

**ANÁLISIS DE PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
AMBIENTES FAVORABLES PARA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN
COLOMBIA, POR MEDIO DE UN SISTEMA DE BAJA ENTALPIA EN
ST. LAWRENCE LOWLANDS, QUÉBEC, CANADÁ**

Presentado por
Darlyng Nicole Salazar Cuellar

En cumplimiento de los requisitos para obtener el
grado de Geocientífica

Departamento de Geociencias
Universidad de los Andes

Noviembre, 2019

**ANÁLISIS DE PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
AMBIENTES FAVORABLES PARA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN
COLOMBIA, POR MEDIO DE UN SISTEMA DE BAJA ENTALPIA EN
ST. LAWRENCE LOWLANDS, QUÉBEC, CANADÁ**

Estudiante

Director

Universidad de los Andes
Facultad de Ciencias
Departamento de Geociencias
Noviembre de 2019

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a la universidad de los Andes, institución por la cual tengo un profundo cariño y admiración. Fue el lugar que me vio crecer como profesional durante 5 años, tiempo en el que viví las mejores experiencias de mi vida. Allí, aprendí a ser más sabia, bondadosa y apasionada. Donde encontré el deporte al que pertenezco, desarrollé mis habilidades de liderazgo, afiancé mi carácter hasta perder el miedo a objetar cuando debía hacerlo. Sus instalaciones guardan innumerables recuerdos que albergaré para siempre en mi alma y en mi corazón.

A mi abuela, quien para siempre será mi persona favorita; espero llegar a ser un cuarto de lo valiente, sincera y leal que es esta mujer. A mis padres, que siendo tan jóvenes aprendieron de la mano conmigo y cómo educarme; les quedaré eternamente agradecida por su apoyo e incondicionalidad. A mi hermana, por ser mi cómplice y compañera de tantas noches de desvelo. A Nayib por su lealtad, a Fuze por su lección de vida, a Robin por enseñarme a ser mejor persona, a William por mostrarme un mundo inundado de novedades despampanantes, y a Laura Esquivel por su ser; Hoy reitero que cada uno de ellos fue el mejor regalo que me dejó esta linda etapa.

A Fabio, Ana, Yamirka y Natalia, por ser fuente de pasión e inspiración.

A Panny y Nanda por permitirme creer
y haber sembrado en mí la curiosidad
que hoy me llevó a ser Geocientífica.

A Dios, por sus eternas bendiciones.

Que empiece el juego...

Tabla de Contenido

Resumen.....	7
Abstract.....	8
1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	13
2.1. Objetivo General.....	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3. Metodología.....	14
4. Marco Geológico.....	15
4.1. Marco Geológico de Paipa, Boyacá.....	15
4.2. Marco Geológico de St. Lawrence Lowlands.....	16
5. Generalidades.....	18
5.1. Geotermia.....	18
5.2. Método Borehole Heat Exchangers (BHEs)	21
6. Adquisición y procesamiento.....	24
6.1. Localización de estaciones.....	24
6.2. Procedimiento de campo y adquisición de datos.....	26
6.3. Procesamiento de los datos de resistividad.....	29
7. Resultados y análisis.....	31
7.1. Monitoreo de inyección de calor.....	31
7.2. Modelos de inversión de resistividad.....	32
8. Discusión y conclusiones.....	36
9. Bibliografía.....	38

Resumen

Investigaciones realizadas desde los años 60 permitieron delimitar las regiones geográficas asociadas a una favorabilidad geológica, confirmando los importantes recursos geotérmicos que posee el país. El ambiente tectónico del territorio colombiano favorece la ocurrencia de anomalías térmicas manifestadas por numerosos sistemas hidrotermales. Paipa, Boyacá, fue seleccionada como una de esas áreas privilegiadas geográficamente, y por ende cuenta con un alto interés investigativo. Desde entonces, ha sido una región estudiada con geoquímica, SR (Sensores Remotos) y métodos geofísicos tales como MT (Magneto Telúrico) y ERT (Electrical Resistivity Tomography), los cuales describen las características térmicas de la zona.

En esta investigación se caracterizaron procesos de transferencia de calor en un sistema de baja entalpía al interior de la cuenca St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canadá, con el fin de generar una metodología replicable que permita identificar ambientes con potencial geotérmico de las mismas características en Paipa, Boyacá, Colombia. Para esto fue realizado un monitoreo de temperatura durante nueve días seguidos, en los cuales se observó detalladamente la evolución de la pluma termal generada por la inyección de calor mediante el método Borehole Heat Exchange (BHE). Dicho monitoreo permitió observar en detalle el comportamiento de las Zonas Termalmente Afectadas (TAZ), que se evidencia detalladamente gracias a la variación de la resistividad del subsuelo obtenido a partir de inversiones tipo Cross-Borehole modeladas con los softwares RES2DInv, Oasis y el complemento de Python R2.

Palabras clave: Geotermia de baja entalpía, BHE, TAZ, Inyección de calor, ERT, Paipa, St. Lawrence Lowlands.

Abstract

Researches carried out since 1960s delimited areas geologically favored by geography, this confirms the important geothermal resources in the country. Moreover, Colombian tectonic framework is the principal causal of thermic anomalies that are evidenced thought numerous hydrothermal systems. Paipa, Boyacá, was one of these favored regions with a high research interest for scientists and geochemical, RS (Remote Sensing), and geophysical methods like TM (Magnetotelluric) and ERT (Electrical Resistivity Tomography) studies has been done.

In this research, heat transfer processes were characterized in a low enthalpy system inside the St. Lawrence Lowlands basin, Quebec, Canada, in order to generate a replicable methodology to identify environments with geothermal potential of the same characteristics in Paipa, Boyacá, Colombia. For this, a thermal system was monitoring for nine days, where the evolve of thermal plume generated by heat injection was observed in more detail using the Borehole Heat Exchange (BHE) method. This process allowed to observe the behavior of Thermally Affected Areas (TAR), which is evidenced for variation of subsoil resistivity obtained from Cross-Borehole inversion modeled using softwares RES2Dinv, Oasis and R2 Pyhton complement.

Keywords: *Low enthalpy Geothermal Energy, BHE, TAZ, Heat Injection, ERT, Paipa, St. Lawrence Lowlands*

1. Introducción

Mitigar el cambio climático y lograr un desarrollo sostenible, son algunos de los grandes retos en la actualidad. Una de las ramas de las geociencias que proporciona soluciones para combatir directamente estas problemáticas, es la Geotermia, ya que no solo es la ciencia que estudia los fenómenos térmicos al interior del planeta, si no también hace referencia al conjunto de procesos empleados para producir energía eléctrica alternativa y sostenible.

Así bien, la importancia del estudio del calor terrestre está basado en su relación con procesos geodinámicos tales como el movimiento de placas litosféricas, la deformación tectónica, la actividad sísmica y volcánica, la elevación de los continentes y la topografía del piso oceánico (Alfaro et al., 2009). Los cuales son procesos netamente naturales que caracterizan esta área de las geociencias, como una de las energías con mayor proyección a largo plazo y mejores índices de retribución en términos energéticos y económicos.

Para el caso específico de Colombia, su favorabilidad tectónica se debe a una posición geográfica privilegiada, debido a que parte de su territorio se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del pacífico (Marzolf, 2014), lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica alrededor de las zonas que abarca. De acuerdo con lo anterior, la configuración actual del territorio colombiano, específicamente la zona andina, se debe a la interacción de la placa de Cocos, las placas Nazca, Caribe y Sudamérica. Interacción que a nivel regional resulta en una gran variación de regímenes tectónicos que delimitan diferentes provincias sismo tectónicas (Alfaro, 2015) (Fig. 1).

En ese orden de ideas, la intensidad de procesos tectónicos activos como la subducción, formación de cordilleras, cuencas y cadenas volcánicas, generan anomalías geotérmicas que

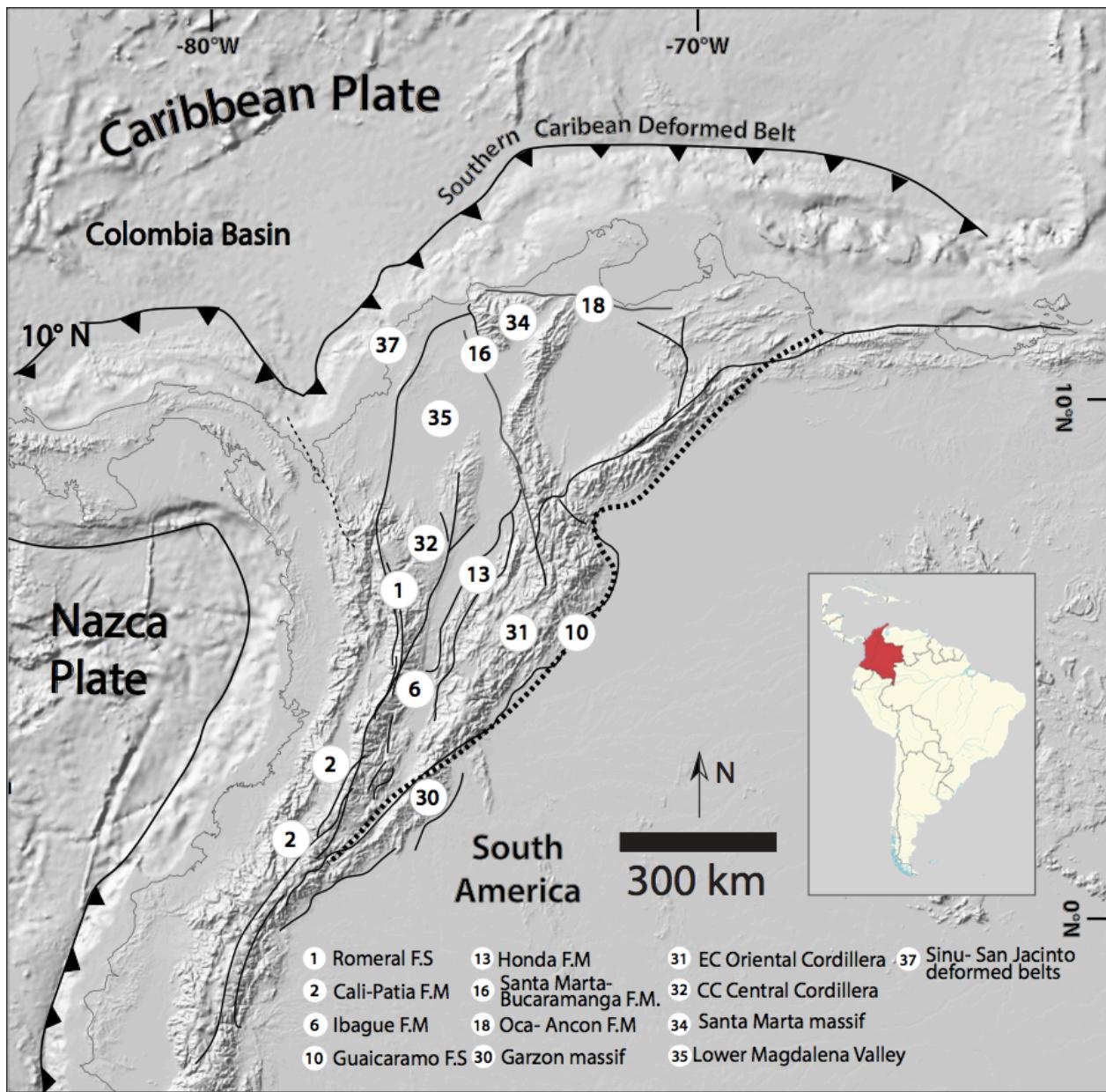


Figura 1. Mapa de configuración tectónica de Colombia con las principales fallas y afinidades tectónicas representadas en colores. Modificado de Montes et al. (2019); Montes et al. (2010).

permiten delimitar el territorio colombiano por su potencial geotérmico que se distribuye principalmente a lo largo de la cordillera de los Andes (Anexo 1). La distribución incluye manifestaciones térmicas como aguas termales, fumarolas y alteraciones hidrotermales de superficie. Adicionalmente, formaciones no volcánicas como las cuencas sedimentarias de Los Llanos, Caguán-Putumayo y el Valle del Magdalena (Mejía et al., 2014; Vargas et al. 2009) (Fig. 1).

En cuanto al desarrollo de proyectos geotérmicos, se deben contemplar cinco fases aplicables para cualquier proyecto energético que darán como resultado el balance de prospectividad del área estudiada (Marzolf, 2014). Se trata de fases de reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad, construcción y operación (Anexo 2). Esta investigación está centrada en la primera fase de desarrollo de un proyecto geotérmico, donde se establecen las zonas con potencial geotérmico y se delimitan las áreas para estudios técnicos y ambientales de prefactibilidad. En ese orden de ideas, un área dentro de la cuenca St. Lawrence Lowlands (SLL), Canadá, fue seleccionada para generar un modelo de estudio replicable con el que se identifiquen características representativas de un sistema geotérmico de baja entalpía en Colombia, específicamente en Paipa, Boyacá, Colombia.

Esta rama de las geociencias se ha beneficiado enormemente del desarrollo para la industria del petróleo y el gas respecto a las tecnologías utilizadas para la exploración de los recursos geotérmicos (Mazolf, 2003). Así bien, la implementación de estas se da con el fin de resolver problemas específicos asociados con la detección y caracterización de reservorios que cuentan con alguna prospectividad. Sin embargo, las condiciones físicas del fluido y los ambientes de generación del sistema geotérmico difieren de las de las metodologías utilizadas en los hidrocarburos, pues son contemplados sistemas geotérmicos que no requieren de elementos dependientes para el aprovechamiento de una fuente calorífica (Dickson y Fanelli, 2010).

Para este tipo de estudios superficiales, se han desarrollado tecnologías subterráneas de almacenamiento de energía térmica que garantizan la fiabilidad, la eficiencia y la sostenibilidad económica del calor renovable (Giordano et al. 2017). Gran parte de estas tecnologías corresponden a los intercambiadores de calor de pozos poco profundos (BHE), a partir de las cuales se realizan investigaciones que permiten describir de manera muy

cuidadosa las propiedades de la zona afectada térmicamente (TAZ). Dicho procedimiento puede ser descrito a través de mediciones puntuales realizadas por medio de sensores de temperatura ubicados dentro del sistema (Fig. 8), para así monitorear los cambios en las temperaturas subterráneas e identificar la evolución de la pluma de calor generada por la inyección en un lapso determinado.

Varios autores como Alfaro (2010) y Moyano (2015) han contribuido en la configuración geotérmica de alta entalpía en Paipa. Sin embargo, no existe un estudio que describa las características térmicas de baja entalpía al interior de esta área de interés. Es por eso que este proyecto busca establecer una metodología que pueda ser utilizada en Paipa u otro territorio colombiano con el fin de identificar y caracterizar el potencial geotérmico de baja entalpía, cuya definición está asociada a la exploración y explotación del calor de bajas temperaturas encontradas a profundidades relativamente bajas. De igual manera, esta investigación busca plantear un nuevo enfoque de temperatura en el municipio boyacense, aprovechando su interés y descripción regional para reactivar la exploración geotérmica en el país haciendo uso de métodos geofísicos, geoestadísticos, sensores remotos y de modelación. Igualmente, mediante la implementación de altas tecnologías como BHE y otros estudios aplicados en la cuenca de SLL que contribuyan en el reconocimiento y caracterización del área.

Así bien, es de suma importancia que en Colombia se desarrolle cultura y conciencia sobre energías alternativas que faciliten la búsqueda y transición hacia las energías renovables. Como objetivo global, no solo tiene implicaciones ambientales de peso, también es una responsabilidad imprescindible fomentar proyectos hacia la diversificación de la matriz energética del país que ayuden a combatir el impacto ambiental y cuenten con un alto porcentaje de retribución a largo plazo.

2. Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Identificar ambientes favorables con potencial geotérmico en Paipa, Boyacá mediante el modelamiento y caracterización de procesos de transferencia de calor realizados a partir del análisis de un sistema de baja entalpía en la cuenca sedimentaria St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canadá.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Observar detalladamente la evolución de la pluma termal generada al emplear el método Borehole Heat Exchange (BHE).
- Modelar las zonas termalmente afectadas (TAZ) producidas por la inyección de calor a partir de resistividades.
- Caracterizar y describir los ambientes favorables sujetos a una interpretación geológica, geofísica y geoquímica de los atributos geotérmicos.
- Delimitar áreas de interés en Paipa, Boyacá según comparación entre ambientes descritos como favorables por las investigaciones anteriormente realizadas y el área estudiada en Canadá.

3. Metodología

Para lograr los objetivos propuestos en esta investigación, se estudiará el comportamiento superficial del suelo tras la alteración del gradiente geotérmico en SLL, Canadá. Dicha alteración se genera por la interacción de calor producida a través de dispositivos BHEs (descritos detalladamente en la sección de generalidades), donde se dispone un sistema de pozo somero que permiten extraer e inyectar calor geotérmico de las rocas a profundidades superficiales. Así bien, se monitoreó la temperatura de la zona canadiense durante nueve días seguidos para observar la evolución de la pluma termal generada por la inyección de calor, con el fin de obtener imágenes cualitativas sobre las zonas termalmente afectadas (TAZ).

Las resistividades que reportados durante la inyección de calor (datos experimentales) serán comparados con los datos reales para así disminuir la incertidumbre de cada uno de ellos. Posteriormente se identificarán las posibles fuentes de incertidumbre durante el flujo de calor y se eliminarán del arreglo con el fin de mitigar datos anómalos que interfieran en la proyección y evolución de la pluma térmica. Una vez obtenidas las inversiones de resistividad, se solapa el comportamiento de la propiedad física de suelo con el diagrama de temperatura obtenido gracias al reporte de cada sensor al interior del cable de calor con en el que se hizo la inyección. Esta investigación dará como resultado un modelo cualitativo replicable en zonas donde el desarrollo en energías alternativas es bajo o donde no existe la tecnología propuesta en esta investigación es el caso de Paipa, Colombia, pues pese a que ha sido un área estudiada por diferentes autores (Moyano et al. 2015, Alfaro et al. 2015; Alfaro et al. 2009, entre otros) desde los años 60, no existe un estudio que describa las características de un sistema geotérmico somero.

4. Marco Geológico

4.1. Marco Geológico de Paipa, Boyacá

El municipio de Paipa está localizado en la Cordillera Oriental de Colombia, en una región que es predominada por rocas sedimentarias, esencialmente cretácneas y terciarias. El basamento está compuesto por rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, así como intrusivas y extrusivas del Jurásico que afloran en el Macizo de Floresta (Fig. 2) al NE de Paipa. Sobre el basamento ocurre la secuencia cretácica sedimentaria con diferencias en facies y espesores, por el control tectónico de fallas como Boyacá y Soapaga. (Velandia, 2003) y la presencia de eventuales cuellos volcánicos con edad aproximada de 2.5 millones de años.

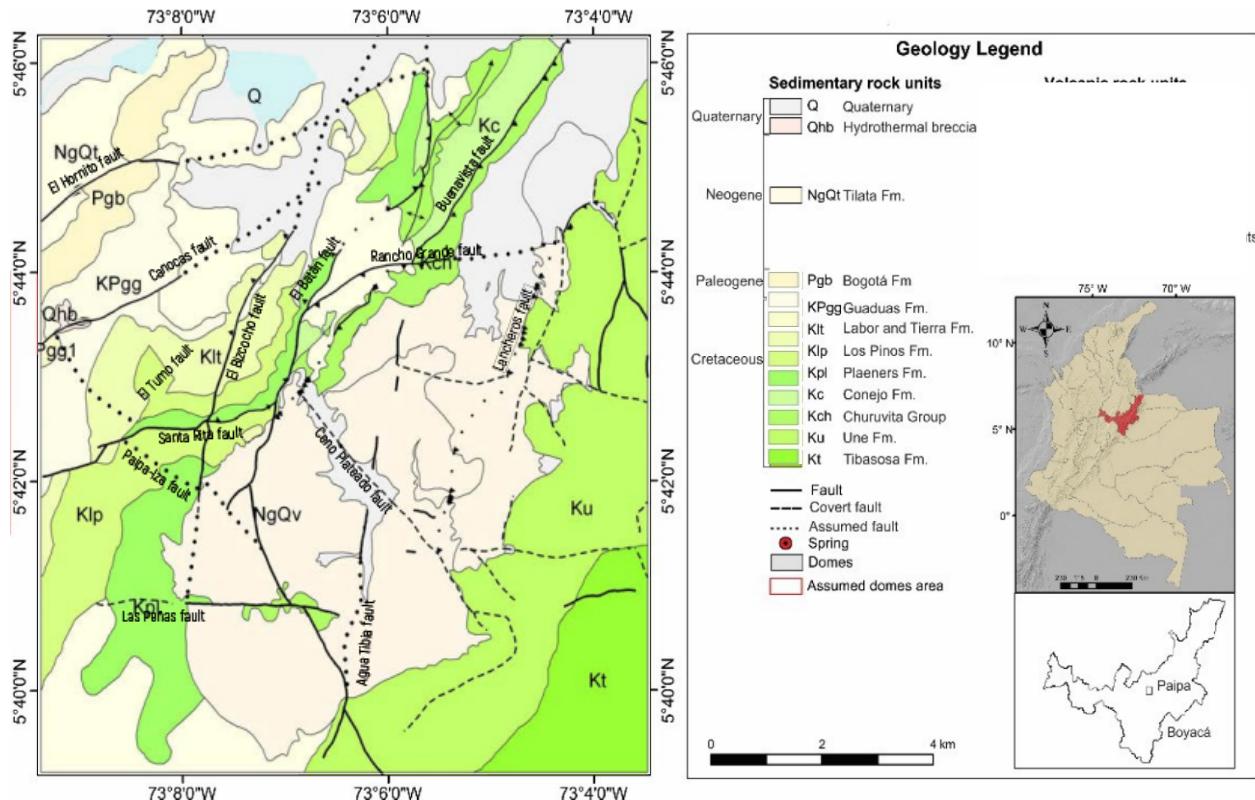


Figura 2. Mapa de configuración tectónica de Colombia con las principales fallas y afinidades tectónicas representadas en colores. Modificado de Rodríguez (2010).

4.2. Marco Geológico de St. Lawrence Lowlands

La cuenca sedimentaria de SLL está ubicada entre el basamento precámbrico de la provincia geológica Grenviliiana. Está separada de este domino por una paraconformidad y los Montes Apalaches. La separación entre las rocas Cámbricas y Ordovícicas de la cuenca SLL se formaron en un contexto geodinámico que evolucionó a partir de una grieta a un margen pasivo y una cuenca de antepaís (Comeau et al., 2012), como se evidencia en la (Fig. 3). Los estratos rocosos están relativamente no deformados y bien conservados. Un gran sinclinal alargado en la dirección suroeste-noreste es la estructura principal asociada a la cuenca SSL. Las fallas normales se encuentran abruptamente inclinadas hacia el sureste con una dirección suroeste-noreste que afecta las secuencias sedimentarias, engrosándose hacia el sureste (Castonguay et al. 2010).

Los ambientes de deposición, áreas donde el sedimento se acumula, influyeron en la formación de los grupos sedimentarios que caracterizan la cuenca SLL. Dichas áreas cuentan con distintas fases mineralógicas y valores de porosidad, desde arcilla hasta cuarzo de porosidad baja y moderada. Estudios geoquímicos reportan que tales variaciones mineralógicas afectan el potencial geotérmico, dado que la petrología y la mineralogía son dos disciplinas fundamentales para entender el tipo de reservorio existente.

La información presentada se puede combinar con las características del sitio, como el espesor de sobrecarga y la naturaleza, ya que los sistemas de bomba de calor geotérmica se instalan para completar el diseño del sistema en función de la configuración geológica local. El nivel del agua subterránea en la cuenca SLL es relativamente poco profunda y comúnmente se encuentra a menos de 10 m debajo de la superficie (Carrier et al. 2013; Laroque et al. 2015). Por lo tanto, se supuso que todas las rocas huésped estaban

completamente saturadas. Esta descripción de la cuenca SLL proporciona una comprensión cualitativa de los principales factores que afectan el potencial de transferencia de calor conductor de las unidades de roca, en las que se pueden instalar sistemas de bomba de calor acoplado a tierra y donde se llevaron a cabo más pruebas de laboratorio (Raymond et al., 2017).

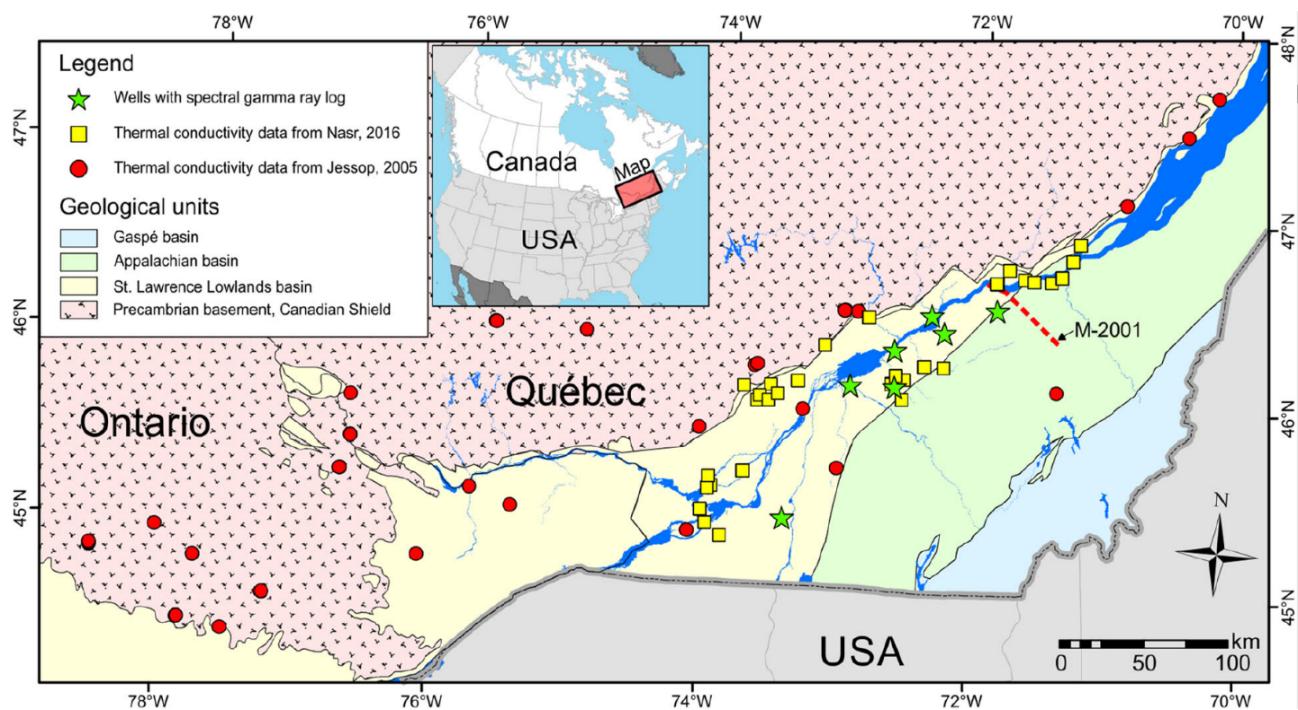


Figura 3. Mapa geológico de Saint Lawrence Lowlands, Quebec, Canadá.. Tomado de Bedard et al. (2017).

5. Generalidades

5.1. Geotermia

La energía geotérmica se define como la energía contenida al interior de la masa de alta temperatura de la corteza terrestre, el manto y el núcleo, donde la dinámica de la tierra y la diferencia de temperaturas entre sus interfaces generan la energía que fluye de manera continua desde su interior hasta la superficie (Toth y Bobok, 2017). Los cambios de temperatura a diferentes profundidades producidos por este flujo de calor se conocen como gradientes geotérmicos (Torres et al., 1993), cuya variación comprende valores entre 30 °/km hasta 200 °/km aproximadamente. Los gradientes más altos de temperatura se presentan en las placas tectónicas, donde el límite convergente favorece el ascenso del magma, el cual calienta grandes extensiones de roca a profundidades considerables formando yacimientos hidrotermales que posteriormente serán fuente de energía para los reservorios geotérmicos.

Ahora bien, existen varias teorías que intentan explicar la procedencia del calor interno en el planeta tierra. Sin embargo, en esta investigación serán resaltados los orígenes más citados por diferentes autores (Jaupart y Mareschal, 2010; Trillo, 2008; Turcotte, 1980): Desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y en el manto¹, calor liberado durante la formación del planeta², Movimientos diferenciales entre las capas internas de la tierra y la cristalización del núcleo³. Es por eso que la inmensa cantidad de energía térmica producida continuamente en estos sistemas y los largos tiempos geológicos requeridos para

¹ Principalmente U²³⁵, U²³⁸, Th²³² y K⁴⁰.

² Calor que sigue llegando a la superficie desde su propagación inicial hace 4.600 Ma

³ El núcleo externo

su agotamiento, hacen que la geotermia sea considerada como una fuente alterna de energía, renovable y prácticamente inagotable (Santoyo y Barragan-Reyes, 2010).

Por otro lado, los sistemas geotérmicos se encuentran en la naturaleza con una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas específicas. Dichas características dan origen a diferentes tipos de sistemas geotérmicos (Anexo 4) que pueden ser clasificados de acuerdo con su entalpía (capacidad de absorber o ceder energía termodinámica) (Marzolf, 2014), o de igual manera, con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010). La (Tabla 1) compila los diferentes rangos de temperaturas expuestos por diferentes autores para la clasificación del tipo de energía geotérmica.

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos de acuerdo con la temperatura del fluido de reservorio en °C. Modificado de Alfaro et al. (2010); Dickson y Fanelli (2004).

Tipo de Geotermia	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Baja Entalpía	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
Media Entalpía	90 -150	125 - 225	100 - 200	-	-
Alta Entalpía	>150	>225	>200	>150	>190

(a) Muffler y Cataldi (1978), (b) Hochstein (1990), (c) Benderitter y Cormy (1990), (d) Nicholson (1993), (e) Axelsson y Gunnlaugsson (2000).

En cuanto a la generación de energía geotérmica, se requieren tres factores principales: una fuente de calor, un reservorio y un fluido que interactúe con dicha fuente siendo el medio que transfiere el calor (Fig. 3). La fuente de calor puede estar regida tanto por intrusiones magmáticas que denotan muy altas temperaturas ($> 600^{\circ}\text{C}$), como por sistemas de baja entalpía donde el gradiente geotérmico normal corresponde a fuentes termales localizadas o residuales (Dickson y Mario Fanelli, 2010). El reservorio corresponde en la mayoría de los casos a un volumen caliente de rocas con características permeables

en el cual los fluidos se emplazan y extraen el calor emitido por la fuente. En cuanto al fluido geotermal, el agua es el fluido que mejor satisface las condiciones idóneas para un proyecto energético, pues es un medio capaz de contener gran capacidad calorífica, es lo suficientemente abundante y fácil de recuperar. Frecuentemente contiene sustancias químicas disueltas y gases como CO₂, H₂S, entre otros (Dickson y Mario Fanelli, 2010). Sin embargo, el vapor es un fluido especialmente adecuado para la conversión cíclica de energía (Toth y Bobok, 2017).

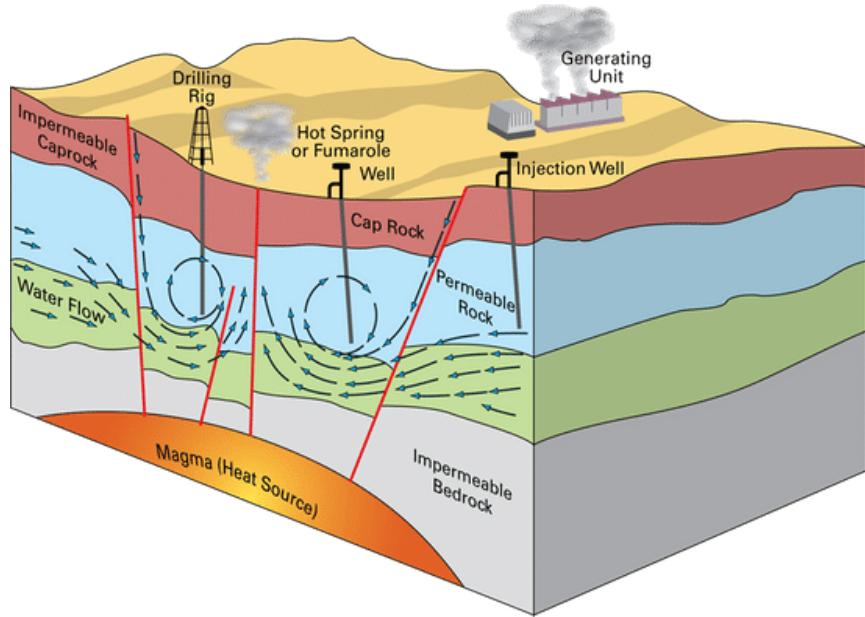


Figura 4. Diagrama ideal y simplificado de un sistema geotérmico. Tomado del British Geological Survey.

Dentro de un sistema geotérmico, y dentro de todos los elementos que constituyen un sistema geotérmico, la fuente de calor es el único que debe ser natural (Dickson y Mario Fanelli, 2010), si las condiciones son favorables, los demás elementos pueden generarse de manera artificial, lo que le da sentido a la geotermia de baja entalpía. La geotermia de baja entalpía o geotermia somera se refiere al estudio, ocurrencia y explotación del calor de baja temperatura (Tabla 1) que encontramos normalmente en el subsuelo a profundidades relativamente bajas, típicamente menor a 200 m (Seisdedos, 2012).

5.2. Método Borehole Heat Exchanger (BHE)

Los BHEs son dispositivos para extraer calor geotérmico de las rocas a profundidades superficiales, cuya configuración dentro del dispositivo consiste en un intercambiador de calor dentro de un pozo por el que circulan fluidos que interactúan con el medio y alteran el gradiente natural del subsuelo (Toth y Bobok, 2016). El pozo es llenado con un material de alta conductividad térmica que permite la transferencia de energía de BHE por conducción, la cual es bastante débil para alcanzar al menos una temperatura de salida media. Esto posiblemente por tratarse de un área somera, con bajas temperaturas y conductividades térmicas débiles. Ahora bien, se resalta que la bomba de calor eléctrica en funcionamiento puede aumentar la temperatura de salida del fluido circulante al nivel requerido (Toth y Bobok, 2016), y ser compensando térmicamente el sistema.

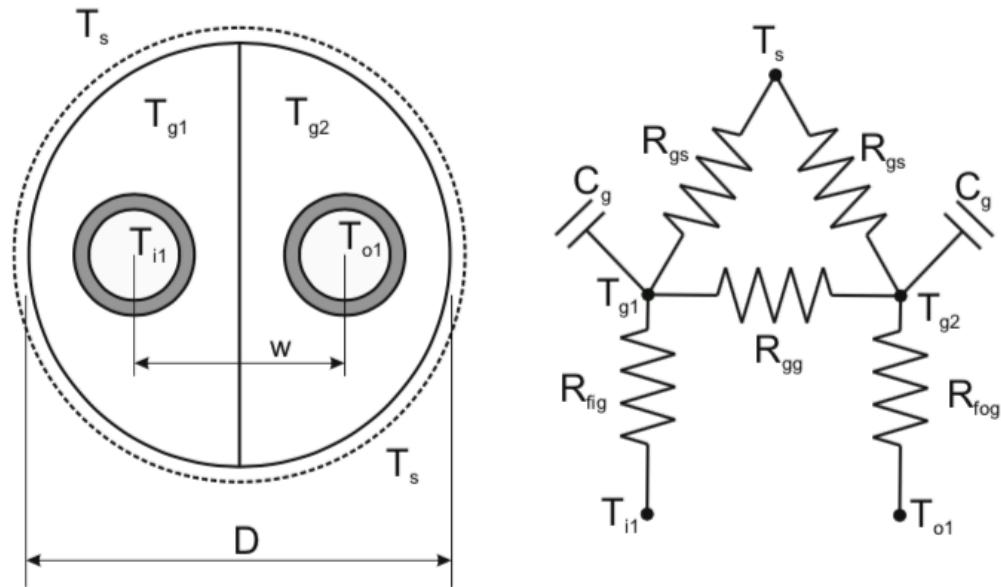


Figura 5. Configuración de BHEs y su correspondiente concepto resistencia y condensadores. Tomado de Shao et al. (2016)

La transferencia de calor entre la configuración del pozo y el subsuelo se puede dividir en cinco vías, como se evidencia en la Fig. 6: (1) la entrada por la tubería del pozo y la primera zona resinada; (2) el tubo de salida y la segunda zona resinada; (3) las dos zonas resinadas; (4) entre la primera zona resinada y el suelo; (5) entre la segunda zona resinada y el subsuelo (Shao et al., 2016).

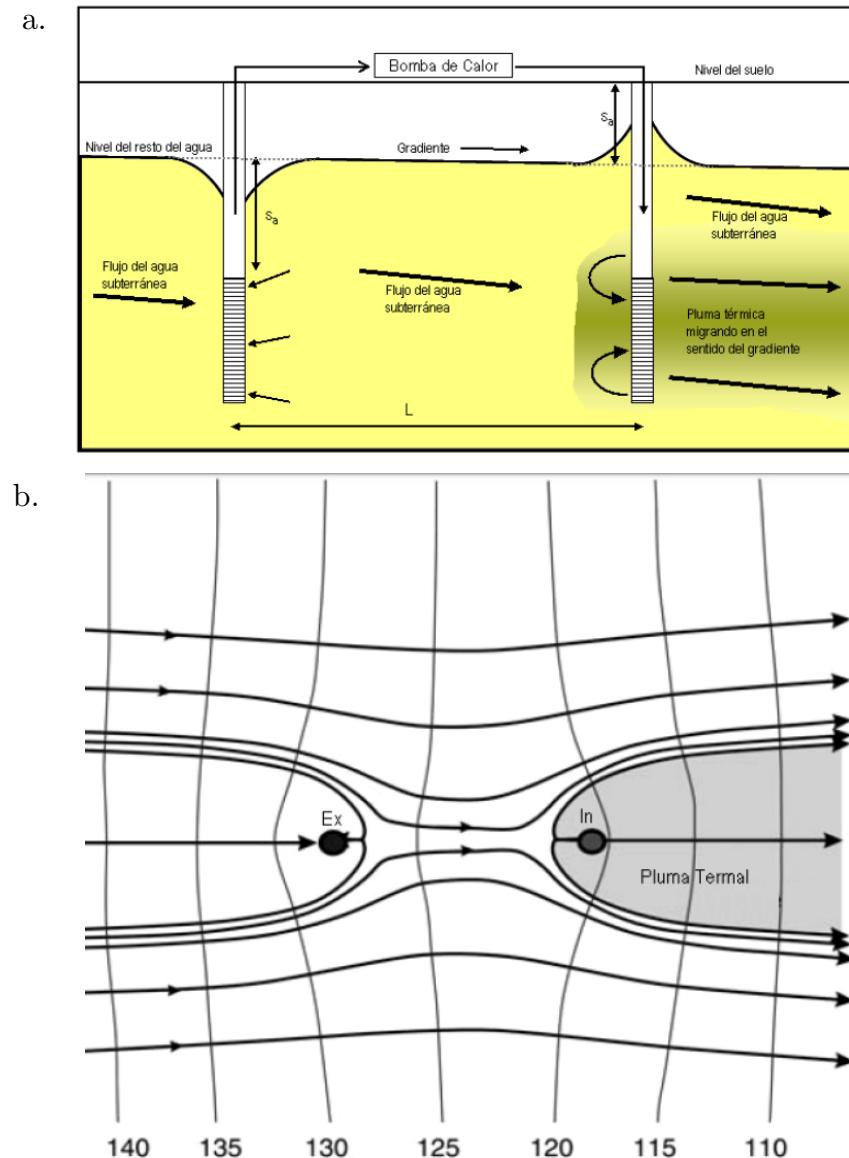


Figura 6. Sistema doble de pozos. A) Pozo de extracción (Ex) e inyección, vista transversal del sistema, L (longitud entre pozos), S_a (elevación de cada pozo). B) Vista en planta del sistema. Las flechas negras representan el flujo del agua subterránea, mientras que las líneas numeradas representan los niveles de agua o valores de cabeza que declinan hacia la derecha. Tomado y modificado de Seisdedos (2012).

En cuanto a la Fig. 5 se expone la sección transversal de una configuración de BHE tipo 1U, la cual cuenta con dos tubos en forma de U que generalmente no se encuentran en contacto directo con el suelo (Shao et al., 2016). Por otro lado, para simplificar el proceso de transferencia de calor dentro de un BHE, se conceptualiza con el modelo Resistor-Condensador (Fig. 5 derecha), donde la resistencia ilustra la corriente obstaculizada por algún componente, mientras que, si el componente es capaz de almacenar electricidad, se le denomina condensador. Siendo este concepto igualmente válido en el proceso de transporte de calor en un BHE. (Shao et al., 2016).

6. Adquisición y procesamiento

6.1. Localización de estaciones

La adquisición por medio del método BHE consiste en una inyección principal de calor en el subsuelo. Se llevó a cabo en el mes de junio en Quebec, Canadá, específicamente en la cuenca SLL y durante nueve días se observó el comportamiento del subsuelo luego de que el medio se alterara térmicamente por el método de inyección.



Figura 7. Vista en planta de la configuración de los pozos BHEs, Quebec, Canadá.

La configuración de los pozos se puede observar en la Fig. 8, donde el pozo 1 y 4 corresponden a los puntos geotérmicos, puntos en los cuales: 1) es inyectado fluido energéticamente cargado capaz de afectar térmicamente la zona y 2) el pozo en el cual se realizó la obtención de resistividades y monitoreo de la ploma térmica generada por la inyección.

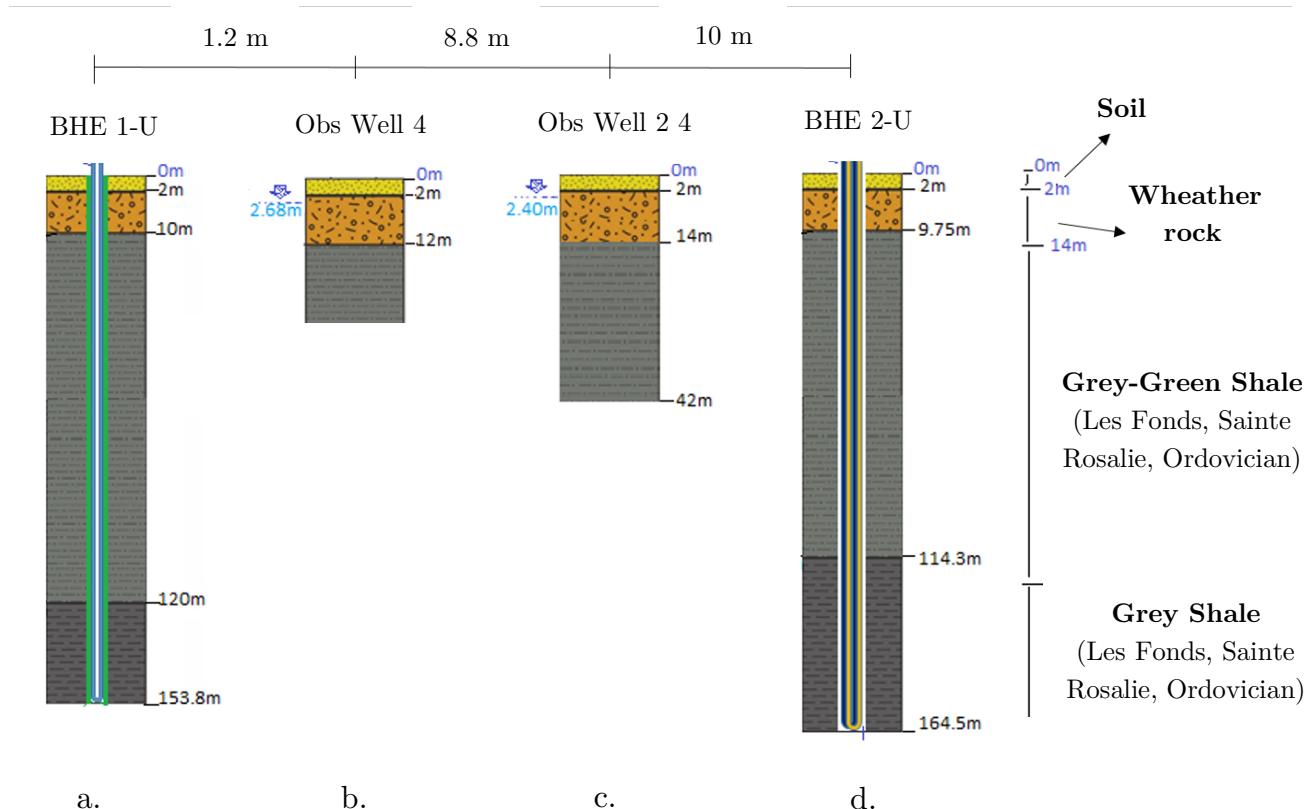


Figura 8. Configuración de los pozos BHEs. a, c y e corresponden a pozos de control de temperatura y resistividad. El pozo d corresponde al pozo donde se hace la inyección de calor.

6.2. Procedimiento de campo y adquisición de datos

Con el fin de llevar a cabo un procedimiento efectivo durante la toma de datos y al mismo tiempo mitigar las anomalías e irregularidades de la adquisición, es indispensable que el arreglo geotérmico y geofísico en campo cumpla con todas las especificaciones según el objetivo del proyecto. En este caso, fue necesaria una unidad de calor por la cual se transmitía energía al subsuelo, la cual consistía en un Datalogger, un regulador de potencia y un Router Wifi. De igual manera, fue necesaria una unidad ERT para llevar a cabo la interacción y medición de la resistividad del sistema geotérmico y los electrodos de superficie que completaban el arreglo mixto.

Por otro lado, las propiedades térmicas e hidrogeológicas del subsuelo fueron caracterizadas cuidadosamente para la debida instalación y distribución de la configuración de los pozos, tal como se ilustró previamente en la Fig. 8 y a continuación en la Fig. 9.



Figura 9. Arreglo geofísico y geotermico en campo.

Ahora bien, en la *Tabla 2.* se encuentra la distribución de ERT survey, los días y las horas exactas en las que se obtuvo la adquisición de resistividad. Cada una de las mediciones obtenidas están conformadas por un ponderado de 1350 datos que incluyen coordenadas y propiedades del subsuelo a profundidad.

Tabla 2. Mediciones obtenidas durante la adquisición ERT del mes de junio de 2019. La fila resaltada representa el día en el que cesó la inyección de calor.

No.	Día	Hora	ERT survey	Potencia [W] ¹	Energía [kj] ²
1	Lunes 10	10:00 am	Cero	0	0
2	Lunes 10	4:00 pm	Uno	1099.27	329.781
3	Martes 11	4:00 pm	Dos	1078.20	323.46
4	Miércoles 12	12:00 pm	Tres	1082.10	324.63
5	Jueves 13	2:00 pm	Cuatro	1081.33	324.399
6	Viernes 14	1:25 pm	Cinco	1062,88	318,864
7	Sábado 15	3:00 pm	Seis	0	0
8	Domingo 16	5:40 pm	Siete	0	0
9	Lunes 17	8:40 am	Ocho	0	0
10	Martes 18	8:40 am	Nueve	0	0

¹Wats

²Kilojouls

En cuanto al monitoreo de resistividad, cada pozo geotérmico cuenta con un cable que mide la resistividad de las rocas en el subsuelo (Fig. 10). El monitoreo llegó a una profundidad de 150 m y se obtuvo un arreglo mixto no convencional, lo cual significa que se comparte un arreglo entre dipolo-dipolo y un arreglo Wenner. La adquisición ERT consistió en 1425 mediciones de quadrupolos. La medida 1 a la 1220 correspondía a un arreglo dipolo-dipolo superficie/pozo con los electrodos de corriente en la superficie y los electrodos de potencial en el pozo. Y los restantes correspondían a un arreglo tipo wenner.

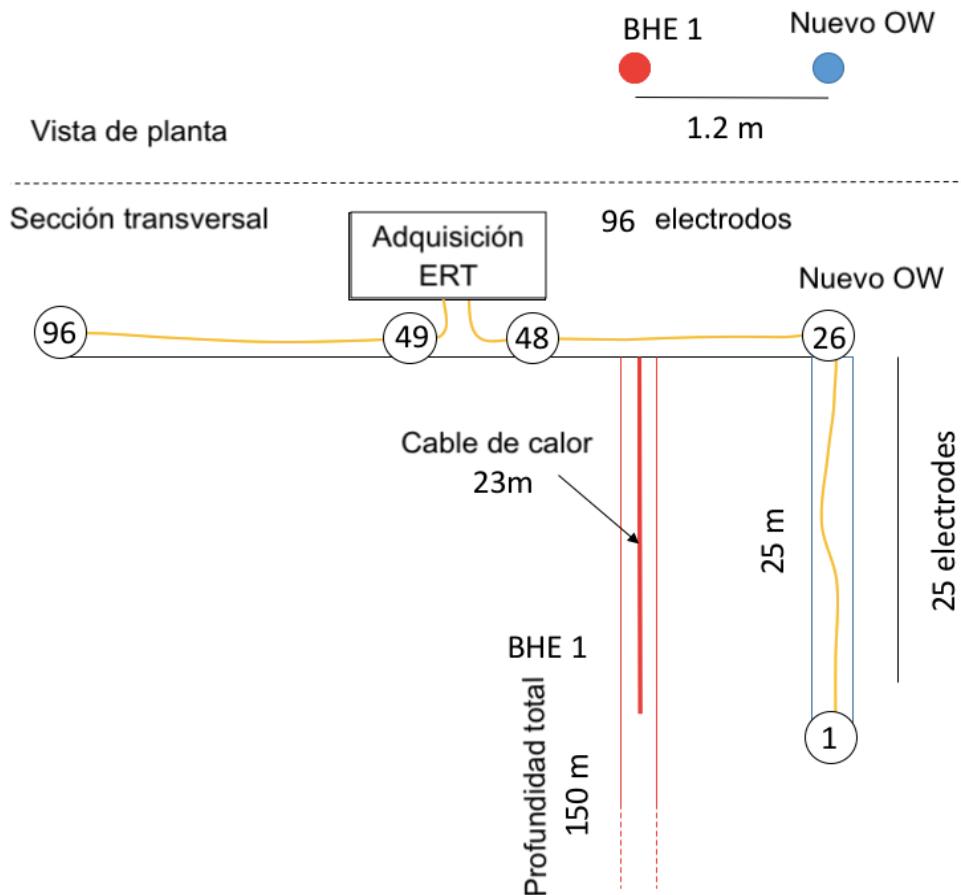


Figura 10. Configuración para el monitoreo eléctrico de resistividad

Con la adquisición de datos obtenida a partir del procedimiento geofísico y geotérmico en campo, se analizarán en detalle las variaciones de temperatura en un lapso de 8 días, tiempo en el que fue hecha la adquisición dentro de la zona canadiense (Tabla 2). Posteriormente, se realizarán modelos de inversión de resistividad del subsuelo en el software RES2DInv para complementar los resultados de las variaciones de temperatura dada por la inyección de calor.

6.3. Procesamiento de los datos de resistividad

Para el procesamiento de resistividad, se utilizó el software Prosys II V4 con el fin de traducir el formato de los datos obtenidos durante la adquisición (.bin) y efectuar procesos como filtrados de resistividades anómalas. Dicho programa arrojaba información sobre el tipo de arreglo, el número y la separación entre electrodos, la resistividad [ohm.m], la polarización inducida [mV], el Voltaje [mV], la desviación estándar y la corriente [mA] (Fig. 11).

#	El-array	xA(m)	xB(m)	xM(m)	xN(m)	Rho ...	Dev.	M (m...)	SP (...)	VM...	IAB (...)
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	62.13	0.00	0.00	-39.15	-1.300	820,490
<input checked="" type="checkbox"/> 2	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	54.19	0.00	0.00	48.46	-2.543	820,490
<input checked="" type="checkbox"/> 3	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	37.33	0.00	0.00	6.34	-4.836	820,490
<input checked="" type="checkbox"/> 4	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	18.92	0.00	0.00	-65.34	-9.623	820,490
<input checked="" type="checkbox"/> 5	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	14.06	0.00	0.00	-142.23	-58.523	820,490
<input checked="" type="checkbox"/> 6	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	72.18	0.00	0.00	24.58	-1.818	819,162
<input checked="" type="checkbox"/> 7	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	49.62	0.00	0.00	-24.65	-2.928	819,162
<input checked="" type="checkbox"/> 8	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	30.12	0.00	0.00	16.56	-5.259	819,162
<input checked="" type="checkbox"/> 9	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	18.69	0.00	0.00	18.17	-14.604	819,162
<input checked="" type="checkbox"/> 10	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	26.46	0.06	0.00	11.85	-234.139	819,162
<input checked="" type="checkbox"/> 11	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	31.92	0.03	0.00	-17.12	-288.062	16,092
<input checked="" type="checkbox"/> 12	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	71.09	0.00	0.00	-18.40	-2.177	818,498
<input checked="" type="checkbox"/> 13	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	45.97	0.00	0.00	53.53	-3.462	818,498
<input checked="" type="checkbox"/> 14	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	23.58	0.00	0.00	3.05	-5.694	818,498
<input checked="" type="checkbox"/> 15	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	16.48	0.00	0.00	-54.40	-20.869	818,498
<input checked="" type="checkbox"/> 16	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	27.46	0.03	0.00	-2.67	-612.208	818,498
<input checked="" type="checkbox"/> 17	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	63.00	0.00	0.00	-6.81	-2.368	817,102
<input checked="" type="checkbox"/> 18	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	41.38	0.00	0.00	7.81	-4.037	817,102
<input checked="" type="checkbox"/> 19	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	19.50	0.00	0.00	44.06	-6.696	817,102
<input checked="" type="checkbox"/> 20	Mixed / non conventio...	0.25	2.50	0.00	0.00	14.73	0.00	0.00	-93.38	-32.285	817,102
<input checked="" type="checkbox"/> 21	Mixed / non conventio...	0.50	2.75	0.00	0.00	57.83	0.00	0.00	-39.18	-1.373	791,029
<input checked="" type="checkbox"/> 22	Mixed / non conventio...	0.50	2.75	0.00	0.00	49.40	0.00	0.00	48.50	-2.626	791,029
<input checked="" type="checkbox"/> 23	Mixed / non conventio...	0.50	2.75	0.00	0.00	34.83	0.00	0.00	6.31	-5.090	791,029
<input checked="" type="checkbox"/> 24	Mixed / non conventio...	0.50	2.75	0.00	0.00	19.43	0.00	0.00	-65.42	-11.037	791,029
<input checked="" type="checkbox"/> 25	Mixed / non conventio...	0.50	2.75	0.00	0.00	15.23	0.03	0.00	-142.33	-68.046	791,029

Figura 11. Preprocesamiento de los datos en el software Prosys II V4.

Posterior a eso, se exportaron los datos en un formato editable para recalcular el valor de resistividad de la siguiente manera:

$$R = \frac{V_p}{I_n}$$

Donde R corresponde a la resistividad, V_p al voltaje y In a la corriente. Una vez realizado el cálculo de resistividad para cada uno de las mediciones (Tabla 2), se crea un archivo .txt con las coordenadas X⁴ y Z⁵ de los pozos (Fig. 11) y la información obtenida del preprocesamiento en el software Prosys II. Despues de configurar la información obtenida a partir de la adquisición BHE y de calcular las resistividades experimentales para cada uno de los datos dentro de cada medición, se siguen las indicaciones sobre el manejo de arreglos tipo cross-borehole (Fig. 6) encontradas en el manual del software RES2Dinv (Loke, 2010), específicamente en el Apéndice I.

Luego de estructurar los datos adecuadamente para modelar el comportamiento de la inyección de calor en el subsuelo, se deben configurar parámetros requeridos por el software como el espaciamiento entre electrodos, el tipo de arreglo y el número de datos obtenidos durante la adquisición. Dicho valor correspondía a 1425 datos tomados, de los cuales fueron eliminados 23 datos que presentaban problemas tanto de adquisición como de procesamiento. Sin embargo, el proceso debía ser bastante riguroso debido a que el tipo de arreglo (cross-borehole) es uno de los menos frecuentes y a menudo el software en el cual se realizan las tomografías presenta errores que pueden retrasar el procesamiento.

Una vez se establece un formato modelo de la configuración tipo cross-borehole que será ingresado al software, se realiza el proceso para cada uno de los datos obtenidos con el fin de reducir el porcentaje de error en las tomografías.

⁴ X es el desplazamiento horizontal del arreglo.

⁵ Z es la profundidad alcanzada por pozo.

7. Resultados y análisis

7.1. Monitoreo de inyección de calor

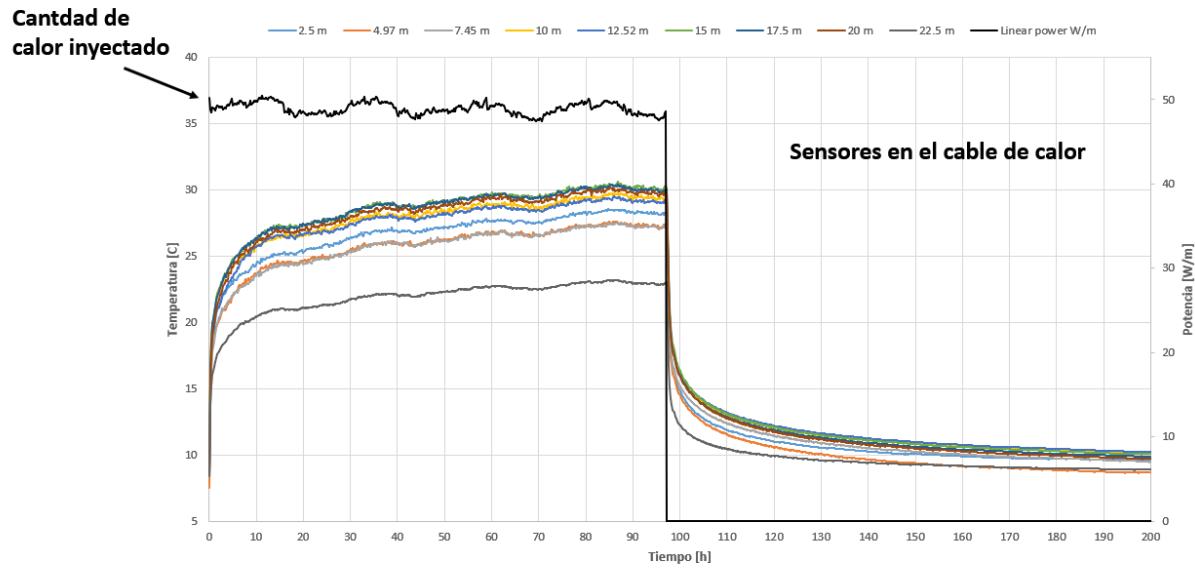


Figura 12. Gráfica que representa el comportamiento de cada sensor al interior del cable de calor respecto a la inyección de calor.

La figura anterior expone el comportamiento de los sensores de calor a diferentes profundidades en el cable de calor, como se evidencia en la Fig. 10. La línea negra en el tope de la gráfica representa la cantidad de calor inyectado durante los primeros 4 días de la adquisición de datos. A las 96 horas (5to día de adquisición) cesa la inyección de calor y se evidencia un decrecimiento abrupto de la temperatura, de un rango de 27-30 °C pasa a ≈ 22 °C, cambiando la concavidad del sistema. La temperatura sigue decreciendo hasta estabilizarse en un rango de 13-10 °C. Esto significa, que los sensores dejan de captar la potencia disipada por el cable de calor cambiando la dirección de la curva de temperatura ponderada hasta llegar a un equilibrio asintótico en las 200 horas, 9no y ultimo día de adquisición.

7.2. Modelos de inversión de resistividad

Figura 13. Inversión cero, uno y dos (Tabla 2) en donde se identifican los flujos preferenciales del calor desde la inyección número uno hasta la dos.

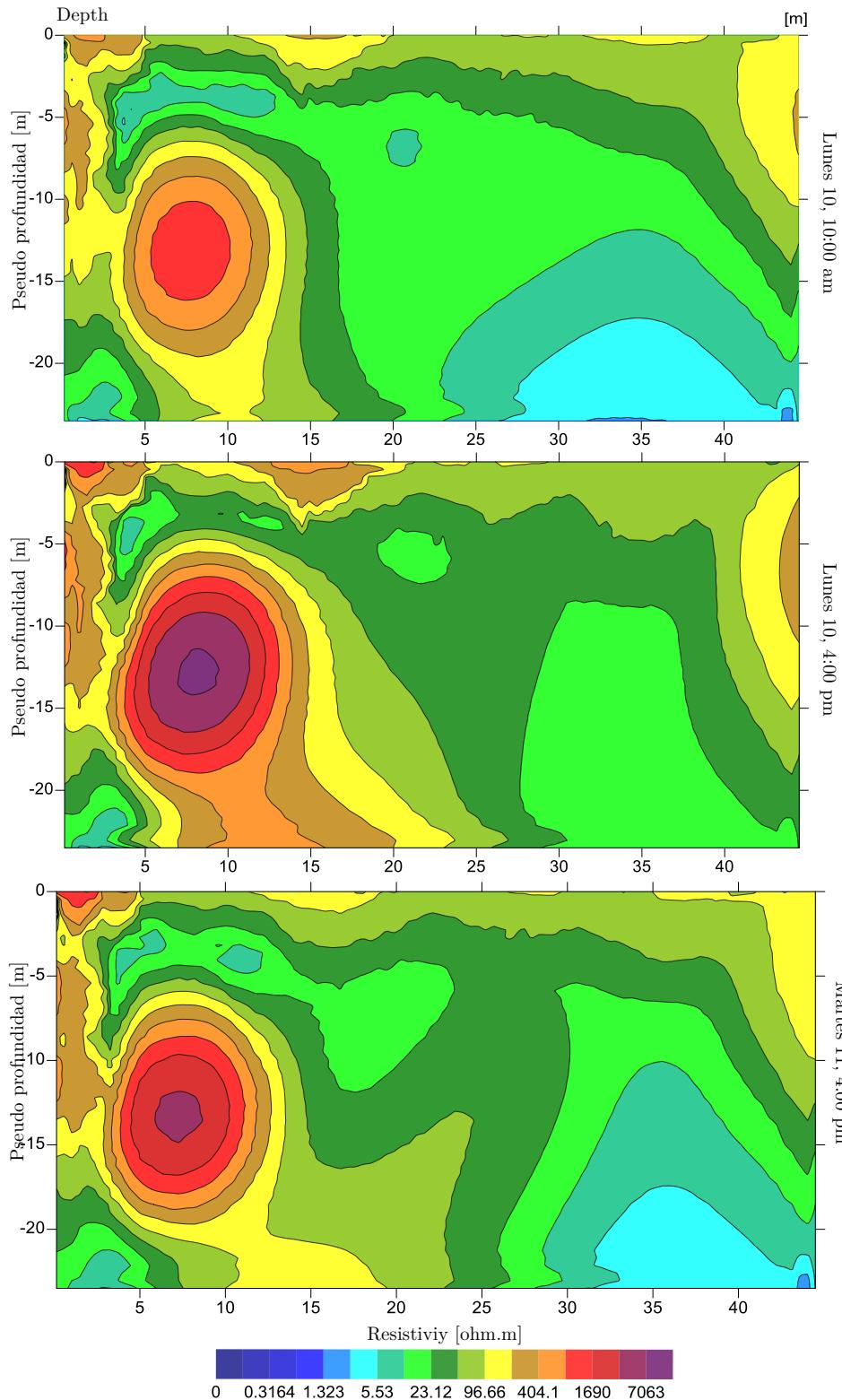
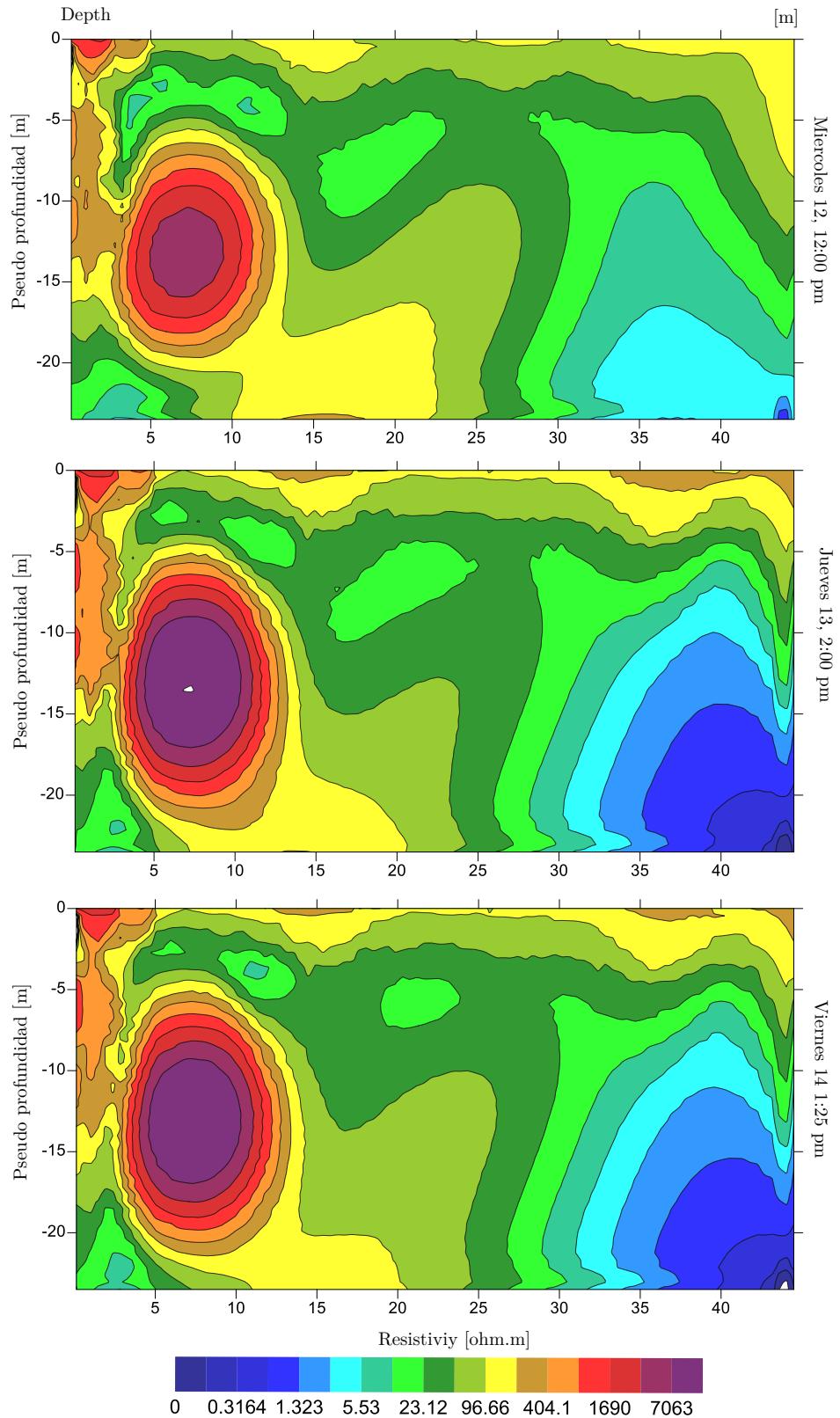


Figura 14. Inversiones tres, cuatro y cinco (Tabla 2) en donde se identifican los flujos preferenciales del calor desde la inyección número tres hasta la cinco.



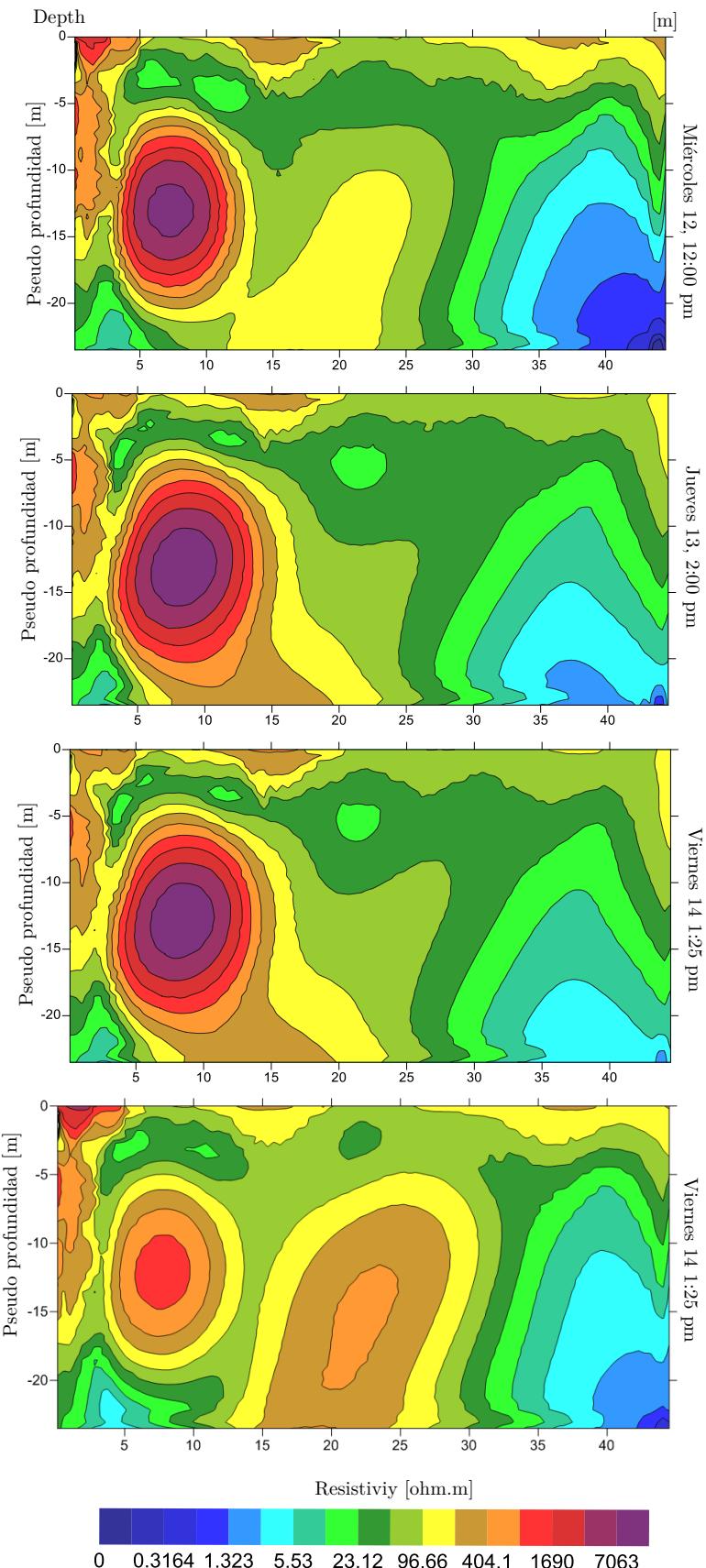


Figura 15. Inversiones seis, siete, ocho y nueve (Tabla 2) en donde se identifican los flujos preferenciales del calor desde la inyección número seis hasta la nueve.

Fueron obtenidas 10 inversiones de resistividad (Fig. 13, 14 y 15) que exponen el comportamiento de la pluma térmica generada por la inyección de calor mediante el uso de tecnologías BHE con el fin de identificar las zonas térmicamente afectadas (TAZ) de forma cualitativa. Dichas imágenes representan la respuesta resistiva del sistema geotérmico de baja entalpía en la cuenca de SLL, Canadá. Las figuras 12 y 13, específicamente, reportan resistividades que oscilan entre 23.12 y 7063 ohm por metro, desde la zona local de adquisición (1-12 m de distancia) hasta áreas circundantes (30 m). A partir del viernes 14 (Fig. 14) cesa la inyección de calor y en los cuatro días restantes se observa el comportamiento decreciente de la resistividad dentro del subsuelo ante el cese de la inyección. Los valores de resistividad aparente y verdadera se adoptaron como una TAZ cualitativa y cuantitativa. La configuración en tres BHE permitió definir un estimado de temperatura inicial (T_0), pero la predicción de temperatura a partir de la variación de resistividad adquirida a lo largo de la adquisición no fue completamente confiable en comparación con los registros directos.

Los resultados de la metodología adoptada mostraron una distribución de temperatura preferencialmente homogénea desde el centro de la adquisición hasta una distancia de 12 m circundantes. Sin embargo, se presentaron dificultades para detectar diferencias de temperatura un par de metros, lo cual puede atribuirse al suavizado espacial intrínseco del método ERT. De hecho, el proceso de inversión no permitió mejorar significativamente las imágenes TAZ cualitativas y cuantitativas en comparación con las pseudo-secciones, incluso eliminando parte de los datos ubicados debajo y alrededor de la entrada. Esto sugiere la utilidad de incluso datos de resistividad aparente solo para un monitoreo aproximado de TAZ en este tipo de aplicaciones.

8. Discusión y Conclusiones

Plantear el uso de un modelo análogo replicable y efectivo resulta bastante útil para zonas de interés que no cuentan con las facilidades tecnológicas o el desarrollo en energías alternativas. Es por eso que, gracias a la metodología propuesta a lo largo de este proyecto de grado, se identificó un método efectivo y replicable llevado a cabo en St. Lawrence Lowlands, Canadá, con el fin de plantear un modelo aplicable para ambientes favorables con potencial geotérmico de baja entalpía en Paipa, Colombia. Cabe resaltar que ambas zonas comparten las características geotérmicas de interés.

Del mismo modo, el estudio de los efectos ambientales de la zona es una variable indispensable que debe contemplarse dentro de las aplicaciones geotérmicas de baja entalpía y los sistemas de almacenamiento de calor, particularmente en áreas altamente pobladas como SLL y Paipa. (Giordano et al., 2017). En cuanto a la zona afectada térmicamente (TAZ), se debe considerar y obtener imágenes precisas para evaluar los posibles efectos secundarios adversos en la litología, la hidrología y la biosfera. Por otro lado, las propiedades térmicas e hidrogeológicas del subsuelo deben caracterizarse cuidadosamente para la instalación y distribución de la configuración de los pozos, tal como se ilustró previamente en la Fig. 8.

En cuanto a las mediciones de resistividad, pueden traer complicaciones locales que se verán reflejadas en los modelos de inversión. En este caso el sistema funciona bajo una zona parcialmente saturada, de modo que es posible que se vea reflejada una resistividad compleja gracias a las fluctuaciones de la temperatura, por ejemplo, la desaturación puede generar datos anómalos que afectarían el ponderado de resistividad de las mediciones locales. En segundo lugar, el espacio disponible para la adquisición es limitado lo que

ocasionaría dificultades para identificar cambios sutiles de resistividad. Por último, la presencia de varios elementos antrópicos como vías de entrada, cables eléctricos, cimientos de los edificios y tuberías de agua podrían afectar los datos de procesamiento e interpretación.

Con lo anterior se puede concluir que es de suma importancia que en Colombia se desarrolle la concientización sobre las energías alternativas, en especial la búsqueda de energías renovables que ayuden a combatir el impacto ambiental y cuenten con un alto porcentaje de retribución a largo plazo. Un estudio mostró que la fuente de calor del suelo bombas se puede usar en calefacción no solo en edificios nuevos de baja energía, sino también en edificios antiguos e históricos (Macenić et al, 2018; Pacchiera y Fausti, 2017). Por lo tanto, es imperativo para el conocimiento de energías, instrumentos y génesis de calor en Colombia el uso del método Borehole Heat Exchange (BHE) como método de innovación geofísica, gracias a que sabemos que hay prospectividad geotérmica de baja entalpía por las evidencias termales que encontramos en el área de interés colombiana.

Finalmente, futuras investigaciones se centrarán en mejorar la resolución y precisión de las adquisiciones por medio de levantamientos eléctricos 3D de superficie, pozos transversales y tomografías alrededor del sitio BHE. Además, se contempla la alternativa de realizar una simulación numérica en 3D para que sea coherente al modelo térmico de fondo y así realizar una comparación confiable con la resistividad derivada.

9. Bibliografía

- Alfaro, C., Alvarado, I., & Manrique Bonilla, A. (2010). Actualización del Mapa Geotérmico de Colombia Fase 2. Mapa preliminar del flujo de calor terrestre en la cuenca de los Llanos Orientales. Bogotá DC.
- Arato, A., Boaga, J., Comina, C., De Seta, M., Di Sipio, E., Galgaro, A., Giordano, N., Mandrone, G., 2015. Geophysical monitoring for shallow geothermal applications — two Italian case histories. *First Break* 33 (8), 75–79.
- AXELSSON, G. & GUNNL AUGSSON, E., 2000. Background: Geothermal utilization, management and monitoring. In: Long-term monitoring of high- and low enthalpy fields under exploitation, WGC 2000 Short Courses, Japan, 3-10.
- Bédard, K., Comeau, F. A., Raymond, J., Malo, M., & Nasr, M. (2018). Geothermal Characterization of the St. Lawrence Lowlands Sedimentary Basin, Québec, Canada. *Natural Resources Research*, 27(4), 479-502
- Benderitter, Y., & Cormy, G. (1990). Possible approach to geothermal research and relative costs. *Small geothermal resources: A guide to development and utilization*, UNITAR, New York, 59-69.
- Benderitter, Y., Tabbagh, J., 1982. Heat storage in a shallow confined aquifer: geophysical tests to detect the resulting anomaly and its evolution with time. *J. Hydrol.* 56, 85–98.
- Bernard, J., Leite, O., Vermeersch, F., Instruments, I. R. I. S., & Orleans, F. (2006). Multi-electrode resistivity imaging for environmental and mining applications. IRIS Instruments, Orleans.
- Busby, J., Geothermal energy — what is it? Recuperado de <https://www.bgs.ac.uk/research/energy/geothermal/home.html>
- Carrier MA, Lefebvre R, Rivard C et al (2013) Portrait des ressources en eau souterraine en Montérégie Est, Québec, Canada. Institut national de la recherche scientifique—Centre Eau Terre Environnement, Quebec City. <http://espace.inrs.ca/1639/1/R001433.pdf>
- Comeau FA, Bédard K, Malo M (2012) Lithostratigraphie standardisée du bassin des Basses-Terres du Saint-Laurent basée sur l'étude des diagraphies. Institut

national de la recherche scientifique—Centre Eau Terre Environnement, Quebec City. <http://espace.inrs.ca/1645/1/R001442.pdf>

Daniel, G. R., Orjuela, C., & Jhon, F. Análisis tecnológico para la explotación de energía geotérmica en zonas de alto potencial en Colombia.

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la energía geotérmica? Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.

Erdlac, R. J., Gross, P., & McDonald, E. (2008). A proposed new geothermal power classification system. *Transactions*, 379-384.

Giordano, N., Arato, A., Comina, C., & Mandrone, G. (2017). Time-lapse electrical resistivity imaging of the thermally affected zone of a Borehole Thermal Energy Storage system near Torino (Northern Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 140, 123-134.

Hamdan, H., & Vafidis, A. (2009, September). Inversion techniques to improve the resistivity images over karstic structures. In *Near Surface 2009-15th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.

Hochstein, M. P. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. Small geothermal resources: A guide to development and utilization, UNITAR, New York, 31-57.

Jaupart, C., & Mareschal, J. C. (2010). Heat generation and transport in the Earth. Cambridge university press.

Loke, M. H. (2010). Res2DInv ver. 3.59. 102 Geoelectrical imaging 2D and 3D. Instruction manual. Geotomo Software.

Loke, M. H. (2010). Res2DInv ver. 3.59. 102 Geoelectrical imaging 2D and 3D. Instruction manual. Geotomo Software.

Macenić, M., Kurevija, T., & Strpić, K. (2018). Systematic review of research and utilization of shallow geothermal energy in Croatia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 33(5), 37-46.

Marzolf, N. C. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia.

Matiz-León, J. C., Rodríguez-Rodríguez, G., & Alfaro-Valero, C. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de Paipa, Boyacá-Colombia. *Boletín de Geología*, 41(2), 71-88.

- Mejía, E., Rayo, L., Méndez, J., & Echeverri, J. (2014). Geothermal development in Colombia.
- Montes, C., Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 832-848.
- Montes, C., Rodriguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., & Cardona, A. (2019). Continental margin response to multiple arc-continent collisions: The northern Andes-Caribbean margin. *Earth-Science Reviews*, 102903.
- Moyano, I. (2015). Modelamiento de estructuras geotérmicas ocultas a partir de la interpretación de anomalías magnetotelúricas de resistividad en la región de Paipa, Boyacá, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.Unal.Edu.Co/49528/1/2969017.2015.pdf>.
- Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2-4), 53-89.
- Raymond, J., Sirois, C., Nasr, M., & Malo, M. (2017). Evaluating the geothermal heat pump potential from a thermostratigraphic assessment of rock samples in the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Environmental Earth Sciences*, 76(2), 83.
- Santoyo, E., & Barragán-Reyes, R. M. (2010). Energía geotérmica. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias, 61(2), 40-51.
- Seisdedos Saez, M. A. (2012). Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea, aspectos a considerar en el contexto local.
- Shao, H., Hein, P., Sachse, A., & Kolditz, O. (2016). *Geoenergy modeling II: shallow geothermal systems*. Springer International Publishing.
- Toth, A., & Bobok, E. (2017). *Flow and heat transfer in geothermal systems: Basic equations for describing and modeling geothermal phenomena and technologies*
- Turcotte, D. L. (1980). On the thermal evolution of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 48(1), 53-58.
- Velandia, F. (2003). Informe Técnico: Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. *Proyecto de Geodinámica, INGEOMINAS*.

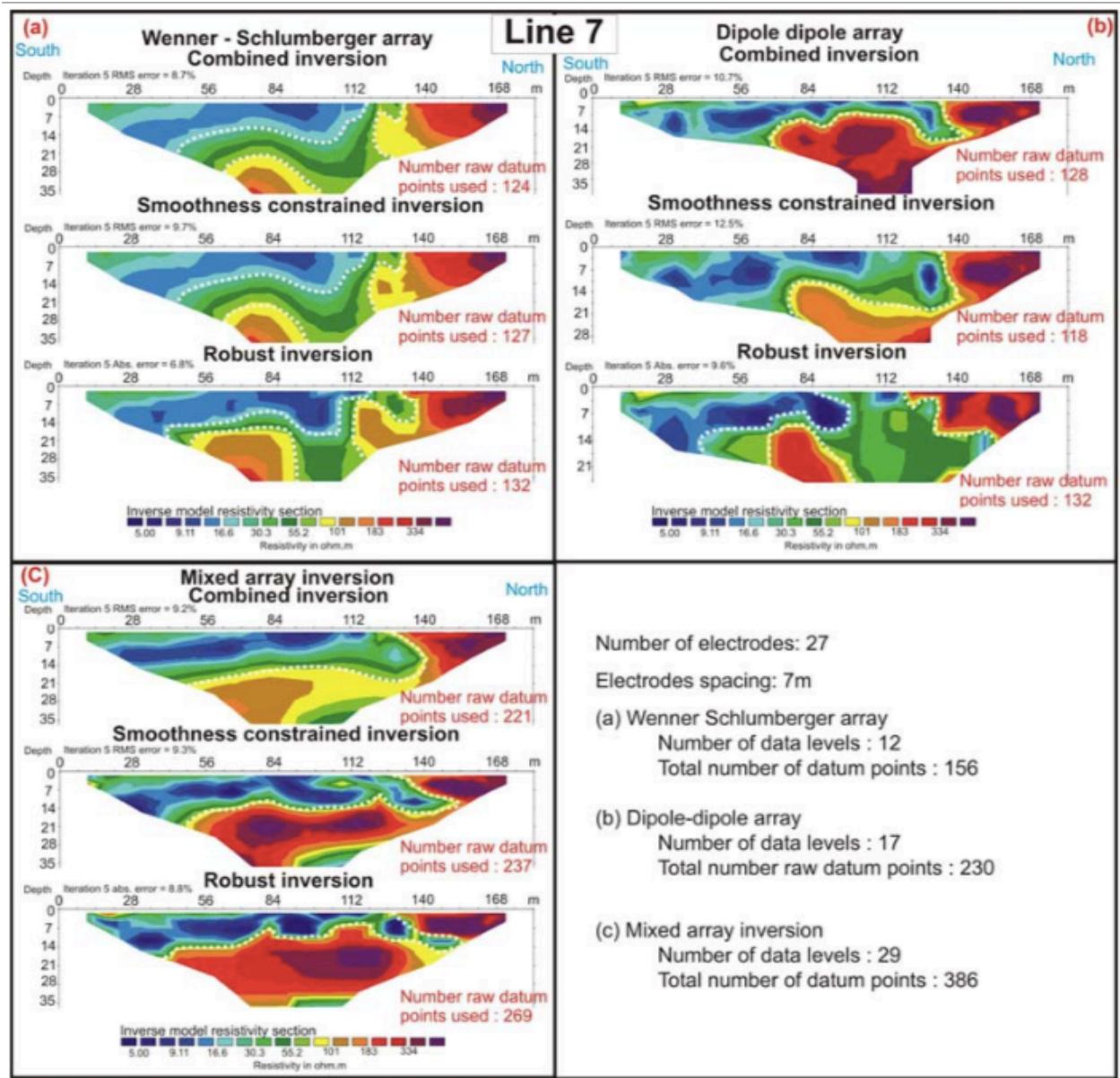
Anexos



Anexo 1. Zonas de potencial geotérmico en Colombia. Tomado de Mejía et al. (2014).

Fase	Objeto	Actividades
Fase 1. Reconocimiento	Establecer las zonas con potencial geotérmico. Delimitar las áreas para los estudios técnicos y ambientales de prefactibilidad. Planear los estudios de prefactibilidad.	1. Identificación de zonas potenciales. 2. Análisis de viabilidad preliminar de un desarrollo geotérmico. 3. Análisis de restricciones ambientales. 4. Planeación de la ejecución de los estudios de prefactibilidad 5. Solicitud de permisos de estudios
Fase 2. Prefactibilidad	Determinar la potencial existencia del recurso geotérmico, la posible localización de la fuente de calor y el reservorio (Modelo Geotérmico Conceptual). Establecer la viabilidad técnica y ambiental del desarrollo de un campo geotérmico.	6. Estudios de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología. 7. Gradiente térmico. 8. Elaboración de modelos geotérmicos. 9. Selección de sitios de perforación. 10. Diseño de perforaciones exploratorias. 11. Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para exploración y uso del recurso. 12. Trámite de la licencia ambiental para exploración y uso del recurso.
Fase 3. Factibilidad	Localizar y llegar hasta el reservorio, obtener fluidos y evaluar la calidad y cantidad disponible del recurso para generación de energía. Realizar análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto geotérmico. Realizar los diseños requeridos y planear el desarrollo del campo geotérmico y la planta de generación.	13. Perforaciones exploratorias. 14. Evaluación del yacimiento. 15. Análisis de viabilidad técnica y económica del desarrollo de un proyecto geotérmico. 16. Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo. 17. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para las perforaciones exploratorias. 18. Realización de los estudios ambientales complementarios para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta de generación. 19. Trámite de la modificación de licencia ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta.
Fase 4. Desarrollo del Campo, Construcción de la Planta y Puesta en Operación	Desarrollo del campo geotérmico con criterios de sostenibilidad. Puesta en operación de la planta y el campo geotérmico	20. Perforación de pozos de producción y pozos de reinyección. 21. Construcción de la planta y obras asociadas (líneas de conducción de agua y vapor, vías de acceso, subestación, línea de conexión). 22. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental (PMA) para cada una de las actividades de desarrollo del campo. 23. Alistamiento y pruebas de la planta y el campo. 24. Puesta en operación comercial. 25. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para la operación de la planta y el campo geotérmico.

Anexo 2. Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico. Tomado de Marzolf (2014).



Anexo 3. Secciones Geoelectricas como resultado de diferentes métodos de inversión. Tomado de PENDIENTE

Ambiente geológico		Rasgo geológico	Fuente de calor en la corteza	Categoría del recurso	Tipo de roca
Márgen de placa	Convergente (compresional)	Cuencas de retro arco	Magmática	Vapor hidromagnético	Ignea Sedimentaria
		Complejo de arco volcánico			
		Vulcanismo continental			
		Complejo intrusivo			
	Divergente (extensional)	Centro de propagación volcánica	Magmática	Vapor hidromagnético	Ignea Sedimentaria
		Sistemas de fisura (rift)			
	Transformación (rumbo deslizante)	Cuencas transtensionales (pull apart)	Magmática	Vapor hidromagnético	Ignea Sedimentaria
		Fallas transtensionales			
		Centros volcánicos/magnáticos			
Intraplaca	Cuenca cratónica	Plumas del manto (puntos calientes)	Magmática	Vapor hidromagnético	Ignea Sedimentaria
		Terreno extensional			
			Gradiente térmico	Estancado	Sedimentaria
	Cuenca de margen pasiva			- Geopresurizado - Hidrostático	
				Co-producido *	
	Basamento complejo		Radiogénica	Roca seca caliente	Ignea

* Flujo natural o bombeado junto con petróleo/gas

Anexo 4. Clasificación del recurso geotérmico con base en características geológicas. Alfaro et al (2010).