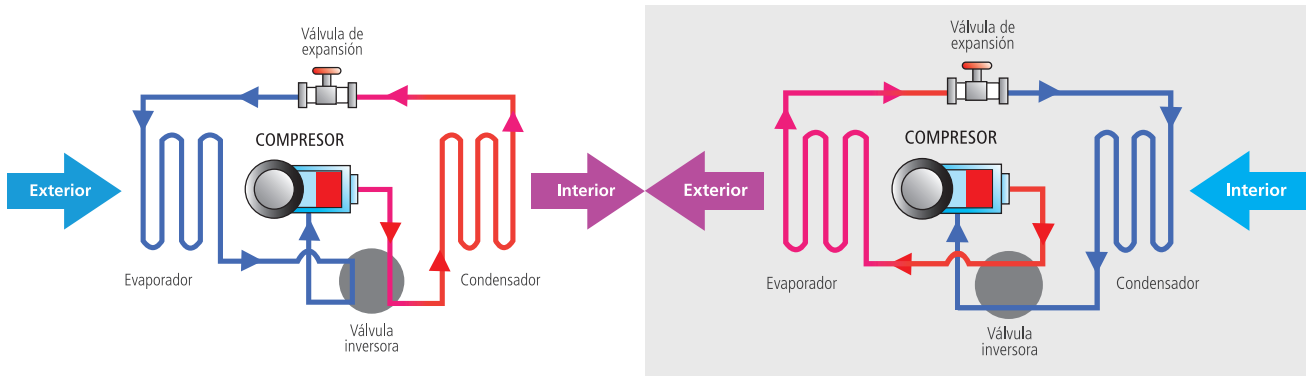


Figura 14. Esquema de funcionamiento de bomba reversible. Modo calefacción (izquierda) y modo refrigeración (derecha).

De acuerdo a su capacidad de regular la potencia, se les considera *ON/OFF* si la bomba solo puede encender y apagar, sin ajustar la potencia de calefacción/refrigeración. En cambio, si posee la tecnología *inverter* puede regular dicha potencia ajustando la velocidad de giro del compresor, permitiendo que este opere en rangos más eficientes, reduzca su desgaste y genere un mejor control en la climatización.

Sus fuentes de alimentación externa de calor pueden ser aire, agua o tierra, refiriéndose estas dos últimas a lo que conocemos como **BCG**. Es el uso del suelo, en vez del aire, lo que permite que las BCG tengan una mayor eficiencia, ya que posee una mejor inercia térmica, lo que reduce sus variaciones anuales de temperatura.

Su potencia alcanza entre 10 y 100kW y, en su mayoría, requieren una conexión eléctrica monofásica o trifásica, dependiendo del modelo y tamaño. También existen las que operan con gas (natural o licuado), reduciendo su consumo eléctrico al mínimo. Sin embargo, estas últimas poseen una eficiencia menor y un mercado más escaso.

Recomendaciones

1. Por lo general las BCG pueden producir agua caliente hasta 60 °C. No se recomienda generar mayores temperaturas, puesto que disminuye la eficiencia aumentando su consumo (algunos equipos usan resistencias eléctricas para alcanzar estas temperaturas).
2. Se recomienda separar la demanda en más de una BCG cada vez que se pueda. De este modo, si uno de los equipos presenta problemas, el sistema todavía podrá operar al menos a media capacidad.
3. Las termofrigobombas son útiles en espacios donde se requiera refrigerar y producir Agua Caliente Sanitaria (ACS) o calefaccionar otro espacio al mismo tiempo, puesto que esta operación les permite tener una gran eficiencia.
4. Los equipos *inverter*, debido a su mayor vida útil y rendimiento general, son preferibles sobre los equipos *on/off*. Estos últimos son recomendables en caso de sistemas abiertos, para evitar agregar un control mayor a la bomba del pozo, como se verá en las próximas páginas.

2.1 Niveles de eficiencia

La eficiencia de las bombas de calor corresponde a la relación entre la energía que se usa para climatizar versus la energía que se consume para realizar dicho proceso y, por su sigla en inglés, se denomina COP (*Coefficient Of Performance*). El COP corresponde a la eficiencia para calefacción, así como el EER (*Energy Efficiency Ratio*) se refiere a la eficiencia en refrigeración.

$$\text{COP} = \frac{\text{Calor entregado}}{\text{Energía consumida}}$$

$$\text{EER} = \frac{\text{Calor extraído}}{\text{Energía consumida}}$$

Mientras más alto sea el COP/EER, mayor es la eficiencia del sistema, puesto que entrega/extrae más calor, con un menor consumo energético.

Cabe señalar que los valores de COP/EER son certificados por el fabricante en condiciones de plena carga (equipo al 100% de potencia). Sin embargo, hoy en día los proveedores también utilizan el coeficiente de rendimiento estacional (SCOP) y el factor de eficiencia energética estacional (SEER), que toman en cuenta variaciones de carga en la operación del equipo, además del consumo de energía cuando el equipo está apagado (consumo vampiro), dando valores más altos que el COP/EER (2017).

Aproximaciones

Mientras mayor sea la diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío, menor será la eficiencia, puesto que se requiere de más energía para operar la bomba de calor (ver Anexo A). De esta forma, si al calefaccionar la temperatura del foco caliente aumenta, el COP disminuye, y si la temperatura del foco frío aumenta, el COP aumenta. En cambio, al refrigerar, el EER aumenta cuando la temperatura de foco frío aumenta y disminuye cuando la temperatura de foco caliente aumenta.

COP y EER dependen del equipo y las temperaturas de trabajo que, por lo general, tienen un valor de 4, en el caso de una BCG con un colector abierto y de 3,5 para un sistema con colector cerrado, debido a que este último trabaja con temperaturas más bajas. La eficiencia real de la bomba de calor deberá ser entregada por el fabricante.

2.1.1 Usos frecuentes

Las BCG pueden usarse para calefacción, refrigeración y producción de agua caliente sanitaria en todo tipo de edificaciones: viviendas, escuelas, grandes edificios de oficinas, hoteles u hospitales. Su utilización también puede extenderse a aplicaciones productivas como la industria vitivinícola, invernaderos, piscinas de piscifactorías, entre otros.

Debido a su alto costo inicial, no son rentables para viviendas unifamiliares pequeñas, sino para construcciones de alta gama, donde el costo asociado a la instalación del sistema geotérmico no sea tan elevado en comparación al costo de la vivienda. Sin embargo, dado que la economía de escala funciona para esta tecnología, barrios completos podrían ser alimentados con BCG en forma de calefacción distrital, de manera costo eficiente.

La **climatización distrital** opera con una central distrital, compuesta por una central térmica donde se produce el fluido para calefacción, refrigeración y/o agua caliente sanitaria, que es distribuido por una red de cañerías hacia todos los bloques de viviendas o edificios que se adhieran a esta central (Figura 15). De este modo, las demandas individuales pueden ser agrupadas en un solo gran sistema que se encarga de alimentarlos, eliminando la necesidad de tener una BCG individual por vivienda, reduciendo así la inversión total de instalación del sistema.



Figura 15. Ejemplo de central distrital geotérmica

3. Dimensionamiento de un Sistema de Calefacción Geotérmica

Esta sección le permitirá dimensionar un sistema de climatización con uso directo de geotermia de manera rápida y sencilla, usando información que probablemente ya conoce o que podrá averiguar con ayuda de esta guía y observaciones sencillas de su entorno. El objetivo es permitirle tomar una decisión rápida y fundamentada respecto a usar geotermia en su proyecto, entregándole las herramientas para llegar a resultados claros y directos que le acerquen a la solución que necesita para su contexto.

Dado que los resultados expuestos pueden representar una realidad distinta, recomendamos usar la información aquí contenida a modo de orientación y revisar las referencias para realizar un dimensionamiento más detallado y preciso, como paso previo al contacto con una empresa de climatización para la implementación del proyecto.

3.1 Demanda térmica

El primer paso para dimensionar un sistema de climatización es conocer la demanda térmica del espacio que desea climatizar y la potencia necesaria para satisfacerla. Para eso, es necesario saber: 1) cuáles son las condiciones climáticas de la localidad; 2) cuál es el nivel de aislación térmica del espacio, y 3) qué uso se le dará a ese espacio, en términos de horario y temperatura.

¿Qué entendemos por **potencia y demanda** térmica?

La **potencia** es el resultado matemático de la división de una cantidad de calor o energía térmica por el tiempo durante el cual se libera o es absorbida. La interpretación física es la velocidad de transformación de la energía térmica. Por ejemplo, hervir un litro de agua de 15 °C a 100 °C requiere la energía equivalente a 355.300 J (Joule). Si el tiempo que se demoró su hervidor en calentar el agua fue de 3 minutos (180 segundos), cuando se divide la energía requerida en el tiempo empleado, da como resultado $355.300/180 = 1.974 \text{ J/s}$. Esto quiere decir que su hervidor liberó 1.974 J de energía en cada segundo que estuvo funcionando, y, por lo tanto, imprimió una potencia térmica de 1.974 J/s, 1.974 W (Watts) o 1,97 kW, que son lo mismo. En el caso de la climatización es igual. Potencia o carga térmica es la cantidad de energía térmica que un recinto intercambia con el exterior por unidad de tiempo. Además, si se multiplica la carga térmica por el tiempo en que se produce el intercambio de energía, el resultado obtenido es la **demanda térmica**, que se mide en unidades de energía como Joule o kilowatt-hora.

La metodología de cálculo está basada en la “Guía Técnica de Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica” del Gobierno de España (2008) y el manual “Ground-Source Heat Pump Project Analysis” del RETScreen Engineering & Cases Textbook (2005). Recomendamos revisar estos documentos para profundizar en los cálculos si lo requiere.

Existen tres grandes demandas térmicas asociadas a la climatización de ambientes: calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. Estas serán descritas a continuación con el fin de entregar una definición, conocer la metodología para calcular su demanda térmica y entregar una aproximación de primer orden en el caso de que no se conozcan algunas de las variables definidas en las metodologías.

3.1.1 Calefacción

Los factores que influyen en la necesidad de calefacción de un espacio corresponden a las pérdidas de calor producidas por las superficies en contacto con el exterior, como las paredes, ventanas y techo, y las renovaciones de aire en función de la temperatura exterior e interior. Por otro lado, los factores que aportan calor son la radiación solar, el metabolismo de los ocupantes y el calor que emanan equipos y artefactos en funcionamiento.

Dado que en invierno los aportes solares tienen menor incidencia y dependen de varios factores, como la orientación y sombras sobre la edificación, es mejor omitirlos en el cálculo de carga térmica, y así aportar un margen de seguridad al dimensionamiento del sistema. Lo mismo pasa con los aportes de ocupantes y artefactos, si se considera que en espacios de baja densidad ocupacional y pocos equipos (como una casa) su aporte es muy bajo. (Figura 16)

En espacios de alto uso (como escuelas u hospitales), el calor generado sí deberá ser considerado para no sobredimensionar los equipos.

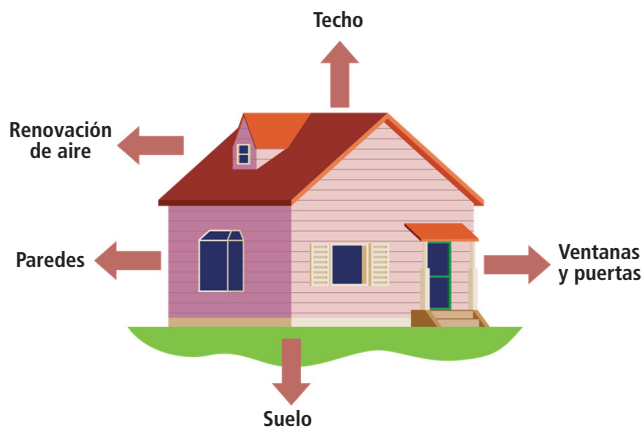


Figura 16. Fuentes de pérdida de calor que influyen en un sistema de calefacción.

Las **pérdidas por superficies** corresponden a todas las pérdidas de calor a través de las superficies que conectan con el exterior (muros, ventanas, techo y suelo). Dependen del área y de la transmisividad térmica de las superficies, la que a su vez depende de la conductividad térmica y geometría de los materiales que las conforman. La suma de la multiplicación de la superficie de cada elemento exterior por su respectiva transmisividad térmica constituye la **envolvente térmica** del edificio.

Por otra parte, la **renovación de aire** se usa para asegurar una buena calidad del aire interior y corresponde a cuánto aire se cambia con el exterior durante una unidad de tiempo. Depende del sistema de ventilación utilizado y/o de la hermeticidad de la construcción. En espacios de alta ocupación, las renovaciones de aire dependerán del número de personas que ocupan el espacio y el tamaño de este. En el caso de una casa bien construida, suele considerarse una renovación de aire por hora.

Metodología

A continuación veremos cómo calcular la potencia requerida por un sistema de calefacción y la demanda térmica total.

Como se mencionó anteriormente, la potencia necesaria para un sistema de calefacción dependerá principalmente de las pérdidas de calor por superficies y las pérdidas de calor por renovaciones de aire. Ambas pérdidas dependen de la diferencia de temperatura que hay entre el interior y el exterior. Al dimensionar un sistema debe considerarse una temperatura interior constante $T_{confort}$, que cumpla con el confort esperado.

La transmitancia térmica para materiales homogéneos corresponde a la división entre la conductividad térmica del material y el espesor de este. Para materiales compuestos por más de un elemento revise la Norma Chilena NCh853-2007 de Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancia térmicas (2007).

Las renovaciones de aire pueden expresarse como el caudal másico de aire en movimiento \dot{m}_{aire} en kilogramos por segundo, el cual depende del número de renovaciones de aire por hora ACH , el volumen del espacio V_{edi} en metros cúbicos y la densidad del aire ρ_{aire} que a temperatura y presión estándar es igual a 1,29 kg/m³.

$$(1) \quad \dot{m}_{aire} = \frac{ACH}{3.600} \cdot V_{edi} \cdot \rho_{aire}$$

Debido a que la temperatura exterior varía durante el día y a lo largo del año, el diseño del sistema debe ser capaz de operar en los momentos más fríos. Para esto, debe considerarse la **temperatura mínima anual** $T_{min\ amb}$ de su localidad. La potencia de calefacción Q_{cal} se calcula como:

$$\dot{Q}_{cal} [W] = F_{pot\ cal} \cdot \left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (T_{confort} - T_{min\ amb}) \quad (2)$$

Donde:

$F_{pot\ cal}$: Factor de seguridad de potencia de calefacción

U_i : Transmisividad térmica del elemento i [W/(m²·K)]

A_i : Área del elemento i [m²]

\dot{m}_{aire} : Caudal másico del aire [kg/s]

$c_{p\ aire}$: Calor específico del aire. En condiciones típicas de habitación igual a 1.012 J/(kg·K)

$T_{confort}$: Temperatura de diseño de confort [°C]

$T_{min\ amb}$: Temperatura mínima ambiente [°C]

Luego, se podrá calcular la energía que consumirá mensualmente el sistema $Q_{cal\ m}$: la **demanda térmica**. Esta, al igual que la potencia, depende de la envolvente y de la renovación de aire, pero también de cuánto tiempo se usa la calefacción. Se calcula mes a mes, usando la **temperatura promedio mensual** $\bar{T}_{amb\ m}$ [°C] como temperatura exterior en la ecuación (2). Además, es necesario multiplicar este valor por el número de horas h_m del mes correspondiente y por un factor de operación de la calefacción $F_{dem\ cal}$ así:

$$Q_{cal\ m} [Wh] = F_{dem\ cal} \cdot \left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (T_{confort} - \bar{T}_{amb\ m}) \cdot h_m \quad (3)$$

Cuando el resultado de la ecuación anterior es negativo, la demanda para ese mes es igual a cero y, por lo tanto, no se requiere el uso de calefacción. Para calcular la demanda anual del espacio Q_{cal} , deben sumarse todas las demandas mensuales, así:

$$Q_{cal} = \sum_{m=1}^{12} Q_{cal\ m} \quad (4)$$

Aproximaciones

A continuación, se presentan algunas aproximaciones útiles para calcular la carga y demanda térmica de un edificio de manera fácil y rápida, obtenidas siguiendo la metodología anterior.

Los resultados presentados usan como supuestos las condiciones ambientales y condiciones de aislación térmica descritas en las zonas climáticas de la norma NCh1079-2008 (ver Anexo B); el uso residencial de los espacios y una temperatura de confort de 20 °C (2009).

Zona climática	Potencia calefacción [W/m ²]	Demanda mes máxima [kWh/(m ² ·mes)]	Demanda específica [kWh/(m ² ·año)]
4 CL	49	18	138
5 CI	54	18	103
6 SL	50	20	155
7 SI	49	19	139
8 SE	53	19	188
9 An ²	60	24	206

Tabla 10. Potencia de diseño y demanda específica de calefacción por zona climática.

Recomendaciones

1. A temperaturas más bajas y peor nivel de aislación térmica y hermeticidad al aire, aumentará la necesidad de calefacción. Es muy importante aislar correctamente el espacio para asegurar el buen funcionamiento del sistema de calefacción y alcanzar una eficiencia energética óptima, ya que una **mala aislación podría implicar más del doble de consumo en calefacción**.
2. Si bien la temperatura de confort depende de factores como las preferencias del ocupante, la velocidad del viento y la humedad relativa, entre otros, se recomienda considerar **20 °C**. Aumentar la temperatura de calefacción tendrá un impacto directo a la demanda del sistema, puesto que requerirá una mayor potencia y/o funcionará por más horas. En promedio, un aumento de un grado Celsius implica el **aumento de un 6% de la potencia** de calefacción y un **12% de la demanda anual**.
3. Para contar con un margen de seguridad, es conveniente considerar un factor de operación de calefacción $F_{cal\ pot}$ igual a 1,1. Es decir, un 10% más que la potencia original. Esto podría asegurar, por ejemplo, que el sistema cumpla la demanda energética en caso que la temperatura disminuya por debajo de la temperatura mínima usada para el diseño.
4. Para una casa, cuya calefacción se apaga por las noches, se recomienda considerar un factor de operación de calefacción $F_{dem\ cal}$ igual a **70%**³. En caso de necesitar calefacción durante el **horario de trabajo**, este factor puede ser igual a **30%**⁴. En tanto, si una casa no ocupa calefacción durante el horario de trabajo, este factor puede ser igual a **40%**⁵.

¹ Calculada para una vivienda de un piso de 100 m² que cumple con los requerimientos de NCh1079-2008 (Anexo B) y considerando una infiltración de aire equivalente a 1 renovación por hora.

² Debido a la extensión de la zona, los valores pueden variar considerablemente dependiendo de la localidad.

³ Considerando una operación desde las 6 AM hasta las 11 PM.

⁴ Considerando una operación desde las 8 AM hasta las 6 PM.

⁵ Considerando una operación desde las 6 AM hasta las 8 AM y desde las 6 PM hasta las 11 PM.

En caso de necesitar un cálculo en mayor detalle, se recomienda usar la información de la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) para la temperatura ambiente, que ofrece estos datos a una resolución horaria en varios puntos del país (Agrometeorología, 2020).

5. Ya que el metabolismo corresponde a la transformación de energía por actividades metabólicas del cuerpo que libera calor; en caso de considerar este valor se recomiendan los siguientes según la actividad física: dormir 100 W, trabajo liviano 140 W, esfuerzo físico ligero 200 W, esfuerzo físico intenso 1.000 W (Bustamante, 2009).
6. En espacios de alta densidad ocupacional, la renovación de aire de diseño depende del espacio climatizado y el número de personas dentro de este. A modo de ejemplo, las salas de clases requieren de una ventilación mínima de 5 L/s por persona (Ministerio de Obras Públicas, 2011).

3.1.2 Refrigeración

Similar a la calefacción, los factores que influyen en la necesidad de refrigeración de un espacio corresponden a las ganancias por las superficies en contacto con el exterior, las renovaciones de aire, la radiación solar, el metabolismo de los ocupantes y el calor que emanan equipos y artefactos en funcionamiento.

A diferencia de la calefacción y, considerando que en verano los aportes solares tienen gran incidencia, estos no pueden omitirse en el cálculo de la carga térmica.

Con respecto a los aportes de ocupantes y artefactos, si se considera que el espacio es de baja densidad ocupacional y pocos equipos, como una casa, su aporte puede no ser considerado; pero, al igual que en el caso de calefacción, para espacios de mayor uso, los artefactos y equipos sí deberán ser tomados en cuenta.

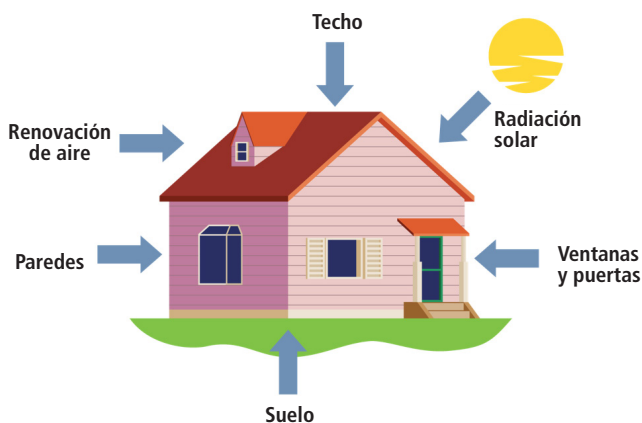


Figura 17. Fuentes de ganancias de calor que influyen en un sistema de refrigeración.

Las mismas consideraciones respecto a las superficies y renovaciones de aire aplicadas para la calefacción, se deben tener presentes también para refrigerar.

Metodología

En las próximas líneas veremos cómo calcular la potencia necesaria de un sistema de refrigeración y la demanda térmica total para los meses de verano.

Como mencionamos anteriormente, la potencia necesaria para el sistema de refrigeración dependerá de las ganancias de calor por superficies, las ganancias de calor por renovaciones de aire y las ganancias solares. Las ganancias por superficie y por renovaciones de aire dependen de la diferencia de temperatura que hay entre el interior y el exterior del espacio a climatizar. Al dimensionar un sistema, se debe considerar una temperatura interior constante que cumpla con el confort esperado. Por otro lado, las ganancias solares dependen de otros factores que se pueden ver en más detalle en el Anexo C.

Debido a que la temperatura exterior varía durante el día y a lo largo del año, el diseño del sistema debe estar pensado para ser capaz de operar en los momentos más calurosos. Para esto, debe considerarse la **temperatura máxima anual** de la localidad.

La potencia de refrigeración Q_{ref} se calcula como:

$$(5) \quad \dot{Q}_{ref}[W] = F_{pot\ ref} \left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (T_{m\acute{a}x\ amb} - T_{confort}) + \dot{q}_{sol\ ver} \cdot A_{edi}$$

Donde:

$F_{pot\ ref}$: Factor de seguridad de potencia de refrigeración

$T_{m\acute{a}x\ amb}$: Temperatura máxima ambiente [°C]

$\dot{q}_{sol\ ver}$: Ganancia solar en verano por área [W/m²]

A_{edi} : Superficie de la edificación a refrigerar [m²]

Al calcular la demanda térmica, la ganancia solar cambiará según el mes y dependerá de la temperatura promedio mensual $\bar{T}_{amb\ m}$, la temperatura máxima y mínima ambiente, así como la ganancia solar en verano e invierno:

$$(6) \quad \dot{q}_{sol\ m}[W/m^2] = \left(\frac{\dot{q}_{sol\ ver} - \dot{q}_{sol\ inv}}{T_{m\acute{a}x\ amb} - T_{m\acute{i}n\ amb}} \right) \cdot (\bar{T}_{amb\ m} - T_{m\acute{i}n\ amb}) + \dot{q}_{sol\ inv}$$

Al igual que en el caso de la calefacción, la energía mensual $Q_{ref\ m}$, que utilizará el sistema, dependerá de la cantidad de tiempo que se use la refrigeración.

Para cada mes del año, $\bar{T}_{amb\ m}$ será la temperatura exterior promedio y $\dot{q}_{sol\ m}$ la ganancia solar del mes. Multiplique estos valores por el número de horas h_m del mes correspondiente, y por un factor de operación de la refrigeración $F_{dem\ ref}$, así:

$$Q_{ref\ m}[Wh] = F_{dem\ ref} \left[\left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (\bar{T}_{amb\ m} - T_{confort}) + \dot{q}_{sol\ m} \cdot A_{edi} \right] \cdot h_m \quad (7)$$

Puede darse el caso que la temperatura ambiente sea menor que la de confort, dando un valor negativo en el parámetro. Debe sumarse normalmente con el aporte solar, que siempre tiene un valor positivo. Cuando el resultado de la ecuación anterior sea negativo, la demanda de refrigeración en ese mes será igual a cero.

Por último, para obtener la demanda anual del espacio Q_{ref} se deben sumar todas las demandas mensuales, así:

$$Q_{ref} = \sum_{m=1}^{12} Q_{ref\ m} \quad (8)$$

Aproximaciones

A continuación, se presentan algunas aproximaciones útiles para calcular la carga y demanda térmica de un edificio de manera fácil y rápida, obtenidas siguiendo la metodología anterior.

Los resultados presentados en esta sección usan como supuestos las condiciones ambientales y condiciones de aislación térmica descritas en las zonas climáticas de la norma NCh1079-2008; un uso residencial de los espacios, equivalente a usar el sistema un 70% respecto al total de horas de cada mes, y una temperatura de confort de 25 °C en verano (Bustamante, 2009).

Para el caso de la zona centro-sur de Chile, es recomendable considerar una ganancia solar de 44 W/m² en verano y una de 11 W/m² en invierno (ver Anexo C).

Para cada zona térmica de la zona centro-sur de Chile (ver Anexo B), se obtienen las siguientes necesidades de refrigeración por superficie construida:

Zona climática	Potencia calefacción [W/m ²]	Demanda mes máxima [kWh/(m ² ·mes)]	Demanda específica [kWh/(m ² ·año)]
4 CL	35	10	33
5 CI	59	19	72
6 SL	41	11	29
7 SI	49	13	39
8 SE	30	11	34
9 An ²	28	6	15

Tabla 11. Potencia de diseño y demanda específica de refrigeración por zona climática¹.

Recomendaciones

1. A temperaturas más altas y peor nivel de aislación térmica y hermeticidad al aire, aumentará la necesidad de refrigeración. Es muy importante aislar correctamente el espacio para asegurar el buen funcionamiento del sistema de refrigeración y lograr una óptima eficiencia energética.
2. Si bien la temperatura de confort depende de factores como las preferencias del ocupante, la velocidad del viento y la humedad relativa, entre otros, se recomienda usar **25 °C** para refrigeración. Disminuir la temperatura de refrigeración tendrá un impacto directo a la demanda del sistema, puesto que requerirá una mayor potencia y/o funcionar por más horas. En promedio, la disminución de un grado Celsius implica el **aumento del 8% en la potencia de refrigeración** y un **14% de la demanda anual**.
3. Para contar con un margen de seguridad, puede considerarse un factor de operación de calefacción $F_{ref\ pot}$ igual a 1,1, es decir, un 10% más que la potencia original.

3.1.3 Agua caliente sanitaria (ACS)

Otro uso particular que tiene la BCG es la producción de agua caliente sanitaria (ACS): agua que se calienta para ser utilizada en baños, cocina y lavaderos.

Como primer alcance, es importante mencionar que los sistemas de generación de ACS deben contar con algún método de prevención para la formación y reproducción de la *bacteria legionela*.

Metodología

La energía necesaria para la producción de ACS depende, principalmente, de la cantidad de agua que se consume y de cuánto se requiera calentar el agua. A mayor aumento de temperatura, mayor será el consumo. Para calcular la energía se usa la siguiente ecuación:

$$(9) \quad Q_{ACS\ m} = V_{ACS\ m} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{p\ H_2O} \cdot \frac{(T_{ACS} - T_{H_2O})}{3600}$$

Donde:

$Q_{ACS\ m}$: Demanda mensual para la producción de ACS [Wh]

$V_{ACS\ m}$: Volumen de agua caliente sanitaria consumida en un mes [m³]

ρ_{H_2O} : Densidad del agua igual a 1.000 kg/m³

$c_{p\ H_2O}$: Calor específico del agua (~4.180 J/(kg·K))

T_{ACS} : Temperatura del agua caliente sanitaria [°C]

T_{H_2O} : Temperatura del agua fría de la llave [°C]

Si se considera el suministro de ACS en un sistema, la demanda debe sumarse a la de climatización, para determinar el consumo final. La suma de ambas dará la demanda anual.

Aproximaciones

La Ley 20.365 establece una demanda de ACS de 40 L/día por persona, con una temperatura de operación de 45 °C (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2013). Este consumo puede ser mucho mayor si el uso del agua es ineficiente por duchas largas, etc.

Considerando una temperatura de 10 °C en la red de agua potable, se puede asumir que la demanda térmica para la producción de ACS es de **50 kWh/mes por persona o 600 kWh/año por persona**.

Recomendaciones

1. En caso de no tener una producción intensiva de ACS, esta se puede hacer cuando la calefacción esté apagada u opere a una menor capacidad, evitando aumentar la potencia de diseño de la bomba de calor. La potencia de generación de ACS depende de la rapidez a la que se quiera calentar el agua y, por lo general, los termos eléctricos de ACS para una vivienda poseen una potencia de 1 – 2 kW.
2. Un uso ineficiente del agua caliente -como es dejar la llave abierta o tomar duchas largas- implicará un consumo mucho mayor al expuesto anteriormente y se traducirá, también, en un aumento de la demanda. En promedio, una ducha consume cerca de 10 L/min, un lavatorio 8 L/min y un lavaplatos 12 L/min. Se recomienda calcular la producción de ACS necesaria, ya que el aumento en el consumo es proporcional al aumento de la demanda.

Ejemplos

En Coyhaique, CEGA implementó un sistema de calefacción geotérmica en las salas del Liceo Altos del Mackay, climatizando cerca de 580 m². Debido a su uso, se consideró una renovación de aire de 5 L/s por persona en horario de oficina. Se calculó una demanda anual inicial de 55.000 kWh_t y una potencia de diseño de 70 kW_t, equivalentes a 95 kWh_t/m²-año y 121 W_t/m². Al liceo se le hizo una mejora de aislación térmica en muros y techumbre, reduciendo la demanda anual a 35.000 kWh_t y la potencia a 50 kW_t, equivalentes a 60 kWh_t/m²-año y 86 W_t/m².

3.2 Sistemas de distribución de calor

La distribución de la energía térmica en los recintos a climatizar se produce mediante el transporte de un fluido caloportador desde la bomba de calor hasta los equipos emisores de calor. En los equipos emisores, el agua intercambia calor con el aire y de esta manera se produce la climatización. Luego, el fluido de trabajo regresa a la bomba de calor y se reinicia el ciclo para volver a ser distribuido hacia los equipos emisores. El sistema en su totalidad, contemplando tuberías y emisores, se denomina sistema de distribución. Este mismo fluido caloportador es el que puede usarse para calentar agua sanitaria para las duchas y lavados.

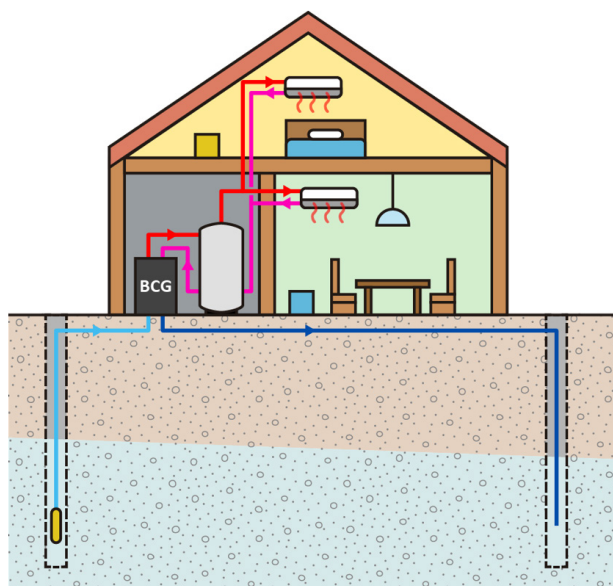


Figura 18. Esquema de calefacción con BCG: el agua de pozo alimenta BCG y luego es devuelta al acuífero. BCG produce agua caliente que se acumula en un estanque y se distribuye dentro de la casa.

Los distintos tipos de sistema de climatización operan bajo dos medios de transferencia de calor con el aire del espacio: por convección natural (losa radiante y radiadores) y por convección forzada (fan coil y unidad manejadora de aire).

A continuación, se muestran los sistemas más habituales de distribución para una bomba de calor, así como la temperatura a la que, por lo general, operan estos sistemas. Cabe señalar que estos sistemas pueden operar a una temperatura distinta a la presentada aquí, pero tendría un impacto en la potencia real que ofrecen, provocando tener que instalar un equipo más grande o una mayor cantidad de lo señalado por el fabricante.

Para mayor detalle de cada equipo o sistema de calefacción puntual se recomienda consultar especificaciones técnicas.

Tipo de sistema de distribución	Losa Radiante	Fan coil / UMA	Radiadores
Temperatura calefacción [°C]	35	50	60 – 90
Temperatura refrigeración [°C]	15	7	No puede
COP de la BCG con colector cerrado	5,0	3,5	3,0
COP de la BCG con colector abierto	7,0	4,0	3,5

Tabla 12. Características de sistemas de distribución.

3.2.1 Losa radiante

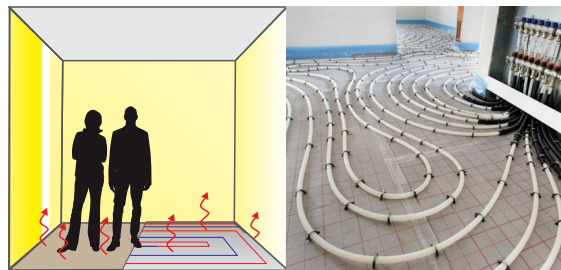


Figura 19. Esquema de funcionamiento de losa radiante y tubería de instalación de losa radiante.

Corresponde a una red de tuberías distribuidas como serpentina en una superficie (suelo, muro o techo, siendo estos dos últimos menos frecuentes), por donde se hace circular el caloportador. Las tuberías son cubiertas por un revestimiento al que transfieren calor y que, a su vez, transfiere el calor al espacio, generando una climatización “invisible” y uniforme (Figura 19).

En comparación a los demás sistemas de distribución descritos en la guía, la losa radiante requiere menor temperatura de operación del caloportador para calefacción y mayor para refrigeración, siendo así la instalación con la operación más eficiente para la BCG.

Su desventaja es que requiere una obra civil de mayor envergadura para su instalación, subiendo con eso el valor de la inversión inicial.

Aproximaciones

Las temperaturas de operación dependerán de la superficie utilizada para climatizar. En suelo radiante, la temperatura del **caloportador para calefacción** oscila en torno a los **35 °C**, mientras que para **refrigeración** es de **15 °C**.

Estas temperaturas de operación están limitadas por la temperatura que tomará el piso del espacio a climatizar. Por efectos fisiológicos en los ocupantes, la máxima temperatura del piso debe ser menor a 29 °C y la mínima de 18 °C.

3.2.2 Radiadores

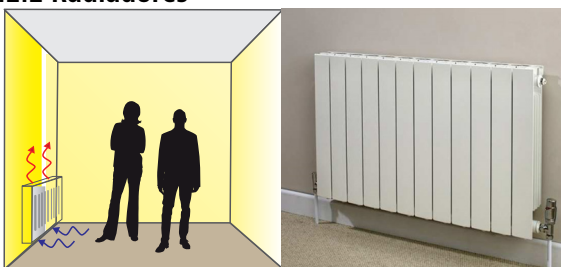


Figura 20. Esquema de funcionamiento de radiador y radiador instalado.

Los radiadores son aparatos contruidos con materiales de buena conductividad térmica (aluminio, acero inoxidable). Por sus rejillas circula el caloportador, cediendo calor al aparato, que

a su vez, cede el calor al ambiente por convección natural y radiación. Cada radiador tiene una entrada de agua caliente en su parte superior y una salida en la parte inferior. Se instalan en las paredes, por lo general bajo las ventanas, para compensar la pérdida de calor producidas a través del vidrio, generando una calefacción focalizada, distribuida mediante un circuito cerrado.

En comparación a los otros sistemas de distribución descritos en la guía, los radiadores solo pueden usarse para calefacción y requieren la mayor temperatura de operación del caloportador, volviéndolos la opción menos eficiente para la BCG. Sin embargo, este emisor es el más común, debido a su bajo costo, durabilidad y rápido calentamiento.

Aproximaciones

La temperatura del caloportador es, por lo general, de **60 – 90 °C**, reduciendo la eficiencia de la BCG. Existen **modelos de baja temperatura** que operan desde **50 °C** y que aumentan la liberación de calor subiendo el flujo de aire por medio de un pequeño ventilador en su interior.

Recomendaciones

1. Debido al efecto que tiene en la eficiencia, no se recomienda usar radiadores tradicionales en un sistema de calefacción con BCG.

3.2.3 Fan coil o ventiloconvector



Figura 21. Esquema de funcionamiento de fan coil y fan coil instalado

En términos generales, un fan coil es un dispositivo formado por un ventilador (fan) y un intercambiador de calor (coil). Es un equipo por el cual circula el caloportador, generando la transferencia de calor hacia el ambiente por medio del flujo de aire impulsado por un ventilador. Esta impulsión de aire caliente permite una rápida climatización, recirculando el aire de la habitación.

Los fan coils poseen diversos modelos pueden instalarse tanto en la parte inferior como superior de los muros, sujetos bajo el techo o empotrados en este. Dado que usan ventiladores, **requieren de una conexión eléctrica** para cada equipo, aunque de bajo consumo.

Debido a la condensación del agua en el aire dentro del equipo, producto de la disminución de temperatura cuando se refrigera, los equipos también requieren de un desagüe hacia el exterior.

En general, estos sistemas de distribución tienen una eficiencia intermedia, entre la losa radiante y los radiadores.

Aproximaciones

La temperatura típica del **caloportador en calefacción** es de **50 °C**, mientras que en refrigeración es de **7 °C**.

Recomendaciones

1. Tomando en consideración lo expuesto, si no se puede intervenir el piso de la vivienda, se sugiere utilizar fan coils para la implementación de BCG.

3.2.4 Conductos de aire o Unidad Manejadora de Aire (UMA)

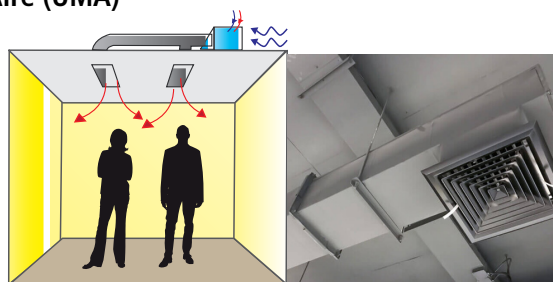


Figura 22. Esquema de funcionamiento de UMA y ducto de distribución.

Estos equipos operan bajo el mismo principio que los fan coils, incentivando la transferencia de calor del caloportador por medio de convección forzada e impulsando el aire con ventiladores. La diferencia con los fan coils está en que dicho intercambio se hace en un equipo central, para luego ser distribuido por ductos de aire dentro de los espacios. Esto permite renovar el aire al interior de los ambientes, ya que permite tomar aire del exterior y no solo recircular el aire adentro.

Por lo general, los ductos se instalan en los cielos, cubiertos por cielos falsos y quedando a la vista solo los elementos terminales (rejillas, difusores o toberas); sin embargo, también se pueden instalar a plena vista.

Debido a la cantidad de material y obra que implica su instalación, su implementación es más costosa.

Aproximaciones

Posee una temperatura del caloportador similar a los fan coils, **calefacción a 50 °C y refrigeración de 7 °C**.

Recomendaciones

1. Debido a la alta inversión requerida, se sugiere instalarlos solo en espacios con alta ocupación, que obliguen a tener una alta renovación de aire, como escuelas, oficinas, hospitales, etc.
2. Estos equipos pueden contar con un recuperador de calor, el cual consiste en un intercambiador de calor entre el aire entrante y el aire expulsado, lo que permite que el

aire entre a una temperatura más cercana a la de operación, reduciendo la demanda general de la BCG. Debido a que este sistema genera un consumo eléctrico adicional, producto del ventilador necesario para expulsar el aire, es recomendable evaluar su conveniencia económica con un cálculo al detalle de la eficiencia del sistema.

3.2.5 Estanque de ACS



Figura 23. Esquema de estanque de ACS y estanque instalado.

El estanque de Agua Caliente Sanitaria se rellena para acumular y calentar el agua de la red de agua potable, que luego es distribuida a la red de agua caliente. Estos recipientes vienen recubiertos con aislante, para disminuir las pérdidas de calor con el ambiente.

Cabe señalar que, dado que el fluido que saca el calor de la BCG no necesariamente es agua potable no debe alimentar directamente a los grifos o duchas.

Es mediante un serpentín ubicado dentro de este estanque, que el caloportador circula cediendo calor al agua acumulada que luego será distribuida en la red de agua caliente.

Aproximaciones

El tamaño del estanque dependerá del consumo requerido y del número de personas que lo ocuparán, partiendo generalmente desde 150 L para cubrir la necesidad de 4 personas.

3.3 Dimensionar el colector geotérmico

Luego de determinar la carga térmica del sistema, se debe seleccionar el tipo de colector geotérmico más adecuado para aprovechar la energía del suelo. En esta sección encontrará orientaciones para reconocer el recurso disponible en el lugar del proyecto, el área de terreno disponible para hacer la instalación, la posibilidad de extraer agua desde un acuífero y las propiedades térmicas del suelo.

Tal como se explicó en detalle en el capítulo relativo al Recurso Geotérmico, existen diferentes tipos de colectores geotérmicos:

colectores horizontales, verticales cerrados, *slinky* o tipo malla, verticales abiertos y *pond loop*.

Un resumen visual de los tipos de colectores se puede apreciar en la Figura 24.

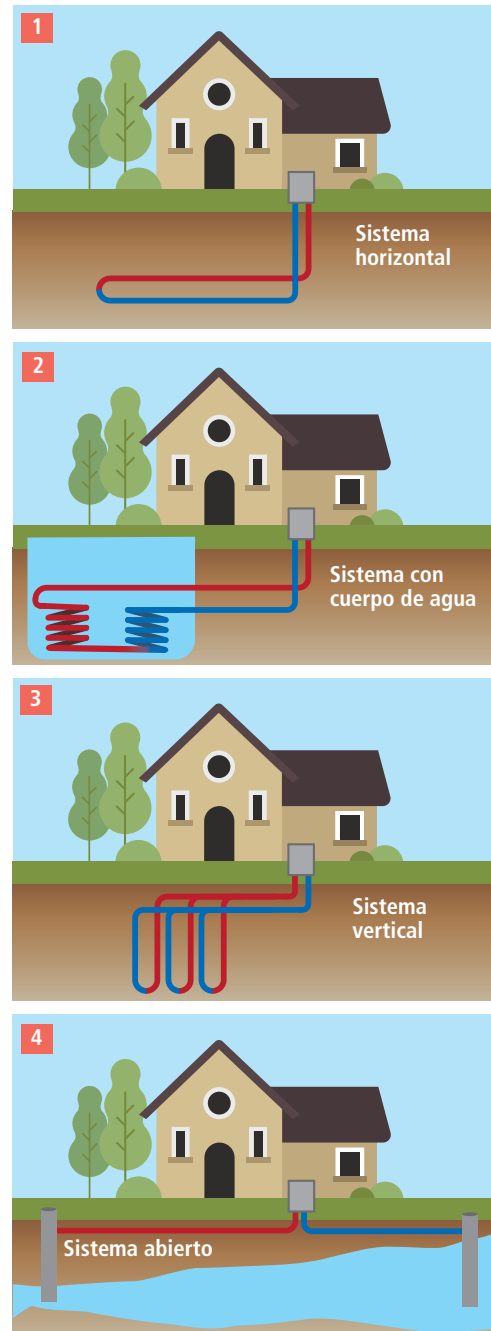


Figura 24. Tipo de colectores geotérmicos. (1) colectores horizontales enterrados entre 1 y 4 metros. (2) *pondloop*, colectores utilizando un cuerpo de agua superficial. (3) colectores tipo malla, enterrados entre 1 y 4 m (4) colectores verticales abiertos, pozos con extracción de agua subterránea.

En primer lugar, es importante considerar que cada colector tiene una metodología particular, a veces similares, pero con supuestos diferentes.

3.3.1 Colectores horizontales

Los colectores horizontales consisten en tuberías enterradas a baja profundidad (no más de cuatro metros), que aprovechan la estabilidad termal del suelo durante el año. El fluido que circula por el colector logra adquirir la energía del suelo, que será aprovechada posteriormente por el sistema de calefacción o refrigeración. En palabras sencillas, cuando el fluido que circula por los colectores pasa por la bomba geotérmica, entrega energía a la bomba de calor, que es utilizada para calefacción, refrigeración o cualquier otro proceso productivo. Después de pasar por la bomba geotérmica, el fluido que circula por los colectores regresa con menor temperatura (en el caso de calefacción) y recupera ese calor en su contacto con el suelo.

Metodología

Un parámetro fundamental para el diseño de colectores horizontales es la temperatura del suelo durante todo el año, a la profundidad que se quieran enterrar los colectores. La temperatura máxima y mínima anual del terreno puede ser estimada a partir de la siguiente ecuación, dependiente de parámetros del suelo y la temperatura ambiente:

$$(10) \quad T_{s \max}(z) = \bar{T}_s + A_s \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \alpha}}\right)$$

$$(11) \quad T_{s \min}(z) = \bar{T}_s - A_s \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{365 \alpha}}\right)$$

Donde:

\bar{T}_s : Temperatura media anual del suelo [°C], que puede ser medida con un termómetro enterrado durante todo un año o aproximarse a la temperatura media anual del ambiente.

A_s : Amplitud anual de la temperatura promedio diaria del ambiente, que se calcula tomando la temperatura promedio diaria máxima registrada en un año, restándole la temperatura promedio diaria mínima registrada en el mismo año [°C], finalmente dividiéndolo por dos. En el caso de no tener esos datos, pueden estimarse utilizando la temperatura mínima y máxima mensual del ambiente.

z : Profundidad medida en [m]

α : Difusividad térmica del suelo medida en [m²/día].

Un resumen gráfico de cómo varía la temperatura durante el año, en los primeros 10 metros bajo tierra, puede observarse en la Figura 25.

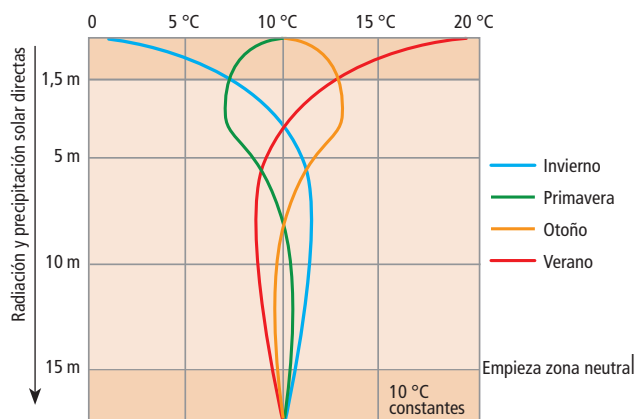


Figura 25. Temperatura del subsuelo a diferentes profundidades en varios momentos del año.

Otro parámetro fundamental es la temperatura de salida de la bomba de calor al colector, la que depende de las especificaciones técnicas de cada equipo. Una aproximación para diseñar los colectores puede obtenerse mediante la siguiente fórmula, obtenida del manual de Retscreen (CANMET, 2005):

$$T_{colector} = \begin{cases} \max(T_{suelo \min} - 8 \text{ °C}; -7 \text{ °C}), & \text{Calefacción} \\ \min(T_{suelo \max} + 11 \text{ °C}; 40 \text{ °C}), & \text{Refrigeración} \end{cases}$$

Las resistencias térmicas del suelo y las tuberías representan la dificultad para intercambiar calor de dichos materiales. Para definir la resistencia térmica del suelo, debemos medir la conductividad térmica del suelo λ_s (ver capítulo de recursos), que es el inverso proporcional de la resistencia térmica (ecuación (12)).

Para medir la conductividad térmica del suelo se usa un conductímetro, pero en su ausencia, se puede estimar según el tipo de suelo (sedimentos o roca, y si está saturado en agua o no) como se muestra en el capítulo de recursos.

Por otro lado, la resistencia de las tuberías se estima en base a sus características geométricas (diámetro interior de tubería ϕ_i , diámetro exterior de tubería ϕ_e y la conductividad térmica del material λ_t mediante la ecuación (13):

$$R_s = \frac{1}{\lambda_s} \quad (12)$$

$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln\left(\frac{\phi_e}{\phi_i}\right) \quad (13)$$

Por último, es necesario definir el factor de carga del sistema (para calefacción y refrigeración), que representa la fracción de horas completamente cargada durante el mes de diseño (el mes más frío y caliente), versus las horas de ese mes [9]. Se calcula con la ecuación (14), donde $Q_{mes \max}$ es la máxima demanda mensual medida en [kWh], h_{mes} son las horas de dicho mes y Q' es la potencia de la BCG medida en [kW]:

$$(14) \quad F = \frac{Q_{mes\ máx}}{h_{mes} \cdot \dot{Q}}$$

Con dichos parámetros podemos calcular el largo del colector $L_{colector}$ [m] necesario para satisfacer la demanda termal de nuestro sistema geotérmico mediante las ecuaciones (15), (16) y (17):

$$(15) \quad L_{colector\ cal} = \dot{Q}_{cal} \cdot \frac{COP - 1}{COP} \cdot \frac{R_t + R_s \cdot F_{cal}}{T_{s\ mín}(z) - T_{colector}}$$

$$(16) \quad L_{colector\ ref} = \dot{Q}_{ref} \cdot \frac{EER + 1}{EER} \cdot \frac{R_t + R_s \cdot F_{ref}}{T_{colector} - T_{s\ máx}(z)}$$

$$(17) \quad L_{colector} = \max(L_{colector\ cal}; L_{colector\ ref})$$

Donde Q_{cal} y Q_{ref} es la potencia de calefacción y refrigeración [W] respectivamente. Finalmente, el área de los colectores dependerá de la distancia "s" que hay entre colectores según:

$$(18) \quad A_{colector} [m^2] = L_{GHE} \cdot s$$

Aproximaciones

Una aproximación de primer orden para definir si es factible utilizar colectores horizontales, incorporando lo explicado en el ejemplo 1, es estimar que el área de colectores necesaria equivale a un rango de **2,0 a 2,5 veces el área que se requiere calefaccionar**. Es decir, si queremos calefaccionar una casa de 100 m², necesitamos un espacio libre para enterrar colectores de 200 a 250 m². La medida de la instalación puede también ser aproximada a **50 m/kW** de metros lineales de colector o **40 m²/kW** de superficie.

Es importante considerar también que el área donde se entierran los colectores quedará inhabilitada para otra construcción, ya que es fundamental mantener la radiación directa del sol, para conservar el equilibrio térmico entre el suelo y el sistema geotérmico.

Recomendaciones

1. Es importante mantener las tuberías separadas para no interferir el intercambio de calor de cada segmento del colector. Una regla general es separar las tuberías entre 0,5 y 0,8 m para tuberías de 32 mm o entre 1,2 y 1,5 m para tuberías de diámetro 40 mm (Uponor, 2013).

Ejemplo 1: Cálculo aproximativo de colector horizontal

Tomando el caso de la casa de 100 m² en Temuco, que se utilizó en el cálculo de demanda, con una potencia de diseño es de $Q_{max} \sim 4,9$ kW, y la demanda térmica sería 1.900 kWh al mes para el mes más frío, agosto. La bomba estaría encendida a máxima potencia durante $1.900/4,9 = 388$ horas. Como agosto tiene 744 horas, el factor de carga es 0,51.

Un suelo de humedad estándar para la región de Temuco tendría una conductividad de 1,1 W/(m·K) y una difusividad térmica de 0,025 m²/día. Con estos parámetros del suelo, y aplicando la ecuación (11) con los valores de temperatura de Temuco, la temperatura mínima del suelo sería 6,8 °C a 1,5 m de profundidad. Además, la resistencia térmica del suelo es $1/1,1 = 0,91$ m·K/W.

Por último, si pensamos en una tubería estándar de HDPE cuya resistencia es 0,08 mK/W, considerando un radio interno de 18 mm, uno externo de 22 mm y una conductividad de 0,4 W/mK. Asumiendo un COP de 3,5, usual en colectores horizontales, se puede aplicar la ecuación (15) y (18):

$$L_{GHE} = q_{max} \left[\frac{(COP_h - 1) \cdot (R_t + R_s \cdot F_h)}{COP_h \cdot (T_{s\ mín} - T_{e\ mín})} \right] = 4,9 \cdot \left[\frac{(3,5 - 1) \cdot (0,08 + 0,91 \cdot 0,51)}{3,5 \cdot (6,8 - 0,8)} \right]$$

$$L_{GHE} = 317 \text{ m}$$

$$A_{GHE} = L_{GHE} \cdot s = 247 \cdot 0,8 = 253 \text{ m}^2$$

3.3.2 Colectores verticales cerrados

Similar a los colectores horizontales, los colectores verticales aprovechan la estabilidad térmica del suelo y hacen circular el fluido por una tubería cerrada que logra un equilibrio térmico con el suelo. La gran diferencia entre colectores horizontales y verticales es que los segundos son enterrados en sondas o pozos de gran profundidad (generalmente entre 20 y 200 metros de profundidad), por lo que se requiere un área más pequeña para la instalación.

Metodología

La variable de diseño para esta solución es el largo de colectores y, por lo tanto, metros de perforación. Como una aproximación de primer orden, se pueden utilizar las mismas fórmulas de los colectores horizontales ((15), (16) y (17)).

La única diferencia radica en la estimación de temperatura mínima y máxima del suelo. En este caso, tanto en refrigeración como calefacción, se ocupa la temperatura media del año, ya que, a las profundidades de estos colectores (~50 – 200 m), la temperatura del suelo se ve poco afectada por las variaciones estacionales en superficie a lo largo del año. Si no se tiene un registro en profundidad de la temperatura del suelo, se puede estimar utilizando la temperatura promedio anual del ambiente. Se recomienda usar un valor de conductividad y difusividad térmica promedio del subsuelo.

Si la demanda es muy alta, se puede hacer más de una sonda para cumplir con la necesidad. Estas deben estar separadas al menos 6 m entre sí para evitar interferencia entre ellas. Además, se sugiere que las sondas se encuentren a más de 3 m de la edificación, de forma que haya espacio para su construcción.

Aproximaciones

Bajo la misma lógica de los colectores horizontales, se pueden estimar los metros de perforación necesarios y aproximarlos a **25 m/kW**. En ese sentido, una casa de 5 kW requiere de 2 sondas de 60 m. Cabe recordar que este valor dependerá de las propiedades del suelo y la demanda que se le dé al colector.

Recomendaciones

1. Si se desea realizar el diseño para una construcción de gran tamaño, por ejemplo, una escuela u hospital, se debe considerar un test de respuesta térmica (ver TRT en capítulo de Recursos).

3.3.3 Colectores verticales abiertos

Los colectores verticales abiertos son pozos que extraen agua subterránea y realizan un intercambio de calor con dicho fluido. Una ventaja de este colector es que, al aprovechar el movimiento del acuífero, la cantidad de masa disponible para el intercambio de calor es mucho mayor que un vertical cerrado.

Metodología

La variable de diseño es el caudal de agua C_{cal} medido en [L/s] que satisface la necesidad térmica de nuestro sistema geotérmico y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$(19) \quad C_{cal} = \dot{Q}_{cal} \cdot \frac{(COP - 1)}{COP} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O} \cdot c_p \cdot (T_{H_2O f} - T_{H_2O i})} \cdot 1000$$

$$(20) \quad C_{ref} = \dot{Q}_{ref} \cdot \frac{(EER + 1)}{EER} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O} \cdot c_p \cdot (T_{H_2O f} - T_{H_2O i})} \cdot 1000$$

Con ρ_{H_2O} la densidad del agua (1.000 kg/m³); c_p el calor específico del agua (~4.180 J/(kg·K)); $T_{H_2O i}$ y $T_{H_2O f}$ la temperatura del agua subterránea inicial (entrada a la BCG) y final (salida de la BCG).

Tomando como referencia la temperatura ambiente promedio anual de cada zona climática como representativa de la temperatura del acuífero, se puede estimar el caudal necesario para satisfacer la demanda de una casa estándar de 100 m². Estos resultados se obtienen pensando que se extraen 3 °C del acuífero y que este se encuentra a 10 m de profundidad. En base a estos supuestos generales sin importar la zona climática, se requiere de **0,06 L/s por kW** o 0,19 L/min por m² a calefacción, que puede ser utilizada como una estimación de primer orden.

Ejemplo 2: Cálculo aproximativo de caudal de colectores abiertos

Utilizando el mismo caso de una casa de 100 m² en Temuco, donde la potencia de diseño es de $Q_{max} \sim 4,9$ kW y la demanda térmica de 1.900 kWh al mes, para el mes más frío, agosto, se ocupan los valores estándar de agua que aplican al agua subterránea $\rho_{H_2O} = 1.000$ kg/m³ y $c_p = 4.180$ J/(kg·K). Con una temperatura del acuífero de 11,7°C, se puede estimar que el COP sería 4,2. Con esto se puede aplicar la ecuación (19)

$$C_{cal} = 4900 \cdot \frac{(4,2 - 1)}{4,2} \cdot \frac{1}{1000 \cdot 4180 \cdot (3)} \cdot 1000$$

$$C_{cal} = 0,298 \frac{L}{s} = 17,9 \frac{L}{min}$$

Recomendaciones

1. En general, la temperatura de los acuíferos entre Santiago y Coyhaique varía entre 14 y 8 °C cuando no hay influencia de aguas termales. Por otro lado, se recomienda sacar entre 3-5 °C del fluido, lo que quiere decir que $T_{H_2O f}$ y $T_{H_2O i}$ es entre 3 y 5 °C. Por último, el COP es el factor de eficiencia del sistema geotérmico, que en sistemas abiertos por lo general es de 4.
2. Otro factor que es fundamental a considerar en estos sistemas, es que la cantidad de caudal requerido para nuestra instalación no necesariamente se puede extraer del acuífero bajo nuestros pies (ver factibilidad de sistemas abiertos en capítulo de recursos). Es necesario extraer menos caudal del que el acuífero permite, para hacer de la geotermia una tecnología renovable. Si se extrae agua sin un equilibrio con el entorno, a largo plazo el recurso se agotará, afectando al ecosistema y perdiendo la inversión realizada. Para saber cuánto es posible extraer de un pozo, es necesaria la asesoría de un hidrogeólogo. Por otro lado, la variable a definir para el diseño de estos colectores es la demanda de caudal que requiere el sistema geotérmico.
3. Es importante notar que la profundidad del acuífero influye de forma importante en la eficiencia real de sistema, por lo que es importante considerar esta variable para estimar los beneficios que traerá desarrollar un sistema geotérmico. Además, se deberían considerar alrededor de cinco metros de abatimiento. Mientras más profundo esté el nivel de agua, mayor potencia se requerirá para moverla. Por lo general, los sistemas abiertos parten con una eficiencia del 400%, bajando 10 puntos porcentuales por cada 5 m de profundidad a la que se encuentre el agua subterránea. Es decir, un sistema con un pozo con agua a 10 m de profundidad tendrá una eficiencia de 380%, mientras que uno con agua a 50 m tendrá una eficiencia de 300%.

3.3.4 Otros colectores

Existen otras configuraciones de colectores, que innovan respecto a los colectores tradicionales aquí mencionados. Un ejemplo de ellos son los llamados *Slinky*, que al igual que los colectores horizontales, ocupan la estabilidad térmica del suelo a baja profundidad durante el año para intercambiar calor. La única diferencia que hay entre estos, es que los colectores se enrollan para aprovechar mejor el suelo, disminuyendo el área total necesaria para el colector, representando una opción para lugares con espacio reducido para su instalación.

Además, están los colectores *Pond loop*, que consisten en una tubería enrollada en un cuerpo de agua, como un lago o un río. Son similares a los colectores horizontales cerrados, con la diferencia que el equilibrio térmico se logra con el cuerpo del agua y no con el suelo.

Pueden existir otras configuraciones que se crean a partir de la disponibilidad de espacio y condiciones del recurso. Por lo tanto, es necesario estudiar estas alternativas junto a los proveedores para realizar su dimensionamiento, que dependerá de sus características particulares.

3.4 Equipos complementarios del sistema

A continuación se presentan algunos equipos complementarios a los sistemas de bombas de calor para su correcto funcionamiento. Estos equipos son necesarios dependiendo de la instalación que se haga.

3.4.1 Estanque de inercia

Corresponde a un tanque donde se acumula el fluido caloportador producido en la BCG, para luego ser distribuido a los emisores. Su función es acumular energía en forma de agua caliente o fría, para usarse sin necesidad de ser producida con la BCG. A diferencia de los tanques de ACS, estos no requieren de un serpentín y el caloportador es vertido directamente en el tanque.

Dependiendo del uso que se les dé, se pueden separar en:

- **Estanque de inercia:** Actúan como una reserva para absorber el calor generado por la BCG cuando la demanda del sistema es baja. Esto disminuye el número de encendidos-apagados del sistema, mejorando la vida útil de la BCG, amortiguando la demanda y permitiendo cubrir parte de los peak de demanda de calor al inicio de la jornada.
- **Acumulador de calor:** Permiten suplir parcial o completamente la demanda de climatización por un período de tiempo, acumulando una gran cantidad de fluido caloportador (más que un estanque de inercia) producido en la BCG.

Metodología

El tamaño de un estanque de inercia depende de las mínimas de demanda del espacio y de climatización de la BCG. Para BCG se puede usar una relación sencilla de **25 L/kW_t** (Homemicro, 2016).

El tamaño de un acumulador de calor, por otro lado, depende de la demanda de climatización que se desea cubrir y del rango de temperatura de operación del acumulador (temperatura inicial del acumulador menos temperatura final).

Recomendaciones

1. El uso de un acumulador es particularmente útil cuando se tiene una tarifa de consumo diferenciada (usualmente en las tardes). De este modo se evita la operación de la BCG cuando la tarifa sea más elevada, usándose solo el acumulador, y reduciendo los costos operacionales.
2. Debido a que un estanque de inercia agrega un costo extra de inversión, requiere espacio y genera una ligera pérdida de eficiencia, se puede decidir no instalarlo si el espacio a climatizar mantiene bien la temperatura.
3. Cuando en el sistema la BCG y el sistema de distribución tengan sus propias bombas de circulación, si no se instala un estanque de inercia requerirá de un separador hidráulico. Este separa el circuito primario de la BCG del circuito secundario de distribución. El separador hidráulico actúa como bypass entre la impulsión y el retorno, evitando las interferencias entre las bombas de varios circuitos, mejorando la circulación del caloportador. Este equipo es mucho más pequeño en comparación al estanque, pero no tiene la capacidad de acumular energía.



Foto 12. Estanque de inercia del proyecto Escuela Mackay. CEGA.

3.4.2 Intercambiador de calor

Foto 13. Imagen de proyecto FIC Tomates. CEGA.



Tal como su nombre lo indica, es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos en movimiento. Estos dispositivos compactan una gran superficie de contacto entre ambos fluidos, sin mezclarlos, lo que aumenta la transferencia de calor.

Existen distintos tipos, según las características de fluidos que operen. Los sistemas con BCG ocupan un intercambiador de calor de placas, puesto que trabajan con líquidos. Las BCG cuentan con intercambiadores dentro de ellas para hacer el intercambio con el circuito del colector y el circuito de distribución. Los intercambiadores externos a la bomba se ocupan para separar un fluido de la BCG, por lo general en colectores abiertos, para no dañar la BCG.

Metodología

El tamaño del intercambiador depende de los caudales de los sistemas, de la potencia de transferencia de calor que se necesite y de la corrosividad del agua. En base a esto, el fabricante debería indicar el modelo requerido.

Recomendaciones

1. Se recomienda su uso en sistemas abiertos, de forma de separar el agua extraída desde el acuífero del circuito de la BCG. De esta forma, se evita que elementos de las aguas entren y dañen la bomba de calor, reduciendo su vida útil.

3.4.3 Bombas de circulación

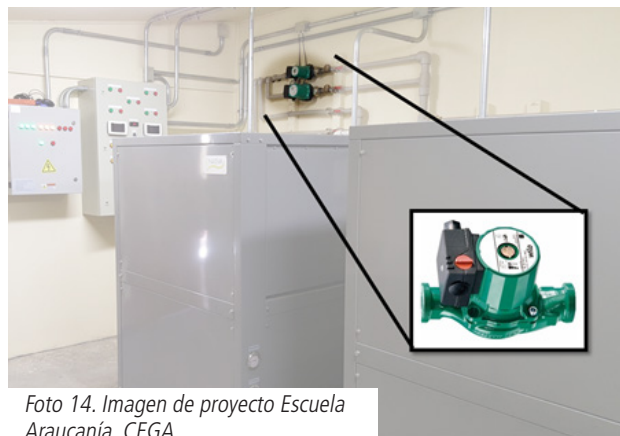


Foto 14. Imagen de proyecto Escuela Araucanía. CEGA.

Son equipos cuya función es hacer circular el agua, venciendo las pérdidas de carga o presión del circuito. Estas pérdidas de carga se producen por el roce del fluido caloportador con las paredes de las tuberías, singularidades del trayecto (curvas, división del flujo, válvulas, etc.), y la presencia de equipos en el circuito (intercambiadores de calor, fan coil, radiador, etc.). En general, en cualquier sistema de circulación hidráulico es necesaria una bomba de circulación para mantener el sistema funcionando.

Metodología

Las pérdidas por roce dependen principalmente de la velocidad de circulación, así como el largo de las tuberías, su diámetro y la materialidad de estas. Las pérdidas por singularidades dependen de la velocidad de circulación, así como el tipo de las mismas (por ejemplo, codos en las tuberías). Por último, el fabricante de los equipos debería entregar la información del caudal necesario y pérdida de carga de estos.

La mayor suma posible de pérdidas de carga de los trayectos corresponde a la pérdida que se debe vencer. Con este valor y el caudal de circulación, se puede escoger la bomba de circulación necesaria para el circuito, idealmente un modelo que tenga su mayor eficiencia en las condiciones de operación.

3.4.4 Bomba hidráulica de pozo (sistemas abiertos)

Al igual que las bombas de circulación, su función es mover agua venciendo las pérdidas de carga. Son necesarias en colectores abiertos para bombear agua del pozo y, a diferencia de los otros sistemas, agregan al cálculo de pérdidas de carga la columna de agua que hay que levantar para sacar el agua del acuífero subterráneo a la superficie, donde se encuentra la BCG.

Las bombas de pozos son cilindros que se introducen en la parte inferior del pozo, sumergidas en el agua subterránea, y desde allí bombean el agua. Las bombas deben estar siempre sumergidas, puesto que el ingreso de aire a estas las dañaría gravemente.

Metodología

Su selección dependerá del caudal que requiera la BCG y de la pérdida de carga del sistema.

A diferencia de los demás elementos expuestos, este equipo puede implicar un consumo eléctrico no despreciable, lo que bajará la eficiencia global del sistema (ver sección 3.5.1). Este consumo dependerá del caudal, profundidad del agua subterránea y la eficiencia de la bomba en el rango de operación.

Recomendaciones

1. Debido a que el consumo de la bomba depende fuertemente de su eficiencia, partiendo desde un 70% y pudiendo llegar a valores tan bajos como el 10%, se recomienda buscar e instalar un modelo que tenga su mayor eficiencia en las condiciones de operación del sistema.
2. En sistemas con BCG con tecnología INVERTER se sugiere instalar un variador de frecuencia u otro equipo que permita disminuir el caudal extraído. Esto se hace para evitar bombear más agua de la necesaria, cuando la BCG opera a una potencia menor a la máxima, y así reducir el consumo eléctrico de la bomba de pozo.
3. Las bombas hidráulicas se dañan cuando el pozo se seca, por lo que se debe tener cuidado con el caudal extraído, de modo de no bajar el nivel del acuífero bajo la bomba.



Foto 15. Imagen de proyecto Escuela Araucanía. CEGA.

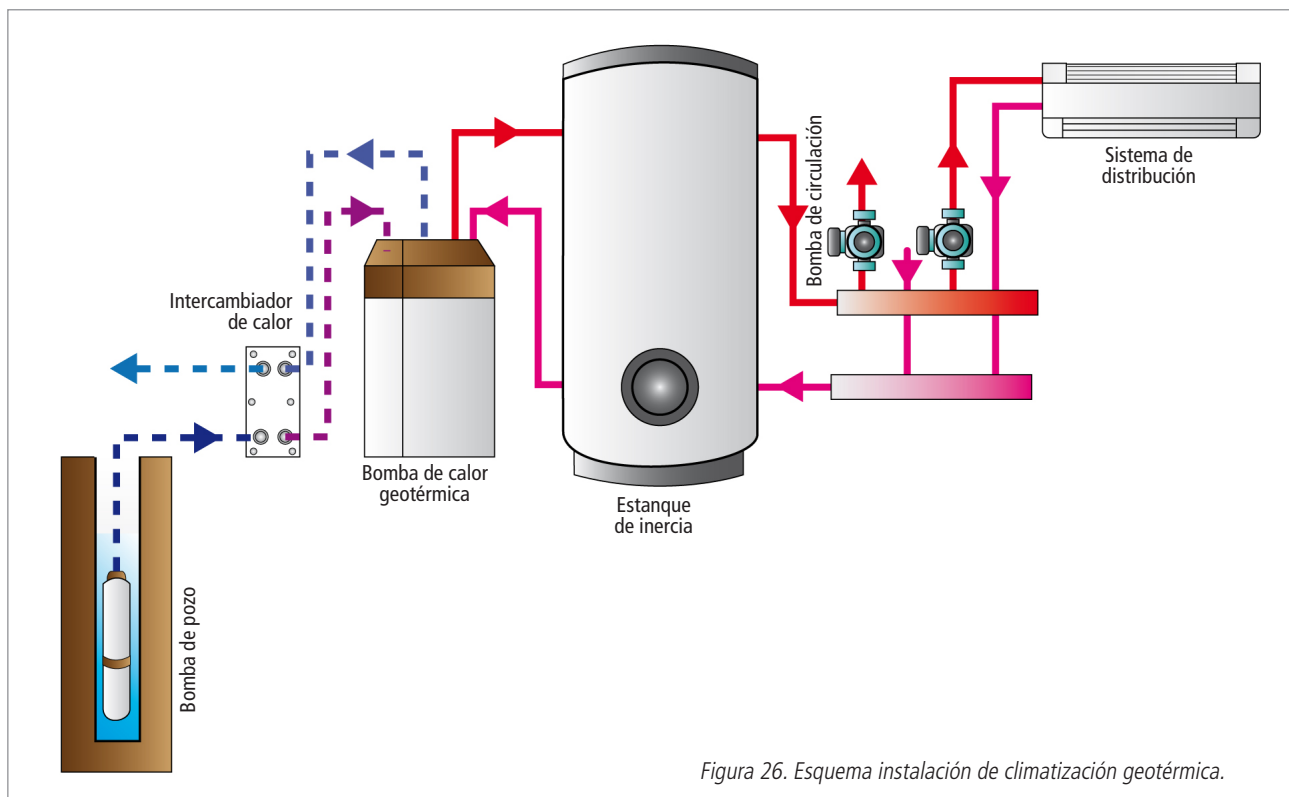


Figura 26. Esquema instalación de climatización geotérmica.

3.5 Operación y Mantenimiento del sistema

3.5.1 Consumo eléctrico

A continuación se describen los consumos característicos de un sistema de climatización geotérmico.

Luego de haber dimensionado el sistema de climatización con geotermia, es necesario describir su operación para determinar cuánta energía eléctrica se consume con su uso. Los cálculos económicos relacionados con este ítem son abordados en mayor profundidad en el capítulo económico de esta Guía.

Si bien los sistemas de climatización geotérmicos son eficientes, todavía consumen electricidad. Por lo tanto, es importante que el sector donde se instalen posea una red capaz de suministrar la energía necesaria al sistema de forma estable, siendo el cálculo de consumo eléctrico fundamental para entender la viabilidad del sistema geotérmico, tomando en consideración la potencia eléctrica y número de fases necesarias.

Como se ha explicado anteriormente, el compresor de la bomba de calor requiere de una fuente de energía externa para poder operar y generar el transporte de calor. Si bien existen BCG con compresores operados a gas, la gran mayoría opera con electricidad, por lo que en esta sección solo se explicará el consumo de electricidad. Con excepción de la bomba de pozo en un sistema con colector abierto, el resto de los equipos de un sistema

de climatización geotérmico posee un consumo eléctrico muy menor, en comparación a la BCG. Existen dos valores importantes para definir el consumo eléctrico: la potencia eléctrica de la instalación y la demanda de energía eléctrica en un período de tiempo.

Metodología

La potencia eléctrica corresponde a la velocidad que se consume la electricidad y, normalmente, se expresa en kilowatts eléctricos [kW_e]. La potencia eléctrica de un sistema de climatización geotérmico se puede obtener dividiendo la potencia de calefacción o refrigeración (según sea su caso) por la eficiencia del sistema (climatización producida versus consumo eléctrico), quedando el valor más alto de los dos.

Por otro lado, la demanda de energía corresponde a la cantidad de electricidad que consume el sistema en algún período de tiempo (al día, al mes, al año) y, generalmente, se expresa en kilowatts-hora eléctricos [kWh_e]. La demanda eléctrica del sistema se puede obtener dividiendo la demanda térmica de calefacción y/o refrigeración por la eficiencia del sistema. La suma de las demandas mensuales dará la demanda anual del sistema.

En sistemas cerrados, la eficiencia del sistema será igual al COP/EER de la BCG. En sistemas abiertos, la eficiencia del sistema será la relación del calor/frío producido versus el consumo de la BCG y la bomba de pozo. La potencia eléctrica de la bomba de

pozo depende de varios factores como son: el caudal bombeado, la profundidad del nivel piezométrico, la eficiencia misma de la bomba, entre otros, y se puede encontrar en las curvas de operación de la bomba de pozo.

Respecto a la capacidad del sistema eléctrico en instalaciones grandes, se debe comprobar la factibilidad de instalación con la empresa distribuidora de electricidad.

Aproximaciones

Para sistemas con colectores cerrados, la eficiencia del sistema se puede aproximar a la eficiencia de la BCG con un valor, por lo general, de 350%, considerando que la BCG es el único equipo que consume electricidad. Para mayor detalle del sistema de distribución y colectores, se puede utilizar la Tabla 12 como referencia.

En sistemas abiertos, mientras más profundo esté el nivel de agua, mayor potencia se requerirá para moverla. Por lo general, los sistemas abiertos parten con una eficiencia del 400%, bajando 10 puntos porcentuales por cada 5 m de profundidad a la que se encuentre el agua subterránea. Es decir, un sistema con un pozo con agua a 10 m de profundidad tendrá una eficiencia de 380%, mientras que uno con agua a 50 m tendrá una eficiencia de 300%.

Recomendaciones

1. La máxima necesidad eléctrica del sistema depende del consumo máximo de los equipos, antecedente que debe ser entregado por los fabricantes. La suma de estos entregará la capacidad necesaria del sistema, que deberá poder ser suplida por la instalación eléctrica de la vivienda o proyecto.
2. El sistema puede ser conectado con paneles fotovoltaicos u otra fuente de energía renovable, como un complemento a la instalación eléctrica, para disminuir el consumo en la red. Pero debido a que las BCG son dependientes de la electricidad, solo se recomienda como un complemento y no para suplir la red eléctrica, en casos donde la potencia disponible de la red no sea suficiente. Esto debido a que se agregan muchos factores que pueden terminar en una falla en la climatización.

3.5.2 Mantenimiento

El uso de sistemas de clima con bombas de calor geotérmicas requiere que se tomen medidas preventivas de mantenimiento, con tal de extender la vida útil y rentabilidad de los equipos.

En este sentido, lo mejor es considerar un mantenimiento preventivo de las bombas de calor y sistemas de distribución al menos una vez al año, que incluya una revisión de todos los componentes del sistema, por parte de personal técnico calificado y que siga las indicaciones de mantenimiento de los fabricantes.

Si se utiliza el sistema de clima tanto para calefacción como para refrigeración, se recomienda, incluso, hacer mantenimiento preventivo al inicio de cada temporada.

Entre las actividades de mantenimiento se encuentran:

- Revisión de bombas de calor.
- Revisión de bombas de circulación.
- Revisión de válvulas de corte y seguridad.
- Revisión de presiones y fugas en circuitos hidráulicos.
- Revisión de conexiones eléctricas.
- Limpieza y recambio de filtros de aire y/o agua.

También es importante considerar -desde la etapa de diseño y durante la instalación- las condiciones físicas de espacio para realizar una mantención adecuada. El proyecto debe entregar la accesibilidad necesaria para efectuar la mantención de los equipos de manera efectiva y segura. Esto quiere decir que los técnicos de mantenimiento deben poder manipular de forma segura y eficaz los equipos, y que las empresas deben asegurarse de que se haga un uso debido de los elementos de protección personal.

Cada vez que una empresa realice mantención a su sistema, se debe dejar registro escrito de los trabajos realizados, y el propietario debe quedarse con una copia.

Por último, ignorar la mantención preventiva del sistema podría ocasionar: 1) fallas imprevistas que no le permitan contar con la climatización en los momentos necesarios; 2) disminución de la rentabilidad de sus componentes, al tener que incurrir en gastos de reparación e inversiones que pueden resultar más costosas que un mantenimiento preventivo planificado, y 3) disminución de la eficiencia del sistema en el mediano y largo plazo.

4. Bibliografía

1. C. Bao Ríos, "Desarrollo de una herramienta de cálculo del rendimiento estacional de bombas de calor según la norma UNE-EN 14825," Universidad Politécnica de Cataluña, 2017.
2. Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Guía técnica de diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica. Madrid, 2008.
3. CANMET Energy Technology Centre, Ground-Source Heat Pump Project Analysis. 2005.
4. Instituto Nacional de Normalización, "NCh853.Of2007 Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas." Santiago, Chile, 2007.
5. W. Bustamante, Y. Rozas, R. Cepeda, F. Encinas, and P. Martinez, "Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social," Santiago, 2009.
6. "Agrometeorología | INIA." <https://agrometeorologia.cl/> (accessed May 18, 2020).
7. Ministerio de Obras Publicas, "Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, según Zonas Geográficas del País y según Tipología de Edificios," Santiago, 2011.
8. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Manual Sistemas Solares Térmicos, 1st ed. Santiago, Chile: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2013.
9. P. K. Kavanaugh and K. Rafferty, "Ground-source Heat Pumps – Design of Geothermal Systems For Commercial and Institutional Buildings," Am. Soc. Heating, Refrig. Air-Conditioning Eng. Inc., 1997.
10. Uponor, "Geotermia información técnica," 2013.
11. Homemicro, "Thermal Storage Vessel Sizing," 2016. [Online]. Available: www.homemicro.co.uk/lzc_vessel.html.
12. B. Morrone, G. Coppola, and V. Raucci, "Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different climates," Energy Convers. Manag., vol. 88, pp. 189–198, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.007.
13. Instituto Nacional de Normalización, "NCh 1079-2008 - Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico." 2008.
14. "Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2." <http://www.cr2.cl/> (accessed May 08, 2020).

5 Anexos

5.1 Anexo A: COP vs temperatura

En caso de contar con la eficiencia de un equipo en particular, se pueden utilizar las siguientes aproximaciones para estimar un valor de eficiencia, según las temperaturas de operación.

La eficiencia de una bomba de calor o COP viene dada por la relación entre el calor entregado/removido versus el trabajo requerido para generar dicha transferencia.

$$(21) \quad COP = \frac{\dot{Q}_t}{\dot{W}}$$

Donde \dot{Q}_t es el calor total entregado/extraído por la bomba y \dot{W} es el trabajo requerido por el sistema. Los COP para calefacción y refrigeración son distintos debido a que, en el caso de calefacción, la electricidad o gas consumido por la bomba también se convierte en un aporte de la calefacción, en cambio en la refrigeración solo aporta el calor extraído. Por lo general se ocupa COP para referirse a la eficiencia en calefacción, mientras que EER para la eficiencia en refrigeración.



$$(22) \quad COP_{calefacción} = COP = \frac{|\dot{Q}_{extraído}| + \dot{W}}{\dot{W}}$$

$$(23) \quad COP_{refrigeración} = EER = \frac{|\dot{Q}_{extraído}|}{\dot{W}}$$

Estos coeficientes se pueden obtener teóricamente en función de las temperaturas de foco caliente $T_{caliente}$ y foco frío $T_{frío}$ en grados Celsius que operan el colector y sistema de distribución, según el ciclo de Carnot y un factor de eficiencia. Este valor puede variar entre 0,3 y 0,7 [12], por lo general 0,5 para calefacción y 0,4 para refrigeración:

$$(24) \quad COP = 0,5 \frac{T_{caliente} + 273}{T_{caliente} - T_{frío}}$$

$$(25) \quad EER = 0,4 \frac{T_{frío} + 273}{T_{caliente} - T_{frío}}$$

En base a esto se obtienen los siguientes COP/EER esperados en función de las temperaturas de foco caliente y foco frío.

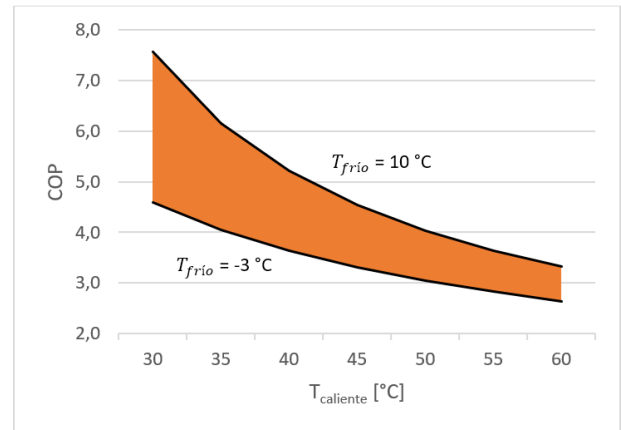


Figura 27. COP práctico con $T_{frío}$ de -3 a 10 °C.

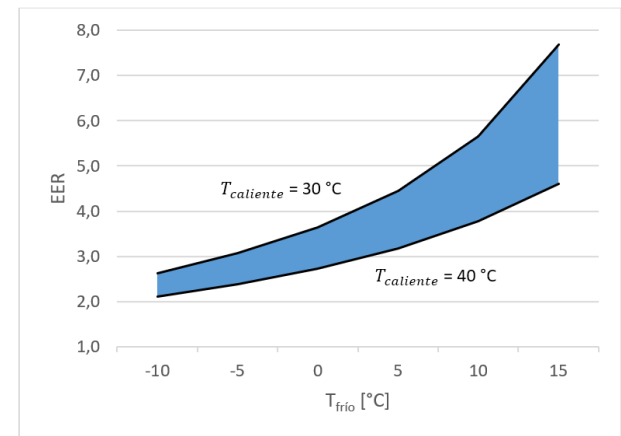


Figura 28. EER práctico con $T_{caliente}$ de 30 a 40 °C.

5.2 Anexo B: Zonas climáticas

La NCh1079-2008 Arquitectura y construcción - Zonificación climática habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico, separa a Chile en 9 zonas climáticas. Esto, con el objeto de facilitar un adecuado diseño arquitectónico, entregando recomendaciones de aislación por zona (Instituto Nacional de Normalización, 2008). Estas zonas corresponden a:

1. Norte litoral (NL)
2. Norte desértica (ND)
3. Norte valles transversales (NVT)
4. Central litoral (CL)
5. Central interior (CI)
6. Sur litoral (SL)
7. Sur interior (SI)
8. Sur extremo (SE)
9. Andina (An)

Dada la extensión de la zona Andina y las diferencias de altura que presenta, sus características son mucho menos homogéneas que las demás zonas, por lo que los valores presentados en el informe pueden variar de localidad a localidad dentro de la zona.

Los valores de transmitancia térmica máxima [$W/(m^2 \cdot K)$] recomendada para muros, techumbre, pisos ventilados y ventanas según la norma pueden verse a continuación.

Zona climática	Transmitancia térmica máxima [$W/(m^2 \cdot K)$]			
	Muros	Techumbre	Piso ventilado	Ventanas
1 NL	2,0	0,8	3,0	5,8
2 ND	0,5	0,4	0,7	3,0
3 NVT	0,8	0,6	1,2	3,0
4 CL	0,8	0,6	1,2	3,0
5 CI	0,6	0,5	0,8	3,0
6 SL	0,6	0,4	0,8	3,0
7 SI	0,5	0,3	0,7	3,0
8 SE	0,4	0,3	0,5	2,4
9 An	0,3	0,3	0,4	2,4

Tabla 13. Transmitancia térmica máxima por zona climática.

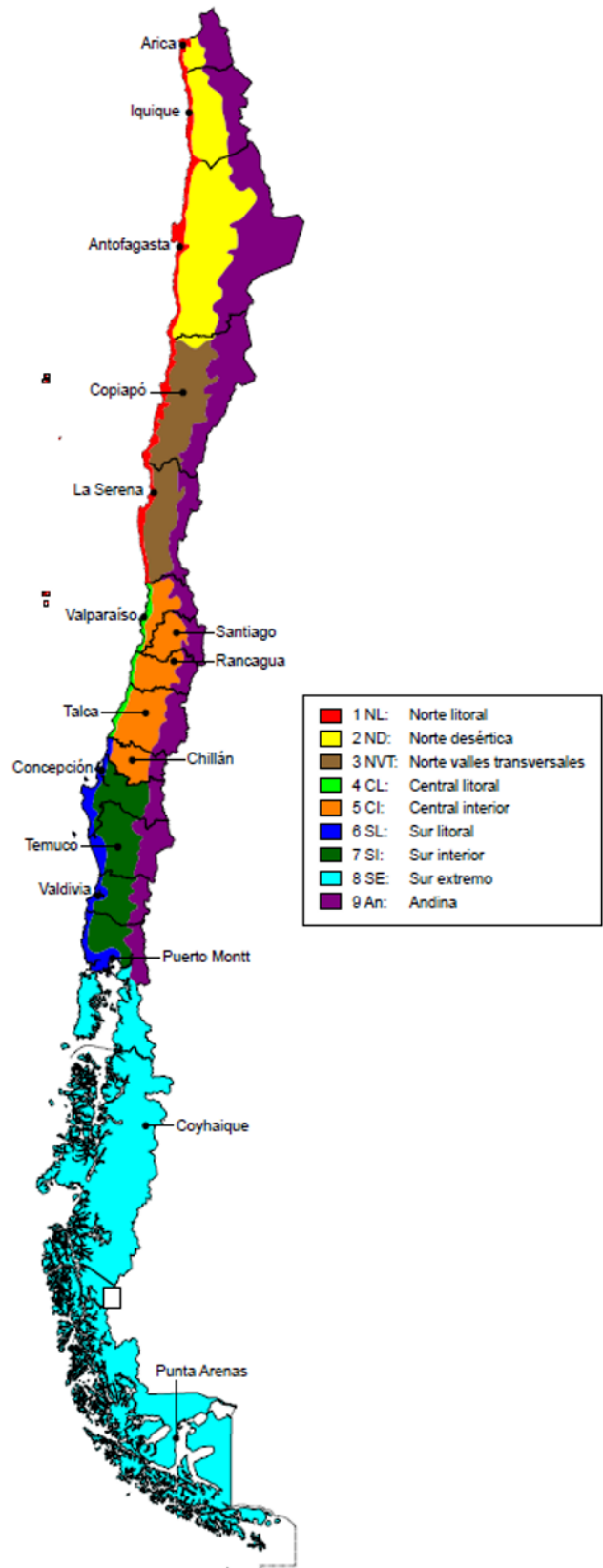


Figura 29. Zonas climáticas de Chile.

Para obtener valores de temperatura representativos, usamos datos del (CR)2 (2020) de varias estaciones repartidas a lo largo de cada zona, considerando mediciones desde enero 2009 hasta enero 2018. Promediamos los valores de temperatura media mensual, mínima y máxima media mensual, además de la temperatura mínima y máxima dentro de la zona.

--- Temperatura mínima extrema
 ● Temperatura mínima
 ● Temperatura promedio
--- Temperatura máxima extrema
 ● Temperatura máxima

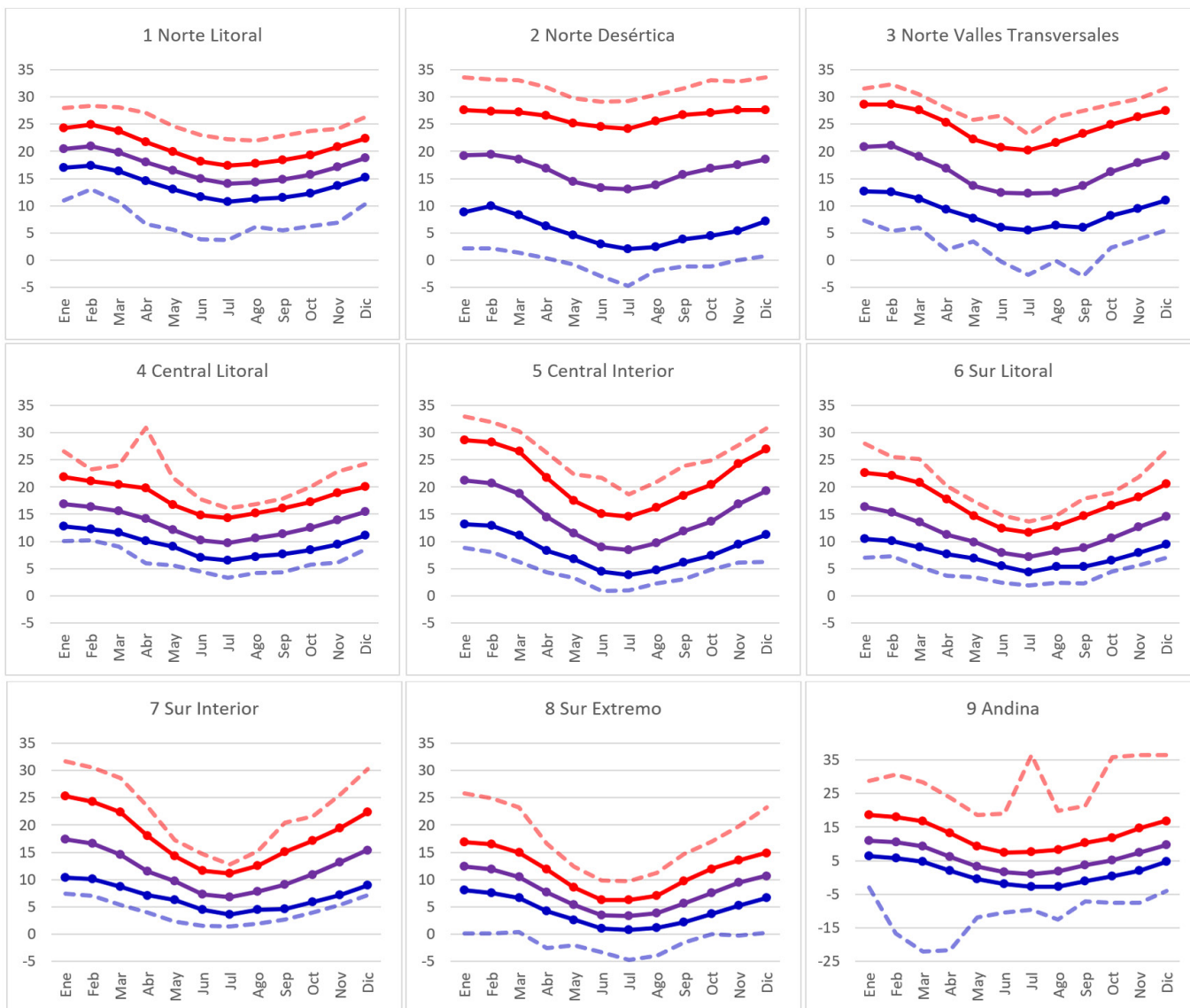


Figura 30. Mediciones de temperaturas por zona climática.

5.3 Anexo C: Cálculo de ganancias solares

La metodología presentada corresponde a una adaptación de la expuesta por el *RetScreen International – Ground-source heat pump project analysis* (CANMET, 2005).

Esta metodología no toma en consideración las mediciones de radiación del sector para calcular el aporte solar, sino que la latitud φ en grados del lugar, en conjunto con el área total de ventanas exteriores de la edificación $A_{ventana}$ [m²]. De este modo, se tiene que la ganancia solar por área del verano $\dot{q}_{sol\ ver}$ y del invierno $\dot{q}_{sol\ inv}$ [W/m²] se puede calcular como:

$$(26) \quad \dot{q}_{sol\ ver} = 0,0216 \cdot \frac{A_{ventana}}{A_{edi}} \cdot (0,86\varphi^2 - 33,9\varphi + 10,955)$$

$$(27) \quad \dot{q}_{sol\ inv} = 0,0076 \cdot \frac{A_{ventana}}{A_{edi}} \cdot (-1,55\varphi^2 + 2,97\varphi + 12,369)$$

Con A_{edi} el área de la edificación a climatizar [m²]. Cabe señalar que, al ubicarnos en el hemisferio sur, el valor de la latitud es negativo.

Por otro lado, la ganancia promedio de cada mes toma un valor entre la ganancia del verano e invierno, dependiendo de la temperatura máxima ambiente $T_{m\acute{a}x\ amb}$ y mínima ambiente $T_{m\acute{i}n\ amb}$, además de la temperatura ambiente promedio del mes evaluado $\bar{T}_{amb\ m}$. En base a esto se tiene que la ganancia solar mensual está comprendida por la siguiente pendiente:

$$(28) \quad M = \frac{\dot{q}_{sol\ ver} - \dot{q}_{sol\ inv}}{T_{m\acute{a}x\ amb} - T_{m\acute{i}n\ amb}}$$

La que finalmente se utiliza en la siguiente ecuación:

$$(29) \quad \dot{q}_{sol\ m} = M \cdot (\bar{T}_{amb\ m} - T_{m\acute{i}n\ amb}) + \dot{q}_{sol\ inv}$$

5.4 Anexo D: Resultados de dimensionamiento de colectores cerrados horizontales y verticales para cada zona climática.



Figura 31. Metros lineales de colector y superficie necesaria para colector cerrado horizontal en cada zona climática, por m² a climatizar.

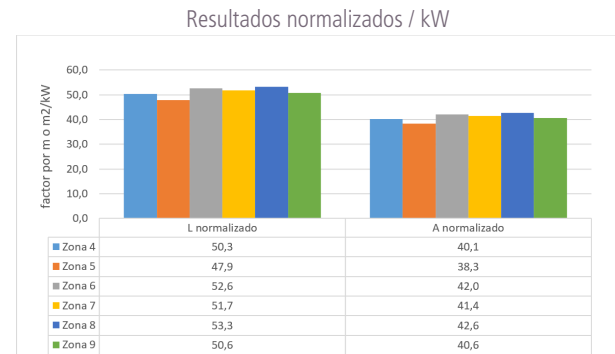


Figura 32. Metros lineales de colector y superficie necesaria para colector cerrado horizontal en cada zona climática, por kW de climatización.

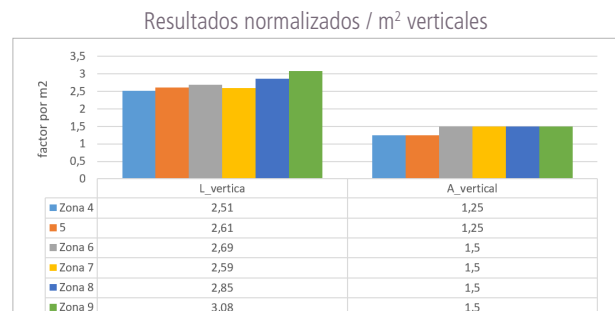


Figura 33. Metros lineales de perforación y superficie necesaria para pozos en cada zona climática, por m² a climatizar.



Figura 34. Cantidad de pozos como colectores cerrados verticales necesarios en cada zona climática, por m² a climatizar.

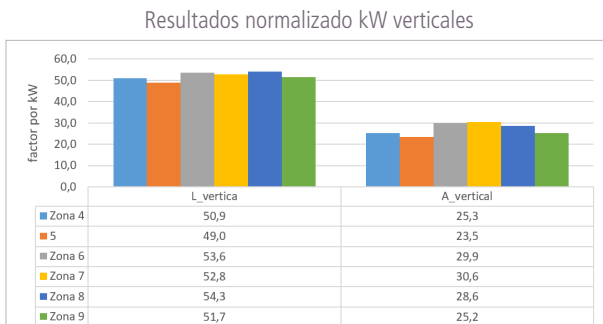


Figura 35. Metros lineales de perforación y superficie necesaria para pozos como colectores cerrados verticales en cada zona climática, por kW de climatización.

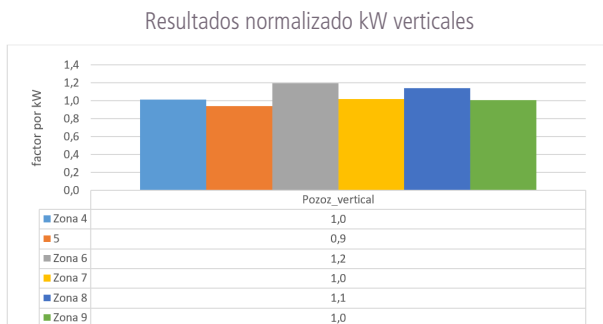


Figura 36. Cantidad de pozos como colectores cerrados verticales necesarios en cada zona climática, por kW de climatización.





Aspectos económicos

Aspectos económicos

Tabla de contenido

1. Evaluación económica de proyectos en base a BCG

- 1.1 Contextualización de mercado geotérmico y de climatización
- 1.2 Costos de operación
- 1.3 Costos de inversión de la geotermia
- 1.4 Evaluación económica privada
- 1.5 Evaluación social y multicriterio

2. Bibliografía

3. Anexos

- 3.1 Anexo A: Detalle tarifas eléctricas
- 3.2 Anexo B: Emisiones contaminantes por tipo de combustible

Aspectos económicos

Autores

- Esteban Micco Hernández
- Nicolás Hurtado Arroyo
- Pablo Valdenegro Cid

1. Evaluación económica de proyectos en base a uso de BCG

El presente capítulo tiene como objetivo aportar a dilucidar cuán conveniente, desde una perspectiva económica, es la climatización de espacios mediante el uso de **Bombas de Calor Geotérmicas (BCG)**.

Para responder a lo anterior, en primer lugar se estiman los costos de inversión y operación de esta tecnología para distintos rangos de potencia. Luego, a partir de estos costos, se estima la conveniencia económica de esta tecnología, desde las perspectivas privada y social, en base a un análisis de costos comparativos con otras fuentes energéticas de climatización, tales como biomasa, combustibles fósiles y aerotermia (extracción de energía del aire para climatizar espacios mediante bombas de calor aire-agua). Asimismo, mediante un ejemplo, se analiza la conveniencia de la geotermia desde una perspectiva multidimensional, usando la metodología de análisis multicriterio.

1.1 Contextualización de mercado geotérmico y de climatización

En la presente subsección se detalla el nivel de penetración de las distintas fuentes energéticas utilizadas a nivel residencial a lo largo del país para climatización y uso de agua caliente sanitaria (ACS) a nivel residencial. Luego, se describen las principales fortalezas y debilidades que presenta actualmente el mercado de climatización geotérmico nacional.

Nivel de penetración - alternativas de climatización

Calefacción

A nivel nacional, cerca del 98% de las viviendas utiliza calefactores individuales y no poseen una calefacción centralizada. Alrededor del 30% de las viviendas cuentan con un calefactor secundario (CDT, 2018).

La **leña** es el principal energético usado para calefacción a nivel nacional, con predominancia en el sur de Chile. En las zonas centro y norte del país, los energéticos predominantes son el **gas licuado**, la **parafina** y la **electricidad**. Por último, en la Región de Magallanes el **gas natural** tiene una gran importancia, debido al bajo costo que tiene en ciudades como Punta

Arenas. El uso de aire acondicionado es bajo (3% a nivel nacional) (CDT, 2018).

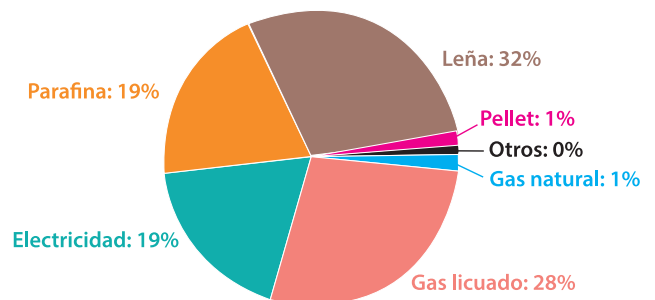


Figura 37. Nivel de penetración de los energéticos en calefacción residencial a nivel nacional. Elaborado en base a (CDT, 2018)

Agua Caliente Sanitaria (ACS)

El gas licuado es la principal fuente de agua caliente sanitaria a nivel nacional, a excepción de la zona de Magallanes, donde el gas natural lo es. El uso del gas licuado se da en zonas urbanas y rurales, y en todos los niveles socioeconómicos.

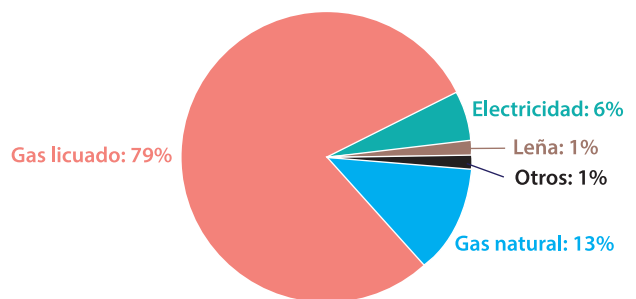


Figura 38. Nivel de penetración de los energéticos en ACS residencial a nivel nacional. Elaborado en base a (CDT, 2018)

Mercado de climatización geotérmica

Actualmente, en Chile existe un mercado geotérmico incipiente y poco regulado. La intermitente cantidad de proveedores de BCG y las variaciones en las tasas de cambio extranjeras (la mayoría son importados desde el extranjero), hace que los precios de la instalación varíen en gran medida.

La información más detallada y reciente de la situación chilena se encuentra disponible en el estudio realizado por el Ministerio de Energía de Chile y la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional GIZ (GIZ, NAMA, 2020a).

A diferencia de otros mercados energéticos que han logrado consolidarse, como el solar fotovoltaico, que tiene un valor de 1,37 USD/kW_p, para instalaciones de 30 - 100 kW_p (GIZ, NAMA, 2017), el costo de instalación de una climatización geotérmica es más complejo de estimar. Los costos varían dependiendo del proveedor, la marca de los equipos, el tipo de instalación y la ubicación de esta.

Dado el nivel de demanda actual, no hay un número importante de proveedores altamente especializados en las distintas etapas de una instalación geotérmica. Sin embargo, existen proveedores con experiencia y conocimientos necesarios para realizar varias de las actividades relacionadas a la geotermia (Aiguasol, 2016).

Uno de los factores preponderantes en este mercado inmaduro es que el costo de perforación de pozos está condicionado, en gran medida, por el mercado de la minería, lo que -en comparación con otros países- encarece el valor de dicha fase de acción. Lo anterior implica que el sistema de captación desde el suelo sea por lo general uno de los ítems más caros dentro de los costos iniciales.

La regulación de precios debería generarse cuando el mercado madure, habiendo proveedores estables y una mayor variedad en los equipos. Para esto se requerirá de un aumento en la demanda de estos sistemas geotérmicos.

1.2 Costos de operación

A continuación se describen los principales costos de operación de los sistemas de climatización geotérmicos basados en bombas de calor geotérmicas (costo de electricidad y costo de mantenimiento), así como las metodologías para la estimación del costo de operación total de un proyecto hipotético.

1.2.1 Costo eléctrico

Introducción

El principal costo de operación de un sistema de calefacción es el costo por el consumo -de electricidad o gas, según corresponda-, por la operación de todo el sistema de calefacción. Dado que las bombas de calor eléctricas son más prominentes en el mercado, no se evaluará la operación de una bomba a gas. Todos los valores expresados a continuación incluyen IVA.

El costo eléctrico de operación depende de tres factores:

- **Valor de la electricidad** en la comuna los cuales son

publicados mensualmente por la respectiva compañía eléctrica.

- La **demanda de energía eléctrica** [kWh_e] del área a climatizar.
- La **tarifa contratada** a la que se encuentre suscrito, la cual puede incluir un cobro adicional por la máxima potencia contratada o consumida [kW_e] durante el año o durante hora punta. De estas, es la tarifa residencial de baja tensión (BT1), la que se ocupa en la mayoría de las casas de Chile.

Como hemos mencionado en este documento, la gran ventaja de la geotermia es su bajo costo de operación. A nivel nacional la geotermia es la segunda fuente energética más económica de operar, siendo solo superada por la leña. En el caso particular de la Región de Magallanes, el subsidio del gas natural reduce el costo este energético a aproximadamente un séptimo de su valor, respecto a otras regiones del país. Por lo tanto, en el caso de Magallanes, la geotermia es la tercera fuente de calefacción más económica.

En la siguiente tabla mostramos una comparación de los precios de distintos energéticos usados en la calefacción.

Tabla 14. Precio de los distintos energéticos por unidad de energía a nivel nacional. Fuente: (CDT, 2018), modificado.

Energético	Precio ¹ [\$/kWh _e]
Leña	\$24
Geotermia (COP* 4)	\$39
Pellet	\$48
Aerotermia (COP* 2)	\$78
Parafina	\$80
Gas natural	\$102
Gas licuado	\$113
Electricidad (COP* 1)	\$157

* COP (Coefficient Of Performance), indica el rendimiento energético como el cociente entre la energía térmica producida y la energía eléctrica requerida para el funcionamiento del equipo.

Estos valores pueden variar dependiendo de la localidad evaluada. Por regla general, se espera que los costos sean más altos mientras más se aleje el lugar de la capital nacional, aunque puede haber excepciones a esta regla.

¹ Valor para el año 2020 con UF = \$28.700

Resultados y aproximaciones

En base al consumo de las distintas zonas y las distintas tarifas de las comunas, los costos anuales esperados para una casa de 100 m² son:

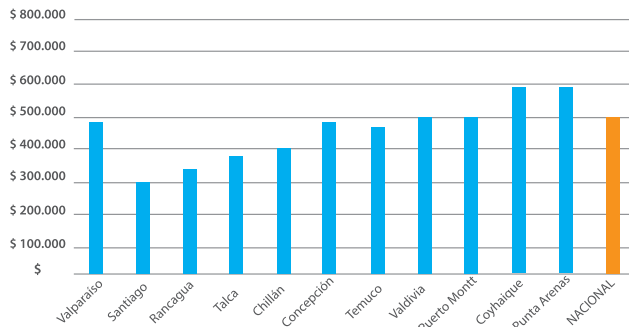


Figura 39.² Ejemplos de costos eléctricos anuales aproximados de calefacción geotérmica en residencia de 100 m².

En este caso, los distintos costos de operación tienen que ver con los distintos consumos de energía y los distintos precios de electricidad. Por su parte, los consumos de energía para cada una de las distintas ciudades son obtenidos de acuerdo con los cálculos descritos en el capítulo técnico de esta guía.

Comparando la misma casa con los demás energéticos, en base a los valores presentados en la Tabla 14, a nivel nacional, los siguientes son los costos anuales esperados.

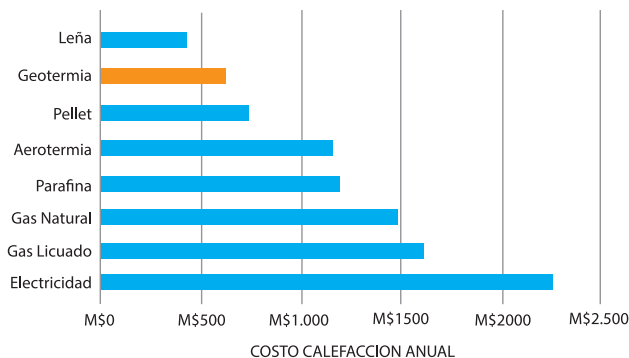


Figura 40. Costos operacionales anuales de distintos energéticos para la calefacción de una residencia de 100 m².

Recomendaciones

Dependiendo del uso y potencia que tenga el sistema, se recomienda buscar la tarifa eléctrica más económica disponible en la zona, cuyas características se pueden ver en el Anexo A.

Para remarcar la importancia de lo anterior a través de un ejemplo, en el recuadro inferior se hace notar que, gracias a la contratación de la tarifa BT4.3, la Escuela Luis Cruz Martínez, a pesar de tener un consumo eléctrico anual 1,7 veces mayor al del Liceo Altos del Mackay, tiene la mitad del costo eléctrico anual debido a que el liceo contrató la tarifa BT3.

² Considerando valores de tarifa BT1 en las distintas capitales regionales en enero 2020. Meses de invierno se considera un costo de electricidad igual al límite de invierno.

Ejemplos

En Coyhaique se implementó un sistema de calefacción geotérmica en las salas del Liceo Bicentenario Altos del Mackay, con el uso de pozos de agua. Se climatizaron cerca de 570 m² y se estimó que el consumo anual de electricidad es de 13.000 kWh_e, con una potencia máxima eléctrica 19 kW_e. Se contrató una tarifa BT3 con la empresa Edelayen, lo que implica un costo de operación anual de MM\$7,4 (65% BCG, 25% pozo, 10% sistema de distribución).

En Curacautín se implementó un sistema de calefacción geotérmica en las salas de la Escuela Luis Cruz Martínez, con el uso de pozos de agua. Se climatizaron cerca de 1.397 m² y se estimó que el consumo anual de electricidad es de 22.000 kWh_e, con una potencia máxima eléctrica 16 kW_e. Se contrató una tarifa BT4.3 con la empresa Frontel, lo que implica un costo de operación anual de MM\$3,6 (30% BCG, 10% bomba de pozo, 45% recuperador de calor, 15% sistema de distribución).

1.2.2 Mantenimiento

Otro costo de operación corresponde al mantenimiento de los equipos. La correcta mantenimiento de estos permite que operen con la eficiencia esperada y que se prolongue su vida útil. Si bien el sistema de distribución también requiere de mantenimiento, a continuación solo se presentan los costos de mantenimiento de la bomba de calor y su sistema de captación, dado que el sistema de distribución no es exclusivo de un energético específico. Los valores se obtienen del informe Índice de Precios Bombas de Calor Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile (GIZ, NAMA, 2020b)

En el contexto de un mercado incipiente, al igual que para la inversión, no existe un mercado maduro de los servicios de mantenimiento. Por lo tanto, hay una gran variación de los costos, dependiendo de la ubicación y la empresa que otorga el servicio.

Considerando una casa de 100 m², como se presenta en la sección técnica para una mantenimiento anual, el costo de mantenimiento es de alrededor de \$12.000 por kW_t. Considerando una potencia de 4 kW_t se estima que el costo de mantenimiento anual es de \$48.000. Los rangos de precio de mantenimiento, así como la mediana de estos se pueden ver en la Figura 41.

Un elemento que influye en el proceso de mantenimiento de los equipos y su consecuente impacto económico es el rol que cumplen los usuarios directos del sistema geotérmico instalado. Para ello es importante desarrollar un proceso correcto de apropiación tecnológica respecto a las pautas de mantenimiento y

de uso eficiente. Para más detalles de estas dinámicas se puede consultar en profundidad el capítulo de esta Guía sobre aspectos sociales y comunitarios.

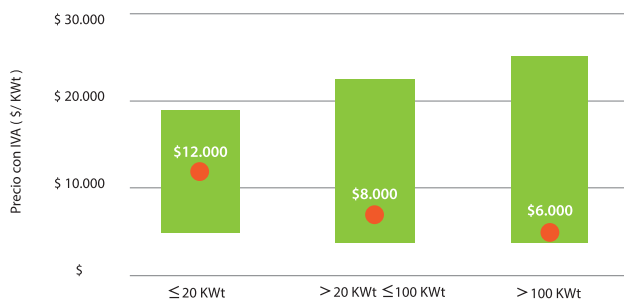


Figura 41. Rango de precios de mantenimiento por potencia de calefacción para distintos rangos de potencia. Elaborado en base a (GIZ, NAMA, 2020b).

Ejemplo de costo de mantenimiento

El Liceo Bicentenario Altos de Mackay, de Coyhaique, implementó un sistema de calefacción geotérmica que cuenta con un pozo de agua de 30 metros de profundidad, 2 bombas de calor geotérmicas, de 25 kW, cada una, y 13 fan coils para climatizar 570 m².

Para este sistema de climatización geotérmica, se cotizó una mantención anual de todo el sistema por un total de MM\$1,3, equivalente a \$26.000/kWt. Estos incluyen revisión de filtraciones, conexiones eléctricas, ajuste de parámetros y limpieza, además de la entrega de un informe del estado de las instalaciones.

1.3 Costos de inversión de la geotermia

Inversión inicial

Corresponde al monto de dinero necesario para iniciar el proyecto. Generalmente, dicha inversión está compuesta por los costos de estudios de factibilidad, adquisición de equipos, suministros y contratación de mano de obra, entre otros.

Ahora bien, el análisis de la inversión de un sistema de climatización geotérmica requiere determinar también los costos de diseño, tamaño, valor de instalación y obras subterráneas, entre otros. Para más claridad, la siguiente tabla resume los ítems principales que deben ser atendidos por una empresa o persona que aspire a desarrollar un proyecto de esta naturaleza.

Valor de los componentes

Para poder estimar cuánto podría costar un proyecto geotérmico, a continuación, se muestran los precios de los principales componentes de un sistema de climatización basado en bombas de calor geotérmicas, para distintos rangos de potencia. Estos son presentados a través de una serie de gráficos donde

las barras verdes representan cotas superiores e inferiores de precios, mientras que el punto rojo representa la mediana de los precios unitarios para cada rango de evaluación.

Todos estos valores se encuentran con más detalle, en el documento *Índice de precios - Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile*, elaborado por el Ministerio de Energía de Chile y GIZ (GIZ, NAMA, 2020b). Los componentes técnicos que serán evaluados económicamente en este apartado, se pueden consultar en el capítulo técnico de esta Guía.

Ítem	Detalle	Consideraciones
Diseño sistema de climatización	Ingeniería de detalle	Determinación de demanda Ingeniería de sistema Planificación de la ejecución
Tipo de colector	Abierto/Cerrado Vertical/Horizontal	Presencia de agua subterránea Profundidad del agua subterránea Temperatura del subsuelo y su variación en profundidad Propiedades físicas del subsuelo
Perforación	Pozo de agua Excavación somera	Diámetro de pozo/s, profundidad y material de relleno
Equipos geotérmicos	Bomba de Calor Geotérmica	Eficiencia (COP), reversibilidad Potencia fija o Inverter Monofásica o trifásica
Equipos del sistema de concentración y distribución de calor	Almacenamiento de calor Distribución de calor Intercambio calórico	Estanques de inercia Fan coils, cañerías, radiadores, etc. Intercambiadores de placa, tuberías
Instalación	Construcción sala técnica, equipos y mano de obra	Mano de obra Materiales

Tabla 15. Componentes de la inversión inicial de un sistema de climatización con Bomba de Calor Geotérmica.

1. Bomba de Calor Geotérmica

El precio de la Bomba de Calor Geotérmica (BCG) depende de muchas variables, como la capacidad del equipo, su marca y su funcionalidad, además de su capacidad de producir calefacción, refrigeración y ACS, entre otras. El precio de estos equipos baja en función de su potencia, a medida que se adquiere un equipo más grande, como se ve en la Figura 42.



Figura 42. Rango de precios de bombas de calor geotérmicas por potencia para distintos rangos de potencia. Elaborado en base a (GIZ, NAMA, 2020b).

2. Colector geotérmico

Los distintos tipos de colectores poseen diferentes costos de instalación. Para pequeñas instalaciones, los colectores horizontales cerrados son más económicos, mientras que los colectores verticales cerrados más costosos en relación con la potencia instalada que aportan al sistema.

Colector horizontal cerrado

Su costo de instalación dependerá del tamaño del colector, lo que se traduce en la superficie necesaria a excavar para enterrar las tuberías. Su precio final, por metro cuadrado, no se ve tan afectado por el tamaño de la excavación.

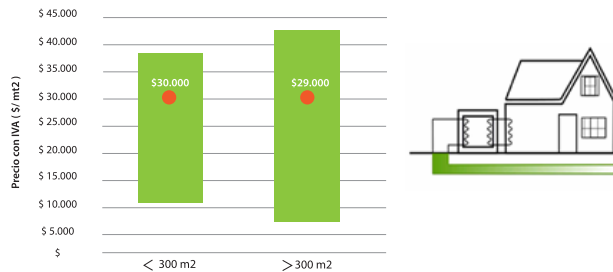


Figura 43. Rango de precios de construcción de colector horizontal por metro cuadrado del colector para distintos rangos de superficie. Elaborado en base a (GIZ, NAMA, 2020b).

Colector vertical cerrado

El costo de los colectores verticales depende del número de sondas necesarias, así como de la extensión y profundidad de la excavación para instalarlas. El precio por metro lineal de perforación tiende a aumentar a medida que incrementa la profundidad, debido al aumento de la complejidad técnica de la perforación.

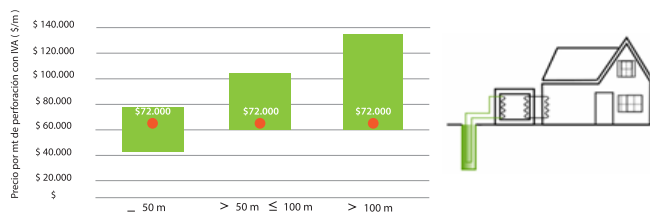


Figura 44. Rango de precios de construcción de colector vertical cerrado por metro de perforación para distintos rangos de profundidad. Elaborado en base a (GIZ, NAMA, 2020b).

Colector abierto

El costo de los colectores abiertos depende de los metros, el diámetro de perforación y la profundidad de la perforación requerida. Al igual que en los colectores verticales cerrados, el precio tiende a aumentar a medida que aumenta la profundidad.

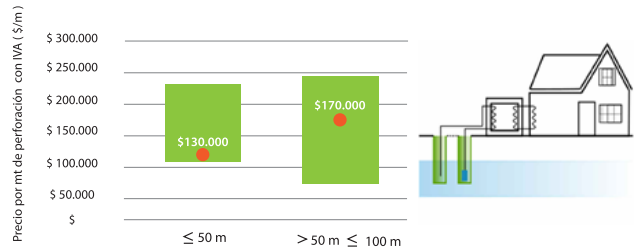


Figura 45. Rango de precios de construcción de pozo de agua por metro lineal de perforación para distintos rangos de profundidad. Elaborado en base a (GIZ, NAMA, 2020b).

3. Sistema de distribución

Se entiende como sistema de distribución los distintos equipos encargados de transmitir el clima al ambiente a calefaccionar o refrigerar. Los sistemas de distribución de calor utilizados más comúnmente son los radiadores, fan coils y losa radiante. Entre estos, la instalación de la losa radiante es la más costosa, mientras que la de los radiadores la más barata. Esta diferencia se explica principalmente, por los distintos niveles de intervención del espacio a climatizar, que requiere cada una de estas tecnologías.

Losa radiante

El costo de instalación de una losa radiante depende, principalmente, de los metros cuadrados que se desean climatizar. Si bien existe una gran dispersión en su rango de precios, dependiendo del proveedor, un precio esperable de esta tecnología es de **\$30.000 por metro cuadrado de losa radiante**.

Fan coil

El valor de instalación de los fan coils depende de la capacidad de cada equipo, así como de las unidades que se requieran. El valor de estos equipos sigue una curva con valores entre **\$80.000 - \$190.000 por kilowatt térmico de fan coil**, en donde los más económicos son los equipos con una capacidad de entre 5 -10 kW_t, mientras que los más costosos son los equipos con una capacidad menor a 1 kW_t y los con una capacidad mayor a 15 kW_t.

Radiador

Al igual que los fan coil, el costo de instalación de radiadores depende de la capacidad de cada equipo y las unidades a instalar. El precio de estos es cercano a los **\$55.000 por kilowatts térmico de radiador** desde equipos sobre 5 kW_t, mientras que los equipos pequeños menores a 1 kW_t son mucho más costosos, con un valor de \$155.000 por kilowatts térmico de radiador.

Valor inicial y valor de los componentes

Con esta información podemos calcular el costo de inversión de un proyecto de climatización geotérmico, en base al tipo de instalación, considerando la mediana como el valor del ítem.

Tomando en cuenta un sistema de climatización para una residencia de 100 m², con una potencia de 5 kW_t de BCG, un colector horizontal de 200 m² de superficie y fan coils con una capacidad menor a 5 kW_t c/u, se tiene que el costo total de inversión es de \$9.000.000, equivalente a **\$1.800.000 por kilowatts térmico**. De estos, el mayor costo corresponde al colector, como se puede ver en la siguiente Figura 46.

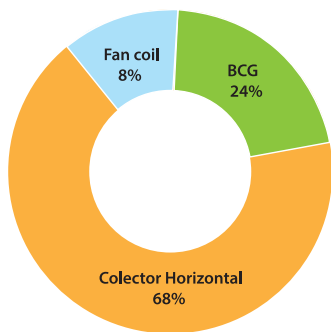


Figura 46. Distribución porcentual de costos climatización residencia de 100 m².

Si comparamos este costo de instalación con respecto a otras alternativas energéticas, el de la geotermia es mucho más elevado, debido a que es la única que requiere de la construcción de un colector geotérmico. En el gráfico inferior se compara el costo de inversión total entre los distintos sistemas de climatización, donde para todas las alternativas excepto la geotermia, se incluyen equipos de climatización con sistema de distribución incluido.

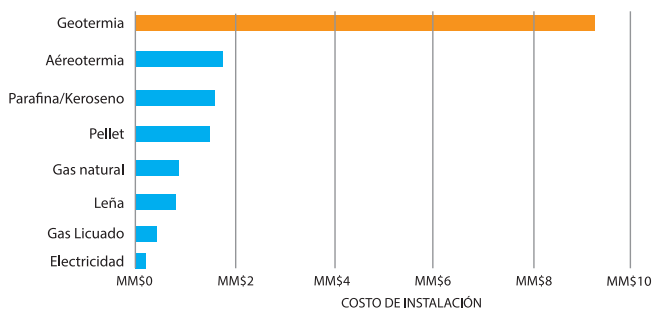


Figura 47. Costos de inversión en millones de pesos de un sistema de climatización para distintas tecnologías para una residencia de 100 m². (Elaborado en base a Centro de Sistemas Públicos, 2019).

En instalaciones grandes, en donde se requiera de una climatización centralizada, el margen de diferencia de inversión entre la geotermia con los demás energéticos va disminuyendo. Esto se debe a que los requerimientos en la instalación, como lo es contar con un sistema de distribución y con una caldera (en el caso de los combustibles) en lugar de usar una bomba de calor, se van equiparando con la geotermia.

El único elemento exclusivo para la geotermia corresponde al colector geotérmico, cuyo costo, en relación al costo total, debería disminuir a medida que crece el proyecto.

Además, debido a su concordancia con la economía de escala, el precio, en función de la capacidad del sistema, irá disminuyendo a medida que aumente el tamaño de la instalación.

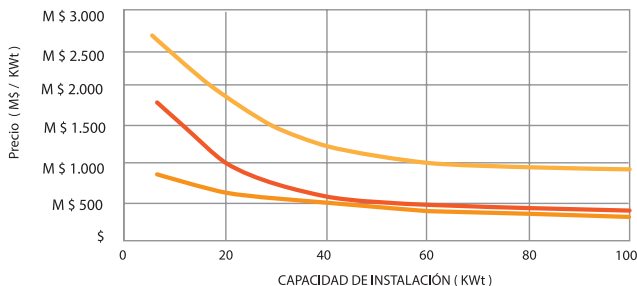


Figura 48. Rango de precios en miles de pesos, para una instalación geotérmica típica en función de la capacidad del sistema de climatización. Línea superior indica máximo, línea media indica mediana y línea inferior indica mínimo.

Recomendaciones

Debido a la alta variabilidad de los costos de instalación de la geotermia, es recomendable realizar diversas cotizaciones para evaluar cuál es la más conveniente. Cada empresa proveedora tiene sus fortalezas y debilidades, en relación con la calidad de sus insumos, precios, tiempos de instalación y posventa, por lo que se recomienda evaluar rigurosamente la empresa a contratar. Es de esperar que los instaladores sigan lineamientos, al menos similares a los expuestos en este manual, con el fin de promover la buena calidad del trabajo y el crecimiento de esta tecnología en el país.

Una opción para reducir la inversión inicial es el aprovechamiento de instalaciones preexistentes, como puede ser el sistema de distribución, de modo de disminuir la intervención necesaria. En ese sentido, la mejor opción es contar con un pozo de agua ya construido, debido a que elimina el costo del colector, lo que debería dejar al sistema en un valor similar a otras opciones de climatización centralizada.

Dado que los pozos poseen un gran rango de potencia disponible, recomendamos su uso cuando el recurso esté disponible, puesto que la inversión total de estos no incrementará linealmente con respecto a la potencia requerida, sino más bien de manera escalonada. Solo en instalaciones residenciales es recomendable el uso de colectores horizontales cerrados sobre los abiertos, puesto que su inversión debería ser menor.

Ejemplo

En la Escuela Luis Cruz Martínez, de Curacautín, Región de La Araucanía, se implementó un sistema de calefacción geotérmica en las salas de la Escuela Luis Cruz Martínez en base a BCG para clima y agua caliente sanitaria, con el uso de un pozo de agua de 38 metros de profundidad. Se climatizaron aproximadamente 1400 m², equivalentes a una potencia instalada cercana a 60 kW_t, utilizando un sistema de distribución en base a fan coils y recuperadores de calor, con un costo total de \$108.000.000.

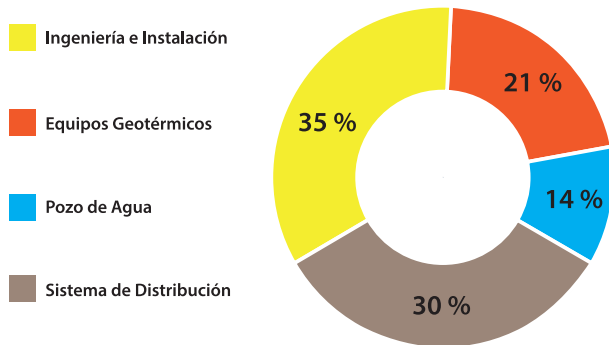


Figura 49. Distribución porcentual costos climatización escuela Luis Cruz Martínez, Curacautín.

En base a cotizaciones facilitadas por la empresa Geomarket S.A. para la climatización "teórica" de esta misma escuela, se realizó un análisis comparativo de los costos de inversión de distintas alternativas energéticas, tomando en cuenta solo los costos de adquisición de equipos de generación de calor (calderas y bombas de calor), costos de perforación para el colector geotérmico, y el mismo sistema de distribución, que se puede ver resumido en la siguiente figura.

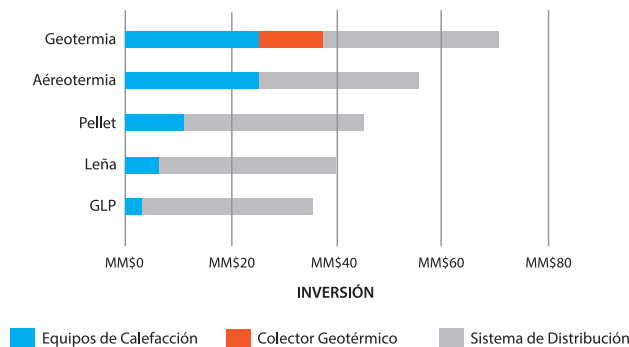


Figura 50. Costos de inversión sistema de generación y distribución de calor para la escuela Luis Cruz Martínez de Curacautín.

1.4 Evaluación económica privada

A continuación, se revisará la evaluación económica privada de proyectos de climatización en base a bombas de calor geotérmicas, mediante un análisis comparativo de los costos operacionales y de inversión de la geotermia, con respecto a otras fuentes energéticas de climatización.

Metodología

Para lo anterior, se utilizará la metodología tradicional de evaluación económica privada de proyectos en 3 pasos.

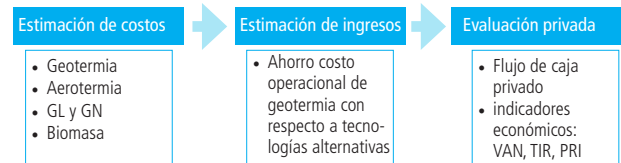


Figura 51. metodología para evaluación económica privada sistemas de climatización geotérmicos (Contreras, 2015).

En primer lugar, es necesario estimar los costos de inversión y operación de las distintas alternativas energéticas para un proyecto de climatización, tales como geotermia, aerotermia, gas licuado, gas natural y biomasa (leña y pellets).

Luego, en base a los costos operacionales de las distintas alternativas, se estiman los potenciales ingresos del sistema de climatización geotérmico a desarrollar considerando el ahorro económico anual en operación con respecto a las fuentes energéticas alternativas.

Finalmente, sopesando los ingresos y costos (inversión y operación) mediante un flujo de caja privado, es posible estimar la factibilidad o conveniencia económica de un sistema de climatización geotérmico, considerando indicadores económicos como el Valor Presente Neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

Resultados y aproximaciones

Debido a que la leña posee un costo de operación más bajo que la geotermia, además de una menor inversión, no resulta conveniente desde un punto de vista netamente económico reemplazar la leña con geotermia, pero sí entran en juego otros parámetros que abordaremos más adelante.

A pesar de su bajo costo operacional, la alta inversión de la climatización geotérmica hace que en proyectos de baja potencia, como lo es una vivienda unifamiliar, el período de recuperación de la inversión pueda estar sobre 20 años (Aiguasol, 2016), volviéndolo una alternativa poco atractiva.

Sin embargo, debido a las economías de escala en la inversión, el período de recuperación disminuye a medida que el proyecto crece. Proyectos sobre los 50 kW, similar a la climatización de

una escuela, comienzan a ser más rentables, con períodos de recuperación que pueden ser menores que 10 años. Dependiendo del energético que se reemplace (como gas o electricidad), una buena rentabilidad se puede dar en proyectos incluso más pequeños.

Asimismo, proyectos productivos energizados por geotermia también tienen el potencial de contar con períodos de recuperación menores a 10 años. Entre esas aplicaciones industriales destacan la industria vitivinícola, invernaderos de precisión, piscinas de piscifactorías y granjas de cerdos, entre otros (Aiguasol, 2016).

En instalaciones mucho más grandes, como pueden ser sistemas de climatización distrital o climatización de grandes edificios como hospitales u hoteles, la recuperación puede ser en un período inferior a los 5 años (Aiguasol, 2016). La geotermia puede ser muy atractiva para estas instalaciones, especialmente si se logra operar con las tarifas eléctricas apropiadas.

Recomendaciones

Analizando el mercado internacional de las BCG, especialmente en Norteamérica y Europa, se observa la implementación de medidas que permiten que la climatización geotérmica de proyectos de baja y media potencia sea económicamente rentable: modelos de financiamiento ESCO (*Energy Service Company*), beneficios tributarios y subvenciones para el desarrollo de proyectos de climatización geotérmicas.

Desde la década de los 80, empresas ESCO han implementado nuevos modelos de negocio (modelos ESCO) de servicios integrados, para la generación de proyectos de ahorro de energía y la utilización de ERNC a un menor costo inicial (que puede llegar a cero), lo que ha permitido irrumpir en los mercados energéticos con gran fuerza. Estas empresas apoyan las inversiones en eficiencia energética en clientes públicos o privados, pagándose, principalmente, por los ahorros generados en los edificios o instalaciones intervenidas.

En el mercado de las BCG, este tipo de cambios estratégicos se está comenzando a validar a partir de experiencias como las de *Dandelion Inc.*, en los Estados Unidos, donde el cliente puede instalar esta tecnología sin costo inicial, con pago mensual de entre USD\$80 y USD\$140, durante 20 años (similar al leasing solar que se utiliza para instalar paneles de forma accesible), es decir, costo mensual menor que las utilidades. Esto se puede ver graficado en la Figura 52. En celeste, se observa el pago por las mejoras realizadas (en este caso, implementación de un sistema de climatización geotérmico) y, en verde, el ahorro económico generado durante y después del pago total de las mejoras realizadas.

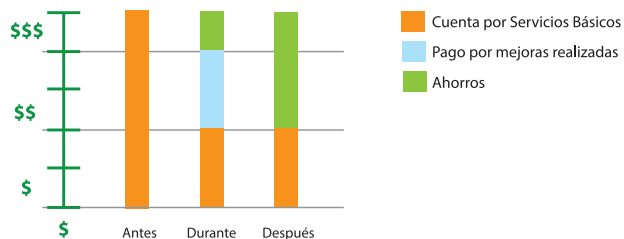


Figura 52. Etapas en el desarrollo de un proyecto tipo ESCO³.

El desarrollo de este modelo, junto a las políticas regulatorias, fondos federales, créditos fiscales y garantías de préstamos para instalaciones de ERNC, han permitido que el mercado de las BCG de EE.UU. haya alcanzado un valor de 1,8 billones de dólares para el año 2017⁴. Se espera que para el año 2024 supere los 2 billones de dólares, con la instalación de 420.000 unidades al año. En Europa, ya existen más de 2 millones de unidades instaladas a nivel residencial, con ventas anuales superiores a las 100.000 unidades. A nivel mundial, se espera que para el año 2024 este mercado alcance un valor de más de \$4 billones de dólares (EGEC Geothermal, 2017). Cabe destacar que el crecimiento del mercado se debe, en parte, a que instituciones como la agencia de protección medioambiental de EE.UU. han reconocido las BCG como la tecnología de refrigeración y calefacción más respetuosa con el medio ambiente, más eficiente en el consumo de energía y más costo eficiente⁵.

En Chile no existe una legislación específica que afecte a los sistemas de BCG, ni tampoco mecanismos de promoción, solo líneas de subvenciones para la implementación de ERNC o medidas de eficiencia energética en sectores como la industria (Aiguasol, 2016). Por esto, el Estado debe diseñar medidas que incentiven el desarrollo de empresas tipo ESCO en Chile, así como mecanismos de promoción a nivel legislativo y financiero. Para ahondar en lo anterior, a continuación llevaremos a cabo la evaluación social de este tipo de proyectos, haciendo hincapié en cómo sus distintas externalidades positivas, especialmente a nivel medioambiental y social, permiten paliar su alto costo de inversión y justificar un mayor nivel de apoyo estatal para su desarrollo.

Asimismo, independiente de la implementación de estas medidas, existen experiencias de calefacción distrital de condominios residenciales en Chile (Condominio Frankfurt, Temuco), donde gracias a la combinación de medidas como la reducción de la carga térmica de los hogares el aislamiento térmico de viviendas, la contratación de tarifas eléctricas correspondientes a clientes libres y el uso de la electricidad fuera del horario peak, la geotermia ha resultado ser la alternativa energética más económica, superando incluso a la leña y/o pellet y alcanzando un costo de apenas 7\$/kWt (Eficiencia Energetica Chile, 2019).

³ <http://a2s.cl/modelo-esco-un-incentivo-para-la-eficiencia-energetica-en-las-empresas/>

⁴ gminsights.com/industry-analysis/geothermal-heat-pump-market

⁵ openpr.com/news/1905891/u-s-geothermal-heat-pump-market-top-key-players-size-share

1.5 Evaluación social y multicriterio

Desde un punto de vista económico, se pudo observar que, dadas las actuales condiciones del mercado de las BCG en Chile, la inversión en proyectos de baja potencia tiene periodos de retorno demasiados altos como para ser convenientes para un inversionista privado.

Abandonemos ahora la perspectiva privada y veamos cómo evaluar proyectos de climatización en base a BCG desde una perspectiva pública, mediante la metodología de evaluación social de proyectos y la evaluación multicriterio, específicamente el proceso de análisis jerárquico (AHP), con el fin de resaltar los beneficios medioambientales y sociales de esta tecnología y así justificar su inversión por parte del Estado.

1.5.1 Evaluación social

La evaluación de proyectos centrada en criterios exclusivamente económicos no toma en cuenta las diversas externalidades positivas de esta tecnología renovable y limpia, especialmente a nivel medioambiental y social, las cuales -de ser integradas al análisis- podrían lograr que la inversión en proyectos de climatización con bombas de calor geotérmicas sea conveniente en casos donde la evaluación privada indica lo contrario.

Entre estos beneficios no tomados en cuenta por la evaluación privada se puede mencionar:

- La nula emisión directa de gases contaminantes, tanto de efecto invernadero (Dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, entre otros) como de efecto local (material particulado 2,5, monóxido de carbono, entre otros).
- El alto grado de autonomía de la geotermia como alternativa de climatización, al no depender de combustibles fósiles ni de biomasa para su funcionamiento, evitando de esta forma la deforestación de bosques (a diferencia del uso de leña y/o pellet).
- Su alto grado de eficiencia energética, al tener un COP mayor a 4, superior a cualquier otra alternativa de climatización eléctrica.

Afortunadamente, la evaluación social de proyectos es una metodología que permite incorporar algunos de estos beneficios, ya que su objetivo es medir y valorar los beneficios y costos de un proyecto desde la perspectiva de toda la sociedad y los agentes económicos que conforman la comunidad nacional. De esta manera, permite tomar en cuenta no solo impacto económico, sino también su impacto ambiental y social a la hora de evaluar un proyecto (Contreras, 2004).

Esto es especialmente útil para los proyectos de inversión pública desarrollados por el Estado, cuyo objetivo no apunta a elevar la utilidad económica, sino que a maximizar el bienestar social que puedan producir.

Para profundizar en esto, a continuación se detalla cómo la climatización geotérmica de espacios puede contribuir a enfrentar diversos problemas de índole ambiental, social y energético, presentes en la esencia de distintas políticas públicas impulsadas por el estado.

Contaminación atmosférica – intradomiciliaria



Foto 17. Contaminación producida por la combustión de leña al interior de los hogares en Coyhaique. CEGA.

La combustión de leña húmeda para calefacción residencial es la responsable del 86% de las emisiones de material particulado 2,5 (MP_{2,5}) en el país. Lo anterior provoca que 27 ciudades en Chile tengan niveles de concentración de este material superiores a la norma primaria anual de 20 µg/m³ de MP_{2,5}, afectando a más de 10 millones de personas en el país (Ministerio del Medioambiente, 2017). Es tal el nivel de contaminación atmosférica por este motivo, que el año 2016 la OMS declaró a Coyhaique como la ciudad más contaminada del mundo (Instituto Nacional de Estadísticas, 2016). Por otro lado, la mala combustión de la leña también emite monóxido de carbono, considerado un gas venenoso. Los efectos de la exposición a estas emisiones se pueden ver en la siguiente tabla.

Emisión	Efectos negativos
Material particulado MP ₁₀ - MP _{2,5}	Irritación de las vías respiratorias, disminución de la función pulmonar, agudización del asma, bronquitis crónica y muerte prematura. A largo plazo puede provocar un menor desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio, así como un mayor riesgo de cáncer en la edad adulta.
Monóxido de Carbono CO	Reduce habilidad de la sangre para transportar oxígeno. Es muy venenoso y en altas concentraciones puede producir la muerte. En la atmósfera posee una vida promedio de un par de meses, contribuyendo en la formación de CO ₂ y O ₃ .

Tabla 16. Efectos negativos de la emisión de material particulado y monóxido de carbono.

De esta forma, se ha estimado que anualmente la contaminación atmosférica en Chile produce 3.721 muertes prematuras, 3.141 admisiones hospitalarias, 108.100 visitas a salas de emergencias y 12.055.822 de personas con días de actividad restringida por la declaración de preemergencia y emergencia ambiental (Ministerio del Medioambiente, 2017).

El Estado, a través de los planes de descontaminación atmosférica (PDA) del Ministerio del Medio Ambiente, ha intentado abordar este problema mediante la implementación de medidas y acciones específicas, tales como la promoción del secado de leña, el reacondicionamiento térmico de casas, el recambio de estufas y el uso de fuentes de energía para calefacción menos contaminantes, entre otras.

El uso de bombas de calor geotérmicas para calefacción podría contribuir de manera significativa a esta política pública y a la disminución de la contaminación atmosférica en las ciudades del centro-sur del país, dado que no produce emisiones contaminantes.

Metodología

Para calcular el beneficio social-económico correspondiente a los casos evitados de problemas de salud gracias al reemplazo del uso de leña (en este caso, por energía geotérmica) y la correspondiente reducción de emisión de material particulado 2,5, se utiliza la metodología de Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para instrumentos de Calidad del Aire del Ministerio del Medioambiente (Ministerio del Medioambiente, 2013).

Para estimar, mediante esta metodología, el beneficio social-económico anual producto de la disminución de los distintos efectos a la salud, se deben seguir los siguientes 3 pasos:

- **Identificar los impactos:** corresponde a identificar los impactos que produce el contaminante a evaluar, en este caso aquellos correspondientes al MP_{2,5}.
- **Cuantificarlos:** consiste en relacionar la concentración de contaminantes con el número de casos afectados o el nivel de impacto de ellos.
- **Valorizarlos:** se refiere a poner en valor monetario los efectos, para así contraponerlos con costos y evaluarlos.

Para más detalles, se recomienda consultar la "Guía Metodológica para la elaboración de un Análisis General de Impacto económico y Social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire" del Ministerio del Medioambiente.

Resultados y aproximaciones

La cantidad de emisiones según el tipo de combustión se puede ver en el Anexo B. Por otro lado, las principales emisiones de una casa de 100 m², 5 kW, es de:



Figura 53. Principales emisiones contaminantes locales anuales de la leña en una vivienda⁶.

Cabe destacar que, utilizando esta metodología, se estima que el beneficio socioeconómico, producto del recambio total del uso de leña en Coyhaique y los casos de salud evitados correspondientes, asciende sobre los MM\$17.000 al año.

Ejemplo

Mediante la utilización de la metodología AGIES (Ministerio del Medioambiente, 2013), se pudo estimar que gracias al desarrollo de los proyectos de climatización geotérmica desarrollados por el CEGA en las escuelas Altos de Mackay de Coyhaique y Luis Cruz Martínez de Curacautín, y el consiguiente desuso de leña para calefacción, se pudieron evitar diversos casos de salud que implicaron un ahorro anual de \$2,8 millones y \$5,2 millones respectivamente.

Cambio climático



Foto 18. Vapor de agua que emana de varias chimeneas en una planta térmica de Boxberg, en Alemania⁷. La Vanguardia.

⁶ Considerando un consumo anual de 2.500 kg de leña al año. En el caso de calderas, las emisiones son mucho menores.

⁷ <https://www.lavanguardia.com/natural/20171106/432667651121/cambio-climatico-cumplimiento-acuerdo-paris.html>

La combustión de los diversos energéticos usados para calefacción emiten gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Si bien los combustibles en base a biomasa, como la leña, se consideran carbono neutrales, puesto que los árboles absorben el CO₂, su mala combustión todavía emite CH₄ y NO_x. Por otro lado, los combustibles fósiles sí poseen emisiones de CO₂.

Gases emitidos	Efectos negativos
Dióxido de carbono CO ₂	Es el gas de efecto invernadero que más incide sobre el calentamiento de la atmósfera. Es culpable del 80% de las emisiones de efecto invernadero en el mundo.
Metano CH ₄	Es un potente gas de efecto invernadero 28 veces más potente que el CO ₂ .
Óxidos de nitrógeno NO _x	Es un potente gas de efecto invernadero 268 veces más potente que el CO ₂ .

Tabla 17. Efectos negativos de los diferentes gases señalados.

El Estado de Chile, a través del acuerdo de París, adoptó el compromiso de reducir sus emisiones de CO₂ y gases equivalentes, lo que se ha manifestado en distintas políticas como, por ejemplo, la Agenda de Energía 2022-2026, del Ministerio de Energía, y la carbono-neutralidad del país para el año 2050 (Ministerio de Energía, 2022), planteada como meta del proyecto de Ley Marco de Cambio Climático. Entre las medidas incluidas para lograr dicho objetivo se destaca la descarbonización de la matriz energética y la promoción de energías renovables y medioambientalmente amigables.

En este sentido, el uso de bombas de calor geotérmicas para calefacción, al ser una tecnología limpia y amigable con el medioambiente, que no genera de forma local ningún tipo de emisiones de efecto invernadero, podría contribuir a la Agenda de Energía 2022-2026 y a alcanzar el objetivo de la carbono-neutralidad del país, disminuyendo así los efectos negativos del cambio climático en el territorio nacional.

No obstante, su operación no está exenta de la emisión (indirecta) de CO₂, la cual es producto de la matriz eléctrica del país y cuyo valor podrá ir disminuyendo a medida que se integren más energías renovables a la red de generación eléctrica.

Metodología

Para el cálculo del beneficio social, producto de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) gracias al reemplazo de fuentes de calefacción contaminantes por geotermia, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de climatización a reemplazar. Para estandarizar con respecto al CO₂, se utiliza el factor de CO₂-eq de los gases (Green House Gas Protocol, 2015).

$$Emisiones\ CO_{2\ eq} = \left(\sum_i^n \left(\frac{Emision\ GEI_i}{kWh_e} \right)_{Fuente\ energetica} \times CO_{2\ eq\ GEI_i} \right) \times Consumo\ energetico(kWh_e)$$

En primer lugar, se debe obtener el factor de emisión del gas y de la fuente energética a evaluar por unidad energética. Luego multiplicarlo por el factor de emisión CO₂-eq del gas. Finalmente, lo anterior se multiplica por el consumo energético de la fuente energética evaluada. Para obtener las emisiones de CO₂-eq totales se debe repetir el proceso anterior para cada gas a evaluar y sumar las emisiones por cada gas CO₂-eq.

2. Cuantificar las emisiones indirectas de CO₂ del sistema de climatización geotérmico a implementar. El Sistema Eléctrico Nacional de Chile durante el año 2019 tuvo un factor de emisión de gases de efecto invernadero de 406 gCO₂-eq por cada kWh_e (Ministerio de Energía, 2019).

$$Emisiones\ CO_{2\ eq\ GEOTERMIA} = Factor\ de\ emision\ de\ GEI \left(\frac{gCO_{2\ eq}}{kWh_e} \right) \times Consumo\ energetico(kWh_e)$$

Para obtener las emisiones de CO₂-eq de la geotermia, se debe multiplicar el factor de emisión de gases efecto invernadero mencionado por el consumo energético total del sistema de climatización geotérmico.

3. Multiplicar dichos valores por el precio social del CO₂, que en Chile asciende a \$25.350 CLP/ton_{CO2}⁸ (Ministerio de Desarrollo Social, 2018).

$$Ben.\ social_{reduccion\ emisiones\ CO_2} = (CO_{2\ eq\ original} - CO_{2\ eq\ geotermico}) \times Precio\ social_{CO_2}$$

Finalmente, restando las emisiones de CO₂-eq del sistema de climatización original por las del sistema de climatización geotérmico y multiplicando dicha resta por el costo social del sistema del CO₂ se puede obtener el beneficio social, producto de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del sistema de climatización geotérmico hipotético.

Resultados y aproximaciones

A continuación, mostramos las emisiones equivalentes de dióxido de carbono por vivienda para los distintos energéticos, en base a las emisiones señaladas en el Anexo B.

⁸ Considerando 1 USD = 780 CLP del día 5 de junio del año 2020.

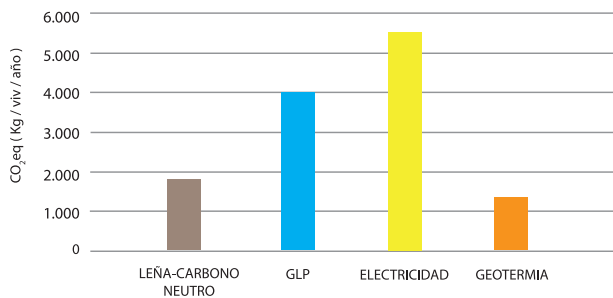


Figura 54. Emisiones CO₂ equivalentes de distintos energéticos por vivienda.

El reemplazo por geotermia implicaría un beneficio social anual por vivienda de \$6.000 en el caso de la leña, \$65.000 para el gas licuado y \$110.000 para la electricidad.

Ejemplo

Se estima que, gracias a los proyectos de climatización geotérmica desarrollados por el CEGA en la Escuela Luis Cruz Martínez, de Curacautín, y el consiguiente desuso de leña para calefacción, se evitó la emisión de 466 kg de CH₄ y 30 kg de NO_x. Mediante la utilización de los precios sociales del CO₂ y de los factores de equivalencia de los distintos gases de efecto invernadero con el CO₂, se pudo calcular que lo anterior implicó un beneficio social anual de \$817.304.

1.5.2 Evaluación multicriterio

Las metodologías de evaluación de proyectos basados en una comparación entre beneficios y costos de índole estrictamente económica (tales como la evaluación privada y social recién descrita, agrupadas en lo que se conoce como “enfoque de eficiencia”) tienen diversas limitaciones.

En primer lugar, al estar basadas en un enfoque de eficiencia -el cual está a su vez basado en cálculos de costos y beneficios económicos de los proyectos- estas no son capaces de incorporar criterios de carácter más cualitativo como la equidad social, la sustentabilidad o la justicia climática y ambiental. Esto se puede deber tanto al alto costo y tiempo que tomaría monetizar estas variables para incorporarlas en un análisis meramente económico o, bien, a que simplemente no pueden ser monetizadas (Contreras y Pacheco, 2008).

Asimismo, este enfoque no considera la participación de las partes involucradas, los efectos del proyecto para distintos agentes y procesos de anticipación y de participación ciudadana. En consecuencia, no se identifica a quienes ganan ni pierden con un proyecto, ni incluye compensaciones de los que ganan a los que pierden.

Como pudimos ver, este tipo de metodologías perjudican especialmente el desarrollo de proyectos basados en energías renovables emergentes, como la geotérmica, debido a su alto costo de inversión y de que no es capaz de capturar sus diversos beneficios sociales y ambientales.

Afortunadamente, la evaluación multicriterio, específicamente el proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología que se escapa de este enfoque miope, permitiendo superar algunas de sus limitaciones.

Esta metodología se caracteriza por su capacidad de manejar problemas de toma de decisiones donde existen múltiples objetivos, criterios, participantes y alternativas. Permite incorporar, por ejemplo, criterios distributivos, análisis de impacto por actores, impactos ambientales y variables tanto cuantitativas como cualitativas a los problemas de toma de decisiones (Arancibia et al., 2005) por lo que es especialmente útil para evaluar proyectos de interés público y que requieren de la intervención del Estado para su realización.

Considerando este tipo de beneficios de los proyectos de climatización mediante BCG, de índole más cualitativo (tales como calidad de climatización, aumento de confort térmico, disminución de pobreza energética, entre otros), que no pueden ser valorizados económicamente y, por lo tanto, quedan fuera de los análisis económicos, a continuación se describe cómo la evaluación multicriterio -específicamente el proceso analítico jerárquico (AHP) permite integrar variables cuantitativas y cualitativas para la evaluación de proyectos de energías renovables, como la climatización de espacios mediante bombas de calor geotérmicas.

Metodología

La metodología AHP (Analytic Hierarchy Process) es una de las más populares y utilizadas dentro de las metodologías de evaluación multicriterio, debido a su gran facilidad de aplicación.

Esta metodología permite apoyar el proceso de evaluación de proyectos al facilitar la integración de criterios de diversa índole, ya sean cuantitativos y/o cualitativos, transformando dichas mediciones y percepciones en una escala única, denominada “escala de prioridades”, permitiendo comparar distintos elementos y establecer ordenes de importancia o prioridad entre ellos, así como comparar diversos proyectos mediante el establecimiento de un ranking basado en un índice global.

La definición de los criterios, así como su distinto nivel de importancia (ponderadores), se basa en la consulta a un panel de expertos que se seleccionan considerando su relación con el proyecto (Contreras y Pacheco, 2008). Los principales pasos de esta metodología están descritos en la siguiente figura.

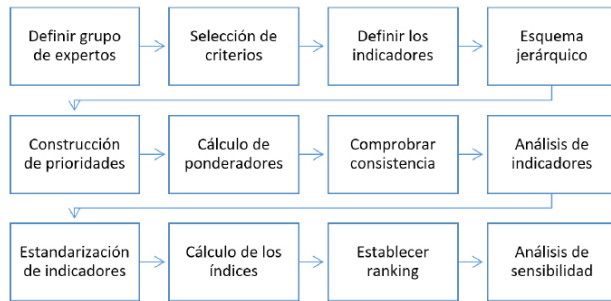


Figura 55. Proceso de una evaluación multicriterio. Fuente: (Contreras y Pacheco, 2008)

Para más detalles respecto a la metodología de evaluación multicriterio, se aconseja consultar el “Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos” de Juan Francisco Pacheco y Eduardo Contreras (2008).

Ejemplo

Esta metodología fue utilizada para evaluar el impacto del proyecto de climatización geotérmica desarrollado por CEGA en la escuela Curacautín, comparándolo con el sistema de climatización antiguo basado en leña.

Se definió como grupo de expertos al Ministerio de Energía, la escuela beneficiaria Luis Cruz Martínez y al CEGA. Luego, en base a encuestas realizadas a dicho grupo de expertos se definieron los criterios, indicadores y ponderadores de cada criterio y subcriterio, determinando un puntaje entre 0 y 5 para cada uno. Finalmente, se pudo estimar que el sistema de climatización geotérmico implementado tuvo una “nota” de 4,27 contra un 1,21 del sistema de climatización antiguo. De esta manera, se pudo observar que el proyecto logró un gran impacto positivo tanto a nivel económico, social, técnico y medioambiental, justificando así la replicación de proyectos de este tipo por parte de entidades estatales como el Ministerio de Energía.

OBJETIVO	Evaluar el impacto del Proyecto de climatización geotérmico, desarrollados con respecto a la situación energética original, de las zonas I y II de la escuela “Luis Cruz Martínez”.							
CRITERIOS	Económicos (L=0,14; G=0,14)		Técnicos (L=0,45; G=0,45)		Sociales (L=0,26; G=0,26)		Ambientales (L=0,14; G=0,14)	
SUBCRITERIOS (variables)	Inversión inicial (L=0,14; G=0,14)		Cal. de calidad (L=0,64; G=0,288)		Confort Térmico (L=0,57; G=0,148)		Emisiones de GEI (L=0,17; G=0,024)	
	4,02	0	0	5	2	5	0	5
	Co. Operacionales (L=0,75; G=0,105)		Inf. Ef. Energética (L=0,28; G=0,126)		# Beneficiados (L=0,57; G=0,148)		Emisiones de GEI (L=0,83; G=0,116)	
	2,93	4,64	1,88	3,12	1,70	3,17	1,22	5
	Facilidad de Uso (L=0,07; G=0,032)		Prácticas (L=0,10; G=0,026)					
	0	4	2	4				
	PUNTAJE SISTEMA ORIGINAL		1,21		4,27		PUNTAJE SISTEMA PROPUESTO	

Figura 56. Puntajes finales de la evaluación multicriterio entre sistema de climatización propuesto y original en las zonas I y II de la escuela Luis Cruz Martínez. Fuente: Elaboración propia.

2. Referencias

- Aiguasol. (2016). Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile (p. 217).
- Arancibia, S., Contreras, E., Mella, S., Torres, P., & Villablanca, I. (2005). Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva. 60.
- CDT, I.-D. S. (2018). Informe final de usos de la energía de los hogares Chile.
- Centro de Sistemas Públicos. (2019). Evaluación Programa de Recambio de Calefactores a Leña del Ministerio del Medio Ambiente. http://www.dipres.gob.cl/597/articulos-187242_informe_final.pdf
- Contreras, E., & Pacheco, J. F. (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos.
- Contreras, Eduardo. (2004). Evaluación social de inversiones públicas: enfoques alternativos y su aplicabilidad para Latinoamérica (p. 108).
- Eduardo Contreras y Christian Diez. (2015). Diseño y evaluación de proyectos. Un enfoque integrado (JC Sáez Ed). <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136613>
- Eficiencia Energética Chile. (2019). Centrales térmicas en base a bombas de calor en el sur de Chile.
- EGEC Geothermal. (2017). EGEC Geothermal Market Report 2017 (pp. 3–17).
- GIZ, NAMA, M. de E. (2017). Índice de Precios de Sistemas Fotovoltaicos (FV) Informe Final.
- GIZ, NAMA, M. de E. (2020a). Estudio de Mercado Bombas de Calor Geotérmicas y Aerotérmicas en Chile (Issue 1, p. 163). <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- GIZ, NAMA, M. de E. (2020b). Índice de precios - Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile. <http://4echile.cl/4echile/wp-content/uploads/2020/01/Indice-de-Precios.pdf>
- Green House Gas Protocol. (2015). Global Warming Potential Values. In Greenhouse Gas Protocol (Vol. 2014, Issue 1995, pp. 2–5).
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2016). Informe anual Medio ambiente. In Medio ambiente (p. 204). <https://doi.org/10.2307/j.ctv5132b9>
- Manuel Oyarzún G. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. In Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias (Vol. 26, Issue 1, pp. 16–25).
- Ministerio de Desarrollo Social. (2018). Precios Sociales 2018 (p. 24).
- Ministerio de Energía. (2022). Agenda de Energía 2022-2026.
- Ministerio de Energía. (2017). Decreto N° 11T/2016. In Biblioteca del Congreso Nacional. <https://www.leychile.cl/N?i=1106886&f=2017-08-24&p=>
- Ministerio de Energía. (2019). ANUARIO ESTADÍSTICO DE ENERGÍA 2019 (p. 192).
- Ministerio del Medioambiente. (2013). Guía Metodológica para la elaboración de un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire (p. 202).
- Ministerio del Medioambiente. (2017). Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente (p. 198). <http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf>

3. Anexos

3.1 Anexo A: Detalle tarifas eléctricas

El Decreto N° 11T/2016 establece que los clientes regulados son libres de elegir la opción tarifaria que desean, siempre y cuando estén dentro de las limitaciones de estas, que diferencian a los clientes conectados a Baja Tensión (BT) (≤ 400 V), de los conectados a Alta Tensión (AT) (> 400 V).

A su vez se separan dependiendo de los parámetros que miden para su cobro mencionado anteriormente (ver Tabla 14). En el Sistema Eléctrico Nacional (SEN)- que abarca desde Arica hasta Chiloé- y en el sistema de Magallanes, se entiende por horas-punta al período comprendido entre las 18:00 y las 22:00 horas de cada día de los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, exceptuándose sábado, domingo y festivos de dichos meses, según el Decreto N° 9T/2019. En el Sistema de Aysén, comprende al período entre las 17:00 y las 22:00 del 1 de mayo hasta el 30 de septiembre.

La tarifa BT1 es la que está asociada principalmente a las casas de Chile. A diferencia de las demás, la tarifa BT1 (y la TRAT1) tienen un cargo adicional por límite de invierno. Este cargo adicional solo se cobrará los meses de invierno (entre el 1 de abril y el 30 de septiembre en el SEN), cuando el consumo sea mayor a 430 kWh/mes. El límite de invierno del cliente es igual al mayor valor entre 350 kWh y el promedio mensual consumido en los meses de no invierno, incrementado en un 20%.

En el caso de las tarifas BT2 / AT2 y BT3 / AT3, cuando la potencia contratada o máxima leída está siendo usada mayoritariamente durante las horas de punta, el consumo será calificado como "presente en punta" y se le aplicará el precio unitario correspondiente. En caso contrario, el consumo será calificado como "parcialmente presente en punta". Para el resto de las tarifas se hace un cobro por potencia y por potencia en hora punta.

Opción tarifaria	Descripción	Cobros por		
		Demanda energía [\$/kWh _e]	Potencia máxima [\$/kW _e /mes]	Potencia máxima en hora punta [\$/kW _e /mes]
BT1 / TRAT1	Uso residencial. Potencia ≤ 10 kW	X		
TRBT2 / TRAT2	Uso residencial. Potencia ≤ 10 kW	X	X	X
TRBT3 / TRAT3	Uso residencial. Potencia > 10 kW	X	X	X
BT2 / AT2	Potencia contratada	X		X
BT3 / AT3	Potencia leída	X		X
BT4 / AT4	Potencia contratada o leída y potencia contratada o leída en hora punta	X	X	X
BT5 / AT5	Uso no residencial. Potencia leída y potencia leída en hora punta	X	X	X

Tabla 18. Resumen de cobros de tarifas. Elaborado a partir de (Ministerio de Energía, 2017)

3.2 Anexo B: Emisiones contaminantes por tipo de combustible

Dependiendo del tipo de equipo calefactor, el nivel de emisión de la combustión de la leña varía, siendo los calefactores individuales mucho menos eficientes que las calderas centralizadas. En la siguiente tabla mostramos el nivel de emisión en función del contaminante, usando como combustible eucalipto con un 15% de humedad. Cabe señalar que la combustión de leña húmeda implicará un aumento en las emisiones. Por otro lado, no se consideran las emisiones por el transporte del combustible, solo su combustión.

Contaminante	Emisiones combustión lenta [g/kg _{leña}]
MP _{2,5}	8,1
MP ₁₀	8,3
CO	115,4
CH ₄	22,1
NO _x	1,4

Tabla 19. Tasa de emisiones contaminantes leña. Fuente: (Manuel Oyarzún G., 2010)

Contaminante	Emisiones caldera [g/kg _{GLP}]
CO ₂	3.000,0
MP ₁₀	40,7
CO	427,1
NO _x	762,7

Tabla 20. Tasa de emisiones contaminantes del gas licuado. Fuente: Manuel Oyarzún G., 2010

Guía práctica
Uso de geotermia somera para climatización
Edición año 2022



Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA)