

Fragua



**Universidad[®]
de Medellín**
Ciencia y Libertad



José María Berdugo Garavito
Presidente Honorable Consiliatura

Federico Restrepo Posada
Rector

Luz Doris Bolívar Yepes
Vicerrectora de Investigaciones

Alejandro Arbeláez Arango
Vicerrector Académico

Leonardo David López Escobar
Coordinador Editorial ldlopez@udem.edu.co

Érica Yaneth Guisao Giraldo
Editora eyguisao@udem.edu.co

Lorenza Correa Restrepo
Corrección de estilo (español). lorreare@gmail.com

Melisa Restrepo Molina
Corrección de estilo (inglés). melisa.re.mo@gmail.com

Olga Gil Domínguez
Traducción español-inglés. gildominguezolga@gmail.com

Hernán Darío Durango Tobón
Diagramación. hernandedurango@gmail.com

Claudia Castrillón Álvarez
Diseño de carátula. claudiadiseno grafico@gmail.com

Impresión:

Xpress Estudio Gráfico y Digital S.A.
Carrera 69 H.N.º 77-40. Teléfono: 6020808.
Bogotá – Colombia

Queda autorizada la reproducción total o parcial de los contenidos de la revista con finalidades educativas, investigativas o académicas siempre y cuando sea citada la fuente. Para poder efectuar reproducciones con otros propósitos, es necesaria la autorización expresa del Sello Editorial Universidad de Medellín. Las ideas, contenidos y posturas de los artículos son responsabilidad de sus autores y no comprometen en nada a la institución ni a la revista.

COMITÉ CIENTÍFICO:

Beatriz Elena Marín Ochoa

Ph. D. Directora Grupo de Investigación en Comunicación Urbana (GICU). Facultad de Comunicación Social-Periodismo. Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Medellín, Colombia.

Elizabeth Florez Yepes

Ph. D. Profesora asistente. Departamento de Ciencias Básicas. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Érica Yaneth Guisao Giraldo

Coordinadora Centro de Investigaciones Económicas, Contables y Administrativas. Editora *Fragua*. Universidad de Medellín.

Hugo Arlés Macías Cardona

Profesor de tiempo completo. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Luz Gabriela Pérez Monsalve

Apoyo profesional Ciencia, Tecnología e Innovación. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Margarita María Hincapié Pérez

Ph. D. Coordinadora Doctorado en Ingeniería. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

Rosa María Bolívar Osorio

Magíster en Educación. Docente de cátedra. Universidad de Antioquia. Excoordinadora de la Red Colombiana de Semilleros de Investigación (Redcolsi). Integrante de Milset-Amlat.

COMITÉ EDITORIAL:

Érica Yaneth Guisao Giraldo. Editora *Fragua*. Coordinadora Centro de Investigaciones Económicas, Contables y Administrativas.

Ana María Parente-Laverde. Coeditora *Fragua*. Coordinadora de la UOC de Investigaciones. Facultad de Ciencias Económicas, Contables y Administrativas.

Alberto Alejandro Alzate Giraldo. Coordinador Centro de Investigaciones en Comunicación.

Ederley Vélez Ortiz. Coordinadora del Centro de Investigación en Ciencias Básicas.

Gladis Estela Morales Mira. Coordinadora Centro de Investigación en Ingeniería.

María Fernanda Paz Gil. Coordinadora Centro de Investigaciones Jurídicas.

Nora Margarita Vargas Zuluaga. Coordinadora del Centro de Investigaciones en Ciencias Sociales y Humanas.

Estudiantes fundadores de la revista:

Laura Hurtado Gómez, programa de Comunicación y Lenguajes Audiovisuales; Luisa Fernanda Arango Arcila, programa de Ingeniería Financiera; Santiago Trujillo Osorio, programa de Administración de Empresas; Ronald Rafael Díaz González, programa de Ingeniería de Sistemas; Ana Milena Montoya Ruiz, programa de Derecho; Jorge Eduardo Vásquez Santamaría, programa de Derecho; María Magdalena Polanco Echeverri, programa de Derecho; Paola Andrea Cataño Gómez, programa de Derecho.

Fecha de impresión: junio de 2018.

Canje: Biblioteca de Facultades

"Eduardo Fernández Botero" Universidad de Medellín.

Teléfonos: (+57+4) 340 5252-340 5335. Fax: (+57+4) 340 5216

Correo electrónico: rbarrientos@udem.edu.co

Página web: www.udem.edu.co

Apartado 1983. Medellín, Colombia.

Visión

La Universidad de Medellín impulsará la educación superior mediante la excelencia académica, la cultura investigativa y la responsabilidad social, para contribuir al desarrollo regional y nacional, en el contexto internacional.

Misión

Fundamentada en su lema Ciencia y Libertad, la Universidad de Medellín tiene como misión la promoción de la cultura y la formación integral de profesionales que contribuyan a la solución de problemas en las áreas de los saberes propios, mediante la docencia, el fomento de la investigación y la interacción con la sociedad.

Valores

Justicia
Respeto
Responsabilidad
Equidad
Solidaridad
Coherencia

CONTENIDO

Editorial.....	7
<i>Editorial</i>	
Autores.....	9
<i>Authors</i>	
Evaluadores.....	11
<i>Evaluation by peers</i>	
Planta geotérmica <i>The Geysers</i>	13
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
Mariana Martínez Henao, Luisa Fernanda Rúa Hidalgo, Juan David Cifuentes Lozada y Naylen Gicela Molina Buriticá	
Centrales geotérmicas de Nesjavellir y Hellisheidi, una mirada hacia la sostenibilidad energética.....	27
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
Naylen Gicela Molina Buriticá, Laura Andrea Luna Aguinaga, Ana María Morales Velásquez, Marly Tatiana Porras Zamudio, Mariana Zapata Montoya, Sebastián Guerra Sánchez, Sebastián Giraldo, Johan Guarín Palomo, Luisa Hernández Lozano, Carlos Manuel Osorio, Juan Bermúdez, María Angélica Cerpa, Daniela Franco, Laura Manuela Muñoz y Liliana Tuberquia	
Impactos ambientales en complejo geotérmico Larderello, Italia.....	45
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
Santiago Delgado Restrepo, Daniel Camilo García Blanco, Lina Fernanda García Cárdenas, Daniela Gómez Rave y María Alejandra Taborda Ortiz	
Más allá de Fukushima, energía alternativa en Japón. Caso Sumikawa	59
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
Manuela Durán Cuadros, Estefanía Román Ospina, J. Orozco y L. Cossio.	

Contenido

Energía geotérmica en México, una alternativa con el medio ambiente: Cerro Prieto ...	71
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
<i>Milber Alberto Murillo Barragán, Edinson de Jesús Restrepo Ochoa, Alejandra Zapata García y Naylen Gicela Molina Buriticá</i>	
Sistemas EGS: una apuesta eficiente en la generación de energía eléctrica	85
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
<i>Ángela María Castañeda Cuartas y Manuela Ortega Rivera</i>	
Avances en el estudio de los recursos geotérmicos en Chile: un ejemplo para Sudamérica	99
<i>Título en inglés</i>	
<i>Título en portugués</i>	
<i>Daniel Stiven Balzán Alzate</i>	
Recomendaciones para nuestros colaboradores	119

EDITORIAL

El volumen 11 número 21 de *Fragua* presenta siete artículos que son producto del proyecto de investigación *Geotermia Unesco IGCP636. Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa*, realizado en 2017, por los grupos de investigación, de la Facultad de Ingeniería, Grinbio y Grinen, clasificados por Colciencias en las categorías B y C, respectivamente. Todos los artículos fueron escritos por estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, y la iniciativa parte y se hace posible por el liderazgo de dos profesoras de tiempo completo que, como investigadoras del proyecto, proponen este producto como resultado de la investigación y de la participación de sus estudiantes.

Los trabajos que se presentan trabajan la temática de la geotermia en distintos países. Estos son:

Planta geotérmica *The Geysers* (Estados Unidos), Centrales eotérmicas de Nesjavellir y Hellisheidi, una mirada hacia la sostenibilidad energética (Islandia); Impactos ambientales en complejo geotérmico Larderello, Italia; Más allá de Fukushima, energía alternativa en Japón. Caso Sumikawa; Energía geotérmica en México, una alternativa amigable con el medio ambiente, "Cerro Prieto"; Sistemas EGS: una apuesta eficiente en la generación de energía eléctrica (Francia) y Avances en el estudio de los recursos geotérmicos en Chile: un ejemplo para Sudamérica.

Érica Yaneth Guisao Giraldo
Editora General

EDITORIAL

The 11th volume of the 21st issue of the Fragua Journal presents seven articles that are a product of the research project UNESCO IGCP-636 Geothermal project. Unifying international research forces to unlock and strengthen geothermal exploitation of the Americas and Europe, performed in 2017 by the research groups from the Engineering Faculty Grinbio and Grinen, classified by Colciencias in the B and C category respectively. All the articles were written by Industrial Engineering students at the University of Medellin and the endeavour was made possible thanks to two full-time professors that, as researchers from the project, propose these products as final research products.

These works, under the geothermal topic in different countries, are: The Geysers geothermal plant (United States), Nesjavellir y Hellisheidi geothermal plants, a look at energetic sustainability (Iceland), Environmental impacts in the Larderello, Italy, geothermal complex (Italy), Beyond Fukushima, alternative energy in Japan. The Sumikawa case (Japan), Geothermal energy in Mexico, an alternative for the environment: Cerro Prieto (Mexico), EGS system: an efficient option in the electric energy generation (France), and Advancements in the study of geothermal resources in Chile: an example for South-America.

Érica Yaneth Guisao Giraldo
General Editor

AUTORES

Autores

EVALUADORES

Planta geotérmica The Geysers*

Mariana Martínez Henao**
Luisa Fernanda Rúa Hidalgo***
Juan David Cifuentes Lozada****
Naylen Gicela Molina Buriticá*****

RESUMEN

El siguiente artículo tiene como finalidad conocer sobre la energía generada por el campo geotérmico *The Geysers*, el mayor complejo de plantas de energía geotérmica del mundo. La empresa Calpine, ubicada en las montañas Mayacamas, a 121 km al norte de la ciudad de San Francisco en el estado de California – EEUU, produce energía a través de los recursos de ese campo geotérmico, que es representada por vapor seco o sobrecalentado.

A través de la búsqueda de información en diferentes bases de datos, se evidenciará que la tecnología actual utilizada por la empresa Calpine permite controlar el impacto medioambiental, facilitando la explotación del recurso y el desarrollo sostenible.

Palabras claves: energía geotérmica; California; Calpine; desarrollo sostenible; impactos medioambientales.

* Artículo producto del proyecto de investigación *Geotermia Unesco IGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en América y Europa"*, en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbio clasificación tipo B y *Grinen* clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: mmariana957@gmail.com

*** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: luisa-rua1008@hotmail.com

**** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: cifuentesj34@gmail.com

***** Ingeniera ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: naylen810@hotmail.com

The Geysers geothermal plant

ABSTRACT

This article has as its main goal to gather and communicate knowledge about the energy generated by the geothermal field They Geysers, the biggest geothermal plants complex in the world. The Calpine Company, located in the Mayacamas mountains, about 121 km north of San Francisco, California – United States, produces energy through the resources within this geothermal field, which is represented by dry or superheated steam.

Through information research in different databases, this study makes evident that the technology currently employed by Calpine allows the control of the environmental impact, thus permitting the exploitation of the resource and sustainable development.

Keywords: geothermal energy; California; Calpine; sustainable development; environmental impacts.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en los últimos años se ha incrementado con la llegada de la era digital, lo que ha generado un aumento en la demanda mundial, debido a que la interacción con dicha era es cotidiana y va desde encender un ordenador hasta transportarnos de un lugar a otro, generando que esta situación tenga un impacto directo en el ambiente. De acuerdo a datos estadísticos de la Agencia Internacional de Energía, el consumo de energía de fuentes fósiles incrementó, lo que conduce a que el recurso fósil sea la mayor fuente de energía (Arroyo, 2008).

De seguir con este consumo, para 2025 se podría tener un incremento aproximado del 30 % en el consumo de energía a nivel mundial (Pasquevich, 2014). Dicha estimación preocupa al sector industrial y económico, más aún porque el aumento en el crecimiento exponencial de la población genera consigo un aumento en el consumo mundial de dicho recurso. Esta relación de aumento, se da por la continua interacción de las necesidades del hombre actual y de él para poder suplirlas, además el avance de las diferentes tecnologías aumenta el consumo de energía. Por ejemplo, existen en países desarrollados viviendas inteligentes y autos que, si bien son amigables con el ambiente, tienden a requerir una mayor cantidad de energía para su funcionamiento. La sociedad actual también se ha adaptado a un mundo en el que día a día está en contacto y esto requiere aproximadamente de un 80 % energía en las tareas que realiza diariamente (Unesco, 2015).

En consecuencia, el incremento de la polución se da proporcionalmente al aumento en el consumo de energía proveniente de dichas fuentes, ya que aumentan los niveles de partículas suspendidas y las emisiones de gases de efecto invernadero. Adicionalmente, los recursos se ven afectados porque se agotan y se acaba su vida útil, lo que genera dificultad en el abastecimiento de energía. Esto lleva a la búsqueda de soluciones que tengan consigo alternativas de energía limpias o bien, que sean sostenibles.

Debido a la gran demanda actual de recursos naturales, se han desarrollado diferentes alternativas de aprovechamiento que ayudan a mitigar los impactos que se generan sobre el planeta. Una evidencia clave de estas alternativas, es la energía geotérmica, la cual aprovecha el calor que se encuentra en el interior de la tierra y está distribuido de una forma irregular, este calor se desplaza desde el interior hasta la superficie terrestre, presentándose por actividad magmática o por condiciones geológicas de la corteza terrestre (Barbier, 2002).

La energía geotérmica, aparte de ser una tecnología limpia, renovable y de bajo impacto ambiental, es también una alternativa favorable para la producción de energía de forma constante y sin problemas de agotamiento, ya que es totalmente independiente de las fluctuaciones de los costos de los combustibles y de las variaciones meteorológicas (Bruni, 2014).

En diferentes países del mundo existen acuíferos, los cuales son parte esencial de la geotermia, que se caracterizan por agua a alta presión y temperatura a grandes profundidades. Además, su permeabilidad permite la circulación del fluido y la transferencia de calor, permitiendo así el aprovechamiento del mismo para la producción de energía renovable. Por otro lado, cabe mencionar que la energía geotérmica se ha explotado desde el siglo XIX para diversas aplicaciones como electricidad, calefacción, procesos industriales, entre otras actividades. La capacidad de la energía geotérmica instalada en el mundo es de aproximadamente 7.974 MWe (Barbier, 2002).

Existen otras fuentes, las cuales son útiles en la producción de energía, como los géisers. Estos, son un tipo especial de fuente que emite periódicamente una columna de agua caliente y vapor al aire. El famoso géiser de Islandia es el que les ha dado el nombre común a estas fuentes termales. Al norte de San Francisco, en las montañas de Mayacamas, se encuentran reservas naturales de vapor por debajo de la superficie de la tierra. Este recurso está siendo aprovechado por una corporación llamada Calpine, en la producción de energía limpia y renovable para los diferentes hogares y empresas de todo el norte de California (Calpine Corporation, 2012).

2. ESTADO DEL ARTE

El aprovechamiento de los reservorios geotérmicos The Geysers, comenzó en 1890 donde inició el uso de los géisers como fuente de agua manantial para el consumo humano; 30 años después se utilizó por primera vez un pequeño generador de máquina a vapor para producir energía eléctrica; desde 1921 a 1922 se emprendió un proceso de excavación con el fin de encontrar más calor y obtener más vapor; se logró producir más energía con un agujero de más de 200 pies. Con este avance, en 1923 se dio paso a la primera central eléctrica la cual producía 35 kilovatios (Calpine Corporation, 2012).

Aunque la producción de vapor de *The Geysers* comenzó en 1960, la inyección no comenzó hasta 1969. Entre 1960 y 1969, el condensador de vapor de la torre de enfriamiento se dispuso en drenajes superficiales cercanos. Inicialmente, los pozos de inyección se situaron lo más lejos posible de los pozos de producción activos, para evitar la posibilidad de irrupción del agua. Para 1970 los pozos geotérmicos alcanzaron entre 7.000 y 8.000 pies de profundidad. 21 centrales se encontraban en operación en 1987 con una capacidad total instalada de 2.043 MW (Barker, 1995).

Luego de 45 años, diferentes empresas comenzaron a invertir en la central eléctrica, ampliando, mejorando las instalaciones e implementando tecnología más avanzada. Es así como la capacidad de generación eléctrica en The Geysers llega a 82 MW. A medida que la empresa crecía, también debía aumentar la producción (Calpine Corporation, 2012).

En 1987 la central contaba con 21 plantas de energía en operación con una capacidad total instalada de 2.043 MW. Durante los siguientes ocho años, la generación de energía disminuye rápidamente como resultado de la pérdida de presión en el depósito de vapor (Calpine Corporation, 2012).

En 1989, Calpine Corporation ingresa a este negocio en The Geysers comprando las ganancias equivalentes de un megavatio en la planta. Los operadores establecen estudios cooperativos sobre la posible inyección de mayor cantidad de agua para crear vapor, mantener la presión del yacimiento y mantener la generación de energía (Calpine Corporation, 2012).

En 1995 se ideó la utilización de agua residual tratada de una planta de tratamiento, como un medio para producir más vapor. Debido a esto, se instaló una tubería de 29 millas desde la planta de tratamiento, hasta la planta geotérmica, transportando 9 millones de galones por día. Cinco años después, Calpine se unió con otras plantas eléctricas con el fin de reducir la pérdida de generación de energía y expandió las tuberías a 40 millas, transportando 11 millones de toneladas de agua residual tratada. Posterior a esto, en el transcurso de 2008-2009 se instaló una nueva tecnología, basada en paneles solares y nuevas fuentes de agua, estabilizando económicamente la empresa (Goyal y Connant, 2010).

En 2008, la porción sureste del reservorio se saturó como consecuencia de la alta inyección de agua y como resultado, la inyección tuvo que ser reducida (Goyal y Connant, 2010). También se ha presentado una mayor atención por parte de los funcionarios de la central geotérmica de Calpine Corporation al manejo del suelo, ya que un estudio realizado por Rashmin *et al.* (2003) analizó la geología y geomorfología del lugar y sus alteraciones al pasar de los años por acción de la naturaleza y por factores antrópicos. Dichos estudios revelan que a causa de las alteraciones que ha tenido el suelo y al incremento del desarrollo comercial significativo, se presentaron presiones en los yacimientos, disminuyendo la producción a una tasa promedio de 11 %. Esto sucedió por la producción de energía a cantidades inadmisibles, es decir, que la explotación está generando cambios en la estructura sísmica local. En otras palabras, se generan alteraciones en la sismología estructural debido a los cambios de la corteza y manto terrestre, tal como lo explica Gunasekera *et al.* (2013).

Actualmente, The Geysers produce 6.600 GWh por año con una potencia eléctrica de 890 MW. La planta ocasiona impactos tanto negativos como positivos, entre estos últimos, el primero es la reducción de seis millones de toneladas de emisión de CO₂; este tipo de energía es más económico que muchas otras energías. Segundo, suministra energía a grandes ciudades y reutiliza el agua residual. Entre los impactos negativos generados, se encontró que hay muchos disturbios al ecosistema local, la afectación a especies y, finalmente, la contaminación del recurso hídrico (Almudena, 2009).

3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La roca fundida o magma, existe en las profundidades de la tierra donde las temperaturas son extremadamente altas. El magma a menudo se encuentra relativamente cerca de la superficie, particularmente en zonas volcánicas activas alrededor de la cuenca del Pacífico. El calor del magma se irradia a las capas de roca, calienta el agua de los poros y de las fracturas de la roca. Luego, una pequeña parte del agua caliente sube a la superficie formando termales, géiseres y fumarolas. En los géiseres el agua hierve y crea depósitos de vapor es atrapado por una capa superpuesta de roca fracturada, llamada tapón de roca (Calpine Corporation, 2012).

The Geysers comprenden 75 millas cuadradas al norte de San Francisco, California, en las montañas de Mayacamas, de las cuales 45 millas cuadradas a lo largo de la frontera de Sonoma y el condado de Lake, poseen el mayor complejo de energía geotérmica del mundo. Allí se encuentran 18 plantas geotérmicas, de las cuales 15 son de la compañía Calpine Corporation, que utilizan el calor en la corteza terrestre para producir electricidad durante todo el día, en la zona comercialmente productiva, la cual es llevada a cabo por la perforación, donde ocupa unos 78 km² con poca o ninguna recarga natural al reservorio geotérmico (Isherwood, 1977).

Los géiseres presentes en la ciudad de San Francisco, son en esencia un complejo de rocas metasedimentarias, en las cuales abundan en mayor cantidad algunas rocas como: turbidita metamorfoseada, *chert* y rocas ultramáficas serpentizadas. Todo el depósito de los géiseres se encuentra principalmente dentro de una variedad de arenisca denominada *metagraywacke*, cubierta de rocas metamórficas asociadas con rocas metamórficas; este tipo de arenisca presenta características como buena dureza, color negro y desordenados granos de cuarzo y feldespato (Romero *et al.*, 1995).

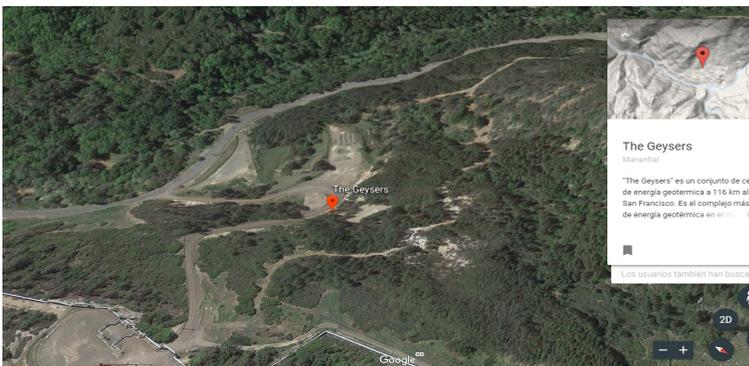


Figura 1. Ubicación geográfica de la planta geotérmica The Geysers (Google Earth, 2017).

En la base del *metagraywacke*, una roca ígnea (felsita) penetró durante el periodo Pleistoceno. Existe una correlación positiva entre el depósito de vapor y la profundi-

dad de la felsita: se cree que la intrusión de esta ha alterado y fracturado de manera hidrotérmica e hidráulicamente la *metagraywacke*, incrementando su permeabilidad para albergar el presente reservorio geotérmico (Romero *et al.*, 1995).



Figura 2. Planta geotérmica The Geysers
(California Energy Commission, 2017).

Los géiseres son un sistema de vapor dominante con baja porosidad y contienen el 90 % de su calor almacenado en las rocas (Goyal y Connant, 2010). Estos yacimientos geotérmicos están delimitados en la parte de encima por formaciones de permeabilidad muy baja (*graywacke* o roca sello) y por debajo por intrusiones graníticas (felsita). La roca del yacimiento en los géiseres es muy fracturada con amplia alteración hidrotermal y recristalización (García *et al.*, 2016).

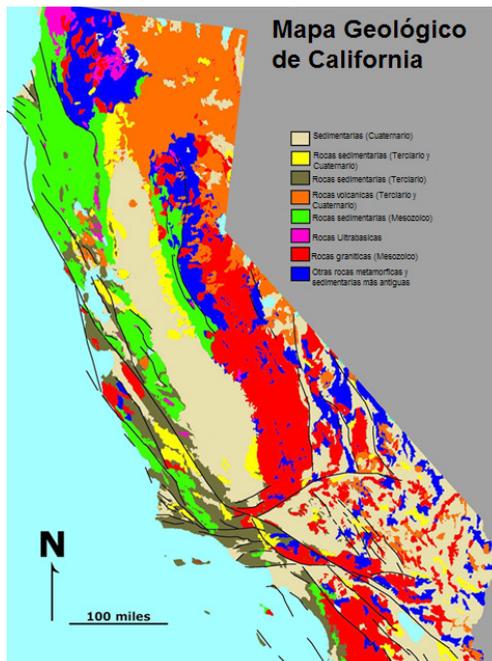


Figura 3. Ubicación del complejo de The Geysers en la geología californiana.
(Mapsof.net, 2017).

3.1 TECNÓNICA DEL MARGEN OCCIDENTAL DE AMÉRICA DEL NORTE (CALIFORNIA)

La geología del lecho de roca en The Geysers, es una mezcla complicada de diversos tipos de suelo que se acretaron al borde occidental norteamericano desde hace aproximadamente 160 millones de años a 30 millones de años, durante la subducción de la placa tectónica de farallón. La antigua placa de farallón, tras los procesos de deformación y subducción durante el periodo geológico conocido como Neógeno, se separó en tres microplacas oceánicas llamadas: Soledad, Guadalupe y Magdalena Estas se subdujeron en convergencia al Este debajo de la placa de Norte América (Atwater, 1989). Una de las principales consecuencias de este proceso tectónico, se manifiesta en el margen continental con la aparición de un intenso magmatismo, produciendo grandes cinturones batolíticos con orientaciones NW-SE distribuidos entre el sur de Estados Unidos y el noroeste de México (Damon *et al.*, 1983).

Los terrenos acretados de la placa de farallón se abdujeron, otros se subduccionaron y se exhumaron. El complejo franciscano incluye las rocas sedimentarias e ígneas que fueron intensamente deformadas y sufrieron metamorfismo bajo alta presión (0,85-1,0 GPa) y alta temperatura (200-350 °C) (Sadowski *et al.*, 2016).

3.2 FALLAS

Las fallas geológicas y las zonas de cizallamiento desempeñan un papel importante en el terreno, ya que son los depósitos de mineral hidrotermal y sistemas geotérmicos e hidrotérmicos. Alrededor de The Geysers se encuentran cuatro fallas (figura 4) que actúan como conductos de la corteza que transportan el flujo del fluido hidrotérmico. Las condiciones que allí se representan del yacimiento, permiten que estos fluidos hidrotérmicos viajen a lo largo de estas montañas y se representen como aguas termales y se expresen en forma de fumarolas (Sadowski *et al.*, 2016).

4. TIPO DERECURSO

The Geysers es uno de los dos lugares del mundo que cuentan con una alta temperatura y que producen vapor seco, el cual se puede utilizar directamente para mover turbinas y generar electricidad. Además, hoy en día la empresa Calpine Corporation ha invertido para extender la vida de este valioso recurso renovable, mediante la mejora en la eficiencia, el desarrollo de reservas sin explotar y extraer energía térmica adicional, a través de la inyección de agua tratada (Geysers Geothermal Association, 1995). El agua residual se canaliza hasta 40 millas desde las plantas de tratamiento del condado de Lake y se añade al campo de vapor manantial de agua caliente. Este sistema ha protegido las vías fluviales locales y ha producido electricidad sin liberar emisiones de gases de efecto invernadero (California Energy Commission, 2017).

Los principales componentes de esta planta de energía geotérmica son: una turbina a vapor, un generador, un condensador, una torre de refrigeración, un sistema de elimi-

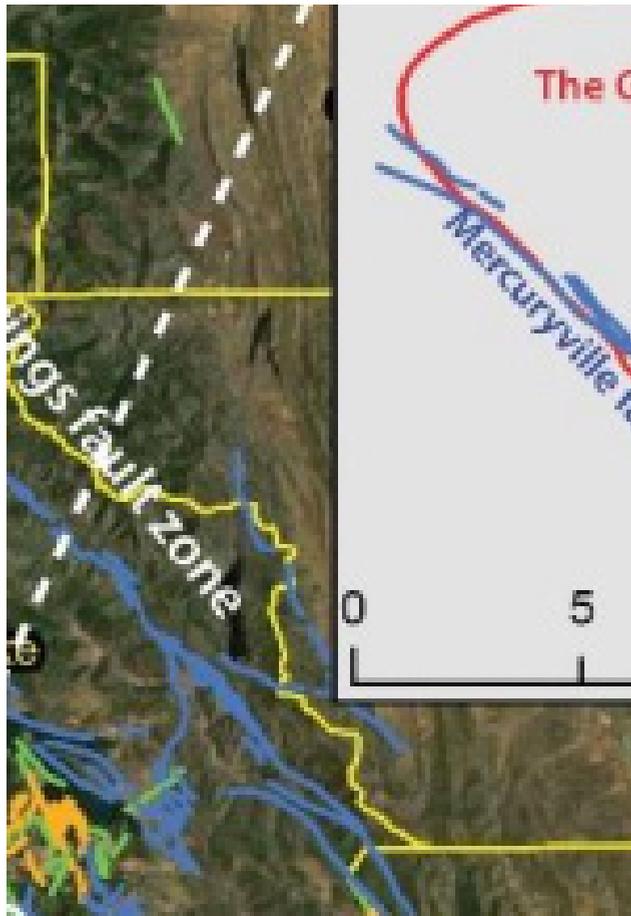


Figura 4. Trazo de límites del complejo de géiseres y la ubicación con respecto a diferentes fallas de la zona Occidental. (Sawyer, 1999)

nación de gas y un sistema de reducción de sulfuro de hidrógeno. La energía térmica en forma de vapor, fluye desde el pozo hasta la planta de energía y llega a la turbina, entrando con una presión de 40 a 100 libras por pulgada cuadrada (PSI). A medida que el vapor se expande por la turbina, la energía térmica es convertida en energía mecánica y esta posteriormente será convertida en energía eléctrica (Calpine Corporation, 2012).

En general, los recursos geotérmicos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Recursos geotérmicos de alta temperatura: temperaturas > 150 °C: de este tipo de recursos se obtienen agua y vapor a presiones altas y se utilizan para la generación de energía eléctrica. Generalmente en las centrales donde se genera energía

eléctrica existen yacimientos geotérmicos o acuíferos a alta temperatura, los cuales son aprovechados mediante la captura de los vapores generados en los yacimientos y que son captados por un pozo hasta la planta de energía térmica, la cual es encargada posteriormente de la producción de energía eléctrica. En otros casos, no existe el acuífero entonces se genera un yacimiento inyectando agua en zonas donde el reservorio esté a altas temperaturas para fracturar la roca y aumentar su permeabilidad (Geoplat, 2014). Sin embargo, los géiseres que se encuentran en las montañas Mayacamas cuentan con dicho recurso, convirtiéndose en ideales para ser aprovechados y generar energía geotérmica.

- Recursos geotérmicos de baja y media temperatura, entre 30 y 150 °C: su uso potencial es en calefacción y como uso del agua caliente para algunas veredas y ciudades. También es común usar estos recursos en sitios turísticos tales como balnearios y algunas fuentes termales (Geoplat, 2014).
- Recursos geotérmicos de muy baja temperatura: temperaturas < 30 °C. En este tipo de recursos es común utilizar el calor bajo de la corteza terrestre y el calor que se absorbe mediante el sol. Su uso principal es proporcionar calefacción y refrigeración a nivel urbano en pueblos pequeños y en viviendas, así como en edificios. Su principio de funcionamiento está basado en la temperatura interna de la corteza terrestre, la cual permanece constante durante todo el año. Allí se aprovecha el calor y se genera un intercambio entre dicho calor subterráneo y la superficie de la tierra, donde se extrae el calor del terreno y con una bomba de calor se transmite al edificio o vivienda en época de invierno, generando calefacción. Por el contrario y de la misma manera, en época de verano el edificio se refresca al ceder calor al terreno a través del mismo circuito (Geoplat, 2014).

5. PERSPECTIVA HACIA EL FUTURO

La energía geotérmica, en términos simples, es la energía que permanece almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra. La explotación de la energía geotérmica empezó en el siglo XIX pero todavía estaba lejos de las tecnologías actuales que permiten el uso variado de energía del subsuelo. Esta energía tiene una proyección de crecimiento del 27,9 % para el año 2035 a nivel global, de acuerdo a datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA).

Según analistas de Estados Unidos, la energía extraída de yacimientos de agua que se encuentran en las profundidades de la tierra, cuenta con incontables ventajas y beneficios, sin embargo, su desarrollo no se ha extendido como debería en EE.UU. por falta de inversiones necesarias. El avance es cada vez más necesario, no solo para evitar daños medioambientales, sino también para contrarrestar problemas económicos, derivados de las fluctuaciones de los precios del crudo o de las interrupciones en el suministro (Martínez, 2007).

El objetivo a cumplir para el 2020 de las plantas de energía geotérmica de The Geysers, es mantener en uso este recurso renovable y suplir la demanda energética del resto del estado, determinando la combinación adecuada de los recursos energéticos para garantizar la fiabilidad y alcanzar las máximas reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero que llegan a la atmósfera, lo que contribuirá a convertir este tipo de energía en un ideal mundial.

Este tipo de energía tiene grandes beneficios, como el de ser renovable y fiable, puesto que no necesita horario alguno porque produce energía tanto en el día como en la noche; es limpia, evita la emisión de 2,4 millones de toneladas de CO₂ al año; es sostenible, ya que, al utilizar aguas residuales para reabastecer los yacimientos de vapor, contribuye al tratamiento y manejo de aguas residuales, que suelen ser un gran problema en las sociedades humanas. Este gran proyecto de The Geysers, busca convertir a California en un estado sostenible y sustentable, que evite el uso de energías altamente contaminantes y que genere más empleos para la población, convirtiéndose en una nueva propuesta de desarrollo y modelo energético que le apuesta a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo económico (Goyal & Conant, 2010).

6. CONCLUSIONES

En conclusión, esta investigación ha demostrado que los proyectos geotérmicos producen energía durante décadas a precios estables y asequibles. Además, el uso de aguas residuales para reponer los yacimientos de vapor, ha solucionado un problema ambiental para las comunidades locales, que al tiempo proporciona una fuente permanente de energía con su reabastecimiento.

A través de la inyección de agua adicional a las reservas y el perfeccionamiento de la planta desde sus inicios hasta hoy, se ha aumentado la eficiencia y la producción de energía, convirtiendo la planta de The Geysers, ubicada en California, en un modelo a seguir en producción, eficacia y desarrollo sostenible, que le apuesta a un futuro por las energías limpias y que demuestra que sí es posible la producción de energías alternativas de manera eficiente.

Una de las formas más eficaces de producir energía eléctrica es a partir de la explotación geotérmica, gracias a que se utiliza el calor del interior de la corteza terrestre. El proceso de producción es sostenible y reduce los impactos que se generan en el ambiente, convirtiendo la energía geotérmica en una gran alternativa para la producción de energía limpia, constante y sin problemas de agotamiento, debido al uso y manejo razonable de los yacimientos de vapor explotados.

La gran importancia del reservorio geotérmico de The Geysers, se debe a su capacidad de abastecimiento, siendo una fuente para veinticinco estados de los Estados Unidos y

además exporta energía a Canadá y México. Debido a su ubicación geográfica y a que se encuentra rodeado por una serie de fallas geológicas, se ha favorecido la circulación de los fluidos en el reservorio geotérmico, que se han aprovechado para la generación de energía y como fuente de aguas termales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almudena, M. (5 de Junio de 2009). *Un campo de géiseres en California para producir energía las 24 horas*. Recuperado el 24 de marzo de 2017, de SOITU.ES: http://www.soitu.es/soitu/2009/06/02/medioambiente/1243949374_001725.html
- Arroyo, M. (26-30 de mayo de 2008). *Nuevas fuentes de energía para un futuro sostenible. ¿Petróleo caro o protección del medio?* Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit-xcol/143.htm>
- Atwater, T. (1989). Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America. Recuperado de <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/872/chapter/3922005/Plate-tectonic-history-of-the-northeast-Pacific>
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3-65.
- Barker, K. S. (1995). Gestión de inyección de agua para la maximización de recursos: la observación de 25 años en el manantial de agua caliente, California.
- Bruni, S. (2014). *La energía geotérmica*. Washington: EIC.
- California Energy Commission. (2017). CA.GOV. Recuperado de <http://www.energy.ca.gov/tour/géiseres/>
- California Energy Commission. (2017). CA.GOV. California Clean Energy Tour: The Geysers. Recuperado de <http://www.energy.ca.gov/tour/géiseres/>
- Calpine Corporation. (2012). *The Geysers: A Very Special Place*. Recuperado de <http://www.géiseres.com/history.aspx>
- Damon, P.E., Clark, K. C., y Shafiqullah, M. (1983). Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1052-1071.
- García, J., Hartline, C., Walters, M., Wright, M., Rutqvist, J., Dobson, P. y Jeanne, P. (2016). The northwest géiseres EGS demonstration project, California part I: characterization and reservoir response to injection. *Geothermics*, 63, 97-119.

- Geoplat. (2014). *Geoplat, Plataforma tecnológica española de geotermia*. Obtenido de Análisis del sector de la energía geotérmica en España: http://www.geoplat.org/setup/upload/modules_docs/content_cont_URI_1980.pdf
- Geysers Geothermal Association . (1995). An update on The Geysers, November 1994. En G. G. Association, *Geothermal Resources Council Bulletin* (págs. 9-21).
- Google Earth. (23 de marzo de 2017). Obtenido de The Geysers: <https://earth.google.com/web/@38.7749061,-122.7552692,1447.98192889a,801.93037197d,35y,0h,0t,0r>
- Goyal, K. P., & Conant, T. (2010). Performance history of The Geysers steam field, California, USA. *Geothermics*, 39, 321-328.
- Gunasekera, R.C., B.R. Julian, & G.R.Foulger. (7 de marzo de 2003). Reservoir depletion at The Geysers geothermal area, California, shown by four-dimensional seismic tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 108 (B3). doi:10.1029/2001JB000638
- Isherwood, W. (1977). Reservoir depletion at The Geysers, California, in Geothermal. En *Geothermal Resources Council Transactions* (Vol. 1, pág. 149).
- Jeanne, P., Rutqvist, J., Hutchings, L., Singh, A. y Dobson, P. F. (2015). Degradation of the mechanical properties imaged by seismic tomography during an EGS creation at The Geysers (California) and geomechanical modeling. En *Physics of the Earth and Planetary Interiors* (Vol. 240, págs. 82-94).
- Mapsof.net. (2017). Carte Geologique Californie. Recuperado de <http://mapsof.net/california/carte-geologique-californie>
- Martínez, Y. (2007). EE.UU. Se plantea una posible implantación masiva de la energía geotérmica. Recuperado de https://tendencias21.levante-emv.com/ee-uu-se-plantea-una-posible-implantacion-masiva-de-la-energia-geotermica_a1466.html
- Pasquevich, D. M. (2014). *La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales*. Obtenido de Asociación Argentina para el progreso de la ciencia. Recuperado de <http://aargentinapciencias.org/2/index.php/grandes-temas-ambientales/energia-y-ambiente/161-la-creciente-demanda-mundial-de-energia-frente-a-los-riesgos-ambientales>
- PK Goyal, T. C. (2010). El historial de rendimiento del campo manantial de agua caliente de vapor, California, EE.UU. Recuperado el 27 de marzo de 2017
- Ptolomeo. (s.f.). Obtenido de Capítulo 2.El golfo de California: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/156/A5.pdf?sequence=5>
- Rashmin C. Gunasekera, G. R. (2003). Reservoir depletion at The Geysers geothermal area, California, shown by four-dimensional seismic tomography. *Journal of Geophysical Research*, 108(B3), 1-11.
- Romero, A., Mcevilly, T., Majer, E. y Vasco, D. (1995). Characterization of the geothermal system beneath the northwest géiseres steam field, california, from seismicity and velocity patterns. *Pergamon Geothermics*, 24, 471-487.

Sadowski, A. J., Forson, C. K., Walters, M. A. y Hartline, C. S. (2016). *Compilation Surface Geologic Map for Use in Three-Dimensional Structural Model Building at The Geysers Geothermal Field, Northern California*. Stanford: PROCEEDINGS.

Sawyer, A. a. (1999). USGS. Obtenido de Quaternary faults database : <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

UNESCO. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo*. Recuperado de http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015Facts_Figures_SPA_web.pdf

Vasco, A. E. (1995). Characterization of the geothermal system beneath the Northwest géiseres steam field, California from seismicity and velocity patterns *Pergamon*, 24(4), 471-473.

Centrales geotérmicas de Nesjavellir y Hellisheidi, una mirada hacia la sostenibilidad energética*

Naylen Gicela Molina Buriticá**; Laura Andrea Luna Aguinaga***; Ana María Morales Velásquez***; Marly Tatiana Porras Zamudio****; Mariana Zapata Montoya*****; Sebastián Guerra Sánchez*****; Sebastián Giraldo*****; Johan Guarín Palomo*****; Luisa Hernández Lozano*****; Carlos Manuel Osorio***** ; Juan Bermúdez*****; María Angélica Cerpa***** ; Daniela Franco*****; Laura Manuela Muñoz***** ; Liliana Tuberquia*****

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar las centrales geotérmicas de Nesjavellir y Hellisheidi, ubicadas en Islandia por medio de un análisis descriptivo con el cual se pretende entender el funcionamiento de producción de energía renovable de la central de Nesjavellir. Además identificar si la reinyección de CO₂ en los reservorios geotérmicos de Hellisheidi es una opción que permite disminuir sus emisiones e impactos negativos en la atmósfera, inclusive realizar ensayos de reinyección con otros derivados minerales producto de la generación de este tipo de energía en carbonatos como la calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg (CO₃)₂), magnesita (MgCO₃) y siderita (FeCO₃), que son estable y ambientalmente benignos sobre las escalas geológicas en distintos estados de la materia. Lo anterior con el fin de reciclarlos y, como se mencionó, disminuir su grado de contaminación en el ambiente y con esto mostrar que este tipo de energía aporta a un futuro sostenible. se evidencia debido a que se pudo concluir que en los ensayos de reinyección de CO₂ en la central de Hellisheidi, es posible reinyectar un 98 % del dióxido de carbono generado.

Palabras clave: energía renovable; sostenibilidad; energía térmica; emisión de gases; reinyección de CO₂.

* Artículo producto del proyecto de investigación Geotermia Unesco IGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa", en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbio clasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Ingeniera ambiental egresada de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: naylen810@hotmail.com

*** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: lauluna@gmail.com

**** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: ana141990@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: malytpz17@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: nana112008@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: sebas.tian-13@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: stian-verde@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: jhoanguarin@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: luului@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: cmo-178@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: juanmbescobar@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: mariangelica95@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: da.my28@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: manuemu@hotmail.com

***** Estudiante de ingeniería ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: anaturberquia@gmail.com

Nesjavellir y Hellisheidi geothermal plants, a look at energetic sustainability

ABSTRACT

The goal of this study is assessing the geothermal plants of Nesjavellir y Hellisheidi, Iceland, through a descriptive analysis with which the study pretends to understand the functioning of the production of renewable energy of the Nesjavellir plant. Furthermore, to identify if the reinjection of CO₂ in the geothermal reservoirs of Hellisheidi is an option that allows the decreasing of the emissions and negative impacts to the atmosphere, even the performing of reinjection of other mineral derivative byproduct of the generation of this type of energy such as calcium carbonate (CaCO₃), dolomite (CaMg (CO₃)₂), magnesium carbonate (MgCO₃) and iron carbonate (FeCO₃) that are stable and environmentally benign upon the geological scale in different states of matter. This last action to recycle them and, as mentioned, decreasing the grade of environmental contamination and with this displaying that this type of energy provides support to a sustainable future. This study was able to conclude that in the CO₂ reinjection trials in the Hellisheidi central, a 98% reinjection of generated CO₂ is possible.

Keywords: renewable energy; sustainability; thermal energy; gas emissions; CO₂ reinjection.

1. INTRODUCCIÓN

Una central geotérmica está asociada a la presencia de zonas volcánicas, las cuales son aprovechadas como reservorios geotérmicos para la generación de energía geotérmica. Este tipo de energía es renovable siempre y cuando la explotación del recurso se haga de forma racional, también puede ser sustentable si cumple con las necesidades de la población actual sin comprometer a las generaciones futuras (Lund, 1996). Ahora bien, dentro de los factores esenciales para la existencia de un buen recurso geotérmico, se encuentran: calor, fluidos y permeabilidad (fracturas) (Alterra Power Corp, 2017).

El desarrollo de este recurso consiste en la identificación, extracción y uso de la energía de estos reservorios de fluido sobrecalentado. Para acceder al vapor o líquido geotérmico, se perforan pozos y en la superficie se utilizan turbinas (por lo general de vapor de ciclo convencional o de ciclo binario) para convertir el vapor extraído desde el interior de la tierra en energía eléctrica. Al final del proceso, el fluido geotérmico se enfría y se reinyecta en el subsuelo para que se caliente nuevamente en el reservorio geotérmico. De esta manera, se forma un ciclo totalmente renovador que permite extraer con continuidad y explotar el calor contenido al interior de la tierra (Alterra Power Corp, 2017).

Para este caso de estudio, se comenzará hablando acerca de la central de Nesjavellir, la segunda planta geotérmica más grande de este país, la cual está ubicada en el suroeste de Islandia a 117 m.s.n.m. en el campo geotérmico de alta temperatura de Hengill (uno de los más grandes) y al este de Reikiavik. Su actividad termal está conectada a tres sistemas volcánicos (Grensdalur, Hromundartindur y Hengill). Su construcción empezó en 1987 aunque en décadas pasadas ya se había realizado un estudio de la zona, en 1990 la primera etapa de la planta térmica se puso en marcha. (Orkuveita Reykjavíkur). Esta central Geotérmica Produce alrededor de 120MWe y 300MWt de energía eléctrica y alrededor de 1.110 litros de agua caliente (80-85 °C) por segundo, la cual sirve para abastecer el servicio de calefacción, electricidad y agua caliente de la región capital, región que está compuesta por siete municipios (Atlason, Gunnarsson y Unnthorsson, 2015).

La segunda planta geotérmica de la cual se hablará es la central de Hellisheidi, la cual está ubicada en el monte Hengill, a unos 20 km al este de Reyjavik y es la planta geotérmica más nueva que se haya construido en Islandia. Esta cuenta con una capacidad de 303 MWe (eléctricos) y 130 MWt (térmicos) (Piensa en Geotermia, 2012). Las instalaciones de la planta fueron construidas en cinco fases entre 2006 y 2011 y esta cubre un área total de 13.000 m² (Piensa en Geotermia, 2012).

La presente investigación está basada en revisiones bibliográficas sobre dos centrales geotérmicas ubicadas en Islandia. Los objetivos principales son dar a conocer cuál es

la viabilidad que tiene el campo geotérmico de Nesjavellir, cómo funciona, el uso que se le está dando a la energía geotérmica y si se está tomando como un beneficio para algunas comunidades específicas, además de conocer acerca de la efectividad de la reinyección de CO₂ en los reservorios geotérmicos.

2. REFERENTE TEÓRICO

Islandia se formó hace 25 millones de años. Esta isla volcánica es parte de la dorsal oceánica que recorre el Atlántico de norte a sur y bajo ella se sitúa un punto caliente (Matin, 2012). Es un país donde la geología toma gran protagonismo, situada en el tercio septentrional de la dorsal atlántica, con eje de norte-sur disecciona la isla y al mismo tiempo sirve de límite a las placas continentales americana y euroasiática. La enorme actividad sísmica a lo largo de este accidente geológico, se manifiesta a través de potentes erupciones submarinas bajo el Atlántico y en forma de afloramientos insulares de naturaleza volcánica (Cano, 2008). Islandia emerge desde las profundidades del océano alcanzado latitudes de hasta 2.000 metros (Cano, 2008).

Este país nórdico cuenta con más de 200 volcanes activos, cifra bastante alta para su superficie, además de contar con lugares con alta actividad geotérmica, lo que lo convierte en el país más volcánico del planeta (Matin, 2012). Cabe resaltar que Islandia se sitúa sobre un punto caliente. De esta forma, el ascenso del magma astenosférico se suma al ascenso de magma procedente de zonas más profundas que pueden llegar al límite entre el núcleo y el manto que son los que originan los puntos calientes (Matin, 2012). En las últimas décadas las energías renovables han cobrado impulso a nivel mundial con un significativo impacto sobre el desarrollo sustentable de las naciones, incluyendo a Islandia. La energía geotérmica se manifiesta de modo natural por todo el territorio islandés: fuentes termales, géiseres, fumarolas y charcas de lodo hirviente (Orkuveita, 2005).

Debido a su origen geológico, su litología está compuesta por columnas basálticas y en menor cantidad por riolita y gabro. Estos basaltos son paleogénicos y geogénicos. (Cano, 2008). Otro punto importante a tener en cuenta es que el volcán Hengill, al cual están asociadas las dos centrales geotérmicas evaluadas en este estudio, es el punto de intersección de tres zonas volcánicas (zona volcánica de occidente, las fracturas de la península de Reyjanes- RPR y la zona volcánica del sur) (Zakharova y Spichak, 2012), es un joven volcán cuyas erupciones iniciaron hace unos 2.000 años y se repiten periódicamente. Dicho volcán tienen tres áreas geotérmicas: Nesjavellir, Hellisheidi y Hveragerdi (Zakharova y Spichak, 2012).

Debido a todo este potencial mencionado, el desarrollo geotérmico en Islandia dio sus primeros resultados a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En la década de 1930, el país se centró en un servicio de calefacción geotérmica para su capital, Reikjavik, con

la tecnología de perforación aportada por la industria petrolera, que permitió explorar a una mayor profundidad, encontrando en ello agua caliente para satisfacer y cumplir con la demanda de calefacción a viviendas (Constructor Eléctrico, 2016).

Después de esto se desarrollaron proyectos de mayor sostenibilidad, con la implementación de los sistemas geotérmicos centralizados a una escala comercial, desarrollado por granjeros que con gran valor realizaron un aporte sostenible en Islandia (ONU, 2015). El gobierno de Islandia estableció un fondo de mitigación en relación con las perforaciones geotérmicas a finales de la década de 1960. El Banco Mundial aportó dinero para la investigación geotérmica y la perforación de sondeo que garantizaba la recuperación de gastos para los proyectos fallidos (ONU, 2015). Reykjavik es el mayor productor de energía geotérmica operando dos centrales, Hellisheidi y Nesjavellir. (Gunnarson *et al.*, 1992).

3. CASOS DE ESTUDIO



Figura 1. Central geotérmica de Nesjavellir, en la zona volcánica de Hengill (Islandia).
Fuente: Orkuveita Reykjavíkur, s. f.



Figura 2. Central geotérmica de Hellisheidi.
Fuente: SINC, 2016.

3.1 Caso de estudio Nesjavellir

3.1.1 Perspectiva

La energía geotérmica en Islandia ha tenido un comienzo representativo, aunque se ha considerado que posee una pequeña potencia en cada instalación por separado que puede llegar a ser prometedor.

La producción de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos ocupa, a nivel mundial, el cuarto lugar dentro de las energías renovables, por detrás de la hidráulica, la biomasa y la eólica. La planta geotérmica de Nesjavellir produce la mayoría de energía que es utilizada en los sistemas de calefacción geotérmica de Islandia. La planta de Nesjavellir utiliza áreas de baja temperatura alrededor de Reykjavik así como campos de alta temperatura (Lund, 1996), aunque es arriesgado hacer predicciones a tan largo plazo en que se alcance o no ese nivel de implantación que depende lógicamente de muchos factores.

3.1.2 Perspectiva de explotación

Nesjavellir se encuentra en un área de alta temperatura a unos 27 km de Reykjavik. La energía geotérmica fue puesta en servicio en 1990 pero se sometió a prueba en los años ochenta haciéndose una perforación para la extracción de cinco a seis millones de toneladas de agua y vapor. Inicialmente la planta produjo aproximadamente 560 l/s de 82 °C de agua caliente para la calefacción urbana (100 MWt), utilizando vapor y agua para calentar aguas subterráneas frías. En 1991, la capacidad se amplió a 150 MWt y en 1998 a 200 MWt con una explotación al recurso de diez millones de toneladas, iniciando la producción de electricidad de 60 MWe y sirviendo alrededor de 180.000 personas o prácticamente toda la población. El agua de Nesjavellir fluye a dos tanques hacia Reykjavik que tiene 18 millones de litros, el agua caliente fluye a lo largo de una tubería principal hasta el sur de la zona de Reykjavik (Lund, 1996).

La central de cogeneración tiene dos funciones: la primera es producir electricidad con el vapor geotérmico, la segunda es calentar el agua fría desde el subsuelo para la calefacción urbana. La producción de electricidad comenzó con la instalación de dos turbinas de 30 MWe; en el 2001 se instaló la tercera turbina aumentando la capacidad a 90 MWe. En el 2002 utilizaron unos 63 millones de metros cúbicos de agua de los cuales 7 millones se reciclan, en 2003 la producción de agua caliente se incrementó a 290 MWt y la cuarta turbina eléctrica será la producción en línea en 2005 con una capacidad de 290 MWe; esto produjo incrementos en la producción (Gunnarson *et al.*, 1992).

Durante la primera fase del proyecto de la central, el caudal fue alrededor de 560 L/s. Un buen aislamiento térmico y el alto volumen de agua, son los factores que contribuyen a la baja pérdida de calor. Posterior a esta primera fase, la planta de Nesjavellir

siguió aumentando la capacidad de producción geotérmica de Hitaveita Reykjavíkur y las nuevas conexiones al sistema de distribución aumentaron en un rango de 3 % a 4 % anualmente. En los últimos años se ha logrado un incremento de la capacidad de almacenamiento de agua caliente entre 18.000 m³ a 72.000 m³ (Gunnarson *et al.*, 1992).

Tabla 1. Cogeneración de electricidad y agua caliente en Nesjavellir

Años	Agua caliente		Electricidad
	l/s	MWt	Mwe
1990	560	100	
1991	840	150	
1998	1120	200	60
2001			90
2003	1640	290	
2005			120

Fuente: Gunnarson *et al.*, 1992.

Un aspecto importante es que, como se había mencionado, la planta está ubicada en el área de Hengill la cual es una de las zonas con las más altas temperaturas en Islandia, esto favorece la planta de Nesjavellir. Además de esto, existe una clara correlación entre la actividad geotérmica y las características tectónicas, como se podrá observar en la figura 3 (Gunnarson *et al.*, 1992).

Debido a este potencial, la exploración en Nesjavellir se ha prolongado durante varias décadas. En el principio se llevó a cabo como parte de un programa de exploración general para todo el área de Hengill. Cuando Hitaveita Reykjavíkur compró la granja de Nesjavellir en 1964, la exploración se enfocó en el campo de Nesjavellir, comenzando la perforación en 1965 y continuando hasta 1986 con la finalización del pozo NJ-18. Todos los pozos se localizan dentro del enjambre de fractura que se extiende hacia el noreste desde el volcán Hengill. Los primeros pozos se encontraban cerca de las manifestaciones geotérmicas superficiales, mientras que los pozos posteriores se extendieron más sobre el área y más lejos para determinar el tamaño del depósito geotérmico. A continuación, se muestran los pozos de producción (Gunnarson *et al.*, 1992).

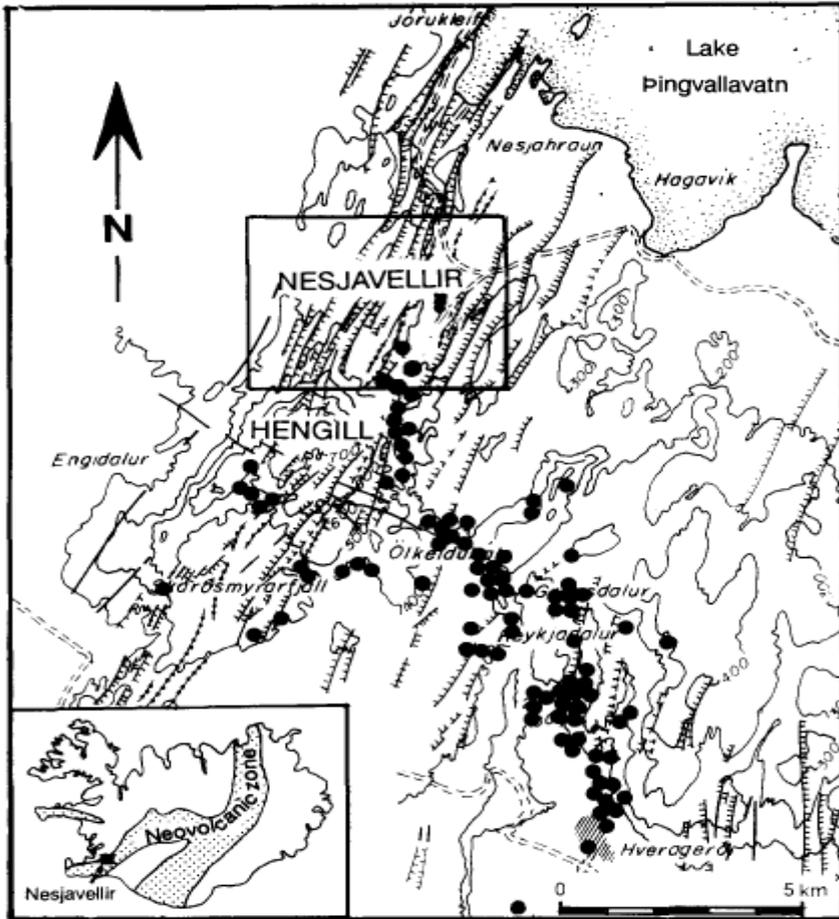


Figura 3. Correlación entre la actividad geotérmica y las características tectónicas
Fuente: (Gunnarson, et al., 1992).

Tabla 2. Pozos de producción en Nesjavellir

Pozos	Profundidad ad (m)	Total de flujo (Kg/s)	Entalp ia	Corriente a 7 bares (Kg/s)	Energía térmica
NG-5	1804	10	1800	5	18
NG-6	1144	22	2480	19	55
NG-7	2001	36	1320	11	48
NG-9	1055	28	2200	20	62
NG-10	1798	52	1350	16	70
NJ-11	2265	37	2520	33	93

Pozos	Profundidad ad (m)	Total de flujo (Kg/s)	Entalpía	Corriente a 7 bares (Kg/s)	Energía térmica
NJ-12	1856	57	1320	17	75
NJ-13	1609	36	2500	31	90
NJ-14	1304	28	1330	9	37
NJ-15	1746	47	1450	17	68
NJ-16	2025	27	2300	21	62
NJ-17	2100	45	950	6	43
NJ-18	2136	35	950	4	33
Total	22843	460		209	754
Promedio	1757	35		16	58

Fuente: Gunnarson *et al.*, 1992.

Tipo de recurso

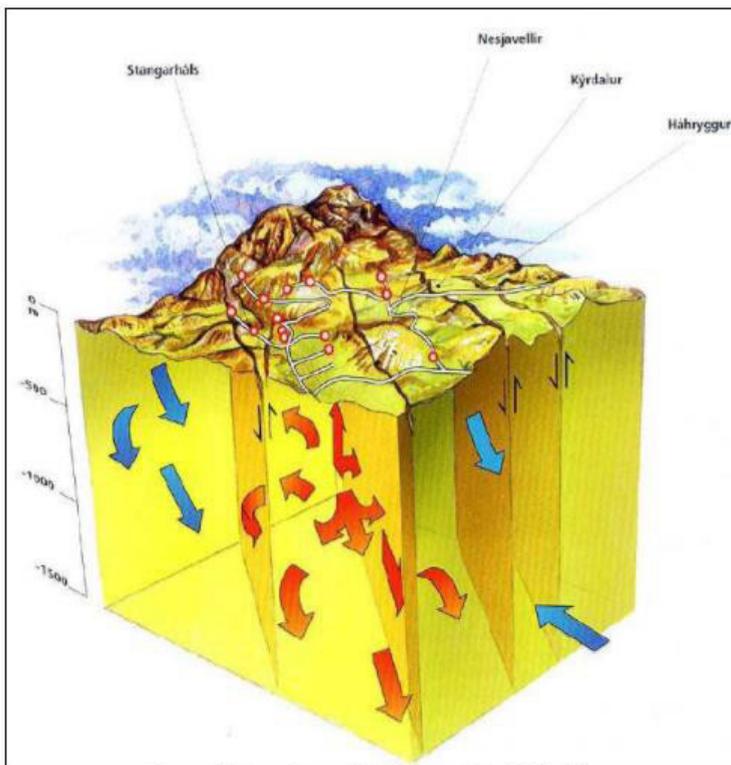


Figura 4. Esquema del funcionamiento geológico del área geotérmica de Nesjavellir
Fuente: Orkuveita Reykjavíkur, 2005.

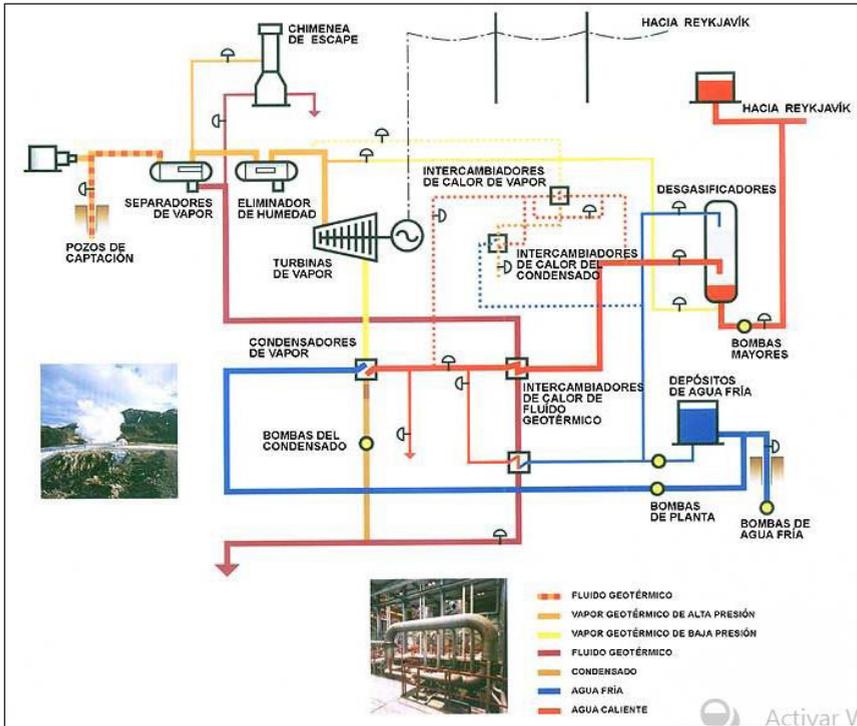


Figura 5. Esquema de la central geotérmica de Nesjavellir (Islandia)
 Fuente: Orkuveita Reykjavíkur, 2005.

Los fluidos geotérmicos se utilizan en la cogeneración de la central eléctrica, para producir agua para la calefacción urbana y electricidad dentro de un rango del 50-75 % de utilidad. Los principales gases no condensables en el vapor son el CO_2 y el H_2S . Actualmente se descargan 12.000 toneladas de CO_2 y 3.400 toneladas de H_2S de la planta por año, lo cual equivale de un valor de alrededor del 90% del CO_2 y 75% del H_2S (Gunnarson *et al.*, 1992).

El fluido, en su mayoría, se encuentra en los pozos como vapor geotérmico y agua. Las muestras de vapor y agua geotérmica, así como el condensado se almacenan para su posterior análisis de gases (Gunnarson *et al.*, 1992).

Las concentraciones de los componentes geotérmicos varían según los pozos que se utilicen, dependiendo de la potencia de la planta. La composición química del agua subterránea fría es constante y las características del campo regulan la cantidad de agua geotérmica que acompaña al vapor, aunque esto es influenciado hasta cierto punto por la elección de diferentes pozos. La energía del vapor se transfiere en el generador y condensador para generar electricidad y calentar el agua. En algunos pozos de producción, se han observado descensos de la temperatura y escalamiento debido

a cambios en la química de los fluidos. El área de Hengill es una de las de más alta temperatura en Islandia. En esta hay tres sistemas volcánicos separados, cada sistema tiene un centro volcánico y unas coordenadas de suroeste-noroeste en un enjambre de fisuras: esta configuración es típica de los centros activos en la grieta volcánica de las zonas (Gunnarson, *et al.*, 1992).

Debido al tipo de recurso y teniendo en cuenta la posterior ampliación de esta planta, se menciona que la principal razón por la que el campo de Nesjavellir fue elegido para la expansión de Hitaveita Reykjavíkur no es solo por la presencia del recurso geotérmico, sino también por los recursos de agua subterránea fresca que están disponibles en la zona. Estos son vitales para las primeras etapas de la explotación del recurso porque los fluidos geotérmicos de alta temperatura no pueden ser utilizados directamente para la calefacción urbana (Gunnarson *et al.*, 1992).

Se planea un sistema cerrado, utilizando agua de retorno de la red de distribución existente, mejorando así la eficiencia del proceso en aproximadamente 100 %, porque el agua de retorno tendrá una temperatura de 40 °C en comparación con 4 °C del agua subterránea. Existe una clara correlación entre la actividad geotérmica y las características tectónicas (Gunnarson *et al.*, 1992).

Todos los pozos se han penetrado en el reservorio geotérmico aunque el sistema de aguas subterráneas frías se extiende a mayores profundidades más lejos del área geotérmica de la superficie activa. El trabajo de exploración en Nesjavellir ha demostrado que existe una variación tridimensional en el reservorio, especialmente en la distribución de temperatura y presión (Gunnarson *et al.*, 1992).

El núcleo del depósito es un sistema de dos fases de ebullición, rodeado por un sistema de líquidos, el sistema de dos fases se encuentra principalmente en las partes meridionales del embalse (Stefansson, 1985). Hay alguna evidencia de un fluido supercrítico dentro del reservorio (por debajo de 2-3 km) cerca de la fisura volcánica de Kyrðalur (Steingrímsson *et al.*, 1990). Las principales características de la zona son el volcán central de Hengill al oeste del campo de los pozos, el cual controla un flujo ascendente del fluido geotérmico que recarga el embalse de Nesjavellir. El fluido es una mezcla de dos fases en ebullición de vapor y agua que, según estudios de isótopos, se origina como precipitación al norte del lago Thingvallavatn. Es probable que el agua fluya hacia Hengill a lo largo de las fracturas, al oeste del fluido Nesjavellir, calentándose por intrusiones magmáticas en las raíces del volcán Hengill. La precipitación local en el área de Hengill fluye como agua subterránea fría a lo largo de la fisura volcánica Kyrðalur que es la principal vía de flujo para el fluido geotérmico en el embalse de Nesjavellir (Gislason, 2000).

3.2 Caso de estudio Hellisheidi

3.2.1.2 Funcionamiento de la central de Hellisheidi. Taladros de producción

Los pozos de producción se perforan verticalmente y direccionalmente. Hasta cinco pozos se pueden situar en cada plataforma. La perforación direccional hace posible alcanzar áreas ambientalmente sensibles, bajo valles y montañas (Gunnlaugsson, 2012).

Las perforaciones pueden alcanzar hasta 3.000-4.000 mt de profundidad y con la perforación direccional es posible alcanzar hasta 1.200 mt de la vertical (Gunnlaugsson, 2012). En promedio, hay cuatro taladros en una plataforma y el tamaño de la plataforma es de aproximadamente 1.200 m². Para ubicar un taladro se analiza información geológica y geofísica de perforación como la de agujeros previamente perforados (Gunnlaugsson, 2012). Se hace un esfuerzo para minimizar los efectos ambientales, teniendo en cuenta el paisaje y la visualización de los taladros. La distancia mínima entre los pozos de producción en la plataforma es de alrededor de 10 mt (Gunnlaugsson, 2012).

Sistema de recogida de vapor y estaciones de separación

Desde de los pozos de perforación, una mezcla de vapor y agua se canaliza a estaciones de separación donde el agua y el vapor son separados. El sistema de recolección de vapor tiene aproximadamente 15 km de largo. Se trata de una tubería de acero aislada con lana de roca y cubierta con hojas de aluminio. Hay tres estaciones de separación con 21 separadores de agua y vapor. Desde las estaciones de separación, el vapor y el agua son transportados en tuberías separadas a la central eléctrica, donde se genera electricidad el agua subterránea fresca es calentada con intercambiadores de calor (Gunnlaugsson, 2012). Antes de que el vapor entre en las turbinas, pasa a través de los eliminadores de niebla para retirar los últimos restos de gotas del vapor. (Gunnlaugsson, 2012).

Centrales eléctricas. En la planta de Hellisheidi hay dos centrales eléctricas. La central eléctrica 1 es el edificio principal. Contiene cuatro turbinas de alta presión, la turbina a baja presión, la planta de calentamiento y un centro de visitantes. Las dos últimas turbinas se encuentran en la central eléctrica 2 (Sleggjan), debido a la falta de espacio en la central eléctrica principal (Gunnlaugsson, 2012).

Planta de suministro y calefacción de agua fría. El suministro de agua fría es principalmente para la planta térmica. El agua fría se calienta en intercambiadores de calor y se bombea a baja presión a Reykjavk para ser utilizada en la calefacción de los edificios (Gunnlaugsson, 2012).

La planta de calefacción consta de dos líneas, cada línea con dos intercambiadores de calor. Dos desaireadores se utilizan para quitar el oxígeno disuelto del agua caliente y prevenir la corrosión. Después de eliminar el oxígeno disuelto se mezcla la menor

cantidad de vapor con el agua para ajustar el pH y añadir algo de sulfuro de hidrógeno (H₂S) al agua. El H₂S reacciona con el oxígeno disuelto que puede entrar en el agua que está dispuesta para el consumo. El agua está entonces libre de oxígeno disuelto y no será corrosiva cuando entre a través de los radiadores en las casas (Gunnlaugsson, 2012).

Disposición del agua separada. Reinyección. Después de extraer energía del agua separada, esta se vuelve a inyectar en el depósito. Dos sitios para la reinyección están en uso a 1 km y 3,5 km de distancia, respectivamente, desde la central eléctrica (Gunnlaugsson, 2012).

Distribución de electricidad y agua caliente. Un cable subterráneo conecta la planta a una subestación. Es desde allí donde la electricidad se distribuye a lo largo la red nacional (Gunnlaugsson, 2012). Por otra parte el agua recalentada es almacenada en un tanque y se suministra a Reykjavik a través de una tubería subterránea aislada. (Ingeoexport, 2016).

Tipo de estudio del prototipo. En la central geotérmica Hellisheidi desde el 2012 se viene realizando un proyecto piloto llamado CarbFix que consiste en la reinyección de CO₂ en los pozos que son producto de las perforaciones para la extracción del vapor de agua que es transportada y utilizada en la generación de energía. Esta planta de energía produce hasta 40.000 toneladas de CO₂ y 16.000 toneladas de H₂S por año como subproductos de la producción de energía. Dado que la litología de este reservorio es basáltico, proporciona varios beneficios para la reinyección de CO₂, entre estos está la estabilidad del suelo ya que actúa como capa protectora que ayuda a que se quede atrapado en los pozos. (Ingeoexpert, 2016), además se ha encontrado que el CO₂ inyectado reacciona rápidamente con el basalto de la zona (Matter *et al.*, 2014). En el desarrollo del proyecto se planteó la necesidad que se ha tenido durante varios años, que es no suministrar más CO₂ antropogénico a la atmósfera, siendo este uno de los derivados que más se produce en este tipo de centrales geotérmicas. Otro de los beneficios que se observó, no solo en esta central geotérmica sino en otras que también han empleado esta metodología de reinyección de CO₂ es la combinación de algunos otros derivados de minerales que se producen a partir de esta clase de generación de energía tales carbonatos como la calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg (CO₃)₂), magnesita (MgCO₃) y siderita (FeCO₃), que son estables y ambientalmente benignas sobre las escalas geológicas (Aradóttir *et al.*, 2012). Esto ocurre debido a que las rocas basálticas tienen un contenido mayor al 25 % en peso de Ca, Mg y óxidos de Fe y son reactivas en el agua. Por esta razón, los metales que se encuentran contenidos en los basaltos, están disueltos para combinarse con el CO₂ inyectado y así formar estos minerales a base de carbonato (Snaebjörnsdóttir y Gislason, 2016). En el momento en el que el CO₂ es disuelto en agua, este ya no flota y de esta manera no vuelve a la superficie, así se almacena como mineral y se inmoviliza para escalas de tiempo

geológico (Snaebjörnsdóttir y Gislason, 2016).

4. RESULTADOS

Separar el CO₂ después de realizado el trabajo en las turbinas, cuyo factor a su alto grado de energía y calor interno favorece la energía cinética para un movimiento más veloz que potencializa la generación de energía, se debe realizar mediante una cámara que con choques de iones a base de carbono permita que se pueda separar en forma pura el CO₂ para que su almacenamiento sea más fácil (Matter, *et al.*, 2014).

La reinyección se hace por medio de un sistema de tubería para el transporte de gas a altas temperaturas, el CO₂ se combina con agua y otros elementos que se derivan de la producción de energía geotérmica como derivados de CaCO₃, dolomita, entre otros y cuando estas se encuentran a una temperatura por debajo del 25 % del gradiente normal del pozo a donde va a ser depositado este es llevado hasta allí, teniendo en cuenta que la cantidad de esta reinyección es un 75 % del área total del pozo con el fin de dejar espacio para que la presión misma de la zona volcánica no se sature y las corrientes de convección sigan su curso normal (Aradóttir *et al.*, 2012).

Durante el desarrollo del proyecto piloto, se constató que el tiempo aproximado para que el CO₂ recombinado formara nueva corteza terrestre era de dos años (MIT Technology Review, 2016). Se realizaron mediciones para fijar las nuevas temperaturas para que los flujos de abastecimiento no fueran afectados y lo que se encontró fue un incremento del gradiente geotérmico. Para lograr una estabilidad sismorresistente de la zona, ya que no había material particulado ni fluidos que se acercaran a contaminantes del medio y en un panorama total el reciclaje de CO₂ había sido todo un éxito (Matter *et al.*, 2014). Se prevé que con la modelación de nueva tecnología este sistema de reinyección de CO₂ se puede realizar en cualquier central geotérmica con basalto. Hasta ahora se están realizando estudios en centrales geotérmicas cuya litología sea distinta a la del basalto.

Tabla 3. Análisis de impactos ambientales

Factor	Impacto	Posibles soluciones
Emisión de ácido sulfhídrico y CO ₂	Contaminación atmosférica	Realizar un posterior tratamiento de oxidación. El ácido sulfhídrico es un agente corrosivo en equipos eléctricos, para esto se hace uso de sistemas de extracción de gases. La liberación de CO ₂ se da como O ₂ y para el carbono se recomienda la instalación de una centrífuga de imanes y con estos residuos se podrá obtener fibra de carbono.

Contaminación térmica	Deterioro de la calidad del aire o el agua	Para mitigar la contaminación térmica en el momento de verter el agua al lago, se debe mantener una temperatura ambiente, sometiéndola a un proceso de enfriamiento para no alterar el ecosistema.
Deterioro del paisaje	Disminución de vegetación	Para la generación de este tipo de energía, es necesario perforar la superficie terrestre, como consecuencia el deterioro del paisaje. Por lo tanto se deben implementar planes de reforestación para el mejoramiento del aire y conservación de especies vegetales y animales.
Suelo	Erosión y compactación	En el momento de la perforación de los pozos se requiere maquinaria, esta genera partículas suspendidas, ruido y además provoca que las especies nativas migren. Para esto se debe tener en cuenta que después de que la planta entre en funcionamiento, se debe recuperar esta zona con las diferentes técnicas de recuperación del suelo.
Infiltración	Contaminación de aguas subterráneas	Cuando se perfora el suelo para la incorporación de pozos, se debe tener en cuenta la impermeabilización del suelo para evitar posibles infiltraciones de ácido sulfhídrico, dado que este puede entrar en contacto con los acuíferos.
Fluidos	Aguas superficiales	Puede producirse por el vertido o acumulación de fluidos geotérmico, que contiene elementos como sodio, potasio, calcio, flúor, magnesio, silicatos, antimonio, estroncio, bicarbonato, boro, litio, arsénico, sulfuro de hidrógeno, mercurio, rubidio, amoníaco, entre otros., contaminantes que aparecen en distintos grados en los ecosistemas acuáticos. En algunos casos, se aplican tratamientos físico-químicos de depuración, aunque lo habitual es la reinyección en el subsuelo.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

La energía geotérmica es un recurso renovable que puede contribuir de una manera importante a la producción de energía eléctrica de un modo sostenible. Entre sus ventajas cabe resaltar que se trata de un recurso con un potencial alto que depende de las características de la zona y de esta manera se determina su tiempo de explotación. En lo referente a si contamina o no, cabe resaltar que esta se da en bajas proporciones, con pequeños porcentajes de emisiones de CO₂ y ampliamente distribuido. Su desarrollo permitirá una generación de electricidad descentralizada, sin dependencia de condiciones externas, por lo que puede brindar energía durante las 24 horas del día y 365 días al año.

La central eléctrica y térmica combinada en Nesjavellir, ha funcionado con éxito

desde octubre 1998 y a empresa local pública Orkuveita Reykjavíkur. Ha demostrado ser una empresa altamente eficiente donde la utilización de la fuente geotérmica beneficia a la población de Islandia y dando a conocer la importancia de la energías más limpias.

Mediante la compilación de información de la energía geotérmica de Nesjavellir en Islandia, se puede concluir que la generación de este recurso para beneficio de la comunidad es muy significativa, ya que produce energía eléctrica y calefacción por medio de vapor y agua, teniendo una viabilidad a futuro de generación de energía más limpia, aprovechando los campos de altas temperaturas donde el volcán Hengil es de gran importancia, gracias a que su geología tiene factores fundamentales para la explotación de los recursos presentes en el medio.

Lo que se procuró plasmar en la matriz de análisis de impactos ambientales, fue la incidencia de los diferentes factores en el ambiente, y sus interacciones con este causando así un impacto. Esta matriz permite reconocer el impacto por factores y ("mejorando así la posibilidad de crear nuevas soluciones") dando así posibles soluciones de este para mitigar los impactos generados a comunidades, ecosistemas y al paisaje de la zona afectada donde se lleva a cabo la construcción de la planta geotérmica.

La reinyección de CO₂ es una alternativa económica y eficaz para dejar de emitir a la atmosfera grandes cantidades de este contaminante, el cual es uno de los factores de la destrucción de la capa de ozono teniendo como consecuencia el incremento de la temperatura en el planeta tierra.

El procedimiento de reciclaje del CO₂ recombinado con otros elementos derivados de la producción de energía geotérmica, no genera grandes costos debido a que las perforaciones por obligación desde los reservorios ya se encuentran para la extracción de la fuente de calor y el sistema para el suministro como lo son las tuberías. Además es una alternativa ambientalmente benéfica dado que recicla más derivados que son contaminantes en el ambiente.

REFERENCIAS

- Alterra Power Corp. (2017). *¿Qué es la energía geotérmica?* Recuperado de <http://sl.q4cdn.com/340776418/files/Peru/What%20is%20Geothermal%20Energy%20-%20Spanish.pdf>
- Aradóttir, E., Sonnenthal, E., Björnsson, G. y Jónsson, H. (2012). Multidimensional reactive transport modeling of CO₂ mineral sequestration in basalts at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9, 24-40.
- Atlason, R., Gunnarsson, A. y Unnthorsson, R. (18 de Junio de 2015). Turbine repair at Nesjavellir geothermal power plant: An Icelandic case study. *Geothermics*, (53), 166-170.
- Cano, N. (2008). Recuperado de http://nogalescano.blogspot.com.co/2008/04/geologa_04.html
- Constructor Eléctrico. (5 de Mayo de 2016). *Constructor Eléctrico*. Recuperado de [https://constructor-](https://constructor-elctrico.com/)

- torelectrico.com/la-geotermia-en-islandia-un-modelo-a-seguir/
- Cross, R. (2016). Así es la planta que ha batido un récord al convertir CO2 del aire en piedra. Recuperado <https://www.technologyreview.es/s/5978/asi-es-la-planta-que-ha-batido-un-record-al-convertir-co2-del-aire-en-piedra>
- Gislason, G. (2000). Nesjavellir co-generation plant, Iceland. Flow of geothermal steam and non-condensable gases. *Proceedings World Geothermal Congress*, 585-590.
- Gunnarson, A., Steingrímsson, B., Gunnlaugsson, E., Magnusson, J. y Maak, R. (1992). Nesjavellir geothermal co-generation power plant. *Geothermics*, 21(4), 559-583.
- Gunnlaugsson, E. (2012). *The Hellisheidi Geothermal Project-Financial Aspects of Geothermal Development*. El Salvador.
- Ingeoexpert. (20 de junio de 2016). *Ingeoexpert*. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/increible-experimento-convierte-co2-roca/>
- Lund, J. (1996). Hitaveita Reykjavíkur and the Nesjavellir Geothermal Co- Generation Power Plant. Recuperado de https://oregontechsfstatic.azureedge.net/sites/default-source/geoheat-center-documents/quarterly-bulletin/vol-26/art5b17eee4362a663989f6fff0000ea57bb.pdf?sfvrsn=2cd88d60_4
- Matin, D. (23 de julio de 2012). Recuperado de <http://www.pangeados.com/2012/07/formacion-y-origen-de-islandia.html>
- Matter, J., Stute, M., Hall, J., Mesfin, K., Snaebjörnsdóttir, S., Gislason, S. y Broecker, W. (2014). Monitoring permanent CO2 storage by in situ mineral carbonation using a reactive tracer technique. *Energy Procedia*, 63, 4.180-4.185.
- ONU. (Diciembre de 2015). *Crónica ONU*. Recuperado de <https://unchronicle.un.org/es/article/la-historia-de-la-energ-sostenible-en-islandia-un-modelo-para-el-mundo>
- Orkuveita Reykjavíkur. (2005). *Nesjavellir: La Central Geotérmica que abastece a Reykjavík de electricidad y agua caliente*. Recuperado de http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia_nesjavellir.htm
- Orkuveita Reykjavíkur. (s.f.). *Nesjavellir Power Plant*. Recuperado de http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia_nesjavellir.htm
- Piensa en Geotermia. (24 de 06 de 2012). *Piensa en Geotermia*. Recuperado de <http://www.piensageotermia.com/islandia-planta-geotermica-de-hellisheidi/>
- Power Technology. (2011). Hellisheidi Geothermal Power Plant: <http://www.power-technology.com/projects/hellisheidi-geothermal-power-plant/>
- SINC. (9 de junio de 2016). SINC: *la ciencia es noticia*. Recuperado de <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-rocas-volcanicas-de-Islandia-logran-capturar-las-emisiones-de-CO2>
- Snaebjörnsdóttir, S. Ó. y Gislason, S. (2016). CO2 Storage Potential Of Basaltic Rocks Offshore Iceland. *Energy Procedia*, (86), 371-380.
- Stefansson, V. (1985). The Nesjavellir high temperature geothermal field in Iceland. *Proc. of the Tenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University report, SGP-TR-84*, 23-30.
- Steingrímsson, B., Gudmundsson, A., Franzson, H. y Gunnlaugsson, E. (1990). Evidence of a super-

critical fluid at depth in the Nesjavellir Field. *Proc. of the Fifteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University report, SGP--130*, 81-88.

Zakharova, O. y Spichak, V. (2012). Geothermal Fields of Hengill Volcano, Iceland. *Journal of Volcanology and Seismology*, 6(1), 1-14.

Impactos ambientales en complejo geotérmico Larderello, Italia*

Santiago Delgado Restrepo**
Daniel Camilo García Blanco***
Lina Fernanda García Cárdenas****
Daniela Gómez Rave*****
María Alejandra Taborda Ortiz*****

RESUMEN

Este artículo tiene como propósito, identificar los impactos ambientales tanto positivos como negativos del complejo geotérmico de Larderello (Toscana, Italia), abarcando los conceptos de geotermia, legislación ambiental en materia de geotermia y las acciones tomadas por la compañía encargada de su manejo a través de revisiones bibliográficas. Larderello se encuentra en un área geológicamente activa por su naturaleza volcánica de alta entalpía, cuenta con yacimientos de vapor de agua caliente, donde la temperatura es suficiente para generar corriente eléctrica en forma económica para usos domésticos, comerciales e industriales. Al igual que cualquier fuente de energía puede generar impactos ambientales que en su mayoría son positivos comparado con otras alternativas y debido a las acciones tomadas por las compañías que se encargan de la operación.

Palabras claves: energía geotérmica; geotermia; Larderello; impactos ambientales; energías limpias.

* Artículo producto del proyecto de investigación *Geotermia Unesco IGCP636. Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa*, en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbioclasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: santiago.delgado91@hotmail.com.

*** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: danielcamilo191@gmail.com.

**** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: lina-fernanda97@hotmail.com.

***** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: danigomezr1@hotmail.com.

***** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: aleja03050@hotmail.com.

Environmental impacts in the Larderello, Italy, geothermal complex

ABSTRACT

This article has the purpose of identifying both the negative and positive impacts of the Larderello (Tuscany, Italy) geothermal complex tackling the concepts of geothermic, environmental legislation in matters of geothermic and the actions taken by the company in charge of its operation through bibliographical revisions. Larderello is located in a geographically active area because of its high-enthalpy volcanic behavior and counts with hot water steam deposits in which the temperature is enough for generating domestic, commercial and industrial electricity economically. Just as any other energy source, it might generate environmental impacts that are mostly positive compared with other alternatives and due to the actions performed by the companies in charge of its operation.

Keywords: Geothermal energy; geothermic; Larderello; environmental impacts; clean energies.

1. INTRODUCCIÓN

La geotermia es considerada una energía alternativa al ser un recurso limpio y renovable, por este motivo se han propuesto proyectos geotérmicos a lo largo del planeta. Uno de los lugares más comunes ha sido Europa, líder internacional en el aprovechamiento directo del calor geotérmico (Gupta y Roy, 2007; Mosquera, 2011).

Italia tiene un alto potencial geotérmico debido a la elevada entalpía de los yacimientos (Berger, 2005). En 1904, se inicia en Larderello los primeros experimentos de producción de electricidad con fluidos geotérmicos y en 1913 comienza a funcionar la primera planta geotérmica y desde 1958 países como Nueva Zelanda, México y Estados Unidos comienzan con la operación de plantas geotérmicas (Cataldi, 2006; Dickson y Fanelli, 2003).

Los factores geológicos de depósitos marinos y continentales, basamento de rocas metamórficas, fluidos magmáticos y metamórficos facilitaron el aprovechamiento geotérmico en Italia, donde la geotermia en este país ocupa el segundo lugar en cuanto a la obtención de corriente con energía renovable, además Italia se encuentra en el primer puesto en Europa en cuanto a la producción de energía geotérmica después del aprovechamiento hidráulico (Batini *et al.*, 2003; Berger, 2005; Bertini *et al.*, 2006; Matienzo, 2011; Sacorotti *et al.*, 2014).

ENEL SPA (anteriormente Ente Nazionale per L'energia Elettrica -ENEL) es la empresa italiana dedicada a la producción, distribución y venta de energía eléctrica y gas que desde los años 70, hizo considerables esfuerzos para explotar en Italia las fuentes geotérmicas que actualmente ayudan al país con la importación de corriente eléctrica (Agencia EFE, 2007).

A pesar de la existencia de la Ley de Minería desde 1927, el desarrollo de la geotermia obligó al gobierno italiano y las entidades ambientales a mejorar la legislación y normatividad con respecto a la extracción de energía, contaminación atmosférica y contaminación en aguas residuales en la producción de energía geotérmica y la creación de la Unión Geotérmica Italiana una organización que busca implementar tecnologías para el uso eficiente y sostenible de la energía geotérmica (UGI, 2007; 2011; Parlamento italiano, 2013; Venerdi, 2014).

Actualmente, no existe ninguna forma de producción o transformación de energía sin causar algún impacto directo o indirecto al ambiente (Dickson y Fanelli, 2003). En la mayoría de casos la exploración geotérmica que afecta al ambiente es proporcional a la escala de su desarrollo (Lunis y Breckenridge, 1991), es decir, comparado con otras producciones de energía genera impactos mínimos sin sobrepasar los límites permisibles. Para el desarrollo de cualquier campo geotérmico, se deben tener en cuenta los

impactos tanto positivos como negativos y las posibles medidas de mitigación. Los principales efectos ambientales del desarrollo geotérmico están relacionados con las perturbaciones superficiales, los efectos físicos de la extracción de líquidos, los efectos de calor y la descarga de sustancias químicas (Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003).

Por medio de una revisión bibliográfica y la obtención de información secundaria, se indican los impactos ambientales tanto positivos como negativos y las medidas tomadas en el complejo geotérmico de Larderello para mitigar y eliminar los efectos negativos para el medio ambiente.

2. METODOLOGÍA

La metodología para realizar este artículo consiste en una revisión bibliográfica, con la que se obtiene información secundaria por medio de la investigación para así adquirir datos relevantes de acuerdo al interés.

Inicialmente, se evalúan los países del continente europeo con alto potencial geotérmico y con centrales geotérmicas, encontrando a Italia como el primer productor a nivel mundial. Luego se realiza una revisión de las centrales existentes en el país, seleccionando al complejo geotérmico de Larderello como el área de estudio para evaluar los impactos ambientales y las posibles soluciones tomadas para mitigar y eliminar los efectos negativos.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Geotermia

La geotermia usa el calor interno de la tierra y es considerada una energía alternativa al ser un recurso limpio y renovable. Es producido cuando el calor de la tierra es transferido al agua ubicada en las profundidades, esta es traída a la superficie como agua caliente o como vapor por medio de pozos perforados o en algunos casos es inyectada desde la superficie a través de tuberías (Gupta y Roy, 2007).

2.2 Geotermia en Europa

Europa es líder internacional en el aprovechamiento directo del calor geotérmico. Se han instalado centrales con una capacidad de 23.000 MW que producen juntos alrededor de 65.000 gigavatios hora (GWh) de calor al año en veintisiete estados (Mosquera, 2011).

El siguiente mapa, (figura 1) tomado del Global energy network Institute, indica la densidad del flujo de calor geotérmico, lo que muestra que la irradiancia (potencia en una superficie de radiación electromagnética) en algunas zonas de Italia es mayor a 150 mW/m², la cual coincide con el complejo geotérmico de Larderello.

“La mayor parte de los sistemas de energía geotérmica en Italia, concretamente el 71,9 % (23 de 32), están comprendidos en el rango de 10 a 20 MW, con una potencia media de 17,6 MW. El 18,8 % se sitúa entre los 20 y los 100 MW con una potencia media de 37,7 MW y el 6,3 % están por debajo de los 10 MW con una producción media de 7 MW” (Matienzo, 2011).

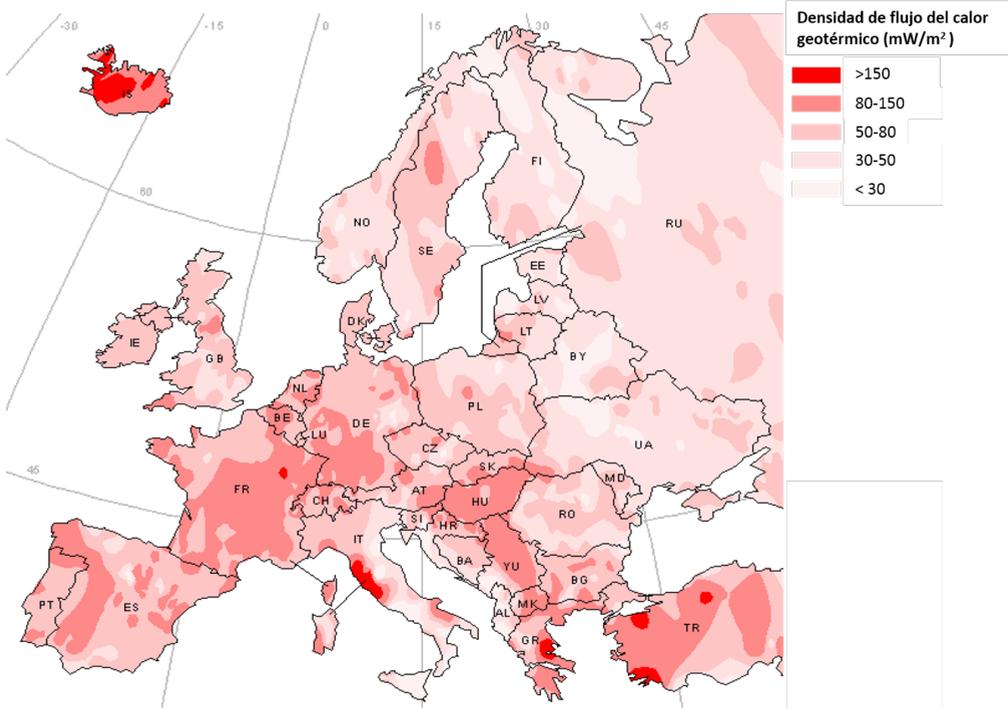


Figura 1. Densidad del flujo de calor geotérmico en Europa
Fuente: Energie-Atlas GmbH y modificado por autores.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1 Complejo geotérmico Larderello

En 1778 se detectó la existencia de la energía geotérmica por la salida de vapor de la tierra y se aprovechó el ácido bórico del agua caliente. En 1827 se utilizó por primera vez la geotermia en vez de madera para la evaporación del agua y respectivamente la extracción del ácido bórico. Los primeros intentos de producción de electricidad con energía geotérmica, comienzan con los experimentos en Italia del Príncipe Gionori Conti

de 1904 a 1905 y en 1913 se construye la primera planta de 250 kW en operación. Hasta 1958 Italia fue el único país del mundo que había desarrollado la tecnología geotérmica, produciendo 2 billones kWh/año. En 1963, la sociedad estatal de alimentación eléctrica ENEL se hizo cargo de todas las actividades de la explotación y producción de corriente. Desde los años 70, se hicieron considerables esfuerzos para explotar en Italia las fuentes geotérmicas. Actualmente Italia depende de la importación de corriente más que cualquier otro país de la Unión Europea (Cappetti, 2015).

El complejo geotérmico Larderello, cuenta con 34 plantas con una capacidad total de 769 MWy es la segunda mayor instalación de energía geotérmica del mundo. La energía producida en el campo geotérmico, representa el 10 % de toda la energía geotérmica producida en el mundo (aproximadamente 5000 GWh) y atiende al 26,5 % de las necesidades energéticas regionales. La primera planta de energía de Larderello tenía una capacidad de generación de 250 kW, que comprendía de una turbina diseñada y construida por los ingenieros de Tosi Electromechanical Company. Las plantas geotérmicas en el campo se construyeron después de que fueron destruidas durante la Segunda Guerra Mundial (Rodríguez, 2014; Roca, 2016).

4.2 ENEL Green Power

ENEL SPA es una empresa italiana dedicada a la producción, distribución y venta de energía eléctrica y gas. Opera en más de 30 países, cuenta con más de 96GW de capacidad instalada neta y distribuye electricidad y gas a través de una red de cerca de 1,9 millones de kilómetros.

El grupo eléctrico italiano produce energía en Europa, América del Norte y Latinoamérica. Trabajan un total de 52.000 empleados que gestionan 54 centrales termoeléctricas, 500 hidroeléctricas, 32 geotérmicas, 17 eólicas y cuatro fotovoltaicas. Gestiona aproximadamente 38 GW de capacidad instalada procedente de instalaciones hídricas, eólicas, geotérmicas, fotovoltaicas, biomasa y cogeneración. Hace parte de las empresas que operan en el sector de las renovables a nivel mundial y cuenta con alta diversificación tecnológica. Debido a su gestión ambiental (código ético, informe de sostenibilidad y políticas ambientales) en ENEL figuran los mayores fondos de inversión internacionales, compañías de seguros, fondos de pensiones y fondos éticos.

4.3 Unión italiana geotérmica

Es una organización sin ánimo de lucro, cuyo objetivo es promover el uso, la investigación y el desarrollo de la energía geotérmica en Italia. También se encarga del diseño, gestión y mejores tecnológicas para su uso eficiente y sostenible. La UGI tiene conocimiento e información sobre la tecnología, las consecuencias económicas, medioambientales y sociales relacionadas con esta energía, exploración y explotación de yacimientos en el territorio italiano. Estimula la conexión y comunicación entre la industria difundién-

dose a través de Italia y el extranjero con la investigación, experiencias, información y comunicación de eventos, oportunidades laborales en el sector.

Sus ingresos se destinan exclusivamente a la realización de actividades como reunir reportes de información y publicar informes sobre los programas de desarrollo de la energía geotérmica en Italia y en el extranjero; difundir noticias e información sobre la naturaleza y los usos de la energía geotérmica, ello destinado a aumentar la conciencia pública sobre los beneficios de desarrollar la forma de energía nacional; compartir información y datos con organizaciones, empresas, industrias, asociaciones profesionales, organizaciones e instituciones italianas y extranjeras que operan en el sector de la energía geotérmica; establecer contactos con los gobiernos nacionales y regionales, autoridades locales y la Unión Europea para proporcionar información sobre el potencial geotérmico del territorio italiano y fomentar la realización de la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos, colaborar con asociaciones y organizaciones internacionales, y asociaciones nacionales de países extranjeros que cumplen funciones similares a la UGI (UGI, 2011).

4.4 Caracterización geológica

Los países con características geológicas apropiadas cuentan con recursos de alta temperatura y se encuentran ubicados en márgenes tectónicas y afectados por vulcanismo (Bona yCoviello, 2016).

Larderello es conocido como el Valle del diablo y está situado en una zona alargada de 300 km cerca de Pomarance en el sur de Toscana. Es un área geológicamente activa reconocida por su productividad geotérmica y desde tiempos antiguos por su naturaleza volcánica y termales. En esta zona ya se hallan a 1.000 metros de profundidad, acuíferos con vapor caliente (Berger, 2005).

Los afloramientos más recientes corresponden a depósitos marinos y continentales del Cuaternario, mientras que los más antiguos están representados por el basamento de rocas metamórficas del Paleozoico. Los sistemas hidrotermales, situados a profundidades entre 500 y 4.000 mt, muestran una evolución desde una etapa temprana, con intrusiones graníticas dominadas por fluidos magmáticos y metamórficos actualmente dominada por fluidos meteóricos.

El crecimiento de los minerales hidrotermales se asocia a las vetas frágiles y a los sistemas de fractura que evidencian la circulación constante de fluidos. La estructura tectónica del campo geotérmico consiste en una pila de unidades tectónicas alpinas. Los depósitos neogénicos y cuaternarios, el complejo Liguria y la unidad Toscana que recubre el complejo metamórfico toscano (Batini *et al.*, 2003; Bertini *et al.*, 2006; Sacorotti *et al.*, 2014).

Es posible observar el sistema geotérmico en el área de Larderello-Travale en la figura 2.

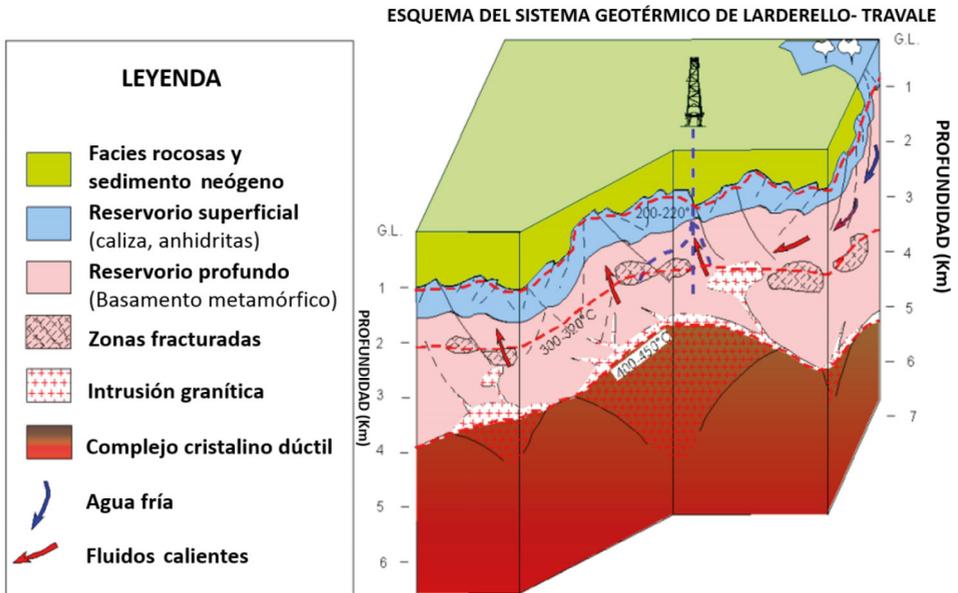


Figura 2. Sistema geotérmico de Larderello-Travale.

Fuente: 100 años de Geotermia en Larderello y modificado por autores.

4.5 Tipo de recurso

El campo geotérmico de Larderello-Travale produce fluidos geotérmicos de alta entalpía a una temperatura entre 150 y 260 °C y a una presión entre 2 y 15 bares, generados por vapor supercalentado y gases compuestos principalmente por CO₂ y H₂S. El flujo másico de los pozos es de 25 toneladas por hora de vapor seco y el reservorio más profundo alcanza valores de 70 bares de presión y 250 °C (Batini *et al.*, 2003).

El tipo de recurso que se encuentra en este complejo es un sistema de conversión directa (Direct-Steam) donde se genera electricidad en yacimientos de vapor. El vapor puede ser húmedo o seco y lleva una cierta cantidad de gases no condensables de composición y concentración variable (entre el 2 y el 10 % que deben tratarse antes de ser emitidos en la atmósfera), que es transportado por medio de tuberías hasta una casa de máquinas donde se encuentran unas turbinas tipo impulso/reacción. Entre la boca del yacimiento y la planta generadora, se encuentran instalados separadores centrífugos que remueven partículas de polvo y sólidos de segmentos de roca y a lo largo de la tubería hay puntos de drenaje para remover el vapor condensado y la humedad en la entrada de la casa de máquinas (Fernández, 2000) (UPME, 2003).

Tabla 1. Condiciones de diseño para seleccionar plantas geotérmicas de vapor

Localización de la planta	Larderello, Italia
Año de inicio	1992
Tipo	Direct steam
Potencia, MW	57
Salida de potencia, MW	52,2
Caudal geotérmico, kg/s	111,1
Temperatura salida de pozos	204 °C
Presión entrada turbina, °C	550,3
Temperatura entrada turbina, °C	205 °C
Gasto vapor turbina, kg/s	111,1
Velocidad, rpm	3.000
Calor eliminado en el condensador	245 MWt
Agua de refrigeración, kg/s	2.785

Fuente: Fernández (2000).

5. IMPACTOS AMBIENTALES

A pesar de que los proyectos geotérmicos suelen tener altos costos de inversión iniciales debido a los procesos de prospección, exploración y construcción de la planta, los costos operacionales son relativamente bajos y varían de acuerdo a la capacidad de la planta y la composición química de los fluidos geotérmicos, además la energía geotérmica es una alternativa que favorece a la naturaleza y favorece a las necesidades humanas, sin verse influenciada por los cambios climáticos y sin afectar el medio ambiente (Mercados eléctricos, 2012; Valenzuela, 2011).

Las ventajas de esta energía frente a las otras, radica en que es inagotable con relación a la historia del hombre, su producción y tecnología para funcionamiento es simple, su campo de aplicación es amplio, cada país puede ser independiente en cuanto a la producción de energía (el abastecimiento depende del país productor) y los efectos ambientales negativos son inferiores a los que producen otras energías tradicionales (Puente, 1988).

Actualmente, no existe ninguna forma de producción o transformación de energía sin causar algún impacto directo o indirecto al ambiente (Dickson y Fanelli, 2003). En la mayoría de casos, la exploración geotérmica afecta al ambiente y es proporcional a la escala de su desarrollo (Lunis y Breckenridge, 1991), es decir, comparada con otras producciones de energía, genera impactos mínimos sin sobrepasar los límites permi-

sibles. El desarrollo de la geotermia puede generar efectos físicos del agua expulsada, efectos térmicos y biológicos, contaminación química y ruido (Gupta y Roy, 2007).

La siguiente tabla, muestra la probabilidad y severidad de los potenciales impactos ambientales en proyectos geotérmicos (Lunis y Breckenridge, 1994).

Tabla 2. Probabilidad y severidad de los potenciales impactos ambientales en proyectos geotérmicos

<i>Impacto</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Severidad de consecuencias</i>
Contaminación de la calidad del aire	Baja	Moderada
Contaminación de aguas superficiales	Moderada	Moderada
Contaminación de aguas subterráneas	Baja	Moderada
Subsidencia del suelo	Baja	Baja a moderada
Altos niveles de ruido	Alta	Baja a moderada
Explosiones por presencia de gases en pozos	Baja	Baja a moderada
Conflictos con las características arqueológicas y culturales	Baja a Moderada	Moderada a alto
Problemas socioeconómicos (industria y agricultura)	Baja	Baja
Contaminación química o térmica de aguas superficiales (cuando no son reinyectadas)	Baja	Moderada a alta
Generación de residuos sólidos de la explotación	Moderada	Moderada a alta

Fuente: Gean (2017).

En cuanto a los problemas socioeconómicos, Lunis y Breckenridge hacen referencia al uso de espacios destinados para la industria y la agricultura disminuyendo el trabajo en estos casos.

La perforación en la exploración o explotación causa efectos negativos al ambiente como la modificación de la morfología de la superficie en la zona y daño a fauna y flora por la instalación de plataformas, contaminación de aguas superficiales durante las explosiones y la generación de gases en las pruebas de perforación. Estos impactos finalizan al completar la perforación.

La instalación de las tuberías igualmente puede afectar fauna y flora y causar modificaciones en el aspecto paisajístico, sin embargo en zonas como Larderello (Italia), la red de oleoductos que cruzan el campo y las torres de refrigeración, hacen parte del panorama y se han convertido en una atracción turística (Dickson y Fanelli, 2004).

Durante la operación, los fluidos geotérmicos usualmente contienen gases como dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, amoníaco, metano y trazas de otros gases, también otras sustancias disueltas que generalmente incrementan su concentración con la temperatura como cloruro de sodio, arsénico, mercurio y boro los cuales son una fuente de contaminación si se descargan al ambiente. Las aguas residuales de plantas geotérmicas tienen una temperatura mayor que la del ambiente, lo que constituye una contaminación termal. La emisión de CO₂ descargada de estas plantas es mucho menor que las centrales de energía fósil y puede causar menos problemas si se adaptan sistemas cerrados que previenen la emisión de gases (Dickson y Fanelli, 2004).

La descarga de aguas residuales es una fuente de contaminación química debido a la concentración de sustancias químicas mencionadas anteriormente. Muchas veces las aguas residuales se enfrían en estanques para no afectar los ecosistemas naturales. La extracción de grandes cantidades de agua puede causar a largo plazo un fenómeno de subsidencia y afectar la estabilidad de las condiciones geotérmicas, el cual puede controlarse reinyectando el agua (Dickson y Fanelli, 2004).

El ruido es considerado un problema en la construcción, y es insignificante en la generación de energía debido a la vibración de las tuberías (Dickson y Fanelli, 2004).

6. LEGISLACIÓN

En 1927 se puso en marcha la Ley de minería, basada en el principio de disponibilidad del subsuelo y en la investigación y explotación de yacimientos minerales, había establecido un sistema de concesión de licencias, lo que permitió que estas actividades se llevaran a cabo solo por personas naturales y jurídicas que tuvieran la capacidad técnica y económica adecuada para llevar a cabo el programa de trabajo aprobado por el decreto de concesión o permiso de investigación. A esta legislación, se integran en 1986 leyes relacionadas con hidrocarburos y energía. En 1976 se emite la Ley 319 sobre la reinyección de fluidos geotermales agotados que debido a su alto costo de implementación se aceleraron estudios y experimentos en el campo de Larderello sobre la reinyección de las aguas residuales. En la década de los 70, continúa vigente la ley de 1927, la cual muestra limitaciones frente a la evolución tecnológica de las plataformas de perforación, profundidad de pozos de producción y requisitos ambientales y de seguridad lo que conlleva a crear una ley específica para la energía geotérmica la Ley 896 de 1986. Esta ley fue la primera legislación italiana en adoptar normas de la evaluación de impacto ambiental (EIA) y más tarde el reglamento de aplicación (Decreto 395 de 1991). En 1988, se emite el Decreto presidencial 203 sobre las emisiones atmosféricas. En 1994, se presenta el reglamento de los procedimientos de concesión de permisos de exploración y concesión para la extracción de los recursos geotérmicos en el interés nacional. En el año 1997, se delega a las regiones los recursos geotérmicos. En 1998

y 1999, se dictan las directrices de las políticas y medidas nacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y se reconoció la producción de energía a partir de FER, un papel extremadamente importante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y con incentivos por medio de certificados verdes. En el año 2010, se reorganiza la legislación en materia de exploración y producción de recursos geotérmicos (Parlamento Italiano, 2013) (Venerdi, 2014).

7. CONCLUSIÓN

La región de Larderello favorece al aprovechamiento geotérmico y es pionera en el aprovechamiento de esta energía renovable. El compromiso del Estado, las agencias y compañías es fundamental para el desarrollo geotérmico sostenible. Todas las fuentes de energía alternativas, generan impactos ambientales negativos, sin embargo, la energía geotérmica, comparada con otras, es más positiva para preservar el medio ambiente. Los impactos ambientales negativos se han disminuido gracias a ENEL, el Estado italiano y la UGI. Aunque actualmente varios países (Indonesia, México, Filipinas, Estados Unidos y Nueva Zelanda) han superado a Italia en producción de energía a través de los recursos geotérmicos, Italia sigue siendo un líder y un país de referencia para ese tipo de explotación, debido a su larga experiencia con ese tipo de recursos que empezó a explotar a principio del siglo XX.

REFERENCIAS

- Agencia EFE. (2007). ENEL, *la eléctrica más fuerte de Italia*. Recuperado de <http://www.elmundo.es/mundodinero/2007/03/01/economia/1172778257.html>
- Batini, F., Brogi, A., Lazzarotto, A., Liotta, D., Pandeli, E. (2003). Geological features of Larderello-Travale and Mt. Amiata geothermal areas (southern Tuscany, Italy). *Episodes*, (26), 239-244.
- Bertini, G., Casini, M., Gianelli, G., y Pandeli, E. (2006). Geological structure of along-living geothermal system, Larderello, Italy. *Terra Nova*, (18), 163-169.
- Berger, W. (2005). *La Geotermia en Italia*. Recuperado de <http://www.revistadyna.com/Documentos/pdfs%5C2005%5C200509dic%5C1002DYNAINDEX.pdf>
- Bona, P. y Coviello, M. F. (2016). *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*. Chile: Naciones Unidas
- Cappetti, G. (2016). *100 años de Geotermia en Larderello Desde la explotación intensiva a la producción sustentable*. Recuperado de http://www.ambcittadelmessico.esteri.it/ambasciata_cittadelmessico/resource/doc/2016/02/g_cappetti_geo_mex.pdf

- Cataldi, R. (2006). De la celebración del centenario de la industria geotermoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, (19), 61-68. Recuperado el día 25 de marzo de 2017 de la base de datos de Google Académico.
- Dickson, M. H. y Fanelli, M. (2003). *Geothermal Energy: Utilization and technology*. Francia: Unesco.
- ENEL Green Power. (2019). Aprendamos sobre las renovables. Recuperado de <https://www.enel-greenpower.com/es>
- Energie-Atlas GmbH. (2005). *Geothermal Energy in Europe*. Recuperado de <http://www.geni.org/global-energy/library/renewable-energy-resources/world/europe/geo-europe/indexbig.shtml>
- Fernández, P. (2000). 2. *Aplicaciones de la geotermia*. Recuperado de <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=4>
- Gupta, H y Roy, S. (2007). *Geothermal Energy: An alternative resource for the 21st century*. Amsterdam: Elsevier.
- Cappetti, G (2016). La experiencia italiana en geotermia. <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy>
- Kristmannsdóttir, H. y Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics, Volumen (32)*, 451-461.
- Lunis, B. C. y Breckenridge, R. (1991). Environmental Considerations. En B. C. Lunis y P. J. Lineau (eds.), *Geothermal Direct Use, Engineering and design Guidebook (437-445)*. Nueva York: Geo Heat Center.
- Matienzo, A. (2011). *El mercado de las energías renovables en Italia*. Recuperado de http://www.aprean.com/internacional/estudios/RENOVABLES_ITALIA.pdf
- Mercados eléctricos. (2012). *Costos geotérmica*. Recuperado de http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C_Geo.html
- Mosquera, P. (2011). *Europa lidera en el mundo el aprovechamiento del calor geotérmico*. Recuperado de <http://www.energias-renovables.com/geotermica/europa-lidera-en-el-mundo-el-aprovechamiento>
- Parlamento Italiano. (2013). Storia della normativa geotermica in Italia. <http://leg16.camera.it/561?appro=188>
- Puente, C. F. (1988). *Geotermia*. SEP/SESIC.
- Roca, J. A. (2016). Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo. Recuperado de <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>
- Rodríguez, E. (2014). *Las plantas de energía geotérmica más grandes del mundo*. Recuperado de <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-geotermica-mas-grandes-del-mundo/>
- Saccoritti, G., Piccinini, D., Zupo, M., Mazzarini, F., Chiarabba, C., Afostinetti, N. P., Licciardi, A., Bagagli, M. (2014). The deep structure of the Larderello-Travale geothermal field (Italy) from integrated, passive seismic investigations. *Energy Procedia*, (59), 227 – 234.

Santiago Delgado R., Daniel C. García B., Lina F. García C., Daniela Gómez R. y María A. Taborda O.

UGI. (2011). *Unione Geotermica Italiana e Associazione Italiana Riscaldamento Urbano: Corso di formazione su politiche, autorizzazioni ed incentivi per gli impianti a pompa di calore*. Recuperado de <http://www.distrettoenergieinnovabili.it/der/s/geotermia-news/notizie/geonews/unione-geotermica-italiana-e-associazione-italiana-riscaldamento-urbano-corso-di-formazione-su-politiche-autorizzazioni-ed-incentivi-per-gli-impianti-a-pompa-di-calore>

UGI. (2007). *Missione*. Recuperado de <http://www.unionegeotermica.it/#>

Unidad de Planeación Minero Energética. UPME. (2003). Utilización de la energía geotérmica-Documen- to descriptivo. Recuperado de http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/material_difusion/UTILIZACION_DE_LA_ENERGIA_GEOTERMICA_DOCUMENTO_DESCRIPTIVO.pdf

Venerdi. (2014). Storia normativa italiana sulla geotermia y Normativa vigente in materia di risorse geotermiche. Recuperado de el día 28 de marzo de 2017 del sitio web Vigor.

Valenzuela, F. (10 de julio de 2011). Energía geotérmica y su implementación en Chile. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, (7), 1-9.

Más allá de Fukushima, energía alternativa en Japón. Caso Sumikawa*

Manuela Durán Cuadros**

Estefanía Román Ospina***

Orozco J.****

Henao S.*****

Cossio L.*****

RESUMEN

Japón es un país con potencial geotérmico explotable, ubicado en una zona con gran actividad tectónica, cercano a 200 volcanes que presentan evidencia de reservas energéticas geotérmicas. Tiene varias plantas geotérmicas funcionando en 17 localidades del país, tal como la zona geotérmica Sumikawa, ubicada en la ladera de la montaña Akita-Yake en la región volcánica Hachimantai, el cual fue objeto de estudio de la investigación.

El objetivo de esta investigación es, además de caracterizar la litología, así como las propiedades geoquímicas del tipo de volcanismo presente en el campo geotérmico estudiado, revisar el proceso de generación de energía geotérmica en Japón. Además, se analizaron los obstáculos alrededor de una torre de generación. Se pudo identificar que el área geotérmica Sumikawa genera energía a partir de las fracturas presentes en la zona, las cuales sirven de conducto para las aguas meteóricas que se infiltran.

Palabras claves: Japón; energía alternativa; fuentes renovables; potencial geotérmico.

* Artículo producto del proyecto de investigación Geotermia UnescoIGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa", en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbio clasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Correo electrónico:manu.duran@live.com

*** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Correo electrónico:estefaro48@hotmail.com

**** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Correo electrónico:jorozcor95@gmail.com

***** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Correo electrónico:sahenaopa@gmail.com

***** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Correo electrónico:cossiola85@gmail.com

Beyond Fukushima, alternative energy in Japan. The Sumikawa case*

ABSTRACT

Japan is a country with an exploitable geothermal potential, located in an area with great tectonic activity, close to 200 volcanoes with evidence of geothermal energetic deposits. It has several geothermal plants functioning in 17 localities of the country, such as the Sumikawa geothermal zone, located in the hillside of the Akita-Yake mountain in the Hachimantai volcanic region, which was an object of study of the research.

The goal of this research is, besides characterizing the lithology, as well as the geochemical properties of the type of volcanism in the studied geothermal field, to assess the process of geothermal energy generation in Japan. Furthermore, the study analyzed the obstacles around a generation tower. It identified that the Sumikawa geothermal area generates energy through the cracks in the zone, which serve as conduct for the infiltrated meteoric waters.

Keywords: Japan; alternative energies; renewable sources; geothermal potential.

INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es producida por el calor natural de la tierra que es transferido hacia la superficie a través de procesos de conducción y convección (Marini, 2000). En la actualidad, el aumento de la población humana en el planeta ha disparado la demanda y el consumo de energía, a su vez que se han incrementado notablemente las fuentes alternativas para la obtención de energía renovables. Por consiguiente, los esfuerzos de las entidades públicas y privadas a nivel global, han centrado sus esfuerzos en encontrar, desarrollar y explotar eficazmente dichos recursos energéticos (Mercado, Arellano, y Barragán, 2007).

Uno de los países con un desarrollo geotérmico importante es Japón, el cual luego del accidente en la central de energía nuclear de Fukushima direccionó sus intereses en explotar nuevas fuentes de energías renovables y menos riesgosas que la nuclear (EIA, 2012).

En el 2013 el consumo de energía en Japón consistió aproximadamente en el 44 % de energía proveniente de petróleo, 22 % de gas natural, 27 % de carbón, 1 % de energía nuclear y el 6 % restante de energías renovables, de las cuales el 4 % provenía de energía hidroeléctrica y el 2 % de energía geotérmica y solar. Cabe resaltar que antes del accidente de Fukushima, el 30 % de la energía en Japón la proporcionaba la energía nuclear. Es por ello que, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el país se propuso generar energía de una manera sostenible (Matschullat, 2015).

Japón cuenta con escasas reservas de combustibles fósiles pero tiene un potencial destacable en generación de energía geotérmica (Matschullat, 2015). El país tiene cerca de 120 volcanes activos que le permiten tener dieciocho centrales geotérmicas en operación ubicadas principalmente en el norte de Honshu y en las islas Kyushi. Esto le da al país alrededor del 5,3 % de la capacidad total mundial de centrales geotérmicas (GRSJ, 2006).

El primer experimento de generación de energía geotérmica en Japón, fue dirigido por el doctor H. Tachikawa en Beppu, Kyushu en 1925. La primera y segunda central geotérmica con intereses comerciales en Japón comenzó a operar en 1966 y 1967 en Matsukawa y Otake, respectivamente. Después de la primera crisis petrolera en 1973, el Ministerio de Comercio Internacional e Industria, inició el proyecto Sunshine para promover el desarrollo de campos geotérmicos. Cuatro plantas más de energía abrieron en los años 70, otras tres plantas en los años 80 y ocho plantas más en los años 90 (GRSJ, 2006).

La central geotérmica de Sumikawa que comenzó a operar en marzo de 1995, está ubicada en la región volcánica de Hachimantai al noreste de Japón, allí hay presencia

de volcanes activos y manifestaciones geotérmicas como aguas termales y fumarolas, además se encuentra cercana a otras centrales geotérmicas como la de Ohnuma, Matsukawa y Kakkonda (Ariki *et al.*, 2000; Fuchino, 2000). Como la mayoría de centrales geotérmicas en Japón, la energía proveniente de la de Sumikawa es utilizada en bombas de calor para la calefacción y refrigeración de espacios, agua caliente sanitaria y la fusión de nieve (Lund y Boyd, 2016).

Por otra parte, a pesar de que la geología y las investigaciones geológicas en Japón son muy famosas, su desarrollo geotérmico ha sido muy lento; además, el número de instalaciones geotérmicas poco profundas sigue siendo muy bajo y la energía geotérmica no va más allá de su uso para bombas de calor para satisfacer la demanda de agua caliente; lo que significa que dicho sector energético necesita más apoyo de los sectores gubernamentales para competir con sus competidores y requiere un mayor volumen de investigaciones que le permitan mostrarse fuerte en el mercado (Jalilinasrabad y Itoi, 2013).

Actualmente, no existe una regulación legal específica en el país para el uso y explotación de la energía geotérmica, ya que no existe una legislación organizada sobre el uso térmico de las aguas subterráneas y subsuperficiales, sin embargo, en grandes zonas urbanas está prohibido extraer aguas subterráneas debido a problemas de subsidencia en el pasado. No obstante, el gobierno japonés reconoció recientemente las ventajas de ahorrar energía y evitar emisiones adicionales de CO₂ mediante el uso de energía geotérmica poco profunda para refrigeración y calefacción. Ahora han comenzado a animar a la gente a usar dichos sistemas y aún no tienen ningún límite para su uso (Haehnlein, Bayer, y Blum, 2010).

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar la litología, así como las propiedades geoquímicas del tipo de volcanismo presente en el suelo estudiado para la construcción de la central geotérmica de Sumikawa en Japón. También, se analizaron los obstáculos alrededor de una torre de generación y los efectos que genera en el ciclo de vida de los reservorios.

ESTADO DEL ARTE

Es necesario resaltar que Japón cuenta con reservas limitadas de combustibles fósiles y otros recursos energéticos no renovables y es uno de los países con mayor actividad tectónica del mundo con casi 200 volcanes y enormes recursos de energía geotérmica (Kubota *et al.*, 2013).

A pesar de la disponibilidad de algunas ubicaciones geotérmicas potencialmente ricas en recursos, la capacidad de las centrales geotérmicas instaladas ha permanecido prácticamente igual desde 1999. Sin embargo, en los últimos años, especialmente después

del gran terremoto del este de Japón el 11 de marzo de 2011, los planes de desarrollo de nuevas centrales geotérmicas han aumentado rápidamente (Kubota *et al.*, 2013).

La producción energética mediante la geotérmica para el año 2010 fue de 3.064 GWh / año, que representó solo el 0,2 % de toda la producción de energía en Japón. Sin embargo, en los últimos años han surgido varios planes de desarrollo y estudios de superficie para la utilización de la energía geotérmica. Por ejemplo, como parte de un proyecto de 42 MW en Wasabizawa en Akita, el documento de alcance se proporcionó para la inspección pública como parte de la evaluación de impacto ambiental en diciembre de 2011. El proyecto incluye un plan para iniciar la construcción de una central geotérmica en 2015 y comenzar a funcionar en 2020 (Kubota *et al.*, 2013).

Aun así, a pesar de su ventaja en el aprovechamiento del recurso geotérmico, la única ley hasta el momento relacionada es *The hot spring law*, la cual se ha encargado de la protección de las aguas termales, impidiendo su explotación para turismo y consumo humano, pero con el gran inconveniente de la inexistencia de regulaciones específicas (Kaneko, 2016).

Por su gran potencial geotérmico, el área geotérmica Sumikawa ha sido objeto de estudio de algunos autores que hasta el momento se han centrado, en su mayoría, en investigar sus características geotérmicas y geoquímicas, descubriendo una falencia en estudios dirigidos al análisis del funcionamiento y desarrollo de la planta ubicada en este lugar (Kubota *et al.*, 2013).

Dentro de las investigaciones realizadas se ha identificado que las líneas isotermas en esta área tienen la misma tendencia de la cadena volcánica que se extiende desde el Monte Akita-Yake hasta el Hachimantai, en dirección este-oeste. La temperatura del subsuelo incrementa gradualmente hacia el sur donde se presenta cadena volcánica y disminuye bruscamente hacia el norte de la zona (Ueda, Kubota, Katoh, Hatakeyama y Matsubaya, 1991).

La temperatura en la parte meridional del sistema geotérmico alcanza un valor de 300 °C a una altitud de 500 M.S.N.M. (a profundidad vertical de aproximadamente 1.600 m.). Se observan cambios térmicos fuertes en zonas de altitud cercana donde algunos pozos registran temperaturas que superan este valor en 17 °C en la parte más profunda y por el contrario, con las zonas de inversión térmica, varios pozos se encuentran en temperaturas 20 °C-50 °C más bajas que la temperatura ambiente en zonas con una altura de 400 M.S.N.M. (Ariki *et al.*, 2000).

La distribución de la temperatura en la zona, sugiere la formación de los fluidos geotérmicos en la fractura profunda que conecta las dos zonas volcánicas mencionadas con anterioridad (Pritchett *et al.*, 1991) y cabe anotar que su frecuencia en las zonas

terciarias se vuelve mayor con el aumento de la temperatura en el área (Ariki *et al.*, 2000). Además la manifestación de aguas termales observada en la zona Sumikawa supondría un reservorio de sedimentos lacustres responsable de las salidas naturales de líquido caliente, las cuales harían parte del mismo sistema hidrotermal (Pritchett *et al.*, 1991).

Dada la composición química, principalmente de sales, sulfatos y bicarbonatos del fluido geotérmico, que se encuentra en las fracturas más profundas de la corteza, se puede determinar que el origen de dichos fluidos es meteórico y estos serán los encargados de recorrer más tarde el sistema de norte a noroeste (Ariki *et al.*, 2000).

Por otra parte, con respecto al modelo de explotación hidrotermal del sistema Sumikawa, se clasificó como tipo D-R según el método de análisis estático realizado por Hiroshi Shigeno (Shigeno, 1995), quien describe el sistema de calor por conducción termal (tipo D) y el potencial de desarrollo del yacimiento según la profundidad de la roca basamento (caso tipo R) con roca marina sedimentaria detrítica, la cual tiene una buena permeabilidad, tal como la roca granítica (Shigeno, 1995).

Esta planta, que funciona desde marzo de 1995, produce energía en un rango de 43-50 MW (Ariki *et al.*, 2000), caracterizada por tener un dispositivo de enfriamiento en la turbina de vapor de la primera etapa, que impide el desagüe en la superficie de la boquilla de evaporación y limita la escala de la turbina (Yasukawa y Takasugi, 2003).

La operación se lleva a cabo a través de pozos de producción y pozos de reinyección, los cuales se encuentran localizados lo más lejos posible para evitar la interferencia entre ellos (Ariki *et al.*, 2000).

Caracterización geológica. Se sabe que en un proyecto de producción de energía geotérmica, cerca del 42 % es en esencia la investigación y caracterización geológica de la zona en tanto esta fase permite la predicción del área donde se hará el aprovechamiento energético. En Japón las áreas geotérmicas se dividen de acuerdo a la presencia de volcanes cuaternarios, aguas termales de altas temperaturas y cuencas cuaternarias sedimentarias (Moghaddam *et al.*, 2014).

Sumikawa pertenece a la región de Akita, al noreste de Japón, donde el volcanismo ocurrió continuamente desde el Mioceno temprano hasta el Cuaternario, encontrándose en el límite de la placa convergente entre el continental noreste de Asia y la placa del Pacífico (Chen *et al.*, 2015). Por otro lado, estudios han concluido que el potencial geotérmico de Akita, está relacionado a la convergencia de placas aledañas a la región que se conjuga con un arco volcánico y complejos intrusivos (Moghaddam *et al.*, 2014). Tectónicamente el área de Sumikawa se distingue por ser una zona de falla con movimiento de bloques y estructuras *graben* extendiéndose en dirección norte-sur (Ariki *et al.*, 2000).

La geología del área Sumikawa se caracteriza por la alta presencia rocas ígneas extrusivas, sedimentos lacustres, piroclastos y formación terciaria intruida por rocas graníticas (Ariki *et al.*, 2000) que sirven como rocas impermeables para el sistema geotérmico, sobre todo los sedimentos lacustres y las roca volcánicas cuaternarias, debido a que sus fracturas no permanecen abiertas, evitando que el flujo geotérmico descargue en la superficie (Ariki *et al.*, 2000). Estas formaciones se dan gracias a la presencia de diferentes volcanes cuaternarios activos allí presentes como el volcán Hachimantai y el volcán Akita-Yake, donde se evidencia una fuerte actividad volcánica con paisajes volcánicos como fumarolas y fuentes termales, las cuales muestran una clara evidencia del potencial energético de la región (Moghaddam *et al.*, 2014; Ueda *et al.*, 1991).

La formación terciaria está compuesta por rocas volcánicas y sedimentos marinos, sin embargo, la composición más profunda identificada hasta ahora para la formación terciaria consiste en rocas intrusivas como el granito, granodiorita y cuarzodiorita (Ueda *et al.*, 1991) (Ariki *et al.*, 2000).

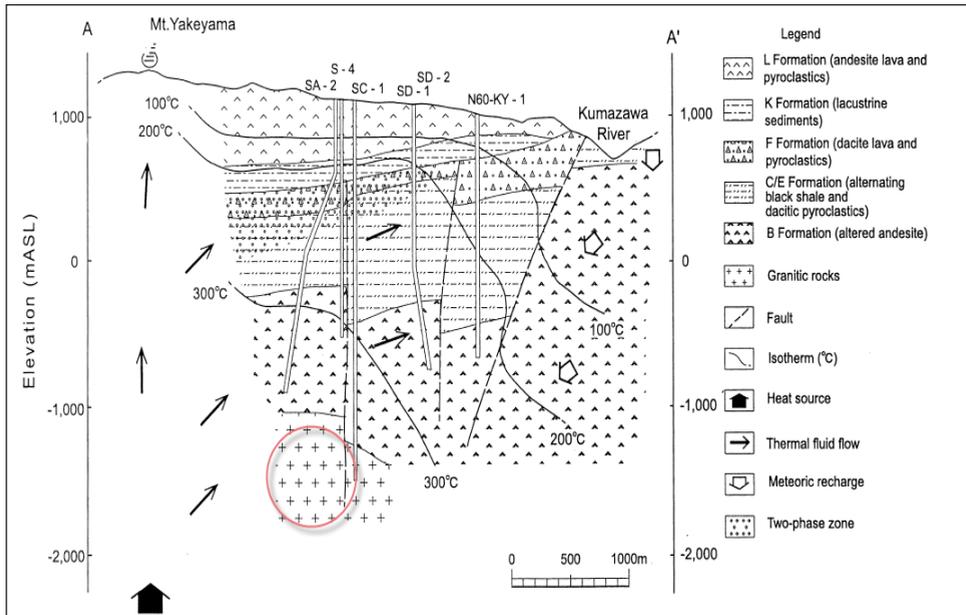


Figura 1. Modelo conceptual del sistema Sumikawa
Fuente: de Kubota (1985).

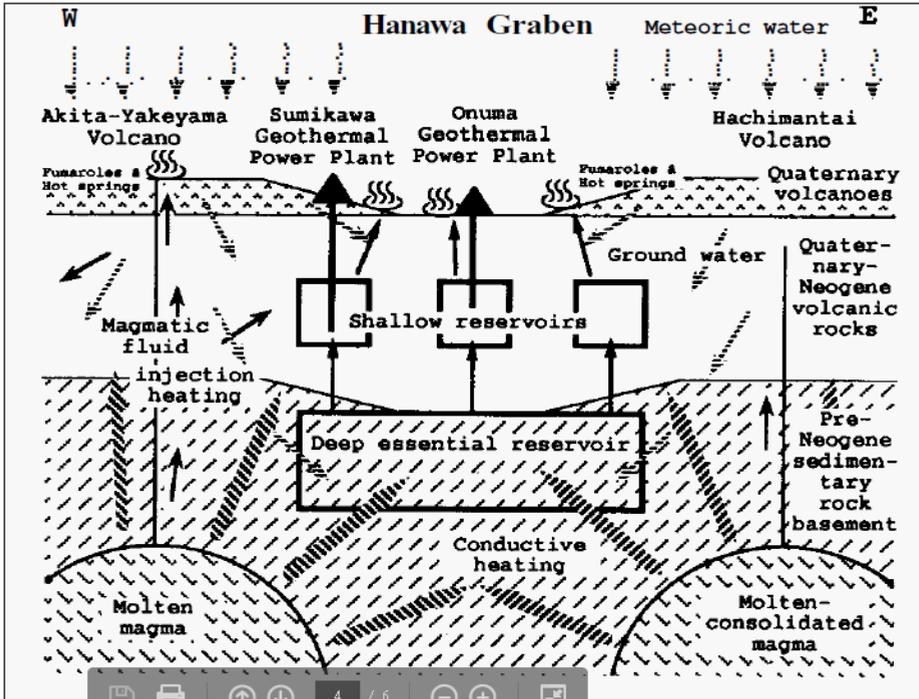


Figura 2. Modelo conceptual del sistema hidrotermal de Onuma y Sumikawa
Fuente: Shigeno, 1995.

El sistema Sumikawa se diferencia de otros sistemas aledaños porque las rocas volcánicas del cuaternario se encuentran cubriendo la capa de sedimentos lacustres del pleistoceno, además de estar acompañado comúnmente por la presencia de clorita. (Ueda *et al.*, 1991).

USO Y OBSTÁCULOS EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

La capacidad instalada de producción geotérmica en Japón es de 535.25 MWe (Kawazoe y Shirakura, 2005), la cual es aprovechada para diferentes áreas, según la región que la genere y la capacidad que esta tenga. Así, la energía producida en la región de Akita, donde se encuentra ubicada la torre Sumikawa, tiene una capacidad de 7,39 MWt, la cual es usada en un 18,67 % para calefacción de casas verdes, un 26,93 % para calefacción de espacios, 10,01 % para suministro de agua caliente y piscinas, 43,98 % para derretir nieve y para aire acondicionado (época de verano) y un 0,41 % para usos de tierra caliente, incluyendo bombas de calor (Kawazoe y Shirakura, 2005).

A pesar de todos los beneficios que trae consigo la producción de energía geotérmica, los elevados costos que esta conlleva es uno de los grandes obstáculos para su implementación como fuente de energía alternativa para mitigar el cambio climático. Alrededor

del 50 % de los costos en geotermia están relacionado con los estudios de reservas potenciales, 40 % en conductos y 10 % en otras necesidades de la planta (Kubota *et al.*, 2013).

Ahora bien, la inversión previa de una gran suma de dinero que podría o no ser recuperada rápidamente, junto con el apoyo insuficiente del gobierno, genera temor por parte de los financiadores (Kubota *et al.*, 2013).

ASPECTOS LEGALES, ECONÓMICOS Y CULTURALES

El desarrollo legal en Japón, en cuanto al uso y producción de energía geotérmica es inexistente, con la presencia de una única ley relacionada con la protección de las fuentes termales, unas 27 mil en el país (Kawazoe y Shirakura, 2005), las cuales son usadas en su mayoría como lugares turísticos y recreativos para la población japonesa (Environmental Impact Assessment, 1984). Así que se vio la necesidad de crear la *Hot spring law*, Ley 125/1948, encargada de preservar este recurso tan importante, impidiendo su explotación indiscriminada tanto de fuentes pequeñas usadas para los baños termales, como las fuentes grandes usadas para la producción geotérmica de energía (Environmental Impact Assessment, 1984; Kaneko, 2016).

Si bien el potencial de recursos geotérmicos útiles para generación energética en Japón es alrededor de 24,6 GWh, únicamente la capacidad geotérmica instalada, tal como se menciona anteriormente, de 535 MWh. Un factor importante para que aún se cuente con muy poco aprovechamiento de esta fuente renovable, es la alta inversión económica que se requiere, previa a la instalación de las plantas geotérmicas y su respectiva operación (Kawazoe y Shirakura, 2005).

Es por esto que New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), organización central para el desarrollo de tecnología geotérmica, lleva a cabo varios proyectos de investigación y el desarrollo en exploración, perforación, ingeniería de yacimientos y tecnologías centrales eléctricas desde un par de décadas atrás. Todos estos esfuerzos son producto de subsidios financieros del 50 % para la perforación exploratoria de pozos y de 20 % para la perforación de pozos de producción y construcción de instalaciones, otorgados por el gobierno japonés al sector privado por medio de la organización mencionada (Kawazoe y Shirakura, 2005).

Se sabe que para el estudio de puntos potenciales de explotación, es necesario el aprovechamiento de fumarolas y fuentes termales, estas últimas son en Japón un gran atractivo turístico pues son utilizadas como baños medicinales, por lo cual es de suma importancia para el gobierno y otras compañías privadas su conservación, oponiéndose a su utilización para el estudio de energías alternativas (Kubota *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

El área geotérmica de Sumikawa mostró que la generación de energía se logra a partir de las fracturas presentes en la zona, las cuales sirven de conducto para las aguas meteóricas que se infiltran, se acercan a la fuente de calor y luego ascienden para ser aprovechadas por la torre. Además, su geología se caracteriza por la alta presencia de rocas ígneas extrusivas, sedimentos lacustres, piroclastos y formación terciaria intruida por rocas graníticas que sirven como rocas impermeables para el sistema geotérmico, sobre todo los sedimentos lacustres y las rocas volcánicas cuaternarias, debido a que sus fracturas no permanecen abiertas, lo que evita el flujo geotérmico de descargue en la superficie.

Los diferentes estudios realizados en la zona, han concluido que el potencial geotérmico en Sumikawa está relacionado a la convergencia de placas aledañas a la región y que la fuerte actividad volcánica con paisajes volcánicos como fumarolas y fuentes termales revelan que dicho potencial geotérmico se da gracias a la presencia de diferentes volcanes cuaternarios activos allí presentes, como el volcán Hachimantai y el volcán Akita-Yake. A su vez, estas dos zonas volcánicas se conectan gracias a fracturas profundas, que generan una distribución de temperatura que sugiere la formación de los fluidos geotérmicos.

Uno de los mayores obstáculos observados alrededor de una torre de generación, es el elevado costo que suponen los estudios previos relacionados a la instalación de las reservas geotérmicas y los gastos de operación que se necesitan en la zona. Además, la capacidad de las centrales geotérmicas instaladas que han permanecido igual desde hace varios años, así como como la inexistencia de regulaciones específicas para los aprovechamientos de recursos geotérmicos podría significar impedimentos en los beneficios de producción de energía geotérmica.

REFERENCIAS

- Ariki, K., Kato, H., Ueda, A. y Bamba, M. (2000). Characteristics and management of the Sumikawa geothermal reservoir, northeastern Japan. *Geothermics*, 29(2), 171–189. [http://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00056-5](http://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00056-5)
- Chen, S., Shuang, Liu, J. Qi, Chen, S. sheng, Guo, Z. fu y Sun, C. Qing. (2015). Variations in the geochemical structure of the mantle wedge beneath the northeast Asian marginal region from pre- to post-opening of the Japan Sea. *Lithos*, 224–225, 324–341. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.03.008>
- Environmental Impact Assessment. (1984). *Legal Systems of Japan*, (3), 59–73.
- Fuchino, H. (2000). Status of geothermal power generation in japan. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, 193–198.

- Haehnlein, S., Bayer, P. y Blum, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2611–2625. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.069>
- Jalilinasrabad, S. y Itoi, R. (2013). Classification of Geothermal Energy Resources in Japan Applying Exergy Concept. *International Journals of Energy Research*, 37, 1842–1850. <http://doi.org/10.1002/er>
- Kaneko, M. (2016). Geothermal Energy Laws in the World. *Geotherm*, 38, 85–100.
- Kawazoe, S. y Shirakura, N. (2005). Geothermal Power Generation and Direct Use in Japan Generation of Geothermal OF GEOTHERMAL. *World Geothermal Congress 2005*, (April), 24–29.
- Kubota, H., Hondo, H., Hienuki, S. y Kaieda, H. (2013). Determining barriers to developing geothermal power generation in Japan: Societal acceptance by stakeholders involved in hot springs. *Energy Policy*, 61, 1079–1087. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.084>
- Lund, J. W. y Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Marini, L. (2000). *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy*. Italia: Universidad de Génova.
- Matschullat, J. (2015). Sitting on an almost infinite energy source—Japan's geothermal and renewables' potential and reality. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1833–1835. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4226-9>
- Mercado, S., Arellano, V. M. y Barragán, R. M. (2007). Medio ambiente, geotermia y toma de conciencia. *Geotermia*, 20(2), 77–86.
- Moghaddam, M. K., Samadzadegan, F., Noorollahi, Y., Sharifi, M. A. y Itoi, R. (2014). Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map. *Geothermics*, 50, 189–201. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.004>
- Pritchett, J. W., Garg, S. K., Arika, K. y Kawano, Y. (1991). Numerical simulation of the Sumikawa geothermal field in the natural state, 151–58. Recuperado de <http://doi.org/10.1115/1.4002056>
- Shigeno, H. (1995). Estimating deep environments of Japanese hydrothermal systems based on geochemical data from geothermal power plants. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, 2, 1019–1024.
- The Geothermal Research Society of Japan. (2006). *Geothermal Energy Japan. Resources and Technologies*. Recuperado de <http://grsj.gr.jp/en/>
- U.S. Energy information administration. (2012). Japan's use of thermal generation is up since March 2011 due to nuclear plant outages - Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA). Recuperado de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=6470>

Durán Cuadros Manuela, Román Ospina Estefanía, Orozco J., Henao S. y Cossio L.

Ueda, A., Kubota, Y., Katoh, H., Hatakeyama, K. y Matsubaya, O. (1991). Geochemical characteristics of the Sumikawa geothermal system, northeast Japan. Recuperado de https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj1966/25/4/25_4_223/_article

Yasukawa, K. y Takasugi, S. (2003). Present status of underground thermal utilization in Japan. *Geothermics*, 32(4), 609–618. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.07.011>

Energía geotérmica en México, una alternativa con el medio ambiente: Cerro Prieto*

Milber Alberto Murillo Barragán**
Edinson de Jesús Restrepo Ochoa***
Alejandra Zapata García****
Naylen Gicela Molina Buriticá*****

RESUMEN

Generación de energía eléctrica a partir del calor que genera el interior de la tierra, es lo que denominamos actualmente como energía geotérmica. Varios países están apostando al uso de energía limpia y así reducir la dependencia por los combustibles fósiles. México es uno de los países en América Latina que ha hecho un gran avance invirtiendo en proyectos geotérmicos. Este artículo estudiará la central geotérmica Cerro Prieto, la cual se encuentra ubicada en la planicie aluvial del Valle Mexicali. Esta central contará con dos nuevas unidades de generación de 50 MW cada una. El estudio se realizará por medio de la revisión bibliográfica con propósito de conocer avances realizados en energía geotérmica por parte de la industria mexicana.

Palabras clave: geotermia; depósito de calor; energía limpia; energía eléctrica; medio ambiente; Cerro Prieto.

* Artículo producto del proyecto de investigación Geotermia UnescoIGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa", en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbio clasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. Correo electrónico: mamurillo@yahoo.com.co

*** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. Correo electrónico: encho8a@hotmail.com

**** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. Correo electrónico: aleja.zapata.g@gmail.com

***** Ingeniera Ambiental de la Universidad de Medellín, Medellín, Colombia. Correo electrónico: naylen810@hotmail.com

Geothermal energy in Mexico, an alternative for the environment: Cerro Prieto

ABSTRACT

Nowadays, we call geothermal energy to the generation of electric energy through the heat in the earth's interior. Several countries are supporting the use of clean energies and thus reducing their dependence on fossil fuels. Mexico is one of those countries in Latin-America that has made great advancements by investing in geothermal projects. This article studies the Cerro Prieto geothermal central, located in the alluvial plains of the Mexicali Valley. This central will count with two new generation units of 50W each. This study is performed through bibliographical review and with the purpose of knowing the advancements made in geothermal energies matter in the Mexican industry.

Keywords: geothermic; heat deposit; clean energy; electric energy; environment; Cerro Prieto.

1. INTRODUCCIÓN

México es un país que cuenta con una alta actividad tectónica y volcánica, ya que se localiza en la zona de contacto de las placas Norteamericana y del Pacífico, además de limitar con otras dos placas menores que son la de Cocos y la del Caribe. Esta alta actividad sísmica, favorece la generación de energía calorífica en el interior de la corteza, denominada energía Geotermia.

El aprovechamiento de la energía geotérmica en México, inició en 1959 con la explotación del campo Geotérmico Pathé, con una capacidad de 3.500 KW de los cuales solo se pudieron producir 150 KW debido a que no contaba con un adecuado sistema de suministro de fluidos geotérmicos, ocasionado por la baja permeabilidad del campo, por lo cual fue cerrado 14 años después de su funcionamiento. (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 2016).

En el norte de Baja California se encuentra ubicado el volcán Cerro Prieto a una altitud aproximada de 1.700MSNM. En 1958 se realizaron los primeros reconocimientos geológicos en este sector y en 1973 comenzó a operar el campo geotérmico Cerro Prieto. (Flórez, 2010). Actualmente cuenta con 13 centrales geotérmicas con una capacidad total de 720 MW (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 2016), siendo el segundo campo más importante del mundo en la generación de electricidad, produciendo el 36% de toda la energía que se distribuye en el estado de Baja California (Comisión Federal de Electricidad, 2007).

La proyección de la central Cerro Prieto V, ha nacido de la alta demanda de energía eléctrica que se presenta en Baja California donde, en los últimos años, se ha observado un alto crecimiento poblacional sin ser interconectada al sistema eléctrico nacional. Por tal motivo, se planea incrementar la capacidad de generación en 100 MW, con la instalación de dos unidades de 50 MW cada una, para una capacidad total de generación del campo eléctrico Cerro Prieto de 820 MW, representando el 39 % de la capacidad total instalada del sistema Baja California (Comisión Federal de Electricidad, 2007).

El presente artículo tiene como objetivo la revisión bibliográfica sobre el proyecto Cerro Prieto, con el propósito de conocer los impactos tanto positivos como negativos, sobre la población y el medio ambiente, que se podrían producir con el desarrollo del proyecto, además evaluar todos los avances realizados en energía geotérmica por parte de la industria mexicana.

2. ESTADO DEL ARTE

Un recurso geotérmico puede ser definido simplemente como un depósito de calor dentro de la tierra que puede ser extraído. Las estimaciones de los recursos geotérmicos se hacen sobre la base de los datos obtenidos a través de estudios geológicos y geofísicos

como la profundidad, el espesor y la extensión de los reservorios geotérmicos (Instituto Latinoamericano de la Comunidad Educativa, 2010). Propiedades como la porosidad, conductividad térmica, capacidad calorífica y permeabilidad, entre otras, definen los fluidos presentes en el reservorio analizado (Kappelmeyer, 1993).

La desintegración radiactiva de los isótopos de larga vida, en particular los de potasio, uranio y torio, continuamente generan calor dentro de la tierra. (González, 1999). El contenido de calor de la tierra se estima en 1.3×10^{31} J, el calor se pierde desde la superficie de la tierra a una tasa promedio de $\sim 80 \text{ mW m}^{-2}$ (Gupta, 2006). En la mayoría de las áreas, este calor llega a la superficie de la tierra en un estado difuso, por lo que es poco rentable explotar este vasto recurso de calor. Se cree que la transferencia de calor por debajo de la litosfera es principalmente por convección y en la litosfera por conducción (Gupta, 2006).

En algunos contextos geológicos como los límites de las placas tectónicas y a veces también dentro de las placas (como, por ejemplo, en los volcanes activos o geológicamente jóvenes asociados a puntos calientes del manto como en la isla de Hawaii), el calor puede ser transferido a nivel local dentro de unos pocos kilómetros de la superficie de la tierra a través del proceso de convección por el magma o rocas fundidas (Gupta, 2006). El magma tiene temperaturas en la vecindad de $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ e interactúa con las rocas cercanas a la superficie, provocando manifestaciones superficiales de la actividad geotérmica como las aguas termales, géiseres y fumarolas (Gupta, 2006). Bajo ciertas condiciones geológicas adecuadas, el calor queda atrapado formando depósitos de calor. En estas zonas, después de perforar unos pocos cientos de metros temperaturas del orden de $200\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$ se encuentran en regiones que podrían ser adecuadas para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Gupta, 2006). Los principales campos de producción de energía geotérmica del mundo explotan este tipo de situaciones. Los requisitos esenciales para un sistema geotérmico son: (1) una gran fuente de calor, (2) un depósito donde se acumule el calor y (3) una barrera para mantener el calor acumulado (capa sello) representada por una formación geológica hidráulicamente impermeable y con baja conductividad térmica. Los campos geotérmicos, aunque puedan ser muy variados, dependen de ciertas características comunes y se pueden clasificar como campos de: (1) vapor dominante, (2) agua caliente, (3) baja presión geostática, (4) rocas calientes y secas (HDR) y (5) magma (Gupta, 2006).

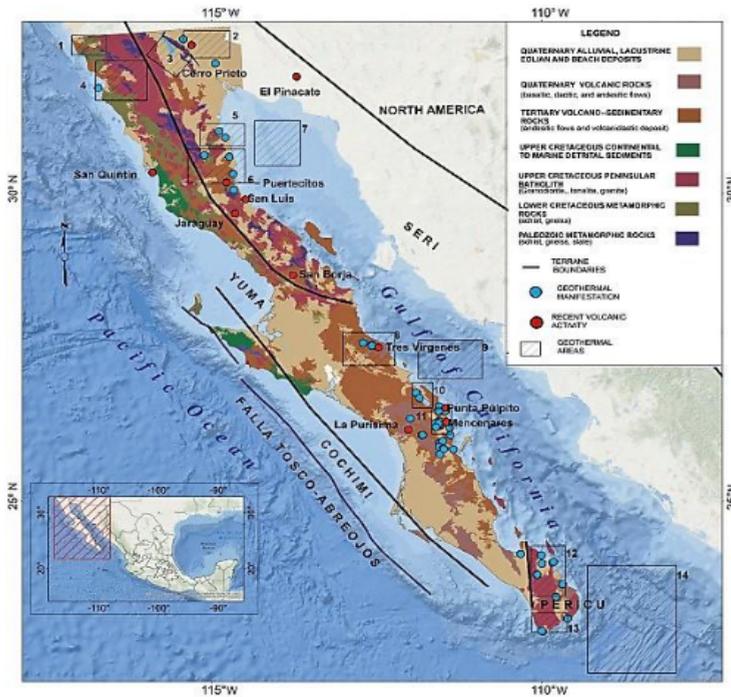
En México, actualmente el 76,37 % de la energía eléctrica que se produce proviene de combustibles fósiles, mientras que el 23,63 % restante proviene de fuentes de energía renovables (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 2016). Por este motivo, el gobierno nacional ha venido trabajando de la mano con la comisión federal de electricidad en el desarrollo de proyectos geotermoeléctricos desde la década de los años setenta y gracias a este esfuerzo, México se ha convertido en uno de los países pioneros en la construcción y operación de centrales geotérmicas. La península

de Baja California es actualmente un importante productor de electricidad a partir de energía geotérmica, con dos campos que generan hasta 730 MW: las Tres vírgenes y Cerro Prieto (Comision Federal de Electricidad, 2011). En el pasado, los estudios geotérmicos convencionales ignoraban muchas áreas de la península que hoy en día se pueden considerar para la producción de electricidad o la utilización directa utilizando tecnologías recientemente desarrolladas (Comision Federal de Electricidad, 2011). En la actualidad, la red eléctrica de la región no está interconectada con la red nacional mexicana y el combustible utilizado para suministrar electricidad a las ciudades y pueblos de la zona, es muy costoso. Además, el desarrollo del turismo ha dado lugar a un aumento significativo de la población y, en consecuencia, a un gran aumento en la demanda de energía y agua (Comision Federal de Electricidad, 2011).

Las áreas geotérmicas que han sido recientemente exploradas son: Ensenada (Punta Banda) en Baja California Norte y Bahía Concepción y Los Cabos en Baja California Sur. Estas investigaciones han conllevado a descubrir nuevos recursos geotérmicos en Waner y Consag, cuencas del golfo de California (Comision Federal de Electricidad, 2011). Todas estas investigaciones promueven la explotación sostenible de los sistemas hidrotermales submarinos para la producción de energía con el uso de nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente (Comision Federal de Electricidad, 2011).

A continuación, se presentan la mayor parte de los datos disponibles de los recursos geotérmicos de la península de Baja California, con exclusión de los dos sistemas geotérmicos que ya están en explotación comercial, es decir, Cerro Prieto y las Tres vírgenes (Arango, 2015).

En el campo geotérmico de Cerro Prieto, el aprovechamiento del recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica, se inició en el mes de mayo de 1973 con la entrada en operación comercial de las dos primeras unidades de la central Cerro Prieto I (CPI) con una capacidad de 37,5 MW cada una. Actualmente, la capacidad total instalada en este campo geotérmico es de 720 MW, distribuidos en cuatro centrales de generación: CP I (180 MW), CP II (220 MW), CP III (220 MW) y CP IV (100 MW), lo que denota que este tipo de generación de electricidad es factible y confiable desde el punto de vista económico, social y ambiental, pudiéndose obtener en promedio altos factores de planta (FP 0,90) con un bajo impacto ambiental. El factor de planta mide el grado de utilización de la capacidad efectiva de una central eléctrica (COES, 2002). Se determina dividiendo la energía real generada entre la máxima teórica.



(1) Tijuana, (2) Valle de Mexicali y Cerro Prieto, (3) Laguna Salada, (4)Ensenada; (5) San Felipe-Punta Estrella, (6) Puertecitos-Valle Chico, (7) Wagner-Consag cuencas, (8) Tres vírgenes, (9) Cuenca de Guaymas, (10) Bahía Concepción, (11) Comondú, (12) La Paz, (13) Los Cabos, (14) Cuenca Alarcón.

Figura 1. Localización de centrales geotérmicas en Baja California
Fuente: Arango (2015).

En la figura 2, se esquematizan los sectores de explotación del campo geotérmico CPI, CPII, CPIII, CPiV y CPV (Comision Federal de Electricidad, 2011).

Por otra parte, de acuerdo con el estudio de desarrollo del mercado eléctrico, se estimó que el área de Baja California tuvo un crecimiento promedio anual de 7,9 % durante el periodo 1999-2008. Ante esta situación, y dado que el área Baja California no se encuentra interconectada al sistema eléctrico nacional, se han tomado las previsiones necesarias para que las centrales de Cerro Prieto continúen trabajando a su plena capacidad e incrementando la capacidad de generación en 100 MW adicionales mediante el desarrollo del proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V. De tal forma, con los 163 pozos productores con que cuenta actualmente el campo geotérmico de Cerro Prieto, se tiene una disponibilidad de vapor en superficie de 6.070 t/h de vapor, cantidad suficiente para mantener la operación del campo geotérmico. En el año 2006 la cantidad de vapor que demandó la operación de las cuatro centrales de Cerro Prieto, fue de 5.175 t/h para una generación de electricidad de aproximadamente de 5.000 GW/h (Comision Federal de Electricidad, 2011).

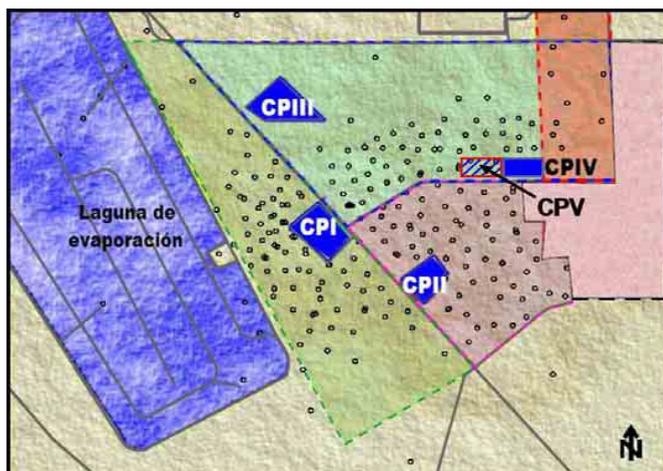


Figura 2. Localización de plantas geotérmicas en Cerro Prieto
Fuente: (Comision Federal de Electricidad, 2011)

Sin embargo, la exploración y construcción de las centrales geotérmicas en esta zona, ha desencadenado diversas problemáticas en las comunidades cercanas ya que el agua y el aire de la zona han sido objeto de descargas contaminantes con alto grado de compuestos químicos perjudiciales para la salud. El investigador de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Román Calleros, ha indagado sobre la desatención de la contaminación de la geotermia que, según sus investigaciones, ha provocado afectaciones en once ejidos y nueve comunidades. Además, él afirmó que la universidad realizó infinidad de pruebas y estudios que reflejaron contaminación en agua, suelo y aire lo que ha provocado asma, alergias y cáncer de pulmón a los pobladores de la zona. "Los suelos están totalmente dañados ya no sirven para nada, el agua está contaminada con agua geotérmica, el aire está contaminado con ácido sulfhídrico, sileno, tolueno, con sílice", explicó (Calleros, 2016).

Entre sus conclusiones recabaron información de campo de personas enfermas en el ejido Nuevo León, Miguel Hidalgo y Morelia en donde se señala en las actas de defunción el cáncer de pulmón con una incidencia muy acentuada en Cerro Prieto. El investigador de la UABC indicó que la zona reporta los índices más altos a nivel nacional de asmáticos, aunque en el tema de cáncer pulmonar dijo que hace falta que la Secretaría de Salud se integre a los trabajos ya que no existen datos estadísticos en Baja California sobre el tema. Él agregó que se encuentra trabajando en un muestreo con los habitantes y personal de la clínica del IMSS (Instituto Mexicano de Seguridad Social) y de manera preliminar acotó que existe.

Una alta incidencia (Calleros, 2016) Explicó que por lo menos existen alrededor de mil hectáreas afectadas directamente tan solo en esos tres ejidos, por lo que se está

pidiendo una indemnización por parte de la Comisión Federal de Electricidad (Comisión Federal de Electricidad, 2011).

3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

El campo geotérmico de Cerro Prieto, se localiza a 28,6 km al SE de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 114°40' y 115°33' de longitud al oeste de Greenwich y los paralelos 31°55' y 32°44' de latitud N, sobre la planicie deltaica que formaron los sedimentos transportados por el Río Colorado (Aguilar Dumas, 2008). A 6 km, al NO del campo, se encuentra el volcán de Cerro Prieto, que tiene una altura de 225M.S.N.M., una composición dacítica a ríodacítica y una edad menor a 700 mil años (Aguilar Dumas, 2008). La planta geotérmica se encuentra dentro del patrón tectónico denominado San Andrés, áreas formadas por los rellenos del valle en las cercanías con cuerpos extrusivos del volcán de Cerro Prieto (Aguilar Dumas, 2008).

La principal geología está representada por rocas metasedimentarias como calizas, areniscas, conglomerados y metamórficas como mármol, gneiss, esquistos de edad mesozoica y, en algunos casos, probablemente paleozoica. Rocas batolíticas cercanas al campo geotérmico de Cerro Prieto, forman gran parte de la Sierra de Cucapas y de la Sierra del Mayor, estas son de tipo granítico y tonalítico. Tienen una edad aproximada de 119 a 120 millones de años. Las rocas volcánicas son por lo general andesitas, riolitas y dacitas de edad mioceno-plioceno y estas se presentan únicamente en la Sierra Pinta a 75 km al SO del campo geotérmico (Aguilar Dumas, 2008).

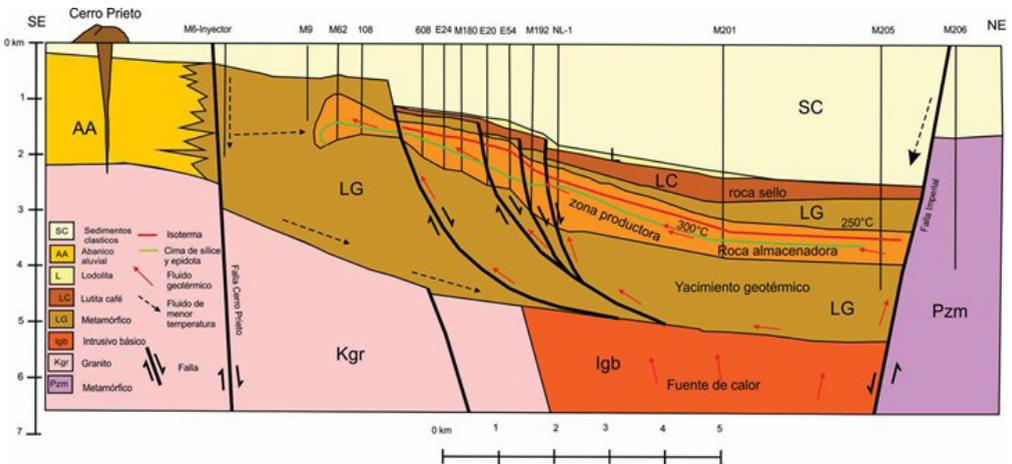


Figura 3. Sección morfológica- estructural SW-NE del campo geotérmico Cerro Prieto
Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2015.

En la anterior imagen, podemos observar que la geología del subsuelo del campo geotérmico Cerro Prieto, comprende al menos cuatro sucesiones litológicas: 1) *Unidad*

D: constituida por basamento granítico, profundizado a más de 4.000 m²) *Unidad C*: formada por sedimentos consolidados de tipo continental, depositada en forma lenticular y en un ambiente deltaico, constituida por una alternancia de areniscas, limonita, lutita, pizarra y argilita. Tiene un espesor entre 2.500 y 3.000 m³). *Unidad B*: confirmada por lodolistas de un espesor que varía de 1 a 800 m Forma la capa sello sobre el yacimiento geotérmico. 4) *Unidad A*: compuesta por sedimentos no consolidados, a los que se le ha asignado una edad cuaternaria, está formada por arcilla, limo arena y grava en forma repetitiva y alternante, con espesor entre los 500 y 800 m (Servicio Geológico Mexicano, 2015).

El campo geotérmico, está limitado por dos fallas laterales, la falla Imperial y la Cerro Prieto. Estas fallas orientadas NE-SW son intercaladas porque actúan como colectores de fluidos geotérmicos. La fuente de calor es una anomalía térmica regional resultante del adelgazamiento de la corteza. El calor, a lo largo con los fluidos hidrotérmicos, se transfiere a través del granítico del Cretácico tardío, rocas de sótano a acuíferos profundos dentro de areniscas y pizarras (Harsh Gupta, 2007). Debido a que las estructuras geológicas que almacenan los acuíferos de agua caliente y el basamento en el Valle de Mexicali están cubiertas por sedimentos deltaicos no consolidados, ha sido necesaria la aplicación de diferentes métodos geofísicos para conocer el comportamiento y la posición, tanto de los sedimentos consolidados, como del basamento granítico y metasedimentario (Aguilar Dumas, 2008).

4. TIPO DE RECURSO

El campo geotérmico de Cerro Prieto, el mayor de los cuatro campos mexicanos en explotación comercial, comprende una superficie de 18 km², aunque las reservas del yacimiento en el subsuelo se extienden hasta cubrir otros 50 km²; se ubica en una cuenca de tipo transtensional producida entre dos fallas laterales activas pertenecientes al sistema de San Andrés: la falla Cerro Prieto y la falla Imperial. En el subsuelo de esa cuenca, el proceso de adelgazamiento de la corteza continental ha generado una anomalía térmica, que es la que finalmente aporta el calor del sistema geotérmico. En la actualidad la CFE opera en Cerro Prieto 163 pozos productores y once pozos inyectores, con los cuales se producen 6.070 t/h de vapor que se extraen conjuntamente con 8.000 t/h de agua geotérmica. Las características de los pozos productores de Cerro Prieto se indican en la tabla 1.

El fluido obtenido en superficie a través de los pozos, es una mezcla de agua y de vapor que debe ser separada por medios mecánicos, lo que se hace en la plataforma de cada pozo mediante un separador centrífugo. El vapor separado se envía a través de un sistema interconectado de vapoductos hacia las plantas generadoras; la interconexión de estos permite transferir vapor de los pozos localizados en un sector del campo hacia otro, en función de las necesidades de cada central. El agua separada, por su parte,

es conducida mediante canales abiertos y tuberías hacia una laguna de evaporación solar donde una parte se evapora y otra parte se reintegra al yacimiento geotérmico mediante pozos inyectoros (Comision Federal de Electricidad, 2011).

Tabla 1. Características de los pozos

Pozos	<i>Características de los pozos productores</i>				
	<i>Sector del campo</i>				
	CP-I	CP-II	CP-III	CP-IV	CP-V
Profundidad (m)	1800	2700	2500	3000	1500
Temperatura (°C)	305	322	333	350	362
Producción por pozo (t/h)	20	53	49	57	800
Entalpía media (KJ/Kg)	1300	1520	1620	1575	-

Fuente: Comision Federal de Electricidad, 2011.

El vapor es conducido por medio de una red de vaporductos de unos 120 kilómetros de longitud. Los vaporductos tienen diámetros de entre 8" y 46" y están térmicamente aislados con una capa de material a base de lana mineral o fibra de vidrio, con una cubierta exterior de aluminio o hierro galvanizado (Salaices, 2007).

Los ductos colectores del vapor se denominan ramales. CP-I cuenta con 8 ramales de alta presión, mientras que para CP-II, CP-III y CP-IV, existen ramales paralelos de alta y baja presión (dos ramales por campo). Esta denominación proviene del tipo de separación: primaria o de alta presión y separación secundaria o de baja presión (Salaices, 2007).

5. PERSPECTIVA DE LA EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA

La oferta de energía eléctrica en la región de Baja California está integrada por varios tipos de centrales: ciclo combinado, turbogas, combustión interna y geotérmica. Las centrales geotérmicas constituyen el 36 % de la capacidad total en Baja California (Comision Federal de Electricidad, 2011).

Para cubrir esta demanda, se requerirán cinco nuevas centrales: cuatro de ciclo combinado (una de 253 MW, una de 228 MW y dos de 255 MW) y una geotermoeléctrica de 100 MW. Esta última conforma el proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V que considera la instalación y operación de dos unidades de 50 MW cada una (Comisión Federal de Electricidad, 2011).

El proyecto geotermoeléctrico Cerro Prieto V reviste una gran importancia por el impulso que dará al desarrollo en la explotación de los recursos renovables del país. Consistirá en la instalación y operación de dos unidades a condensación de 50 MW cada una, con las que se incrementará a 820 MW la capacidad de generación del campo geotérmico Cerro Prieto bajo un régimen de extracción de vapor racional y estable a largo plazo. Estas dos unidades nuevas están funcionando desde el año 2006 y su funcionamiento fue proyectado hasta el año 2040. En la siguiente tabla se encuentran consignadas las fechas de operación de las unidades instaladas en cada uno de los campos e igualmente los años que llevan operando estas unidades hasta la fecha y así mismo cuál es la capacidad de cada una de las unidades en MW (Comisión Federal de Electricidad, 2011).

Tabla 2. Capacidad instalada en el campo Cerro Prieto

<i>Capacidad instalada en el campo Cerro Prieto</i>			
<i>Nombre de la unidad</i>	<i>Fecha de operación</i>	<i>Años en operación</i>	<i>Capacidad instalada (MW)</i>
CP-I U-1	1973	44	37,5
CP-I U-2	1973	44	37,5
CP-I U-3	1979	38	37,5
CP-I U-4	1979	38	37,5
CP-I U-5	1982	35	30
CP-I U-6	1986	31	110
CP-I U-7	1987	30	110
CP-I U-8	1986	31	110
CP-I U-9	1987	30	110
CP-I U-10	2000	17	25
CP-I U-11	2000	17	25
CP-I U-12	2000	17	25
CP-I U-13	2000	17	25

Fuente: Comisión Federal de Electricidad, 2011.

6. CONCLUSIONES

En la actualidad se vive una crisis energética y esto ha obligado a expertos de todo el mundo a replantear mecanismos de generación de electricidad. Por consiguiente, se han empezado a emplear otras fuentes para la generación de energía llamadas energías alternativas y que son una opción amigable para el medio ambiente. México es el cuarto productor de energía geotérmica, la cual tiene uno de los costos de generación

más baratos dentro de las fuentes renovables (Meana, 2014). Cuenta con la planta de energía geotérmica Cerro Prieto, la cual es una planta generadora de energía limpia que trae consigo múltiples beneficios no solo para el medio ambiente, sino también para la región.

Para la planeación y desarrollo de sus proyectos, la Comisión Federal de Electricidad toma en cuenta la normativa ambiental vigente con el fin de evitar en lo posible el impacto en el ambiente donde se implementen, considerando para ello los efectos sobre los diferentes ecosistemas que conforman el área de estudio de sus proyectos, a fin de prever, mitigar o compensar la posible afectación que pudieran ocasionar sobre la flora, fauna, suelo y agua, contribuyendo de esta manera a garantizar su compromiso con el ambiente, en las actividades de selección del sitio, construcción, operación y mantenimiento.

La producción de energía eléctrica por medio de las plantas geotérmicas, es una estrategia que en los últimos años está tomando mucha fuerza ya que los costos de producción son mucho más bajos que el de las plantas de carbón y nucleares.

Ambientalmente, la utilización de las plantas geotérmicas para producir energía causa menos impacto que aquellas que explotan combustibles fósiles, sin embargo es importante mencionar que puede ocasionar daños ambientales por el vertimiento y emisión de sulfuro de hidrógeno, amoníaco, mercurio y arsénico los cuales afectan de forma directa los suelos y cuerpos hídricos que estén cerca de la zona, además esto puede repercutir en la salud de las comunidades que se encuentren dentro del área de influencia del proyecto.

El campo de la geotermia es una nueva opción energética para Latinoamérica, la misma nace ante la inminente necesidad de explorar nuevas opciones de energía más limpia, teniendo en cuenta la relación costo-beneficio. Así mismo, al ser una fuente renovable, ayuda a mejorar la seguridad del suministro eléctrico. En Colombia aún no se ha desarrollado como en otros países de Latinoamérica. Sin embargo, el país cuenta con un potencial geotérmico de 2.210 MW (Isagen, 2014) distribuidos en zonas del centro y sur del país. En la actualidad la empresa Isagen se encuentra realizando estudios para dos proyectos uno de ellos es el proyecto geotérmico macizo volcánico del Ruiz donde se estima una capacidad de 50 MW y el otro es el proyecto geotérmico binacional Tufiño – Chile – Cerro Negro donde se estima una capacidad de 138 MW. Este último se está trabajando con Ecuador y los estudios de prefactibilidad ya se han iniciado mientras que para el proyecto macizo Volcánico del Ruiz ya se han terminado los estudios de prefactibilidad y la licencia ambiental se encuentra en trámite. El Banco Mundial afirma que en América Latina y el Caribe se puede encontrar energía geotérmica en Argentina, Chile, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, México y Nicaragua (Dinero, 2016). Por esta razón este trabajo se enfoca en México, país líder de energía geotérmica

en Latinoamérica.

REFERENCIAS

- A. de la Pena L., I. P. (s.f.). *Modelo geológico del campo geotérmico de Cerro Prieto*. Mexicali: Comisión Federal de Electricidad.
- Aguilar Dumas, Á. (enero de 2008). Análisis geológico - productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico de Cerro Pietro, BC. *Revista Geotermia*, 21, 91.
- Arango, C. (mayo de 2015). *Prospectos geotérmicos en la península de Baja California*. Elsevier.
- Calleros, R. (13 de febrero de 2016). Geotérmica de CFE contamina y enferma Valle de Mexicali. Recuperado de <https://contrasena.com.mx/2016/02/13/geotermica-cfe-contamina-enferma-valle-mexicali/>
- Cemiegeo, C. M. (2016). *Cemiegeo.org*. Recuperado el 5 de marzo de 2017, de <http://cemiegeo.org/index.php/geotermia?id=6>.
- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. (2016). *Cemiegeo.org*. <http://cemiegeo.org/index.php/geotermia?id=6>.
- Coes. (2002). Obtenido de <http://www.coes.org.pe/DataWeb2/2002/dtr/estadistica/anual/Sumario/ProduccionElectricidad/FactPlanta.htm>
- COES. (2002). Obtenido de <http://www.coes.org.pe/DataWeb2/2002/dtr/estadistica/anual/Sumario/ProduccionElectricidad/FactPlanta.htm>
- Comisión federal de electricidad. (2007). *sinat.semarnat.gob.mx*. Recuperado el 10 de marzo de 2017, de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>
- Comisión federal de electricidad. (2007). *sinat.semarnat.gob.mx*. Recuperado el 10 de marzo de 2017, de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2007/02BC2007E0001.pdf>
- Comisión federal de electricidad. (2011). *Proyecto Geotermico Cerro Prieto*.
- Comisión federal De electricidad. (2011). *Proyecto Geotermoeléctrico Cerro Prieto V*.
- Comisión federal de electricidad. (2011). *Proyecto Geotermoeléctrico Cerro Prieto V*. México.
- Redacción Energía. (2016). La energía geotérmica, ¿una nueva opción energética para América Latina? Recuperado de <https://www.dinero.com/economia/articulo/los-beneficios-y-dificultades-de-la-implementacion-de-la-energia-geotermica/231758>
- Dumas, A. A. (2008). Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico Cerro Prieto, BC. *Geotermia*.
- Flórez, M. (2010). *Revista Del Campo Geotermico del Cerro Prieto*. Obtenido de <https://universitam.com/academicos/noticias/informacion-sobre-el-volcan-de-cerro-prieto-no-hay-evidencias-de-posible-erupcion/>
- González, P. (1999). *Fechaamiento geológico y arqueológico por termoluminiscencia*. Recuperado de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/026/31026838.pdf?r=1&r=1

Sistemas EGS: una apuesta eficiente en la generación de energía eléctrica*

Ángela María Castañeda Cuartas**

Manuela Ortega Rivera***

RESUMEN

Debido a las condiciones económicas, políticas y a unas estructuras organizativas apropiadas, en Francia se ha favorecido el desarrollo de la energía geotérmica.

Los usos de esta energía en el país son principalmente para calefacción y la climatización.

En el norte de Alsacia, en la ciudad de Soultz-Sous-Forêts, se encuentra una central piloto para la producción de electricidad. El proyecto inició en 1987 usando el calor como energía alternativa. En el año 2005 ya se tenía la perforación de cuatro pozos profundos, los cuales entrarían en funcionamiento por medio de sistemas geotérmicos mejorados o EGS por sus siglas en inglés. Este tipo de sistemas constan de una fuente de calor (roca caliente), no permeable, a partir de la cual se crea un yacimiento artificial por estimulación hidráulica para extraer energía.

Palabras clave: energía geotérmica; energía alternativa; energía hidráulica.

* Artículo producto del proyecto de investigación Geotermia Unesco IGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa", en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbioclasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: mariangel.1859@gmail.com

*** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: ana_mua@hotmail.com

EGS system: an efficient option in the electric energy generation

ABSTRACT

Due to the economic, political and appropriate management structural conditions, France has benefited from the geothermal energy development.

In the north of Alsace, in the city of Soultz-Sous-Forêts, is located a pilot plant for the production of electricity. The project began in 1987, using heat as an alternative energy source. In the year 2005, there were already four deep wells drilled, which would begin their functioning through Enhanced Geothermal Systems (EGS). This type of systems have a not-permeable heat source (hot rock) through which an artificial deposit is created due to the hydraulic stimulation for energy extraction.

Keywords: geothermal energy; alternative energy; hydraulic energy.

INTRODUCCIÓN

En la corteza terrestre existen áreas que poseen gran actividad tectónica, sísmica y volcánica que proporcionan un elevado flujo calórico con respecto a otras zonas que no cuentan con estas características (Marzolf, 2014). Basándose en estos parámetros, se definen los distintos tipos de energía geotérmica existentes: 1) geotermia profunda: para profundidades mayores a los 400 metros. 2) Geotermia hidrotermal: emplea las capas terrestres que transportan agua caliente a grandes profundidades para la generación directa de energía. El agua debe tener temperatura superior a 100 °C. 3) Geotermia petrotermal: funciona a partir de rocas calientes a las cuales se les inyecta agua para extraer vapor a profundidades de aproximadamente 3 a 6 kilómetros y temperaturas alrededor de 150 °C. 4) Geotermia próxima a la superficie: se puede dar en perforaciones de hasta 400 metros y temperaturas de 25 °C pero su generación de electricidad en comparación con las demás no es tan elevada (Erdwerk, 2017).

La energía geotérmica es un conjunto de procesos industriales que aprovechan las condiciones térmicas de la tierra para producir energía eléctrica o calor de gran utilidad para el ser humano. Es un tipo de energía renovable, eficiente, de producción continua, sin importar la época, el tiempo o las condiciones climáticas y gestionable. Por medio de perforaciones similares a las que se utilizan para las extracciones de petróleo, se transporta el fluido caliente (agua o vapor) hasta la superficie y mediante una turbina se genera electricidad. Dependiendo de la temperatura y la profundidad será la cantidad de energía que se genere. En la actualidad el 68 % de la energía geotérmica alrededor del mundo se emplea para la calefacción en las viviendas, en usos agrícolas y acuícolas, en el termalismo que se encarga por medio de estaciones termales de brindar el servicio médico para tratamientos prescritos o simplemente servicio turístico (León, Quintana, y Quintana, 2017) y, por último, se ha implementado en procesos industriales.

Específicamente, el sistema geotérmico mejorado (Enhanced Geothermal System en inglés, EGS) genera electricidad geotérmica sin necesidad de recursos hidrotérmicos convectivos naturales los cuales, hasta hace poco, habían sido explotados en lugares donde el calor natural, el agua y la permeabilidad de la roca eran suficientes para permitir la extracción de energía. Como respuesta a esta problemática, surgen los sistemas EGS debido a que la mayor parte de la energía geotérmica se encuentra en roca seca e impermeable (Olásolo, 2013). Esta nueva tecnología mejora y crea recursos geotérmicos mediante estimulación hidráulica y química en roca con fracturas naturales. Cuando las grietas y los poros originarios no permiten caudales económicos, la permeabilidad puede mejorarse bombeando agua fría de alta presión dentro de la roca, desencadenando eventos de cizallamiento que mejoran la permeabilidad del sistema (Portier *et al.*, 2009) y pueden ocasionar microsismos, algunos de ellos eventualmente con mayor intensidad, generando inconvenientes en las poblaciones cercanas. Por medio de la investigación se ha llegado a preferir la estimulación química, la cual consiste en el uso

de productos químicos los cuales cumplen con la función de disolver los minerales que impiden tener caudales adecuados para la producción de energía eléctrica (Ledésert y Hébert, 2012).

Mediante la tecnología EGS es posible implementar CO₂ como fluido opcional para la producción de energía en lugar de agua, debido a sus propiedades termodinámicas (a mayor temperatura y presión, la densidad del CO₂ en estado líquido disminuye, aumentando la del estado gaseoso) todo lo anterior está soportado teóricamente y disponible en el texto Análisis termodinámico de la aplicación de dióxido de carbono utilizado en sistemas de combate de incendios en generadores para centrales hidroeléctricas (Aguilar Roda, 2010).

Francia ha tenido alta influencia en la geotermia como ciencia: las primeras mediciones realizadas con termómetros se llevaron a cabo en una mina cercana a Belfort (Francia) en el año 1740, posteriormente se desarrollaron diferentes métodos científicos para comprensión del balance térmico que posee la tierra, dando origen a la geotermia (Dickson y Fanelli, 2004). Este país no ha generado estrategias propicias para la explotación de recursos de alta entalpía, pero cuenta con lugares adecuados para su explotación y las plantas allí ubicadas son referentes en cuanto a investigación, explotación, producción y distribución de energía eléctrica. Una de estas plantas se encuentra en isla Guadalupe y por supuesto Soultz-Sous-Forêts en (Alsacia), que es pionera en la creación de estrategias para la producción de energía con sistemas EGS (Blessent, Raymond, y Dezayes, 2016).

Como señala Bertani (2007) en la actualidad los programas de geotermia han producido energía por varias décadas en los Estados Unidos de América, Islandia e Italia. Por ejemplo, en las estadísticas presentadas en el congreso del 2010 World Geotherm en Alabama "la capacidad instalada de generación de energía geotérmica alcanza los 10.715 MW en el mundo. Su tasa de crecimiento promedio anual es de alrededor de 4 % en Estados Unidos, Indonesia e Islandia aumentó 530 MW, 400 MW y 373 MW".

Estado del arte

El calor de la tierra se ha utilizado desde hace siglos, pero el uso de la energía geotérmica para producir electricidad comienza en el siglo XIX en Italia, en la zona de Toscana, con la instalación de una industria química para la extracción de ácido bórico de aguas a alta temperatura (Calle, 2011).

La producción de energía eléctrica por medio de plantas geotérmicas ha avanzado a nivel mundial en distintos países entre los cuales se encuentran: Austria, Alemania, Italia, Portugal y Guatemala. A continuación, se mencionarán algunas de las plantas presentes y la potencia para cada cual en los lugares ya mencionados (Bertani *et al.*, 2010).

Austria cuenta con dos plantas binarias, una de ellas denominada Altheim y la otra se le llama Bad Blumau. En Altheim para la explotación de energía se utiliza un fluido que se encuentra a una temperatura de 106 °C para una potencia neta de 500 KW; para el caso de Bad Blumau, el fluido se encuentra a una temperatura de 110 °C que se explota para calentar un spa y para la generación de 180 KW a través de una planta binaria.

La primera planta de producción de energía geotérmica ubicada en Alemania precisamente en Neustadt-Glewe, cuenta con unas instalaciones de capacidad máxima de 230 KW y funciona a través de un ciclo binario, en el cual se utiliza fluido geotérmico a 98 °C que anualmente produce 1,5 GWh de los cuales 10.7 MWt son utilizados para la calefacción en zonas urbanas y distritos.

En Italia se cuenta con dos grandes áreas de explotación geotérmica: la primera de ellas es Larderello Travale-Radicondoli, con una capacidad instalada de producción de 562 MW para una extensión de terreno con 250 km² y 160 MW de potencia; Monte Amiata es el segundo sitio de explotación, el cual lleva un proceso más lento debido a problemas de aceptación de las poblaciones. Este sitio cuenta con centrales en los pueblos de Piancastagnaio y Bagnore que para el año 2007 contaban con una capacidad instalada de 88 MW.

En el caso de Portugal, los recursos geotérmicos han crecido en la isla de São Miguel, la más poblada de los archipiélagos de Azarote, con una capacidad instalada de aproximadamente 23 MW, lo que genera un aporte de la isla de un 43 % de energía renovable. Por último, en Guatemala la explotación del recurso geotérmico se encuentra presente en Zunil ubicado al Oeste, campo con temperaturas de 300 °C que posee una capacidad de 50 MW. Por otra parte, Guatemala cuenta con Amatitlan que se encuentra a 25 km al sur, un poco menos desarrollado y con temperaturas cercanas a 240 °C para el cual se pronostica que llegue a 50 MW, sin embargo por ahora su capacidad es de 28 MW. Los sistemas EGS se están desarrollando y probando actualmente en Francia, Australia, Japón, Alemania, Estados Unidos y Suiza . El proyecto EGS más grande del mundo es una planta de 25 megavatios que se está desarrollando actualmente en Cooper Basin, Australia. En este país, el gobierno ha proporcionado fondos de investigación para el desarrollo de tecnologías geotérmicas.

En Suiza, la sismicidad inducida en una central en Basilea, llevó a la cancelación del proyecto instaurado allí. Después de un estudio del gobierno, se determinó que los terremotos generados por el proyecto eran propensos a hacer millones de dólares en daños cada año, ya que a finales de 2006, después de que se generaran terremotos que aun cuando no causaron daños físicos, causaron daños a viviendas y otras estructuras por alrededor de nueve millones de dólares (Glanz, 2009).

En oposición al caso de Suiza, en Soultz-sous-Forêts la estimulación hidráulica generó pequeños movimientos sísmicos de baja intensidad, con excepción de algunos que

alcanzaron un valor de 2 en la escala de Richter. Para los científicos estos microsismos no eran suficientemente fuertes indicando que los procesos de estimulación hidráulica realizados eran eficientes, aun así surgieron inconvenientes con las viviendas ubicadas a los alrededores de la planta, que necesariamente se debieron tomar en cuenta, además no se estaban obteniendo los resultados esperados, en cuanto a la conectividad hidráulica entre los pozos, que quedaba insuficiente debido a la poca remoción de depósitos naturales (calcita, sílice, arcilla, ferrosos). Posteriormente, se tomó la decisión de utilizar como recurso la estimulación química, para la cual se diluyeron ácidos suaves en agua removiendo los residuos faltantes. En el año 2006 con ensayos de bombeo en los pozos, se demostró que ambos procesos funcionaron exitosamente, ocasionando un progreso en el rendimiento hidráulico del sistema (Amirfeiz y Es, 2014).

En Portugal, el gobierno de este país concedió en diciembre de 2008 una licencia exclusiva a Geovita Ltd. para prospectar y explorar la energía geotérmica en una de las mejores zonas de Portugal continental. Un área de unos 500 km² está siendo estudiada por Geovita junto con el departamento de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Coimbra (Santoyo, 2012).

La central piloto de Soultz-sous-Forêts (Francia), que produce 1,5 MW, ha sido conectada recientemente. El proyecto constó de cuatro etapas, en la siguiente tabla se muestra los procesos mencionados anteriormente.

Tabla 1. Etapas principales del proyecto

Fase de exploración 1987-1991	Perforación del pozo GPK1 a 2.000 m
Creación de un doble GPK1/GPK2 1991-1998	Profundización de GPK1 a 3.600 m Perforación del pozo GPK2 a 3.880 m Prueba de circulación entre los dos pozos
Creación de un triple GPK2/GPK3/GPK4 1999-2007	Profundización de GPK2 a 5.080 m Perforación de GPK3 a 5.100 m Perforación de GPK4 a 5.270 m Pruebas de circulación entre todos los pozos
Construcción y prueba de la primer unidad generadora de 1,5 MW de energía 2007-2008	Instalación de los equipos de la superficie (turbina e intercambiador) Instalación de las bombas en cada pozo Inauguración de la central el 13 de junio de 2008

Fuente: elaboración propia.

La geotermia ha sido acogida por diferentes campos para la generación de energía renovable, como en el caso de Disney Inspired Resort, situado cerca de Disneyland

París, que es el destino de ecoturismo líder de Europa y que integra la aplicación de los estándares de desarrollo sostenible más avanzados en su concepto y funcionamiento, principalmente debido al uso de una fuente local de energía renovable: el pozo (1600 m) de energía geotérmica del acuífero Dogger de la región Ile-de-France, el cual cubrirá el 100 % de los requisitos de calefacción del sitio (Global Geothermal News, 2017).

Caracterización geológica

Soultz-sous-Forêts es un sitio que, para el año 1997, el contexto geotérmico le exigía demostrar que era posible o viable la implementación de un sistema EGS en el cual se pudiera circular un fluido térmico por medio de las fracturas en el basamento granítico (Fritz *et al.*, 2010). Esta región cuenta con condiciones privilegiadas, como un gradiente térmico significativamente superior, aproximadamente tres veces mayor del valor normal de gradiente geotérmico, que corresponde a un aumento en la temperatura de 25-30 °C/km. En la zona se encuentra un macizo granítico (Marzolf, 2014), compuesto por fenocristales de feldespatos alcalinos sobre una matriz de cuarzo, biotita, plagioclasa y anfíbol menor (Sausse, Dezayes, y Genter, 2007).

El valle de Rin regionalmente posee una anomalía térmica, localmente cuenta con varias anomalías que se extienden por el borde occidental, siendo el resultado de las corrientes de flujos de calor ascendentes. La temperatura de la zona supera los 50 °C a 400 m. de profundidad y el gradiente de la temperatura en la superficie excede los 10,5 °C en 100 m, como se indica en Blessent *et al.* (2016). La forma de la anomalía se define por las fallas normales identificadas en la región.

Soultz-sous-Forêts se sitúa 50 km norte de Estrasburgo, en una zona con anomalía térmica alta observada en el recuadro ubicado a la derecha en parte baja del mapa siendo las de color gris (figura 1). Seis perforaciones son presentes: 4.550 (exploración de petróleo), GPK1 (primero HDR perforación), EPS1 (HDR perforación), GP2-GPK3-GPK4 (5.000 m. de profundidad de los 3 pozos del sistema EGS). La sección transversal en la parte inferior derecha de la figura 1, muestra la geometría (Graben-Horst) que cruza el río Rin de E-W, los puntos representan el granito mientras que el inclinado gris y blanco son las capas sedimentarias (Blessent *et al.*, 2016).

El basamento sobre el cual se encuentra ubicada la planta Soultz-sous-Forêts, es un granito porfídico típico que contiene cuarzo, K-feldespatos, plagioclasa, biotita, anfíbol y algunos otros minerales como magnetita, titanita, apatita, allanita y circonitas. Entre todos, la biotita es el componente máfico con mayor presencia por lo tanto termina por ser el de mayor dominancia. El anfíbol es un componente que la mayoría de las veces se presenta en bajas proporciones o por el contrario puede ser bastante abundante. También se puede contar con la presencia de carbonatos. Todas las características mencionadas anteriormente dieron origen al granito denominado monzogranito con una edad situada en 334 Ma (Dezayes, Genter y Hooijkaas, 2005).

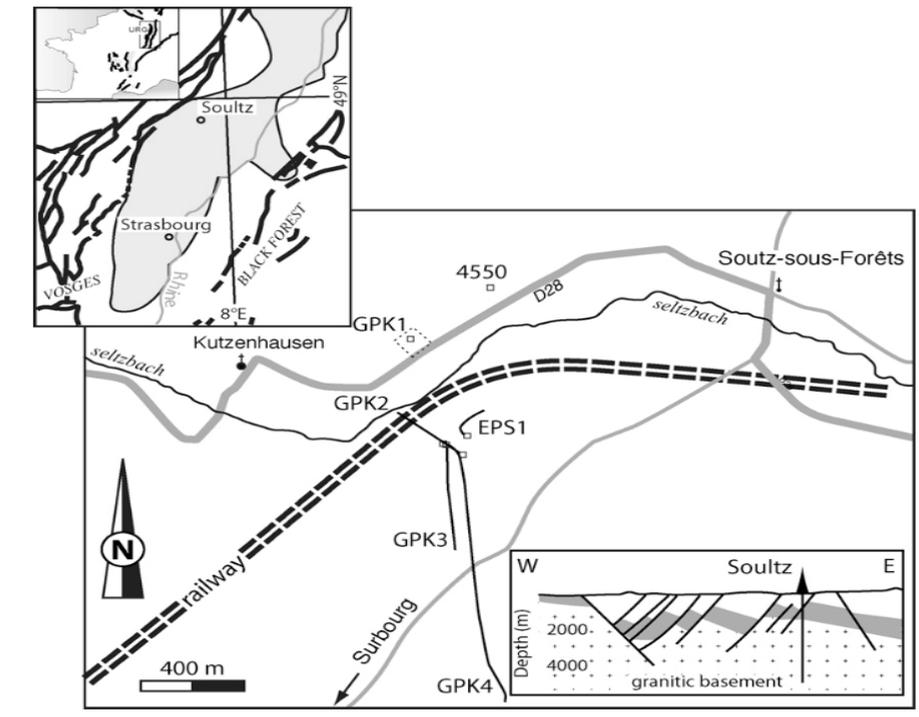


Figura 1. Mapa de ubicación del graben superior del Rin
Fuente: URG

Tipo de recurso

En el caso de estudio del presente artículo, se hace referencia al calor desprendido desde el interior de la tierra como el recurso que puede ser aprovechado por el hombre, debido a las condiciones geológicas, físicas y químicas específicas que presentan diferentes lugares alrededor del planeta, entre los cuales podemos nombrar el cinturón de fuego del Pacífico que cuenta con una alta actividad sísmica y volcánica. Todos aquellos territorios que tengan su ubicación en este cinturón o en lugares con condiciones parecidas son los más adecuados para el aprovechamiento de este recurso (Marzolf, 2014).

La teoría tectónica de placas explica por qué algunos lugares del planeta cuentan con condiciones privilegiadas para la explotación de la energía geotérmica. Las placas son móviles y por lo general una placa oceánica se desliza bajo la placa continental (subduce); estos movimientos provocan fracturas en las rocas permitiendo el paso de vapores de magma y es de tal manera como se acerca el calor a la superficie, contando con agua percolada desde los suelos, la cual ha sido almacenada por roca impermeable. Esto da origen al aprovechamiento de los reservorios naturales (Tonda, 2011) y, posteriormente, la creación de artificiales por medio de sistemas EGS.

La energía que se genera en la geotermia es renovable, limpia y fácil de explotar. El hombre ha encontrado diversas formas de darle utilidad dependiendo de la entalpía del reservorio: si es alta, se puede utilizar para la producción de energía y si por el contrario es muy baja, se puede usar en bombas de calor, calefacción y otros. En la siguiente tabla se muestra la clasificación por entalpía (Marzolf, 2014).

Tabla 2. Clasificación del recurso según su entalpía

<i>Clase del sistema</i>	<i>Muffler y Cataldi (1978)</i>	<i>Hochstein (1990)</i>	<i>Benderitter y Cormy (1990)</i>	<i>Haene Rybach y Stegena (1998)</i>
Baja entalpía (Agua termal)	< 90 °C	125 °C	< 100°C	< 150°C
Media entalpía (Vapor y aguas)	90° a 150 °C	125° a 225 °C	100° a 200 °C	NA
Entalpía alta (Vapor seco)	>150 °C	>225 °C	>200 °C	>150 °C

Fuente: Marzolf, 2014.

En Soultz-sous-Forêts, al encontrarse situada sobre un sistema de fallas normales, como fue mencionado anteriormente en la caracterización geológica, y por tener altas temperaturas a profundidades aproximadas de 5 km con diferentes gradientes, se puede inyectar agua fría y esta, en contacto con la roca, se calienta y se convierte en fluido explotable que, siendo transportado y dirigido por un ciclo de Rankin, termina por convertirse en energía eléctrica.

Perspectiva de la explotación geotérmica

La planta geotérmica Soultz-sous-Forêts, tuvo su creación después de los buenos resultados obtenidos en la primera propuesta de generación eléctrica desde la geotermia, que fue planteada por Los Alamos Scientific Laboratory (LASL), como dice Olásolo (2013) "El proyecto se lleva a cabo unos 40 kilómetros al oeste de Los Alamos, en el lado oeste del Río Grande (Nuevo México)". El proyecto germano-francés, comenzó con el objetivo o finalidad de generar energía eléctrica, partiendo de una fuente energética alterna a las ya existentes basadas en petróleo, flujos de aire o radiación solar. También se proyectó desde el aspecto de la investigación, para ser un modelo y banco de información acerca de las técnicas de perforación, métodos de exploración superficial, monitoreo geoquímico y geofísico, pruebas con trazadores, estimulaciones hidráulicas y químicas, así mismo, conocimientos generales de la tecnología EGS.

Se sabe que una planta geotérmica causa impactos ambientales con las emisiones de óxido de nitrógeno, dióxido de sulfuro, sílice, carbono y partículas en suspensión. En los reservorios de aguas geotermales pueden existir metales pesados como mercurio, boro y arsénico. Puede verse afectada la estabilidad del terreno donde se construyen las plantas produciendo sismos debido a la fracturación hidráulica y también puede darse la contaminación de aguas freáticas por las excavaciones. Todo lo anterior está previsto por la planta que cuenta con medidas ambientales para prevenirlo (Genter *et al.*, 2010).

Sin embargo, aparte de las emisiones inevitables de la central, también se han llevado a cabo estudios que responden positivamente a otras cuestiones medioambientales, como lo son la contaminación acústica, el uso del agua y la calidad de la mismas, el uso del suelo y el impacto de la construcción de la central geotérmica en la flora y fauna del ecosistema (Llobet i Webb, 2015). Con respecto al uso del agua, las centrales geotérmicas usan 20 litros de agua por cada MWh generado comparando con otros tipos de producción energética entre los cuales están las centrales nucleares con 3.000 litros por MWh, continúan las de carbón vegetal con aproximadamente 2.500 litros MWh, por último las centrales de gas natural con unos 1.400 litros MWh (Genter *et al.*, 2010). En cuanto al sistema en general, está construido para permitir la producción de uno o de ambos pozos con los que se cuenta. El caudal de producción previsto de ambos es de aproximadamente 35 l/s, para una temperatura de producción de 175 °C (Genter *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

El calor desprendido de la tierra ha sido estudiado a lo largo de los años, convirtiéndose en una fuente alterna de energía, renovable, limpia y fácil de explotar que por características tales como no depender de la climatología del lugar, tampoco de la existencia de un reservorio de agua debido a las nuevas tecnologías EGS (Enhanced Geothermal System), ha ampliado en gran manera su explotación convirtiéndose en un recurso que empieza a formar parte de la cotidianidad humana. Principalmente funciona en calefacción pero ha extendido sus usos a otras áreas como agricultura, acuicultura, medicina y producción eléctrica.

La teoría de placas nos indica por qué la energía geotérmica en algunos lugares del planeta es explotable. Esto se debe al movimiento de las placas oceánicas que se subducen bajo las continentales, movimientos que generan fracturas en las rocas y de esta manera se dan las condiciones adecuadas para la producción de energía geotérmica. El proyecto germano-francés Soultz-sous-Forêts, es una apuesta a la investigación iniciada en 1987 de nuevas técnicas para la explotación de energía geotérmica, siendo un lugar que cuenta con las condiciones adecuadas para su explotación: altos gradientes de temperatura y roca impermeable fracturada de manera natural.

La composición del basamento granítico sobre el cual se encuentra ubicada la planta francesa Soultz-sous-Forêts, está integrada por minerales como cuarzo, K-feldespato, plagioclasa, biotita, anfíbol y algunos otros minerales como magnetita, titanita, apatita, allanita y circonitas todo lo anterior dio origen al monzogranito de edad paleozoica.

La historia de Francia ha mostrado que es un país con alta influencia de la ciencia geotérmica el cual cuentan con plantas referentes del tema como la ubicada en isla Guadalupe y Soultz-sous-Forêts, igualmente continúa con falencias en el planteamiento de estrategias adecuadas para la explotación de recursos de alta entalpía.

Los sistemas EGS han comenzado a ser estudiados en países como Francia, Australia, Japón, Alemania, Estados Unidos y Suiza, contando con diferentes investigaciones técnicas y experiencias que permiten un mayor acercamiento y mejores conocimientos en el tema. Algunas pruebas realizadas en los sitios ha permitido concluir que la estimulación hidráulica o química encargada de mejorar la permeabilidad de la roca, impide la realización de proyecto debido a la presentación de sismos que generan daños estructurales y, por ende, económicos.

Los sistemas EGS han permitido la explotación de recursos en sitios con condiciones adecuadas sin la presencia de reservorios de agua, con rocas fracturadas a altas profundidades y anomalías térmicas regionales que permiten la generación de energía eléctrica por medio de la inyección de agua fría que al contacto con la roca caliente, asciende en forma de vapor el cual al mover la turbina origina electricidad. Cuando los caudales no son los convenientes, se puede recurrir a la estimulación hidráulica que consiste en reinyectar agua con presiones lo suficientemente grandes para lograr abrir la grietas y mejorar la permeabilidad del sistema o en caso de ocasionar sismos con alta probabilidad de tener inconvenientes para la población, se cuenta con la estimulación química la que se lleva a cabo mediante el uso de ácidos suaves encargados de remover los minerales que obstruyen el flujo del fluido térmico.

Como todos los recursos explotados, el calor desprendido de la tierra, al generar energía eléctrica, produce algunas emisiones de óxido de nitrógeno, dióxido de sulfuro, sílice, carbono y partículas en suspensión. Algunas de las implicaciones de la exploración, construcción y puesta en funcionamiento de una planta geotérmica pueden ser la contaminación de aguas freáticas por excavaciones, pérdida de estabilidad en el terreno debido a la estimulación hidráulica y química. La primera de ellas produce, además, inconvenientes por sismicidad por lo que la población aledaña en ocasiones se opone a la operación de las plantas.

Además de todas la emisiones que es inevitable se produzcan, es posible comparar este tipo de producción de energía con algunas otras por medio de estudios medioambientales que nos ofrecen un punto de vista de cuan viables son estos sistemas que no

dependen de la estación del año o de un recurso difícil de renovar como el petróleo. Por ejemplo, la producción de cada MWh para una central geotérmica requiere de 20 litros de agua, mientras que los tipos de producción diferentes a este generan un gasto del recurso mayor entre los cuales contamos con centrales nucleares que consumen 3.000 litros por MWh, centrales de carbón con 2.500 litros MWh y, por último, centrales de gas con un gasto aproximado de 1.400 litros MWh.

REFERENCIAS

- Amirfeiz, M., y Es, S. (2014). Geociencias Tierra. *Research Eu Revista del espacio europeo de la investigación*, (29), 48.
- Aguilar Roda, G.F. (2010). *Análisis termodinámico de la aplicación de dióxido de carbono utilizado en sistemas de combate de incendios en generadores para centrales hidroeléctricas*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Bertani, R. (2007). *World Geothermal Generation in 2007*. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany, 30 May -1 June.
- Blessent, D., Raymond, J., y Dezayes, C. (2016). Les ressources géothermiques profondes au Québec et en Colombie : un secteur dont le développement pourrait s'inspirer des centrales géothermiques en France. *Revista TSM*, 9, 1-13.
- Calle, J. L. (2011). La capacidad de energía geotérmica mundial llega a 10.715 MW. Recuperado de <https://www.ewind.com/2011/08/02/la-capacidad-de-energia-geotermica-mundial-llega-a-10-715-mw/#:~:text=La%20capacidad%20de%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20mundial%20llega%20a%2010.715%20MW,-2%20agosto%2C%202011&text=La%20capacidad%20instalada%20en%20el,los%2010.715%20MW%20en%202010.&text=En%20la%20actualidad%2C%20m%C3%A1s%20de,mundo%20se%20emplea%20para%20calefacci%C3%B3n>
- Dezayes, C., Genter, A., y Hooijkaas, G. R. (2005). *Deep-Seated Geology and Fracture System of the EGS Soultz Reservoir (France) based on Recent 5 km Depth Boreholes*. Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April.
- Dickson, M. H., y Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la energía geotérmica? Recuperado de http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/que_es_la_energia_geotermica.html
- Erdwerk. (2017). Erdwerk - Servicios de geotermia profunda. Recuperado de <http://www.erdwerk.com/servicios-2/geotermia-profunda/>
- Fritz, B., Jacquot, E., Jacquemont, B., Baldeyrou-Bailly, A., Rosener, M. y Vidal, O. (2010). Geochemical modelling of fluid-rock interactions in the context of the Soultz-sous-Forets geothermal system. *Comptes Rendus Geoscience*, 342, (7-8), 653-667.
- Genter, A., Evans, K., Cuenot, N., Fritsch, D., y Sanjuan, B. (2010). Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoir of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS). *Comptes Rendus Geoscience*, 342(7-8), 502-516. <https://doi.org/10.1016/j.CRTE.2010.01.006>
- Glanz, J. (2009). Quake Threat Leads Swiss to Close Geothermal Project. *The New York Times*, 10-12.
- Global Geothermal News. (2017). Disney Inspired Resort Uses Geothermal Energy for 100 % of Heating Needs. Recuperado de <https://geothermalresourcescouncil.blogspot.com/2017/09/opening-of-villages-nature-paris.html#:~:text=September%208%2C%202017-,France%3A%20Disney%20Inspired%20Resort%20Uses%20Geothermal,for%20100%25%20of%20Heating%20>

Needs&text=Designed%20by%20the%20Euro%20Disney,is%20Europe's%20leading%20ecotourism%20destination.

- Ledésert, B. a., y Hébert, R. L. (2012). *The Soultz-sous-Forêts' Enhanced Geothermal System : A Granitic Basement Used as a Heat Exchanger to Produce Electricity, Heat Exchangers - Basics Design Applications*, Dr. Jovan Mitrovic (Ed.). InTech. Recuperado de <http://www.intechopen.com/books/heat-exchangers-basics-design-applications>
- Llobet i Webb A. (2015). Estudi comparatiu del sistemes hidrotermals de Soultz-sous-Forêts (França) i l'àrea de Vallès Oriental. Escola de camins. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/79173/Estudi%20comparatiu%20del%20sistemes%20hidrotermals%20de%20Soultz-sous-For%3%AAts%20%28Fran%3%A7a%29%20i%20l%27%3%A0rea%20de%20Vall%3%A8s%20Oriental.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- León, M. B. Q., Quintana, B. M., y Quintana, A. J. M. (2017). El turismo mayor de edad en Michoacán. *Red Internacional de Investigadores En Competitividad*, 4(1), 2100–2119. Retrieved from file:///C:/Users/User/Downloads/764-3896-1-PB.pdf
- Marzolf, N. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. *Banco Interamericano de Desarrollo, Convenio Isagen – BID/JC*. 86 páginas.
- Olásolo, A.P. (2013). *Análisis general sobre sistemas geotérmicos medidos (EGS) para la generación de energía eléctrica*. Universidad de la Rioja. Recuperado de https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE000546.pdf
- Portier, S., Vuataz, F. O.-D., Nami, P., Sanjuan, B., y Gérard, A. (2009). Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France. *Geothermics*, 38, 349-359.
- Sausse, J., Dezayes, C., y Genter, A. (2007). From geological interpretation and 3D modelling to the characterization of the deep seated EGS reservoir of Soultz (France). *European Geothermal Congress*, (June), 1–7.
- Santoyo, E. (2012). Los sistemas de roca seca caliente: una fuente de energía renovable oportuna a considerar en el programa de explotación de la geotermia.(pág. 11). XXII Congreso Nacional de Geoquímica. México DF: Universidad Veracruzana. Campus Coatzacoalcos.
- Tonda, J. (2011). *El oro solar y otras fuentes de energía*. Ciudad de México: FCE.

Avances en el estudio de los recursos geotérmicos en Chile: un ejemplo para Sudamérica*

Daniel Stiven Balzán Alzate**

RESUMEN

La dependencia de Chile en la importación de energía, genera vacíos en su economía atribuida a los altos costos de su importación. Por tal motivo, a lo largo del tiempo se han desarrollado estudios relacionados a fuentes de energía alternativas, buscando así lograr la independencia energética y disminuir los vacíos económicos generados. En el presente artículo se presenta una panorámica del país en términos de la viabilidad en la explotación de los recursos geotérmicos y cómo este sirve de ejemplo para diferentes países de Sudamérica. Para lograr el objetivo, se realizó una revisión de diferentes fuentes bibliográficas que permitieron corroborar la riqueza del país relacionada con los recursos geotérmicos, concluyendo que gracias a la ubicación geográfica de Chile, este cuenta con un alto potencial geotérmico reflejado en los estudios realizados y en la materialización de la primera planta geotérmica del país y Sudamérica.

Palabras clave: geotermia; Chile; fuentes de energía alternativa; potencial geotérmico.

* Artículo producto del proyecto de investigación Geotermia Unesco IGCP636 "Unificación de capacidades internacionales en investigación para permitir y fortalecer el desarrollo de recursos geotérmicos en las Américas y en Europa", en 2017, asociado a los grupos de investigación Grinbioclasificación tipo B y Grinen clasificación tipo C ante Colciencias.

** Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: daniel_balzan@hotmail.com

Advancements in the study of geothermal resources in Chile: an example for South-America

ABSTRACT

Chile's dependence on the import of energy generates voids in its economy that are attributed to the high costs of its import. For that reason, throughout time there have been studies related to alternative energy sources, searching, thus, energetic independence and a decreasing in the economic voids generated by this. This article presents a panoramic of the country in terms of viability in the exploitation of the geothermal resources and how this country is an example for different South-American countries. For achieving this, this study reviewed different bibliographical sources that allowed the corroboration of the countries geothermal richness of resources, concluding that thanks to the Chilean geographical location it counts with high geothermal potential reflected in the studies performed and in the first geothermal plant of the country and all of South-America.

Keywords: geothermic; Chile; alternative energy sources; geothermal potential.

INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo económico de Chile sugiere incrementos en la oferta y demanda de energía en los sectores comerciales, domésticos e industriales. En Chile entre los años 1995 y 2005 el consumo de energía primaria mostró un incremento del 4,5 % anual y de manera paralela el incremento del producto interno bruto del país (PIB) crecía en un 3,6 % anual, esto validando la relación existente entre el desarrollo económico con la oferta y demanda de energía el país (Conicyt, 2007).

Según la estructura económica de Chile, para el año 2006 la distribución eléctrica por sector de la economía se da de manera que el 33 % del consumo de energía eléctrica lo concentra el sector minero, mientras que otras industrias tienen un consumo del 28 %, el sector residencial del 16 % y el comercio con un 11 % (Conicyt, 2007).

Sumado al incremento de la oferta y demanda del recurso energético, se encuentra que Chile tiene problemas debido a que cuenta con limitados recursos energéticos propios, asumiendo una dependencia externa en la importación de energía (IEA, 2009), dependencia que se espera por muchos años más salvo se encuentren nuevas formas para suministro constante y óptimo del recurso.

Chile en su historia ha enfatizado el suministro de su energía mediante las hidroeléctricas, lo que conlleva a depender de la continua variación climática. Cabe la pena resaltar que el uso del petróleo para el suministro industrial y residencial, empezó a disminuir a mediados de los 90, fecha en la cual Chile comenzó a diversificar su matriz energética con la importación de gas natural para la producción de energía (Conicyt, 2007).

Acá es donde entra con fuerza la utilización de energías alternativas al petróleo y la necesidad de encontrar energías que se puedan desarrollar dentro del país, lo cual le permitiría ser autónomo en temas energéticos. Por esto nace la idea de implementar energías renovables como la solar, eólica y geotérmica. Es en este punto donde se considera la viabilidad de la implementación de estas energías renovables, evaluando sus ventajas, desventajas y viabilidad de participar en el medio energético. Encontramos en la energía solar y eólica fuentes de suministro que de primera mano presentan como ventaja ser alternativas renovables, aun así suma más el hecho de que son fuentes irregulares de suministro de energía, lo cual no les permitiría ser recurso de energía base para ser consolidadas en el país. Además en términos de ocupación de suelos estas fuentes juegan roles importantes ya que su ocupación es alta y esta puede sobreponerse a usos de suelos diferentes lo que implicaría abordar otras problemáticas. Entonces la energía geotérmica comienza a tomar fuerza ya que, gracias a la ubicación geográfica de Chile sobre el arco volcánico andino, albergaría un alto potencial de recursos geotérmicos que podrían ser explotados para suministrar de manera constante la producción de energía eléctrica del país. Los recursos geotérmicos podrían ofrecer

una fuente de energía limpia, considerando que el país necesita importar casi el 85 % de combustibles fósiles para la producción de electricidad y más que el 75 % de la electricidad que requiere (Lahsen *et al.*, 2015).

En la actualidad, en términos de producción de energía geotérmica, Chile goza de tener la primera planta geotérmica de sudamérica, Cerro Pabellón, la cual produce 48 MW, ubicada en la región Antofagasta (Elmostrador, 2017). Esto da paso al presente artículo, el cual consta de una revisión bibliográfica de algunos estudios realizados sobre temáticas relacionadas a la energía geotérmica, lo cual permite identificar el estado actual del país en relación a este tipo de energía alternativa y renovable.

1. PRIMERA PLANTA GEOTÉRMICA EN SUDAMÉRICA

Como se mencionó anteriormente, Chile cuenta con el privilegio de poseer la primera planta geotérmica de la región Sudamericana, Cerro Pabellón, que es también la primera planta geotérmica de alta entalpía a gran escala en el mundo que se encuentra construida a una altitud de 4.500M.S.N.M. y está ubicada en la región de Antofagasta en Ollague (Elmostrador, 2017). Desde hace 110 años atrás, el país comenzó a dar los primeros intentos para desarrollar una planta de generación geotérmica, en la región del Tatio, en 1908 (Sánchez-Alfaro *et al.*, 2015).

La planta fue construida por Enel Green Power Chile Ltda. (EGPC), subsidiaria chilena de energías renovables del Grupo Enel, junto a la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP). La planta está constituida de dos unidades, con capacidad instalada de 24 MW cada una y es propiedad de la empresa Geotérmica del Norte S.A. (GDN), una sociedad controlada por EGPC (81,7 %) y ENAP (18,3 %). La planta fue construida por Ormat Technologies (Jorquera, 2017).

Para que se dé el desarrollo de la energía geotérmica, es de carácter primordial realizar una caracterización de los reservorios geotérmicos, caracterización que consiste en ubicación, posible profundidad y temperatura a la que se encuentra el reservorio. Para la planta Cerro Pabellón, el reservorio está ubicado a 3 km de profundidad a temperatura de 200 °C.

La estructura de la planta consta de una tubería que se ubica a la profundidad del reservorio, tubería por la cual el fluido asciende de manera natural debido a la alta presión a la que se encuentra sometida. Este fluido llega a superficie como mezcla de líquido y vapor, donde el vapor pasa por turbinas que transforman la energía cinética en energía eléctrica; mientras que el líquido que se encuentra a alta temperatura, circula por otros sistemas de tuberías con el objetivo de ponerlo en contacto con isopentano, fluido que alcanza con mayor velocidad el punto de ebullición en comparación con el agua. Esto se realiza para evaporar isopentano que de igual forma es puesto a circular por turbinas que generan energía eléctrica.

Por último, lo que realiza la planta es condensar el vapor tanto de agua como de isopentano, el condensado del agua es reinyectado al reservorio y el isopentano es puesto a circular nuevamente con el líquido caliente (Morales, 2017).

En la figura 1, se muestra la estructura básica para el funcionamiento de una planta geotérmica, estructura similar a la planta geotérmica Cerro Pabellón.

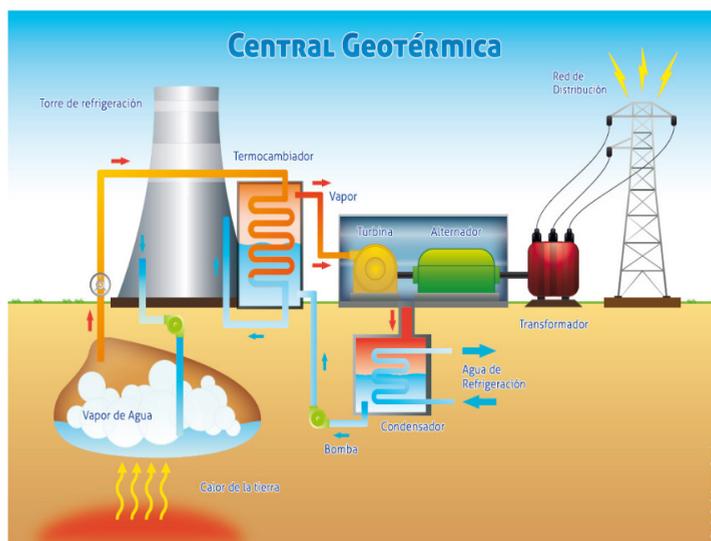


Figura 1. Diagrama básico de la estructura de una planta geotérmica.
Fuente: Portillo(2017).

2. PRECIPITACION Y GÉNESIS DE LOS FLUIDOS GEOTÉRMICOS

Entre las temáticas relacionadas con la caracterización de los recursos geotérmicos, se encuentra el estudio de la precipitación y génesis de los fluidos geotérmicos. La caracterización de esos fluidos es importante para conocer en qué tipo de reservorio se originan, a cuál profundidad circulan y su potencial para generar electricidad, entre otras. En Chile se han desarrollado y publicado varios trabajos que serán resumidos y analizados en esta sección.

2.1 Precipitación de sílice en el región del Tatio-Chile

En la actualidad los proyectos de exploración se encuentran enfocados en las áreas de mayor potencial geotérmico de la región, una de estas áreas de importancia geotérmica es la región del Tatio, que es el tercer campo de géiseres más grande del mundo, sin embargo, a pesar de esto, muchas de sus manifestaciones hidrotermales han sido poco estudiadas (Slagter *et al.*, 2017). El Tatio se encuentra ubicado a 4.200 MSNM. al norte en el altiplano chileno como se muestra en la figura 2.

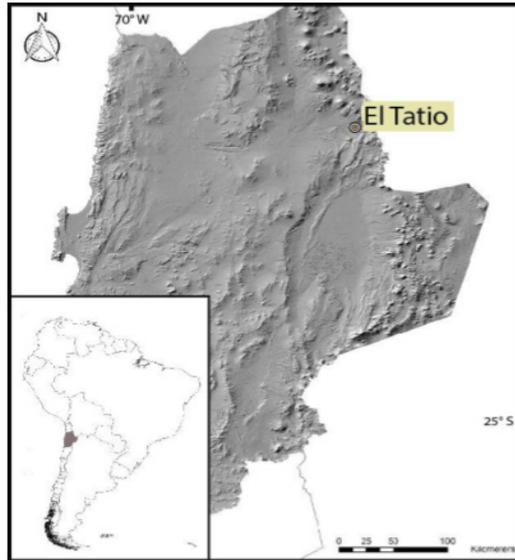


Figura 2. Ubicación de la región El Tatio
Fuente: Slagter *et al.* (2017).

Para este caso, se realiza un resumen del trabajo hecho por Slagter *et al.* (2017), donde enfocan sus estudios en los depósitos de sílice del Tatio, ya que estos depósitos son expresiones superficiales de sistemas geotérmicos ocultos, debido a que la precipitación de sílice se da a partir de fluidos geotérmicos que enfrían, evaporan o secan.

El estudio realizado se enfocó en un cono representativo del *paleo sinter* de 1,5 m de altura en la porción noreste del campo de géiseres. Este estudio presentó como metodología el mapeo de características geotérmicas superficiales junto con caracterizaciones texturales y mineralógicas de sílice, todo con el fin de determinar la cronología de la precipitación de sílice en esta región. La caracterización de sílice se realizó a partir del análisis al microscopio.

En temas texturales observaron gran variación de texturas sedimentares, entre las cuales se encuentran capas de texturas espiculares que son de gran importancia en la validación de reservorios geotérmicos ocultos, puesto que son texturas que se describen como facies proximales, típicas de resurgimientos a altas temperaturas (>60 °C). También las observaciones revelaron que la fase principal de sílice que forma los depósitos de *sinter* es de opal-A, indicando que los *sinters* que se encuentran en una etapa temprana de maduración diagenética. La sílice se encuentra presente en forma de esferas con diámetros menores a 10 μm y en algunos casos como agregados o costras botrioidales. Todo lo anterior permitió concluir que, durante la formación del cono de *sinter* estudiado, la variación de condiciones físicas y ambientales dan como resultado diferentes texturas,

variaciones que se ven atribuidas a la velocidad del flujo de los fluidos térmicos y a su temperatura, entre otros.

2.2 Génesis de travertinos en las aguas termales de Baños Morales y Baños Colina

El cajón del Maipo, en las localidades Baños Morales y Baños Colina, presenta un estudio enfocado en la precipitación de travertino, ya que la precipitación de esta roca se encuentra asociada a fuentes termales, las cuales a su vez son indicadores de sistemas geotérmicos en profundidad, de esto la importancia del estudio del travertino en esta zona ubicada a aproximadamente 65 km del SO de la capital Santiago de Chile. En esta sección se describe un resumen del trabajo realizado por Anselmo *et al.* (2017).

Las aguas termales están ubicadas en los Andes en la cordillera principal oriental (EPC), en la zona volcánica del sur de los Andes que presenta como característica ser una zona de volcanismo activo.

En la investigación establecieron como metodología la observación en campo para realizar mapeo y descripción de las morfologías de los cuerpos de travertino. Además, realizaron medidas de las aguas termales como temperatura y pH *in situ* para la caracterización del fluido parental, incluido también el muestro de roca morfológica. Todos los datos fueron analizados posteriormente en laboratorios para el reconocimiento de las diferencias texturales y determinación de la mineralogía de las muestras. En la investigación determinaron tres depósitos principales, los cuales son: Morales Poniente, termales Baños Morales y Morales Oriente. Estos se colocan sobre material no consolidado en la ribera norte del río Volcán, que contienen cubiertas de carbonatos y travertinos en el límite con el río.

Los travertinos se caracterizan por *minidam* en su superficie y textura botroidal en las cavidades y en algunas partes de su superficie. Morales Oriente, es el único depósito que se encuentra inactivo, mientras que Morales Poniente y termales Baños Morales se encuentran activos. Las precipitaciones activas de travertino en estos, dio paso a la suposición de que los depósitos son evidencia de actividad térmica pasada y su formación se da a partir de afloramiento de agua y CO₂. También la similitud existente entre la morfología de ambos, indica un mismo proceso de formación mediante el cual el agua fluye por el efecto de una pendiente precipitando carbonatos en su camino.

En la zona sur de Baños Colina, se identificaron tres depósitos: la Grieta, el Domo y Baños Colina, donde la orientación subparalela de la Grieta y la fisura principal de el Domo, indican un control estructural en el transporte de fluidos, donde se es posible que la Grieta actúe como un canal de transporte de fluidos subterráneos a través del valle.

Quizás, en los depósitos de Baños Colina, los fluidos meteóricos se infiltran a través de estructuras permeables y también por medio de fallas locales que permiten el transporte de aguas a zonas profundas que posteriormente tienen una surgencia rápida.

Todo lo anterior les permitió sustentar que los depósitos de travertino en las zonas activas, son formados por el afloramiento de aguas termales lo cual indica actividad geotérmica reciente.

2.3 Origen de fluidos térmicos y su relación con los sistemas geotérmicos de Aysén

Aysén se ubica entre los 43°38' S y 49°16' S cerca del océano Pacífico, la configuración de su relieve es muy singular (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017), además presenta condiciones óptimas para la formación de sistemas geotérmicos, condiciones tales como altas precipitaciones, sistemas volcánicos activos y sistemas de fallas activas. Todas estas características configuran una región de importancia geotérmica (Negri *et al.*, 2017).

En el trabajo abordado por Negri *et al.* (2017) se identifica el origen de los fluidos geotérmicos de la región, además su relación con los sistemas geotérmicos presentes. A continuación, se presenta una síntesis del trabajo realizado por el investigador.

La estrategia metodológica consistió en la toma de muestras extraídas de fuentes termales, fiordos y aguas meteóricas, las cuales posteriormente fueron analizadas por el Centro de Excelencia Geotérmica de los Andes (CEGA). Los análisis fueron cromatografía iónica, espectrofotometría de absorción atómica, espectrofotometría de masa plasmática de acoplamiento inductivo, análisis de isótopos por medio de espectrofotómetro de masas y realizaron dos análisis estadísticos multivariantes.

A través del diagrama de Piper, se dedujo que las aguas termales son principalmente de tipo Na-Cl y solo dos tipos de aguas Na-HCO₃, con una distinción de las aguas meteóricas a Ca-HCO₃ vía aguas termales Na-HCO₃ a Na-Cl, lo que permite pensar en procesos de interacción de mezcla agua y roca que indica la química de las muestras de manantiales termales. Negri *et al.* (2017) pudieron demostrar a partir de otros análisis realizados, más los mostrados en el presente artículo, que los datos fisicoquímicos de los manantiales termales de Aysén, indican que la mezcla del agua de fiordo, la erosión de silicato y la desgasificación volcánica, son procesos dominantes que controlaron las características de los fluidos térmicos.

Los autores indicaron que la composición isotópica mostró una relación con las aguas meteóricas reales, lo que sugiere un corto tiempo de residencia de las aguas de recarga e intercambio isotópico limitado en los procesos de interacción agua-roca, también mencionan que existe una clara recarga meteórica.

2.4 Determinación de fuentes de recarga y evolución hidrotermal en el acuífero de la zona de falla de Chile

Ese estudio fue realizado por Taucare *et al.* (2017). La zona de estudio se encuentra ubicada sobre la cordillera de los Andes, en las coordenadas 32°25'S y 32° 60'N. En el área se encuentra una cuenca sedimentaria cuaternaria con una cordillera formada por el volcán Cenozoic'sn y sedimentos de rocas. Las unidades geológicas se encuentran en contacto mediante la falla Pucuro, que es una falla regional con orientación NS, descrita como falla invertida y reactivada como falla inversa, como se muestra en la figura 3.

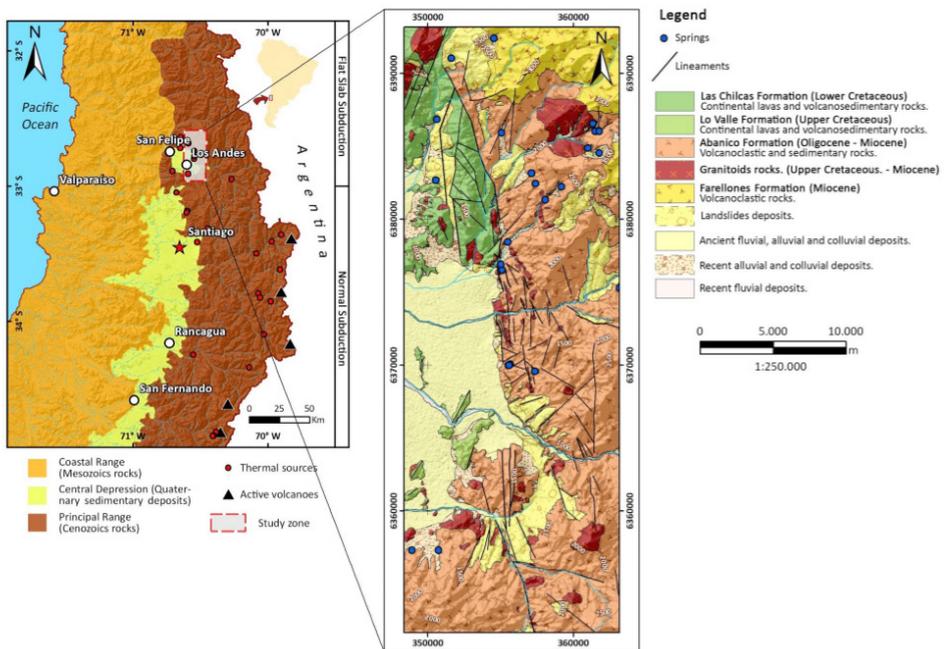


Figura 3. Mapa geológico regional

Fuente: Taucare *et al.* (2017).

La estructura geológica de la zona, corresponde a depósitos constituidos por lavas andesíticas porfídricas y depósitos volcanoclásticos con edades entre el Cretácico y el Mioceno. En la zona, la mayoría de las rocas estratificadas se encontraron afectadas por alteración hidrotermal que es controlada por la falla Pucuro.

El área presenta numerosos conjuntos de fallas conjuntas y secundarias alrededor de la falla principal Pucuro. En la zona también se presentan treinta y un afloramientos termales que al parecer surgen de rocas alineadas espacialmente a la falla.

La metodología implementada por Taucare *et al.* (2017), se basó principalmente en la toma de muestras de agua primavera que le permitió evaluar las características hidroquímicas e isotópicas, las interacciones agua-roca y los procesos de mezcla del agua, analizados mediante herramientas geoquímicas y estadísticas clásicas.

De los resultados, los autores obtuvieron que la zona de falla Pocuro actuó como conducto que permitió la circulación de fluido térmico y profundo, además que en la actualidad la zona de falla Pocuro permite la circulación de aguas subterráneas. También identificó dos grupos principales de aguas: un grupo neutro compuesto principalmente Ca-HCO_3 y un grupo ácido compuesto por Ca-SO_4 y por último concluyó que las aguas primavera tienen corto tiempo de residencia de las aguas de recarga a poca profundidad.

2.5 Procesos de recarga de fuentes de agua subterránea y aguas superficiales sobre el complejo volcánico Lonquimay

Ese estudio fue realizado por Pérez *et al.* (2017) y se enfoca en un área que alberga grandes características geotérmicas, donde se incluyen manantiales naturales, pozos y fumarolas. En el sector se ha realizado exploración geotérmica por entidades privadas donde se ha encontrado presencia de reservorios de alta entalpía con temperaturas entre 250 y 300 °C.

El planteamiento realizado por los autores consistió en la identificación de las principales fuentes de recarga de los reservorios geotérmicos del área de influencia del complejo Volcánico Lonquimay – Tolhuaca, esto debido a que dentro de una de las problemáticas que se ha encontrado para la explotación constante y efectiva del reservorio, es que no se conocen los procesos y vías de recarga que permitan asegurar el suministro del recurso.

Para el estudio, los autores recolectaron un total de 14 muestras de fuentes termales y pozos que posteriormente fueron analizadas para elementos mayores y oligoelementos en los laboratorios del Centro de Excelencia Geotérmica de los Andes (CEGA). Además de las catorce muestras de agua geotérmica, se recolectaron quince muestras de agua meteórica provenientes de lluvia, ríos y aguas de nieve que fueron tomadas en diferentes altitudes del área de estudio que fueron analizadas para determinar las relaciones isotópicas.

Por último, para la determinación de la edad de las aguas subterráneas y restringir los procesos de mezcla subsuperficial, se midieron clorofluorocarbonos y hexafluoruro de azufre.

Todo lo anterior le permitió comprobar la existencia del reservorio geotérmico ubicado a 2 km de profundidad por debajo del complejo volcánico, además que este controla

las temperaturas y composiciones de los manantiales a lo largo del flanco noroeste del volcán hasta termas de Malleco.

También le permitió concluir que los manantiales y pozos ubicados al sur del volcán, pueden estar relacionados con una circulación más superficial a través de formaciones volcán-sedimentarias Cura-Mallín y Malleco. Estos manantiales contienen una composición mucho más diluida, temperaturas más bajas y menores concentraciones de metales traza derivados del magma.

2.6 Procesos hidrogeoquímicos de las aguas termales de Pica al norte de Chile

Pica se encuentra ubicado en el desierto de Atacama. Este es uno de los desiertos más áridos del mundo, posee una precipitación promedio anual de 10 mm, en la región se da la presencia de asentamientos humanos que desde siglos han utilizado las fuentes subterráneas para la satisfacción de sus necesidades.

El área estudiada por Placencia et, al. (2017), se encuentra dominada por estratos alternativos del Jurásico al Cuaternario de rocas sedimentarias continentales. En el entorno regional se subdivide en 3 unidades geológicas predominantes: pampa del Tamarugal, la precordillera y la meseta del antiplano.

Los autores pretendieron realizar análisis hidrogeoquímicos de la zona y lo ejecutaron mediante la toma de muestras en aguas de los sitios de Pica y el salar del Huasco, utilizando como puntos de muestreo manantiales y pozos. A través de los análisis realizados, pudieron concluir que las fuentes termales se encuentran ubicadas cerca de Chintaguay y Longacho, región de Tarapacá, además que las aguas de Pica poseen tres dominios de las características físicas y químicas, donde el grupo 1 está formado por agua de concentraciones de sólidos entre el grupo 2 y 3 y la meteorización de la roca influye principalmente en sus aguas; el grupo 2 corresponde a aguas con mayores sólidos disueltos y, por último, el grupo 3 con aguas muy diluidas donde el proceso principal podría ser la precipitación.

2.7 Especiación de arsénico en el campo geotérmico del Tatio

Como se mencionó anteriormente, el Tatio es una de las áreas que posee mayor potencial geotérmico en Chile. Para este caso, Alsina et, al. (2013) estudiaron la especiación del arsénico en un canal hidrotermal en esta región, estudio que fue motivado porque en investigaciones realizadas con anterioridad se identificaron hidróxidos férricos hidratados como la principal fase en el contenido de arsénico.

En el potencial geotérmico del Tatio, se ve incluso la presencia de fuentes hidrotermales que han sido documentadas como géiseres, fumarolas, terrazas de *sinter*, entre otras. A partir de estudios isotópicos y geoquímicos, los autores determinaron que las

aguas hidrotermales en la zona están controladas por la interacción agua-roca y varios procesos de mezcla, todo prov eniente de aguas meteóricas y las fuentes subterráneas locales, que dan origen a aguas con variaciones en el contenido de cloruro, dando lugar a aguas ácidas con mezcla de fluidos magmáticos con altos contenidos de hidrocarburos.

El trabajo realizado por Alsina *et al.* (2013) estuvo enfocado en la determinación de los mecanismos por los cuales el arsénico es incorporado en las aguas hidrotermales de la zona de estudio. Para este fin, realizaron una caracterización química de las aguas termales, además, examinaron la distribución espacial y especiación del arsénico. En términos de la caracterización química de las aguas, encontraron que la temperatura y la concentración de arsénico variaban a medida que se alejaban del punto de muestreo. Para el caso de un géiser, la temperatura varía con una constante aproximada de $-0,68\text{ }^{\circ}\text{C/m}$, lo cual quiere decir que por cada metro de distancia con respecto al géiser, la temperatura en el agua de la quebrada disminuye constantemente $0,68\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el arsénico (III) y (V) tienden a tener comportamientos diferentes, es decir, arsénico (III) fue dominante en los primeros 20 metros de distancia y el arsénico (V) fue dominante entre los 20 y 40 m de distancia. Estos resultados se ven representados en la figura 4.

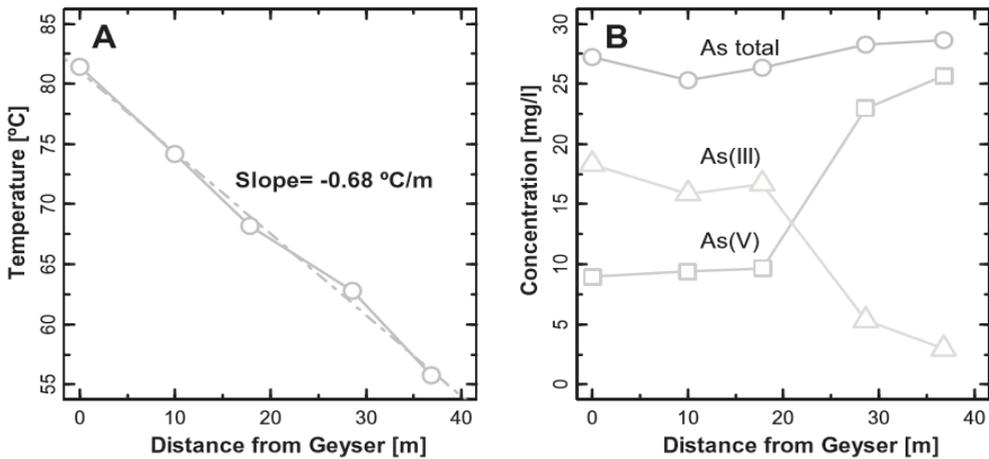


Figura 4. (A) Variación de la temperatura del agua a lo largo de la quebrada con respecto a la distancia del geyser. (B) variación de As(III) y As(V) a lo largo de la misma quebrada (Alsina *et al.*, 2013).

La oxidación de As (III) en el canal es atribuida a bacterias arqueas que aceleran el proceso de oxidación en las horas nocturnas, convirtiendo As (III) en As (V), la predominancia de As (III) se da por la disolución y oxidación de arsenopirita (FeAsS) en el reservorio geotérmico.

2.8 Características químicas e isotópicas de los fluidos hidrotermales de la zona volcánica: sistemas geotérmicos de Chile central

La cordillera principal de Chile, está caracterizada por dos litologías diferentes y se encuentra distribuida de acuerdo con dos cinturones: el cinturón central mesozoico, compuesto por rocas sedimentarias ricas en cal y yeso, donde ocurre el arco volcánico activo y el cinturón occidental de edad cenozoica, compuesto por rocas basálticas, andesitas volcánicas y vocanoclasticas. Todo este entorno geológico controla los manantiales fríos y termales de la región, que principalmente son alimentadas por aguas meteóricas que circulan a través de estructuras regionales profundas. En la investigación realizada por Benavente et, al. (2015), se realizaron estudios de caracterización de manantiales tanto fríos como termales, sumado a esto se caracterizaron gases en fumarolas y piscinas de burbujeo. Las muestras fueron tomadas en la zona este y oeste de la cordillera principal.

En relación con la composición química e isotópica de las aguas objeto de estudio los autores, se establecieron seis grupos de facies químicas diferentes: $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$, $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ y $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$, donde cada facie determina condiciones específicas para el pH y los sólidos.

Los valores asociados al pH y a los sólidos disueltos totales, se encuentran muy diversificados: en la figura 5 se muestra la variación de la concentración de sólidos con respecto a la temperatura y relacionados también con las zonas de estudio, WPC ("Western Principal Cordillera") y EPC ("Eastern Principal Cordillera").

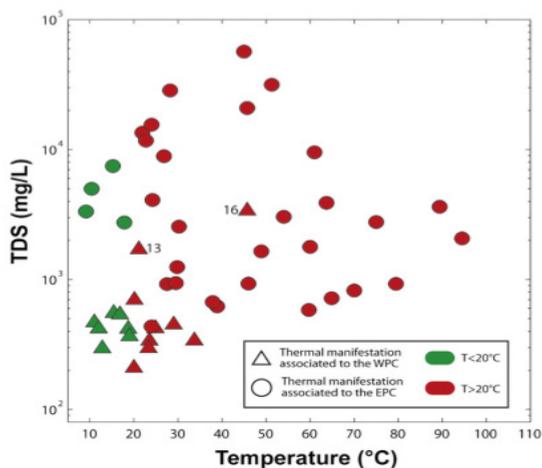


Figura 5. Concentración de sólidos disueltos totales en las zonas de manifestación WPC (al Oeste de la cordillera principal) y EPC (al este de la cordillera principal), además de la temperatura de la muestra.

Fuente: (Benavente et al., 2015)

Todos los valores reportados y analizados para gases se concentraron en la zona EPC, donde los gases disueltos con mayor abundancia fueron el dióxido de carbono CO₂ y N₂ y los de menos abundancia fueron O₂, CH₄, H₂, He y Ar. En la tabla 1 se muestran las concentraciones correspondientes a los puntos de la zona EPC donde se tomó la muestra con sus respectivas concentraciones.

Tabla 1. Concentraciones de los gases analizados para las muestras recolectadas.
Concentraciones en Mmo/mol



Fuente: Benavente *et al.* (2015)

Todo lo anterior les permitió concluir que los sistemas hidrotermales presentes a lo largo de la cordillera principal de Chile central, tienen como fuente de recarga principal aguas meteóricas que se infiltran a diferentes altitudes. El agua magmática pudo afectar los fluidos hidrotermales descargados de las fumarolas relacionadas con volcanes activos.

Por último, las diferentes composiciones de las aguas termales se encuentran estrechamente relacionadas por las rocas con las que se encuentran en contacto, por ejemplo las aguas con composición química HCO₃ se encuentran asociadas a rocas volcánicas andesíticas cenozoicas, las aguas dominadas por SO₄²⁻ y Cl⁻ se producen por la interacción con rocas mesozoicas a bajas temperaturas. Esto explica que la composición de un agua termal está altamente relacionada con la litología por la cual se transporta.

Los resultados de este estudio verifican el gran potencial geotérmico de la región para producción de energía geotérmica de alta entalpía.

CONCLUSIÓN

Con el evidente aumento de la demanda energética en Chile, además de los pocos recursos fósiles locales, pero con alto potencial geotérmico atribuido a la ubicación geográfica del país (estimado entre 3.000 y 16.000 MWe) (Sánchez-Alfaro *et al.*, 2015), en miras de buscar una matriz energética estable y sostenible ya que el país cuenta con

más de 300 áreas geotérmicas asociadas al vulcanismo cuaternario (Lahsen *et al.*, 2015), se ha impulsado la investigación de recursos geotérmicos con el fin de determinar la viabilidad en la explotación de los recursos que se presentan a lo largo de todo el país.

Como se pudo observar en el presente artículo, Chile cuenta con gran virtud en temas energéticos relacionados con la geotermia, virtud que se refleja con la materialización de la primera planta geotérmica en Sudamérica (Cerro Pabellón). Es por todo esto que Chile es un ejemplo para los países sudamericanos como Colombia, Ecuador, Venezuela, entre otros, en la búsqueda de la independencia energética.

Es importante además resaltar la labor de los diferentes grupos de investigación en energía geotérmica, ya que estos brindan información de vital importancia a la hora de desarrollar las diferentes etapas asociadas a la explotación del recurso, etapas como estudios de prefactibilidad y factibilidad.

REFERENCIAS

- Alsina M., Zanella L., Hoel C., Pizarro G. y, Gaillard J. (2013). *Arsenic speciation in sinter mineralization a hydrothermal channel of el Taito geothermal field*. Editorial totuman.
- Anselmo A., Morata D., Reich M. y Daniele L. (2017). Travertine genesis at Baños Morales and Baños colina hot springs, Central Andes, Chile. *Geology and Andean Geothermal Center of Excellence*, 3, 21-56.
- Benavente, O., Tassi, F., Aguilera F., Capecchiacci, F., Gutierrez, F., Vaselli, O. y Rizzo A. (2015). *Chemical and isotopic features of cold and thermal fluids discharged Southern Volcanic Zone between 32.5°S and 36°S: Insights into the physical and chemical processes controlling fluid geochemistry in geothermal system of Central Chile*. Elsevier.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2017). Región de Aysen. Chile, nuestro país. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11>
- Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. Conicyt. (2007). El sector de la energía en Chile - Capacidades de investigación y áreas de desarrollo científico-tecnológico. Recuperado de http://www.conicyt.cl/documentos/dri/ue/Energia_Energy_BD.pdf
- El Mostrador. (2017). Primera planta geotérmica en Sudamérica: Enel y Enap inyectan energía al sistema con cerro Pabellón. Recuperado de: <http://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2017/03/31/primera-planta-geotermica-de-sudamerica-enel-y-enap-inyectan-energia-al-sistema-con-cerro-pabellon/>
- IEA, International Energy Agency (2009). *Chile energy policy review*. Santiago de Chile: IEA.
- Jorquera, C. (2017). Primera planta geotérmica de América del sur – Cerro Pabellón de 48 MW inicia operación. Recuperado de: <http://www.piensageotermia.com/primera-planta-geotermica-de-america-del-sur-cerro-pabellon-de-48-mw-inicia-operacion/>
- Lahsen, A., Rojas, J., Morata, D. y Aravena, D. (2015). Geothermal Exploration in Chile: Country Update. Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015

- Morales, J. (2017). Así funciona la primera planta geotérmica de Chile. Recuperado de <http://www.lun.com/Pages/NewsDetail.aspx?dt=2017-09-13&BodyID=0&PaginaId=4>
- Negri, A., Daniele, L., Delgado, A., Morata, D. (2017). Origin of thermal fluids and implications for Aysen geothermal systems: A hydrogeochemistry and isotopic approach. Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)
- Pérez, R., Reich, M., Daniele, L., Tardani, D., Wrage, J., Sánchez, P., Held, S., Delgado, A. y Morata, D. (2017). Geochemical composition and anthropogenic tracer signature of thermal waters in the Lonquimay-Tolhuaca volcanic complex: Groundwater recharge source and subsurface mixing processes. Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)
- Portillo, G. (2017). *Todo lo que debes saber sobre la energía geotérmica*. Recuperado de <https://www.renovablesverdes.com/energia-geotermica/>
- Placencia, G., Daniele, L., Negri, A., Delgado, A. y Morata, D. (2017). I Preliminary results about hydro-geochemical processes in the Pica thermal springs (North of Chile). Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)
- Sánchez-Alfaro, P., Sielfel, G., VanCampen, B., Dobson, P., Fuentes, V., Reed, A., Palma-Behnke, R., Morata, D. (2015). Geothermal barriers, policies and economics in Chile – Lessons for the Andes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1390–1401.
- Slagter, S., Reich, M. y Muñoz C. (2017). The evolution of silica precipitation at the El Taito Geyser Field, Chile. Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)
- Taucare, M., Daniele, L., Arancibia, G. y Morata, D. (2017). Using hydrogeochemical and isotopical data to determine sources of recharge and hydrothermal evolution in fault zone aquifer, central Chile. Department of Geology and Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)

RECOMENDACIONES PARA NUESTROS COLABORADORES

Quienes envíen artículos con destino a publicación en cualquiera de las revistas de la Universidad de Medellín deben acompañar el artículo con la constancia de que es inédito, de su autoría y que no ha sido propuesto para publicación en ningún otro medio simultáneamente. Además, ceden sus derechos patrimoniales a la institución y la autorizan a divulgar tales artículos por cualquier medio, impreso o electrónico, incluido Internet.

Las personas interesadas en presentar un artículo para publicación en la revista Fragua, Vicerrectoría de Investigaciones, Red Interna de Semilleros de Investigación, de la Universidad de Medellín, deberán acogerse a lo siguiente:

1. El documento debe cumplir con las siguientes características:
 - Escrito en formato de Word, fuente Arial, 12 puntos, a espacio 1,5; su extensión puede variar entre 4.000 palabras como mínimo, y 9.000 palabras, como máximo.
 - El documento se debe paginar en la parte inferior derecha.
2. Todo artículo deberá incluir la siguiente información: título del trabajo, nombre del autor o autores, resumen, palabras clave (máximo seis), desarrollo del artículo con la siguiente estructura: introducción, desarrollo, conclusiones y bibliografía.
3. En el título del artículo debe insertarse una nota de pie de página indicando o explicando el origen del artículo. Para esta explicación tenga en cuenta la siguiente información:
 - Grupo de investigación y nivel de clasificación en Colciencias, en caso de estar clasificado.
 - Nombre del proyecto de investigación del cual es producto el artículo.
 - Nombre del semillero al que pertenece
 - Entidad(es) que financia(n) el proyecto
 - Período de ejecución

4. Nombre del autor o autores completos, y en pie de página, la formación académica, semilleros de investigación en los que ha participado, vinculación laboral, grupo y línea de investigación a la cual pertenece el autor, dirección para correspondencia física (es importante, además, la dirección postal de la institución a la cual pertenece el autor) y dirección electrónica.
5. El resumen del artículo puede variar entre 80 y 140 palabras y se sugiere seguir la siguiente estructura:
 - Objetivo del artículo: el propósito que buscan los autores con el trabajo.
 - Método: método empleado para argumentar y lograr el objetivo propuesto.
 - Principal resultado obtenido o conclusión.
6. Todo artículo debe tener las palabras clave (máximo seis); el criterio para elegir las palabras clave es que estas garanticen la visibilidad del artículo en los motores de búsqueda y en las bases de datos. Estas palabras son empleadas por las bibliotecas y los índices temáticos de revistas para clasificar los artículos. De esta forma se garantiza que cuando alguien hace una búsqueda por tema pueda tener acceso al artículo.
7. Las notas de pie de página deben estar en letra Times New Roman, tamaño 10, a espacio sencillo, justificadas y con una sangría de tal forma que el texto quede alineado al lado derecho del número y no debajo del número. Además, cuando en una página aparezcan más de dos pies de página se deben separar con un espacio.
8. Las notas de pie de página se deben emplear para hacer definiciones, aclarar conceptos o remitir al lector a otros trabajos o autores que traten con mayor profundidad los temas que por algún motivo no se pueden desarrollar en el texto pero que el autor considera que pueden ser de interés para el lector. Las notas de pie de página no se deben usar para citar los trabajos que se emplean como material de apoyo en la elaboración del artículo.
9. La responsabilidad de la información estadística contenida en cuadros y gráficos es del autor. Estos cuadros y gráficos deben ser numerados y referenciados en su totalidad en el texto; además, en la parte inferior de éstos deben estar las fuentes de información; en caso de que sea elaborado por los autores la fuente debe decir: elaboración propia. Los títulos de los cuadros, gráficos o esquemas deben ir en letra minúscula y sin centrar. Todos los cuadros y gráficos deberán ir en archivos separados.
 - Anexar, aparte del artículo, una síntesis o presentación (no superior a un párrafo) de la hoja de vida del autor y las referencias de las publicaciones más recientes.

TEXTO

Los artículos deben conservar un tono en tercera persona. Solo puede pasar a primera persona en las notas al pie de página.

Las dedicatorias y los epígrafes van en cursiva, salvo, en estos últimos, las especificaciones de autor, obra o año.

Las siglas no se pluralizan; cuando se necesite enfatizar una cantidad mayor a la unidad, antes de la sigla se pone el artículo en plural. Por ejemplo, no "una reunión de ONGS", sino "una reunión de las ONG". Además, la primera vez que aparece una sigla en el artículo, se explica su significado entre paréntesis, salvo los casos que ya son muy reconocidos.

Las comillas que se utilizan en cualquier parte del texto, en citas y en referencias bibliográficas, son estas: "" no estas: « », pues con las primeras siempre se nota si cierran o abren.

Las unidades se separan con punto y los decimales con coma; además, entre una cifra y el signo de porcentaje, no hay espacio.

TÍTULOS, SUBTÍTULOS Y DATOS GENERALES DEL ARTÍCULO

Títulos ni subtítulos llevan punto final.

Para la nota de pie de página del título y del nombre de autor, el superíndice que se utiliza no es un número, sino un asterisco.

Los nombres de los grupos y líneas de investigación van en cursiva, y con mayúsculas las palabras principales. El del proyecto de investigación, en cursiva y con mayúscula inicial.

GUIONES

El guión largo — (Ctrl+Alt+-teclado numérico) se utiliza para líneas incidentales y diálogos, pero si termina en un punto, no se cierra.

El guión pequeño () se utiliza para ciertas palabras que van unidas por el guión; por ejemplo, tecno-científico. Y para indicar rangos, de tiempo o de páginas. Aquí no se deja espacio entre los guiones, además, los años y los números de página no llevan punto.

MATERIAL GRÁFICO

Las palabras que se utilizan para el título son tabla o figura. Ese título va centrado.

Adentro, el título de las columnas va en cursiva, sin negrita.

CITAS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Las referencias deben presentarse de acuerdo con el estilo de referencia y citas de la American Psychological Association (APA).

La referencia bibliográfica de una cita se incorpora en el texto de la siguiente forma:

Si la cita es textual y tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas y al final se presenta entre paréntesis la fuente de la siguiente forma (García, Osorio y Correa, 2000, pág.).

Si la cita tiene más de 40 palabras se omiten las comillas y se deja como un texto independiente con un margen izquierdo más amplio. La información de la fuente se coloca al final de la cita igual que el ejemplo anterior.

Si la cita no es textual y está escribiendo en sus palabras, es necesario mencionar el autor y la fecha. A continuación se presentan algunos ejemplos:

García y Osorio (2000), si el nombre del autor hace parte de la oración, y (García y Osorio, 2000) si no hace parte de la oración.

Cuando hay varias referencias de la misma fuente en un solo párrafo, se debe escribir la fecha en la primera cita; después, basta con escribir el nombre del autor.

(García, 1990; 2000), para dos artículos del mismo autor citados a la vez.

(García, 1990a; 1990b), para dos artículos del mismo autor y el mismo año.

Si una publicación tiene más de tres autores debe indicarse solamente el nombre del primer autor seguido por *et al.*, (Gómez *et al.*, 2000).

Si hay dos o más publicaciones de autores diferentes en el mismo año se deben citar en orden alfabético y si son de autores diferentes en años distintos se deberán citar en orden cronológico.

Cuando en la nota van varias referencias bibliográficas, se separan con punto y coma.

La lista de referencias debe ir al final del texto y hacerse en orden alfabético con base en el primer apellido del primer autor y siguiendo como pautas los siguientes ejemplos:

Citación de un libro

Autor, A. A. (primero el apellido en mayúscula la inicial, luego las iniciales del nombre). (Año de la publicación). PUNTO *Título de la obra (en cursiva)*. PUNTO (Edición – si la hay). PUNTO Ubicación: Editorial. PUNTO

Citación de un capítulo de libro

Autor, A. A. (primero el apellido en mayúscula la inicial, luego las iniciales del nombre). (Año de la publicación). PUNTO Título del capítulo. PUNTO En Autor del libro (Eds.), *Título del libro (en cursiva)* (páginas del capítulo). PUNTO Ubicación: Editorial. PUNTO

Citación de artículo de revista

Autor, A. A. (primero el apellido en mayúscula la inicial, luego las iniciales del nombre). (Año de la publicación, incluya el mes y día de la publicación para publicaciones diarias, semanales o mensuales). PUNTO Título del artículo. PUNTO *Título de la revista (en cursiva)*, diario, semanario, Volumen (número), páginas.

Fuentes de Internet

Si el artículo fue obtenido de una base de datos el esquema general es:

Autor, A. A. (primero el apellido en mayúscula la inicial, luego las iniciales del nombre). (Año de la publicación). PUNTO Título del artículo. PUNTO *Título de la revista (en cursiva)*, Volumen, (número), páginas. PUNTO Recuperado el día de mes de año, de la base de datos tal.

Si el documento está disponible en un sitio web el esquema general es:

Autor, A. A. (primero el apellido en mayúscula la inicial, luego las iniciales del nombre). (Año de la publicación). PUNTO *Título del artículo (en cursiva)*. PUNTO Recuperado el día de mes de año, del sitio web de nombre del sitio: URL

