REPORTE DE INTELIGENCIA TECNOLÓGICA GEOTERMIA

SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

FONDO
DE SUSTENTABILIDAD
ENERGÉTICA

IMP
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

copyright © **Instituto Mexicano del Petróleo**
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2017

Información General del Proyecto

Número de proyecto IMP
F.61493. Mapas de Ruta Tecnológica para los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE´s).

Jefa de Proyecto
M. en C. María Georgina Ortiz Gallardo.

Responsable del reporte
M. en A. César Andrés de la Fuente Melo.

Colaboradores
Dr. Renato Castro Govea.
M. en A. Martha Beatriz Rodríguez Hidalgo.
Dr. Sebastián Madrigal Olán.
Ing. Wuilliam Bermudez Mendoza.

Diseño Editorial
Lic. Carlos Alberto Torres de Loera.

Información del Cliente

Entidad solicitante: Fondo Sectorial CONACYT-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética
M en I. Ernesto Gabriel Hernández Montoya.
Secretario Administrativo del Fondo Sectorial CONACYT – Secretaría de Energía- Sustentabilidad Energética.

Coordinador del Proyecto por parte de la Secretaría de Energía
Dr. Edgar Santoyo Castelazo.
Director de Innovación Tecnológica.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 7

1.1 Objetivo 7
1.2 Alcance 7
1.3 Metodología general para realizar el reporte de inteligencia tecnológica 8

2 CONTEXTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA 11

2.1 Objetivos y metas de la energía geotérmica en México 11
2.2 Aplicaciones de la Energía Geotérmica 12
2.3 Áreas tecnológicas y cadena de valor 13
2.4 Retos tecnológicos nacionales e internacionales 15

2.4.1 Exploración 15
2.4.2 Perforación 16
2.4.3 Desarrollo de campo 17
2.4.4 Construcción de plantas 17
2.4.5 Operación y mantenimiento 18
2.4.6 Otros: Sistemas geotérmicos mejorados (EGS) 19

3 ACTIVIDAD EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO 21

3.1 Exploración 21

3.1.1 Isótopos 24
3.1.2 Sensores remotos 27
3.1.3 Sísmica 29
3.1.4 Estudios magnetotelúricos (MT) 32
3.1.5 Estudios electromagnéticos (EM) 34

3.2 Perforación 37
3.3 Fluidos súper calientes 39
3.4 Patentes identificadas en generación de electricidad 42
3.5 Patentes identificadas para los usos directos de la energía geotérmica 43

4 OTROS ASPECTOS IDENTIFICADOS PARA EL DESPLIEGUE DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA 46

4.1 Incentivos financieros 46
4.2 Regulaciones 47
4.3 Estándares 48

REFERENCIAS 50

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

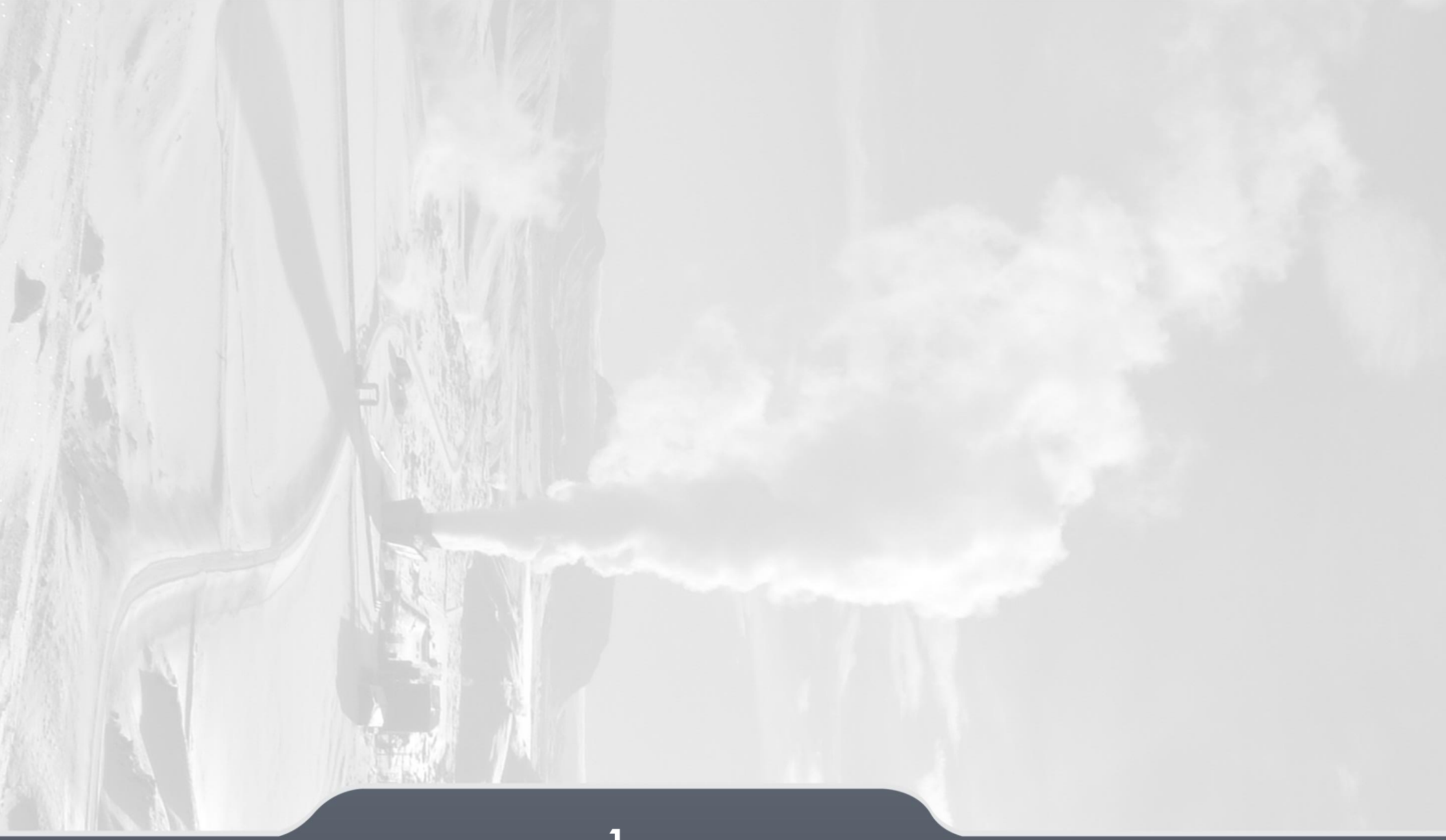
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso metodológico para realizar el Reporte de Inteligencia Tecnológica. 8
Figura 2. Publicaciones por año acerca de Exploración Geotérmica. 22
Figura 3. Países con más publicaciones acerca de Exploración Geotérmica. 22
Figura 4. Organizaciones con más publicaciones acerca de Exploración Geotérmica. 23
Figura 5. Palabras clave más frecuentes en publicaciones acerca de Exploración Geotérmica. 23
Figura 6. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con Exploración en geotermia. 24
Figura 7. Países con más publicaciones acerca de isótopos en geotermia. 24
Figura 8. Publicaciones por año acerca de isótopos en geotermia. 25
Figura 9. Organizaciones con más publicaciones acerca de isótopos en geotermia. 25
Figura 10. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con isótopos en geotermia. 26
Figura 11. Palabras clave más frecuentes en publicaciones acerca de isótopos en geotermia. 26
Figura 12. Palabras clave con más registros acerca de sensores remotos en geotermia. 27
Figura 1. Países con mayor número de publicaciones acerca de sensores remotos geotérmicos. 27
Figura 14. Publicaciones por año acerca de sensores remotos en geotermia. 28
Figura 15. Organizaciones con más publicaciones acerca de sensores remotos en geotermia. 28
Figura 16. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con sensores remotos en geotermia. 29
Figura 17. Publicaciones por año acerca de sísmica en geotermia. 29
Figura 18. Palabras clave con más registros acerca de sísmica en geotermia. 30
Figura 19. Organizaciones con más publicaciones acerca de sísmica en geotermia. 30
Figura 20. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con sísmica en geotermia. 31
Figura 21. Publicación de artículos de sísmica por país. 31
Figura 22. Publicaciones por año acerca de estudios magnetotelúricos en geotermia. 32
Figura 23. Publicaciones por país con respecto a estudios magnetotelúricos. 33
Figura 24. Palabras clave con más registros acerca de estudios magnetotelúricos en geotermia. 33

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 25. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con estudios magnetotelúricos en geotermia. 34
Figura 26. Organizaciones con más registros acerca de estudios magnetotelurico. 34
Figura 27. Publicaciones por año acerca de estudios electromagnéticos en geotermia. 35
Figura 28. Palabras clave con más registros acerca de estudios electromagnéticos en geotermia. 35
Figura 29. Publicaciones por país con respecto a estudios electromagnéticos. . 36
Figura 30. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con estudios electromagnéticos en geotermia. 36
Figura 31. Organizaciones con más registros acerca de estudios electromagnéticos. 37
Figura 32. Palabras claves relacionadas con perforación en geotermia. 37
Figura 33. Publicaciones por año acerca de perforación en geotermia..... 38
Figura 34. Artículos publicados por país sobre temas de perforación en geotermia. 38
Figura 35. Organizaciones con más registros acerca de perforación en geotermia. 39
Figura 36. Publicaciones por año acerca de fluidos súper calientes. 40
Figura 37. Palabras claves relacionadas con fluidos súper calientes. 40
Figura 38. Artículos publicados por país sobre temas de fluidos súper calientes. 41
Figura 39. Organizaciones con más registros acerca de fluidos súper calientes en geotermia. 41
Figura 40. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con fluidos súper calientes. 42
Figura 41. Distribución anual de familia de patentes registradas para la generación de electricidad con recursos geotérmicos. 42
Figura 42. Distribución por país de familia de patentes registradas para la generación de electricidad a través de recursos geotérmicos. 43
Figura 43. Distribución anual de familia de patentes registradas para los usos directos de los recursos geotérmicos. 44
Figura 44. Distribución por país de familia de patentes registradas para los usos directos de los recursos geotérmicos. 44

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



1.

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la geotermia es el aprovechamiento del calor existente en el interior de la tierra, esta energía es transportada en fluidos geotérmicos naturales hacia la superficie mediante la perforación de pozos.

Actualmente este tipo de energía tiene muy alto potencial, ya que por ser una fuente de energía limpia, flexible, confiable y abundante ofrece ventajas económicas y ambientales sobre las tecnologías tradicionales. Y además, es una alternativa para reducir los riesgos ambientales del calentamiento global que son provocados por la utilización de combustibles fósiles.

En el mundo se encuentra una gran variedad de recursos geotérmicos que permiten la generación de electricidad y el aprovechamiento directo del calor. México, con su naturaleza volcánica y la amplia distribución de manifestaciones termales, es uno de los países con mayor potencial geotérmico en el mundo; además de ser pionero en el aprovechamiento de este tipo de recursos, cuenta con una amplia experiencia para la explotación de los yacimientos hidrotermales.

De acuerdo a la red de organizaciones interesadas en las políticas globales de energías renovables (REN21, 2015), en el año 2014 a nivel mundial, México se encontraba en la cuarta posición en capacidad de producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica. Sin embargo, el país cuenta con recursos geotérmicos abundantes aun no explotados que pueden ser aprovechados para la generación de electricidad y múltiples usos directos.

1.1 Objetivo

Establecer un panorama general del desarrollo de la tecnología empleada para el aprovechamiento de la energía geotérmica, así como los principales retos para el despliegue de esta energía. Este reporte servirá como insumo de información para generar el mapa de ruta tecnológico de la energía geotérmica en México.

1.2 Alcance

El presente estudio profundiza en mayor detalle en algunos temas relacionados con la generación de electricidad a través del uso de energía geotérmica, adicionalmente, se incluyen algunos aspectos de los usos directos de este tipo de energía, no siendo el principal punto de enfoque.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

1.3 Metodología general para realizar el reporte de inteligencia tecnológica

La colecta y análisis de la información para elaborar el Reporte de Inteligencia Tecnológica (IT) se efectuó siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 1.

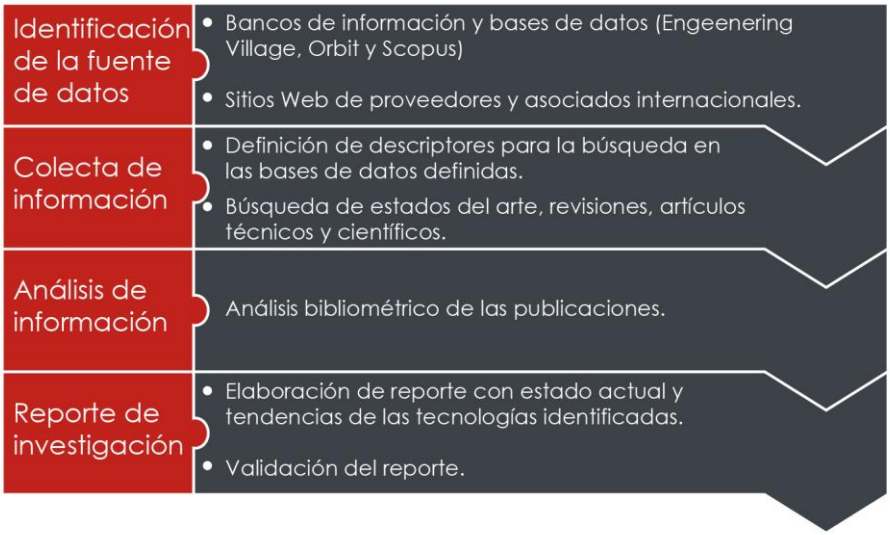


Figura 1. Proceso metodológico para realizar el Reporte de Inteligencia Tecnológica.

Las principales fuentes de información para el Reporte de Inteligencia Tecnológica fueron bases de datos de patentes *(Orbit)* y de publicaciones (*Scopus)*. Las publicaciones incluyeron revistas científicas, tesis de posgrado, revisiones técnicas e ingenieriles, revistas técnicas especializadas y reportes de agencias gubernamentales o asociaciones industriales. La búsqueda que fue realizada en el 2016, cubre los artículos publicados del periodo 2005 a 2016.

Asimismo, se consultaron fuentes informales (noticias, proveedores, ferias, conferencias y personal interno de Investigación y Desarrollo (I&D)) usando esencialmente Internet y se recurrió a entrevistas con expertos para validar la información colectada.

Adicionalmente, se presenta información basada en la consulta de leyes nacionales, documentos oficiales de la Secretaría de Energía (SENER), mapas de ruta tecnológicos de la Agencia Internacional de Energía (*IEA*, por sus siglas en inglés), documentos de divulgación científica e informes de empresas y asociaciones líderes en geotermia.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Para integrar los objetivos y metas en materia de energía geotérmica del país se revisó la Ley de Transición Energética (DOF, 2015), prospectivas elaboradas por la SENER y los acuerdos internacionales de cambio climático REN21 (REN21, 2015). Asimismo, se tomó como referencia el mapa de ruta tecnológica de geotermia de la IEA (Beerepoot, 2011), para la identificación de las aplicaciones, áreas tecnológicas y retos, los cuales se complementaron con otros mapas de ruta, como el elaborado por la Comisión Europea (Aposteanu, y otros, 2014), y artículos de divulgación científica que se citan a lo largo del estudio.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.

CONTEXTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

2 CONTEXTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

2.1 Objetivos y metas de la energía geotérmica en México

Con la finalidad de incrementar el aprovechamiento sustentable y la participación de las energías renovables en la matriz energética, de mitigar los efectos de gas invernadero que producen los combustibles fósiles y de cumplir con los compromisos internacionales, el gobierno ha emitido programas y estrategias donde se establecieron los objetivos y metas nacionales en el corto, mediano y largo plazo, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Objetivos y metas para el desarrollo de energías limpias en México.

OBJETIVOS	Corto Plazo 2018	Mediano Plazo 2024	Largo Plazo 2030
Generación de electricidad con energías limpias	25% mínimo (LTE)	35% mínimo (LTE)	42% mínimo (Prosp. Sector Eléct. 2015 - 2029)
Reductor de emisiones (ambiental)	30% al 2020 (LGCC)		50% al 2050 (COP21)
Sistema de incentivos	Al 2020 que promueva y permita ser rentable la generación de electricidad a través de renovables		
Reducción de GEI			22% (COP21)
Carbono negro			Reducción 55% (COP21)
Sustitución de combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa en la industria nacional (COP21)			
Incrementar la flota vehicular a gas natural y disponer de combustibles limpios (COP21)			
Promover uso doméstico de calentadores y celdas solares (COP21)			

Nota: Se marcan en paréntesis las siglas de los documentos empleados como referencia.

Para la energía geotérmica, las metas establecidas en términos de generación eléctrica se muestran en la Tabla 2.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Tabla 2. Pronóstico de generación de electricidad de acuerdo al Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables (PEAER), Prospectiva energías renovables 2015-2029 (PER) e International Renewable Energy Agency (IRENA).

Año	Generación de energía geotérmica
2016 - 2017	6,742 GWh/año (PEAER)
2018	7,135 GWh/año (PEAER) 7,664 GWh/año (PEAER)
2024	13,253 GWh/año (PER)
2029	13,217 GWh/año (PER)

2.2 Aplicaciones de la Energía Geotérmica

Los recursos geotérmicos se aprovechan en términos de generación de electricidad y usos directos. La principal restricción al uso de la energía geotérmica es la dificultad para su transporte, por lo que preferentemente se utiliza en lugares cercanos al punto de generación u obtención. El transformarla en energía eléctrica permite un uso más extendido.

Para la generación de electricidad se requieren recursos con temperaturas mayores a 150°C; para temperaturas menores se puede hacer un uso directo del calor geotérmico.

Entre los usos directos mencionados por la IEA se encuentran, por ejemplo, la calefacción doméstica y urbana, de spas y piscinas, de invernaderos, de estanques de acuicultura, así como el calentamiento de procesos industriales y de suelos para derretir nieve.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*FAO, por sus siglas en inglés*) detalla ciertos usos directos, los cuales se mencionan a continuación:

- Secado de productos agrícolas;
- Calefacción de invernaderos;

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

- Piscicultura;
- Invernaderos de agua salada;
- Pasteurización de leche;
- Precalentamiento y calefacción para procesamiento de alimentos;
- Evaporación y destilación en procesos industriales;
- Pelado y blanqueo de frutas y verduras;
- Esterilización de alimentos; y
- Calefacción de suelos para cultivos.

2.3 Áreas tecnológicas y cadena de valor

Las áreas tecnológicas se definen como el conjunto de conocimientos, metodologías y herramientas que se relacionan con algún componente o actividad clave en una cadena productiva. En el caso particular de la geotermia, (Harvey Consultants Ltd., 2013) dividen la cadena de valor en las siguientes fases:

- Estudio preliminar;
- Exploración;
- Perforaciones de prueba;
- Revisión y planeación de proyectos;
- Desarrollo de campos;
- Construcción de plantas; y
- Operación y mantenimiento.

Para una buena planeación de estas fases será importante conocer el tipo del recurso geotérmico involucrado. Para la generación de electricidad, por ejemplo, se pueden mencionar nueve tipos de sistemas geotérmicos potenciales (Santoyo & Barragán Reyes, 2010).

- Sistemas convectivos hidrotermales;
- Sistemas geotérmicos mejorados (roca seca caliente);
- Sistemas geotérmicos geopresurizados;
- Sistemas geotérmicos conductivos sedimentarios;
- Sistemas geotérmicos radiogénicos;
- Sistemas geotérmicos marinos;
- Sistemas geotérmicos magmáticos;
- Sistemas geotérmicos de agua caliente asociada con yacimientos de petróleo y gas; y
- Sistemas geotérmicos supercríticos.

En cuanto a las áreas tecnológicas que se pueden tomar en cuenta para el desarrollo de la geotermia, prácticamente cada agencia o asociación define las suyas. El mapa

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

de ruta de geotermia de la IEA (Beerepoot, 2011), por ejemplo, identifica las siguientes áreas:

- Evaluación de recursos geotérmicos;
- Perforación;
- Uso del calor geotérmico;
- Tecnologías geotérmicas avanzadas: *Enhanced Geothermal Systems (EGS)*; y
- Tecnologías geotérmicas avanzadas: Otros (Explotación de fluidos supercríticos, recursos de roca seca caliente, coproducción aceite y gas y producción costa afuera).

Por su parte, en una publicación de la Asociación de Energía Geotérmica (Kagel, 2008), señala las siguientes áreas tecnológicas:

- Fluidos geotérmicos (corrosión, precipitación e inyección);
- Plantas de energía (diseño y construcción, turbinas, transmisión de materiales, etc.);
- Tecnologías de conversión (plantas de vapor seco, flash, binarias, y combinadas flash-binarias);
- Tipos de enfriamiento (torres de enfriamiento, enfriamiento de agua o aire);
- Estructuras de planta de energía para minimizar impacto (ruido, impacto visual, mitigación para reducir impacto en vida silvestre y vegetación, monitoreo de actividades, mantenimiento, etc.);
- Eficiencia (plantas y turbinas);
- Sistemas geotérmicos no tradicionales (sistemas geotérmicos híbridos, EGS, coproducción aceite y gas, etc.);
- Nuevas tecnologías (recuperación mineral, fluidos de trabajo para plantas de energía ciclo Rankine, sistemas híbridos de enfriamiento, revestimientos, etc.);
- Usos directos (pozos y bombas de circulación, intercambiadores de calor, reguladores de poder y sistema de disposición de agua); y
- Bombas de calor geotérmico.

Finalmente, el mapa de ruta elaborado por la Plataforma Tecnológica Europea (Aposteanu, y otros, 2014), plantea las siguientes áreas tecnológicas:

Tecnologías geotérmicas someras

- Tecnologías de acoplamiento al subsuelo somero; y
- Recursos, nuevos sistemas e integración.

Tecnologías geotermales profundas

- Recursos geotermales profundos;
- Perforación geotérmica profunda;

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

- Producción geotermal profunda; y
- Programas EGS.

A partir de esta identificación, tanto de las etapas de un desarrollo geotérmico como de las áreas tecnológicas, se consideró como base, para el presente estudio, el proceso propuesto en la guía para la colecta de fuente de datos, análisis y presentación de proyectos geotérmicos (Harvey Consultants Ltd., 2013), resumiendo algunas etapas para efectos de facilitar el manejo de la información. De esta manera, las áreas tecnológicas a considerar quedan vinculadas con las etapas de un desarrollo geotérmico y se agrupan de la siguiente manera:

- Exploración;
- Perforación;
- Desarrollo de campos;
- Construcción de plantas; y
- Operación y mantenimiento.

2.4 Retos tecnológicos nacionales e internacionales

Los principales retos nacionales e internacionales fueron identificados con base en las áreas tecnológicas definidas en el presente estudio.

2.4.1 Exploración

En el mapa de ruta para el desarrollo estratégico de la exploración geotérmica, elaborado por la Oficina de Tecnología Geotérmica de los Estados Unidos (Phillips, Ziagos, & Thorsteinsson, 2013), se identifican los siguientes retos para la evaluación de recursos geotérmicos:

- Mejorar el reconocimiento y resolución de señales geofísicas, además de la reducción de costos de exploración y el crecimiento de reservas;
- Identificar nuevas firmas geoquímicas y mejorar las técnicas de exploración (geoquímicas, geofísicas y de sensores remotos);
- Desarrollo de nuevas técnicas y herramientas para la detección de señales geofísicas;
- Métodos para el procesamiento avanzado de datos;
- Identificación y recopilación de datos faltantes para la delimitación de yacimientos;
- Verificación a través de casos de estudio y pruebas de laboratorio;
- Estudios cuantitativos mediante la interpretación integral de datos geofísicos, geoquímicos y geológicos, para mejorar la determinación de las condiciones de permeabilidad en el subsuelo;

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

- Imágenes 4D de las rutas de los fluidos e inversión de Temperatura-Profundidad (TD) para determinar perfiles del flujo;
- Reducción del riesgo exploratorio a través de la delimitación confiable de *plays* geotérmicos;
- Uso de técnicas de fracturación de roca para mejorar la permeabilidad del yacimiento;
- Ampliar la gama de geotermómetros para la determinación de la temperatura del reservorio;
- Mejorar las técnicas de adquisición de imágenes de fracturas y la precisión de su análisis de acuerdo a la escala de la permeabilidad de la roca;
- Medición remota del contenido, composición y ruta activa de los fluidos hidrotermales;
- Crear bases de datos públicas con información geológica;
- Desarrollar un método integral para la identificación y la evaluación de potencial de los recursos de roca seca caliente e hidrotermales; y
- Desarrollar herramientas y modelos de sub-superficie para la identificación de sitios hidrotermales ocultos y de roca seca caliente.

Para la IEA (Beerepoot, 2011), constituye un reto el lograr capitalizar la experiencia y conocimiento en la exploración de la industria petrolera para replicar éxitos en la geotermia.

2.4.2 Perforación

En el contexto mundial, se consideran relevantes los siguientes retos (Sigfusson & Uihlein, 2016), (Ziagos, Phillips, Boyd, & Jelacic, 2013), (Beerepoot, 2011):

- Técnicas y materiales mejorados para la construcción de pozos;
- Mejoras en términos de gestión de seguridad, salud y medio ambiente;
- Desarrollo de sellos mecánicos resistentes a altas temperaturas;
- Desarrollo de herramientas y componentes electrónicos de fondo de pozos resistentes al daño o destrucción por altas temperaturas;
- Desarrollo de fluidos de perforación resistentes a las altas temperaturas;
- Control de pérdidas de circulación del fluido de perforación;
- Control del pozo en ambientes con altas temperaturas y rocas fracturadas;
- Control de pozos para evitar invasión del fluido de formación al pozo;
- Mejorar la gestión de gases no condensables; y
- Diseño de barrenas para perforar roca dura y corrosiva.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

En el caso de México (Santoyo & Barragán Reyes, 2010), se identifican los siguientes retos:

- Desarrollo de tecnologías de perforación y de construcción de pozos, que logren subsanar los obstáculos que presentan las altas temperaturas, los fluidos corrosivos y la roca dura (diámetros más grandes, perforación balanceada dentro del yacimiento productor, pozos direccionales, nuevas barrenas, etc.);
- Formulación de fluidos de perforación y cementos resistentes a las altas temperaturas;
- Solución a los problemas de pérdidas de circulación e identificación de zonas permeables;
- Estimación de temperaturas estabilizadas y calibración de simuladores numéricos para el estudio del historial térmico del pozo.

2.4.3 Desarrollo de campo

Al respecto, se identifican los siguientes retos (Lee, 2014):

- Permitir flexibilidad en la planta para que se pueda operar en un amplio rango de presiones, temperatura y entalpías;
- Incertidumbre en el desempeño del campo ya que las decisiones del diseño de la planta se realizan antes de que los pozos que la conforman sean perforados;
- Optimizar la sincronización de los equipos superficiales y los de fondo de pozo para mejorar su desempeño; y
- Asegurar del flujo geotérmico en la planta considerando que cada campo tiene diferentes características químicas.

Además el Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (ESMAP, 2012), menciona que se requieren construir modelos conceptuales y numéricos del yacimiento para identificar los patrones de flujo subterráneos.

2.4.4 Construcción de plantas

No se encontró documentación extensa de retos en cuanto a construcción de plantas. No obstante, (Santoyo & Barragán Reyes, 2010) se deben desarrollar materiales avanzados que se adapten a campos con condiciones extremas.

La IEA (Beerepoot, 2011), considera que existen retos para generar tecnologías avanzadas costa afuera y para recursos geo presurizados y supercríticos (o incluso magma), así como para el aprovechamiento de una amplia base de recursos adicionales.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.4.5 Operación y mantenimiento

Las instalaciones de generación de energía con recursos geotérmicos se enfrentan a un gran número de retos tecnológicos, relacionados con el desempeño de los diversos materiales de construcción y componentes. Con respecto a los materiales metálicos, los mecanismos de degradación incluyen la corrosión general por picadura bajo tensión, la erosión, la fragilidad, la fatiga, y la respuesta a grandes deformaciones por actividad sísmica. En muchos casos, las conexiones soldadas representan un posible "eslabón débil" de la cadena de la integridad mecánica.

En este rubro se identifican los retos siguientes (Amend & Yee, 2013):

- Minimizar la erosión y la corrosión en tuberías;
- Minimizar la depositación y sarro en intercambiadores de calor;
- Mantener la pureza del vapor;
- Predecir y adaptarse a los cambios del vapor en el equipamiento de la planta;
- Encontrar el balance entre eficiencia, corrosión, sarro y costos;
- Desarrollo de intercambiadores de calor con nuevos materiales;
- Mayor eficiencia en la producción combinada de calor y electricidad CHP (por sus siglas en inglés, *Combined Heat and Power*); y
- Desarrollar la recuperación de minerales contenidos en las salmueras geotérmicas.

Así también, se identificaron los siguientes retos (Santoyo & Barragán Reyes, 2010):

- Optimización de ciclos termodinámicos para mejorar la eficiencia de las plantas geo termoeléctricas convencionales y de ciclo binario;
- Aprovechamiento integral de la energía de baja y media temperatura, usando procesos tipo cascada y de cogeneración (ciclos binarios);
- Explotación secundaria de extracción de minerales como política adicional de disposición y/o utilización de fluidos residuales o de desecho; y
- Remoción de contaminantes y técnicas de remediación.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

2.4.6 Otros: Sistemas geotérmicos mejorados (EGS)

No obstante que se eligió identificar los retos con base en las etapas de un proyecto geotérmico, se incluyen también, por la importancia que revisten, los retos identificados para los Sistemas Geotérmicos Mejorados (Enhanced Geothermal Systems EGS). Para estos sistemas, se identifican los siguientes retos (Olasolo, Juárez, Morales, Liarte, & D´Amico, 2016):

- Mejorar los métodos de estimulación para incrementar el volumen del recurso extraído de los yacimientos fracturados; e
- Incrementar la eficiencia de los ciclos de conversión de energía.

Para los mismos sistemas (Rybach, 2010), se consideran los siguientes retos:

- Incorporar tecnología (como podrían ser sensores remotos y control remoto) a los intercambiadores de calor localizados en el fondo del pozo, a fin de detectar y cambiar sus propiedades de acuerdo a las condiciones del yacimiento; y
- Mejorar las técnicas de estimulación (hidráulica, química) para ciertos conjuntos de propiedades de yacimientos.

Por otra parte, la IEA (Beerepoot, 2011), contempla los EGS junto con otros sistemas que requieren de tecnologías geotérmicas avanzadas (como la explotación de fluidos supercríticos, recursos de roca caliente, coproducción aceite y gas, producción costa afuera), e identifica los siguientes retos:

- Coproducir agua caliente de pozos de aceite y gas;
- Capitalizar la experiencia y conocimiento en la exploración de la industria petrolera, para replicar éxitos en la geotermia; y
- Desarrollar tecnologías avanzadas para recursos costa afuera, geo presurizados y supercríticos (o incluso magma).

Asimismo en el plan general del CEMIE-Geo 2014 (Romo-Jones, 2015), menciona el reto denominado "Desarrollo de tecnología para el aprovechamiento de recursos de roca seca caliente mediante sistemas geotérmicos mejorados o artificiales (EGS)".

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

3. ACTIVIDAD EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

3 ACTIVIDAD EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Se realizó un análisis bibliométrico que incluyó publicaciones por año, autores, instituciones, países y tipo de documentos empleando los datos de publicaciones contenidas en las bases *Engineering Village*[1], *Orbit*[2] *e IP Business Intelligence*. Las publicaciones consultadas versaron sobre temas actuales de investigación en energía geotérmica y comprenden el período 2005-2016. Se probó una variedad de estrategias de búsqueda para obtener las publicaciones y patentes más relevantes sobre los temas que se analizan.

La bibliometría es la aplicación del análisis cuantitativo y estadístico a publicaciones para evaluar el desempeño de la investigación (Thomson Reuters, 2008). Por ello, efectuar una bibliometría permite identificar información relevante sobre un tema (autores, instituciones, países, etc.) para entender el pasado, prever el futuro y apoyar el proceso de toma de decisiones. Similarmente, el estudio de patentes es valioso para el análisis competitivo y de tendencias de la tecnología (Daim, Rueda, Martin, & Gerdsri, 2006).

A continuación se presentaran los resultados obtenidos del estudio bibliométrico para temas relacionados con las etapas para el desarrollo de un sistema geotérmico y otros derivados de los tópicos de la energía geotérmica.

3.1 Exploración

Una de las principales etapas para el desarrollo de un sistema geotérmico es la exploración.

La figura 2 muestra la cantidad de artículos publicados por año relacionados con la exploración geotérmica, en la gráfica se aprecia que a partir del año 2008, el número de publicaciones crece de manera exponencial y es en el año 2014, posiblemente por un desfase en la actualización en las bases de datos de artículos indexados, cuando se nota un ligero decremento.

[1] Base de datos de resúmenes y citas que contiene publicaciones como revistas científicas, libros y registros de conferencias de distintos temas (Elsevier, 2016).
[2] Cubre más de 100 oficinas de propiedad intelectual (Questel, 2011).

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

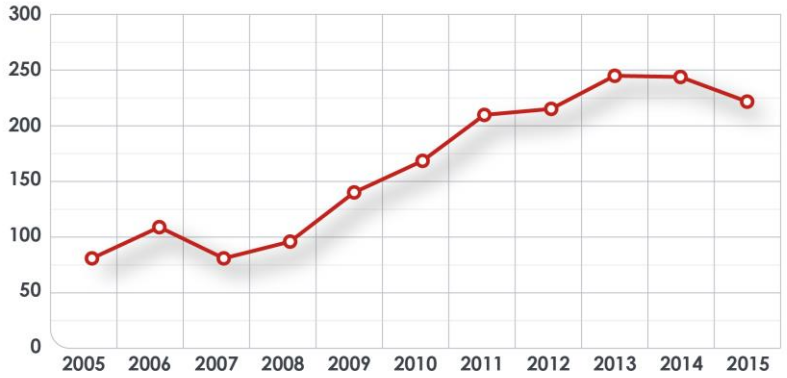


Figura 2. Publicaciones por año acerca de Exploración Geotérmica.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Destacan Estados Unidos y China como los países con más artículos publicados relacionados con la exploración geotérmica. En los resultados de la bibliometría se distingue la Universidad de Nevada como la institución con el mayor número de publicaciones relacionadas con la exploración geotérmica (Figuras 3 y 4).

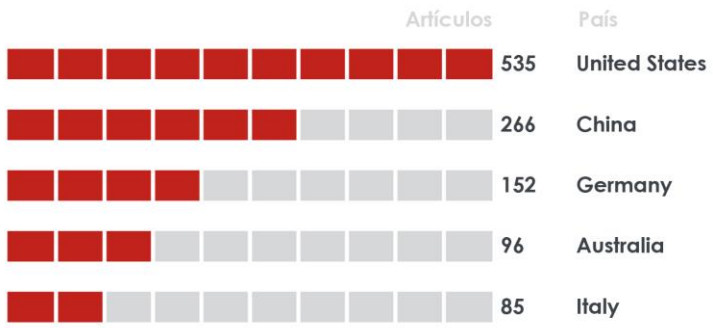


Figura 3. Países con más publicaciones acerca de Exploración Geotérmica.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

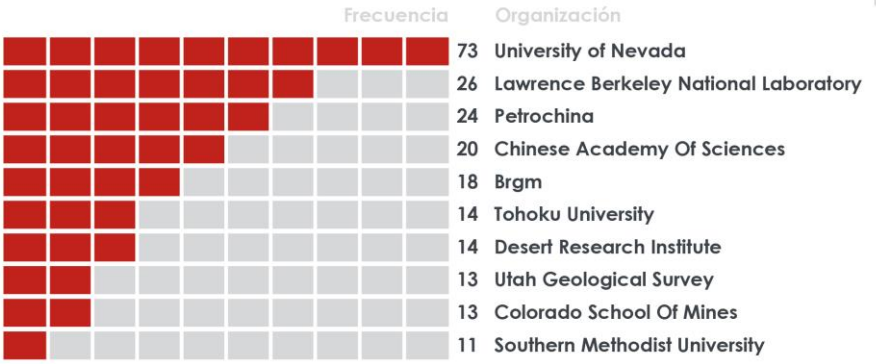


Figura 4. Organizaciones con más publicaciones acerca de Exploración Geotérmica.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

Tópicos como sismología (seismology), transferencia de calor (heat transfer) y recursos de energía renovables (renewable energy resources) son los que con mayor frecuencia se mencionan en las publicaciones de artículos de exploración geotérmica, esto se puede observar en la figura 5.

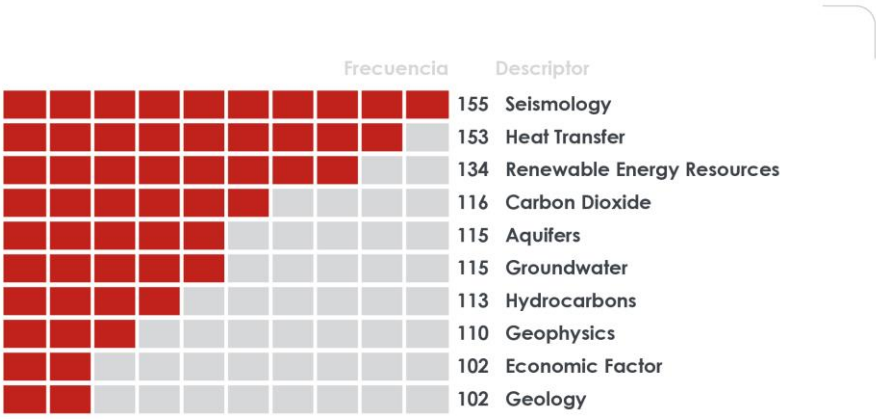


Figura 5. Palabras clave más frecuentes en publicaciones acerca de Exploración Geotérmica.

Fuente: Estudio bibliográfico desarrollado durante la investigación.

Por otro lado, la figura 6 muestra los nombres de aquellos investigadores que se han dado a la tarea de publicar artículos en la tema de la Exploración de Geotermia, identificándose a Mark Coolbaugh como el investigador que encabeza el listado con un total de 41 publicaciones.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

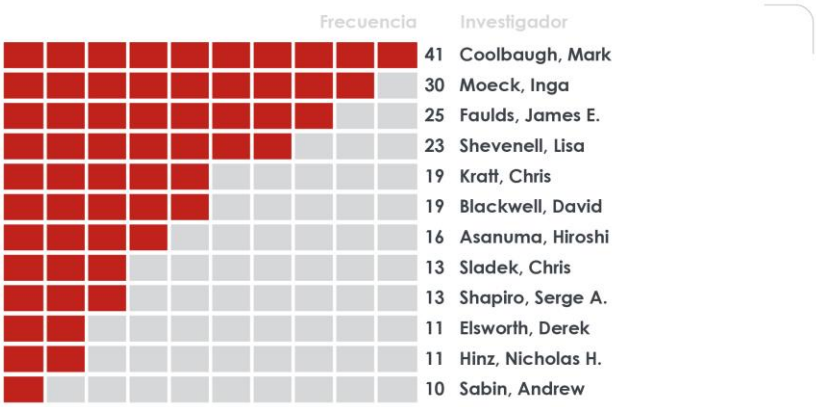


Figura 6. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con Exploración en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

3.1.1 Isótopos

Con el fin de abatir costos en el área de exploración y para mejorar las predicciones de posibles yacimientos geotérmicos, se han desarrollado algunas herramientas geoquímicas, tales como los métodos basados en la determinación de cocientes isotópicos en fluidos para la identificación de su origen. Además, se han desarrollado también nuevos geotermómetros, que permiten evaluar la temperatura del reservorio geotérmico bajo ciertas condiciones.

En la figura 7 destacan Estados Unidos, China e Italia como los países con la mayor cantidad de publicaciones anuales relativas a isótopos en la exploración geotérmica.

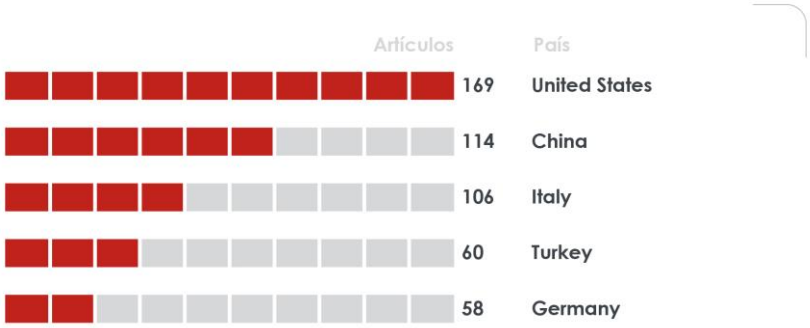


Figura 7. Países con más publicaciones acerca de isótopos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

La figura 8 muestra que es a partir del año 2007 cuando se tiene un incremento continuo en la cantidad de publicaciones relacionadas a isótopos en la exploración geotérmica.

Figura 8. Publicaciones por año acerca de isótopos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

De acuerdo a la figura 9 el Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología, en Italia, es la institución que tiene el mayor número de publicaciones sobre este tópico. Además el italiano Franco Tassi de la Universidad de Florencia de acuerdo a la figura 10 es el investigador con la mayor cantidad de publicaciones sobre isótopos en geotermia.

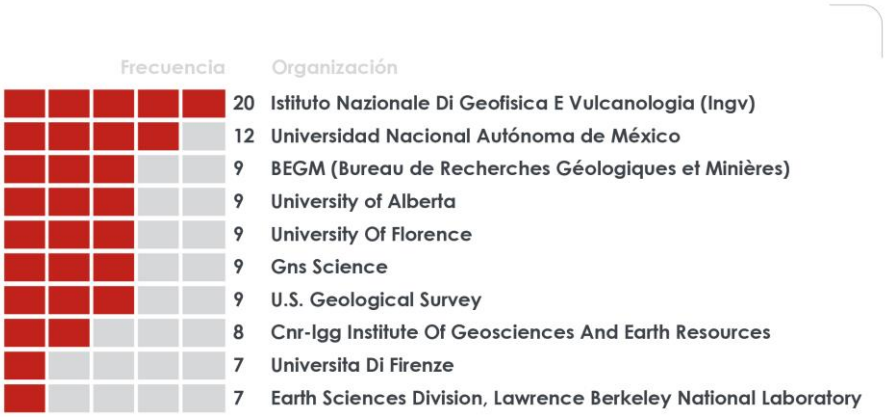


Figura 9. Organizaciones con más publicaciones acerca de isótopos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

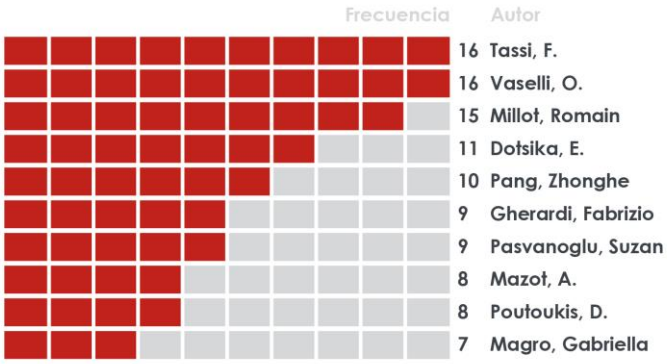


Figura 10. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con isótopos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Es común que se mencionen términos como geoquímica (geochemistry), agua subterránea o también llamados mantos acuíferos (groundwater), dióxido de carbono (carbon dioxide) e hidroquímica (hydrochemistry), entre otros. Véase la figura 11.

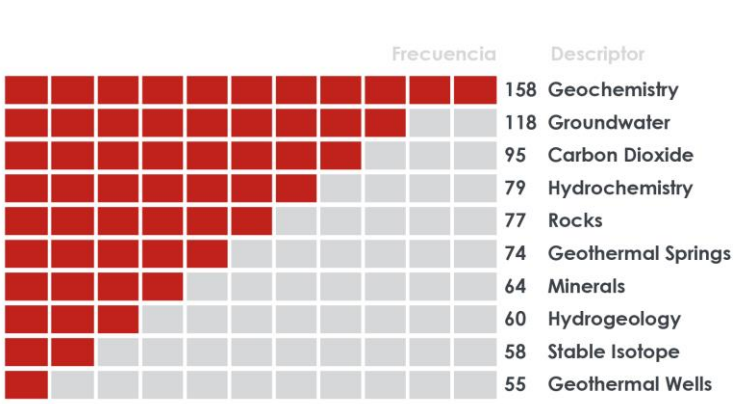


Figura 11. Palabras clave más frecuentes en publicaciones acerca de isótopos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliográfico desarrollado durante la investigación.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

3.1.2 Sensores remotos

Dentro del área de exploración geotérmica se han desarrollado y probado nuevas tecnologías de sensores remotos para el reconocimiento regional y la evaluación de prospectos. En este tema, como resultado del estudio bibliométrico, se puede apreciar que la investigación actual se basa en la radiación infrarroja y las imágenes satelitales ASTER para realizar mapeos de temperatura, reflectancia y elevación del terreno (Figura 12).

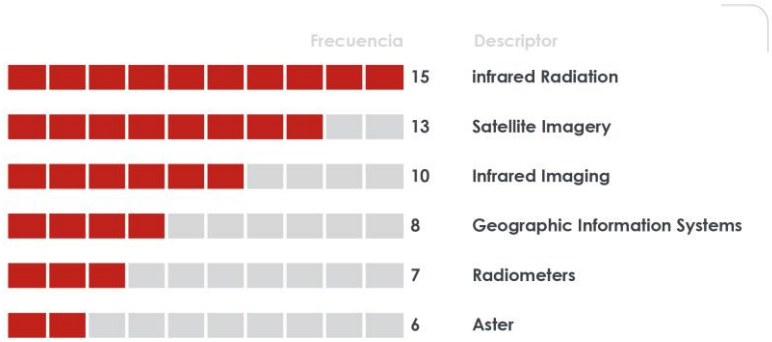


Figura 12. Palabras clave con más registros acerca de sensores remotos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Además en su mayoría, las publicaciones y los registros de patentes con respecto a sensores remotos en el área geotérmica son liderados por Estados Unidos, esto es observable en la figura 13.

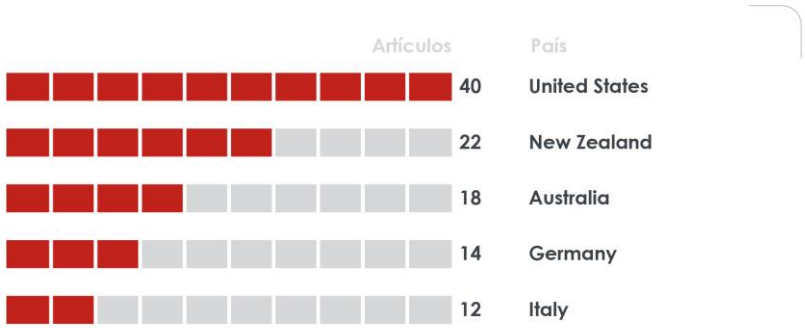


Figura 13. Países con mayor número de publicaciones acerca de sensores remotos geotérmicos.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

En la figura 14 se aprecia que a partir del año 2008 se incrementa significativamente el número de publicaciones acerca del uso de instrumentos para detectar de forma remota datos como temperatura, y la presencia de fluidos durante la exploración geotérmica. Además destaca la Universidad de Reno Nevada como la institución, que de manera sobresaliente, de acuerdo al listado mostrado en la figura 15 publica la mayor cantidad de artículos relativos al uso de sensores remotos en geotermia.

Figura 14. Publicaciones por año acerca de sensores remotos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

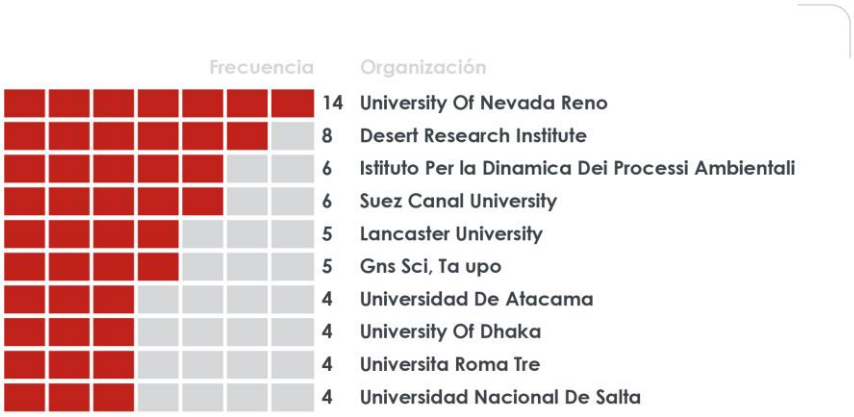


Figura 15. Organizaciones con más publicaciones acerca de sensores remotos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

En la figura 16 se observa a la Doctora Wendy Calvin, encabezando el listado de investigadores con mayor cantidad de artículos publicados acerca de los sensores remotos en geotermia.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

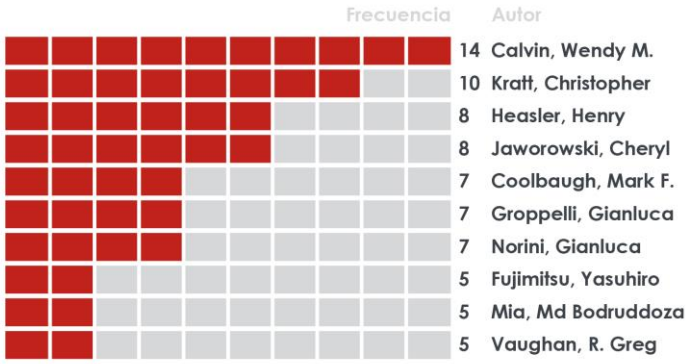


Figura 16. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con sensores remotos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

3.1.3 Sísmica

De acuerdo a la figura 17 durante el período 2009 y 2012 se publicaron alrededor de 60 publicaciones anuales relativos al tópico de sísmica en geotermia. A partir del 2013 la cantidad de publicaciones relacionadas con el uso de la sísmica prácticamente se duplicaron.

Figura 17. Publicaciones por año acerca de sísmica en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Los temas más mencionados en los artículos relativos al uso de sísmica en la etapa de exploración geotérmica, de acuerdo a la figura 18, son fallamiento (faulting), fracturas (fracture) y ondas sísmicas (seismic waves).

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

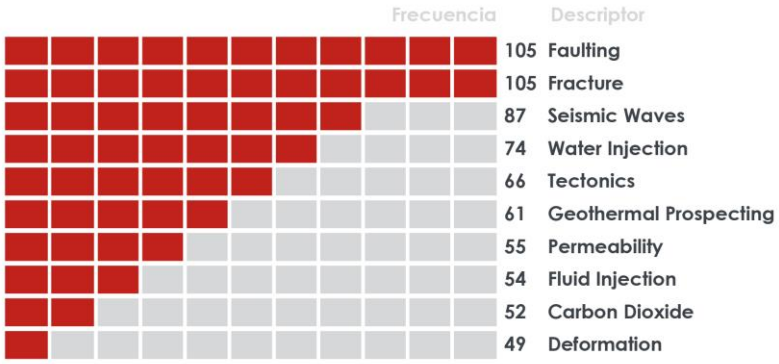


Figura 18. Palabras clave con más registros acerca de sísmica en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

La Universidad Libre de Berlín encabeza el listado de organizaciones con mayor número de publicaciones, mostrado en la figura 19, relativo al uso de sísmica durante la exploración geotérmica. Además el Dr. Serge A. Shapiro, investigador de esta misma institución, es de acuerdo al listado de la figura 20 el Investigador con el mayor número de participaciones en artículos relativos a la sísmica en geotermia.

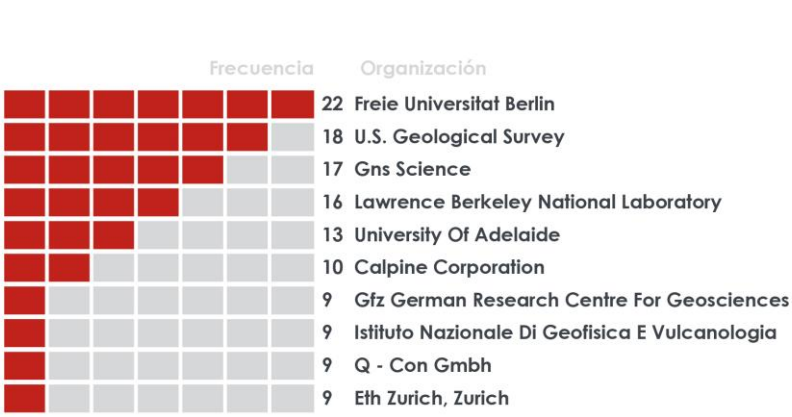


Figura 19. Organizaciones con más publicaciones acerca de sísmica en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

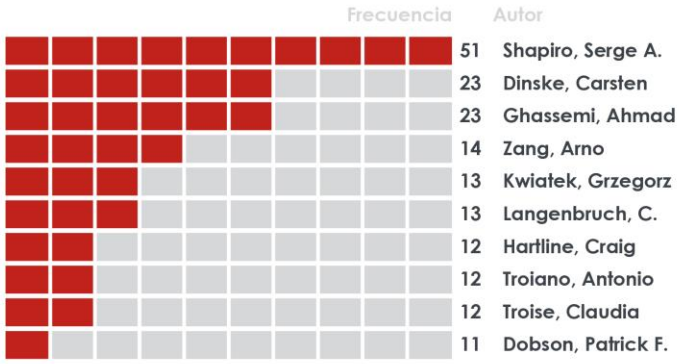


Figura 20. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con sísmica en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

En el mapa de ruta para el desarrollo estratégico de las tecnologías de exploración geotérmica (Phillips, Ziagos, & Thorsteinsson, 2013) consideran que además de la geoquímica, los métodos sísmicos podrían ser de ayuda en la delimitación de temperaturas, ya que los fluidos y su temperatura tienen efectos en la atenuación de las ondas sísmicas. El estudio bibliométrico realizado nos indica que Estados Unidos es el país que, en los últimos diez años, ha realizado más publicaciones y tiene un registro considerable de patentes referentes a la aplicación de estudios sísmicos en la exploración de yacimientos geotérmicos. Ver figura 21.

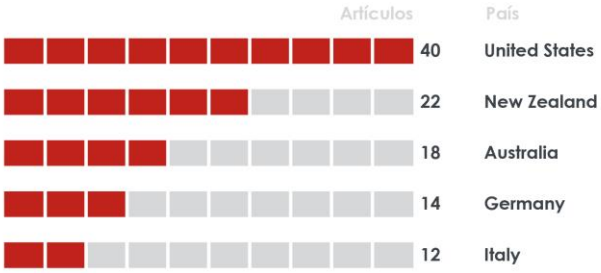


Figura 21. Publicación de artículos de sísmica por país.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

3.1.4 Estudios magnetotelúricos (MT)

La tierra posee un campo magnético estacionario, este campo se produce, entre otras fuentes, por la convección de minerales líquidos eléctricamente conductivos, en la porción externa del núcleo terrestre, (Hiriart Le Bert, y otros, 2011). De esta manera, en la fase de exploración en fuentes de recursos geotérmicos se pueden emplear los métodos geofísicos electromagnéticos (EM) y magnetotelúricos (MT).

Hasta el año 2011 solamente se publicaban alrededor de 10 publicaciones anuales sobre estudios magnetotelúricos en la exploración geotérmica. Es a partir del año 2012 cuando la cantidad de publicaciones relacionadas con estos estudios tiene un crecimiento continuo que se percibe exponencial para el año 2014, según la figura 22 se ha logrado publicar hasta 30 artículos en éste último año graficado.

Figura 22. Publicaciones por año acerca de estudios magnetotelúricos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Los Estados Unidos es por mucho el país con el mayor número de publicaciones de acuerdo al listado mostrado en la figura 23.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

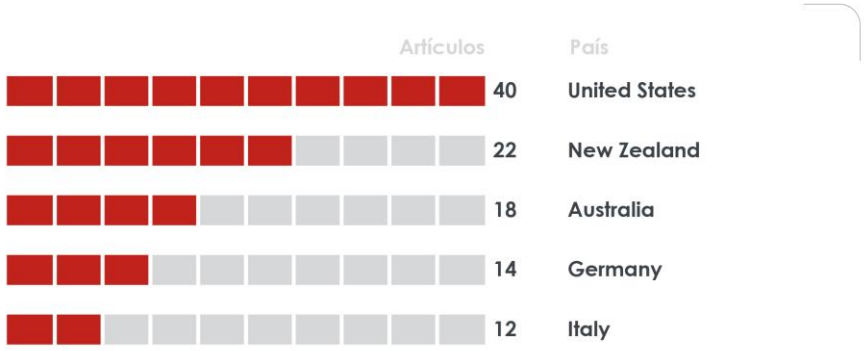


Figura 23. Publicaciones por país con respecto a estudios magnetotelúricos.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

Temas como resistividad eléctrica (electrical resistivity), prospección geotérmica (geotermal prospecting) y geofísica (geophysics) son entre otros los más mencionados en las publicaciones relacionadas a los estudios magnetotelúricos, véase la figura 24.

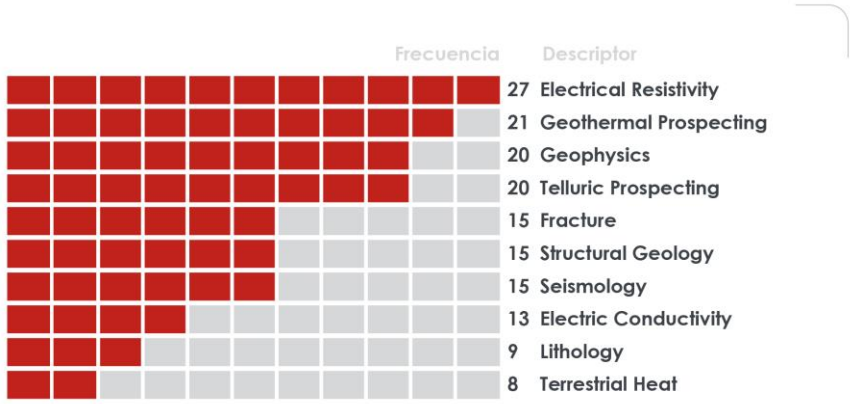


Figura 24. Palabras clave con más registros acerca de estudios magnetotelúricos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

El Dr. Stephan Thiel investigador de la Universidad de Adelaide en Australia encabeza el listado de investigadores con mayor participación en artículos relacionados con estudios magnetotelúricos mostrado en la figura 25.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

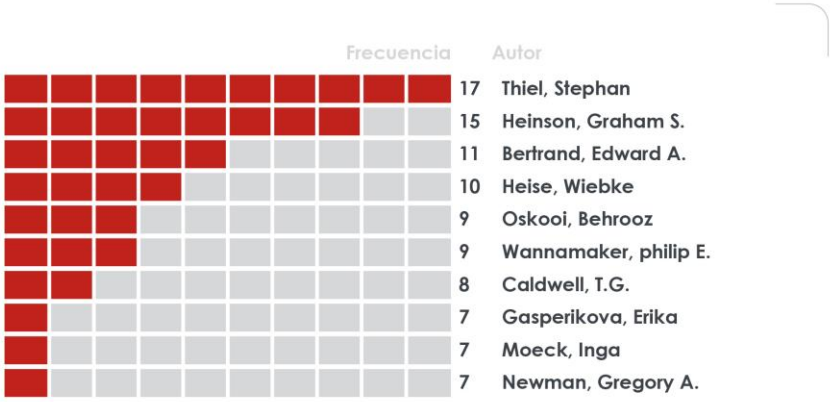


Figura 25. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con estudios magnetotelúricos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Además, en la figura 26 se aprecia que GNS Science, es la organización que en los últimos años ha registrado más estudios magnetotelúricos.

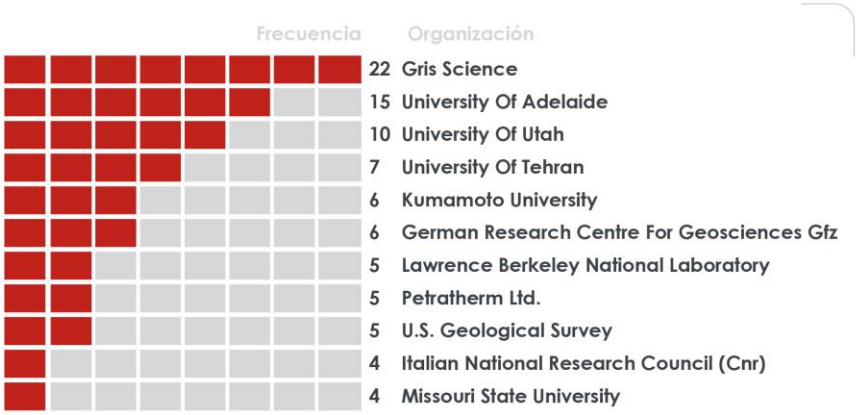


Figura 26. Organizaciones con más registros acerca de estudios magnetotelúricos.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

3.1.5 Estudios electromagnéticos (EM)

La cantidad de publicaciones de artículos relacionados con estudios electromagnéticos para caracterizar fluidos geotérmicos, de acuerdo a la figura 27, ha sido variable año con año, pero con un incremento en 2014.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

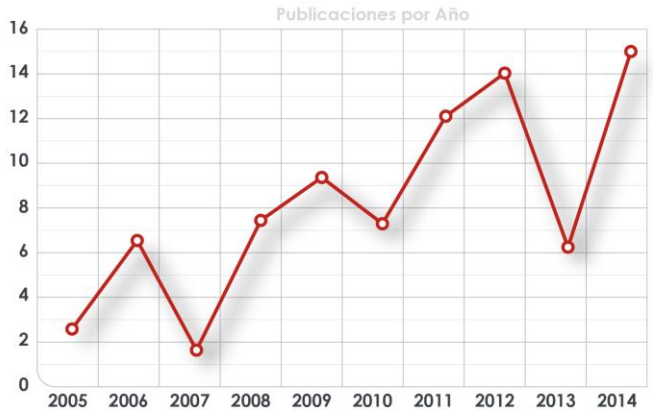


Figura 27. Publicaciones por año acerca de estudios electromagnéticos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Las publicaciones relacionadas con los estudios electromagnéticos en geotermia, generalmente mencionan temas como prospección geotérmica (geotermal prospecting), resistividad eléctrica (electrical resistivity) y geofísica (geophysics), entre otros, esto puede ser observado en la figura 28.

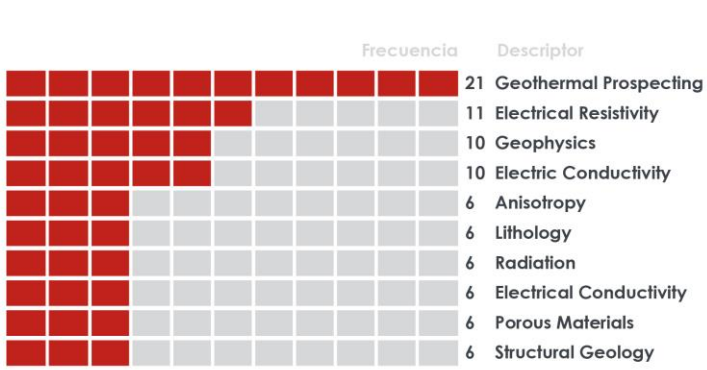


Figura 28. Palabras clave con más registros acerca de estudios electromagnéticos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Los Estado Unidos es el país, que de acuerdo a la figura 29, ha publicado el mayor número de estudios electromagnéticos y es el Dr. Stephan Thiel el investigador que tiene el mayor número de artículos publicados relacionados en este tipo de estudios. Véase la figura 30.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

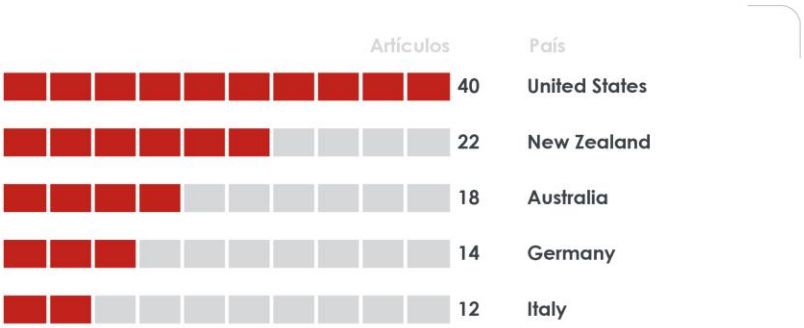


Figura 29. Publicaciones por país con respecto a estudios electromagnéticos.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación

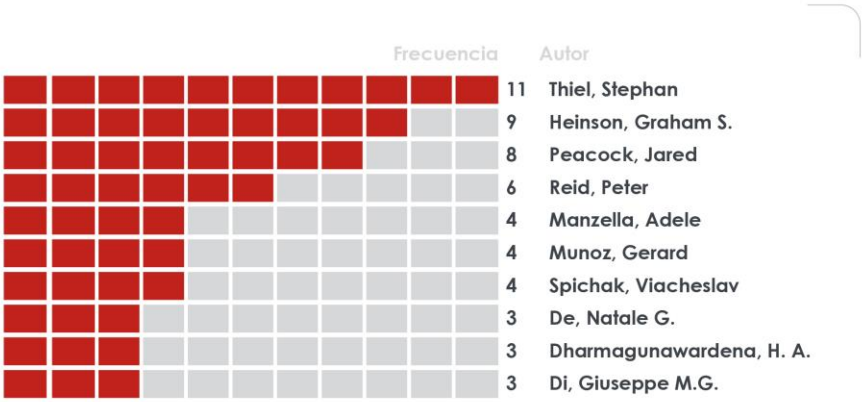


Figura 30. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con estudios electromagnéticos en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

En la figura 31 se aprecia que la Universidad de Adelaida, en Australia, es la institución que en los últimos años ha generado muchas de las publicaciones respecto a estudios electromagnéticos.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 31. Organizaciones con más registros acerca de estudios electromagnéticos.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

3.2 Perforación

Al final de la fase de exploración superficial, y posterior a las perforaciones exploratorias, para el desarrollo del campo geotérmico se perforan pozos de producción y reinyección. En los resultados de la bibliometría destacan, entre otros, los siguientes temas: temperatura (temperature), fuentes de energía (energy source), transferencia de calor (heat transfer), recursos de energía renovable (renewable energy resources) y factor económico (economic factor) (Figura 32).

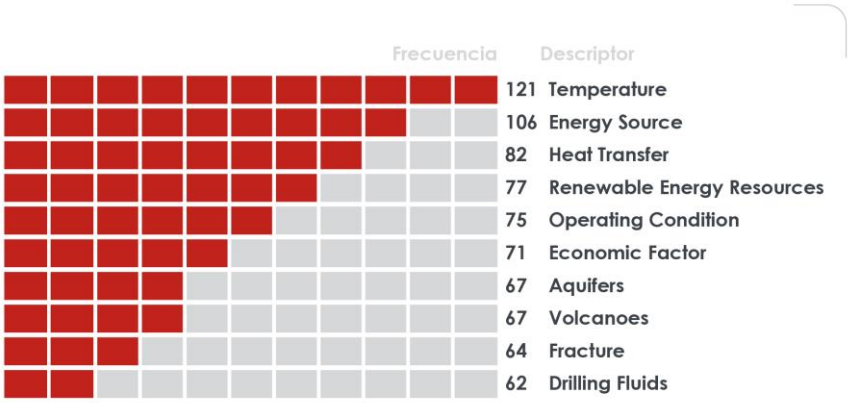


Figura 32. Palabras claves relacionadas con perforación en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

En referencia al número de publicaciones por año en el tema de perforación en geotermia y con la ayuda de la figura 33, se observa que es a partir del año 2008

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

donde se tiene un marcado incremento en las publicaciones, aunque cierra 2015 con una disminución.

Figura 33. Publicaciones por año acerca de perforación en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

La mayoría de las publicaciones relacionadas con perforación en geotermia son realizadas en los Estados Unidos; otros países que también tienen un considerable número de publicaciones son Alemania y China (Figura 34).

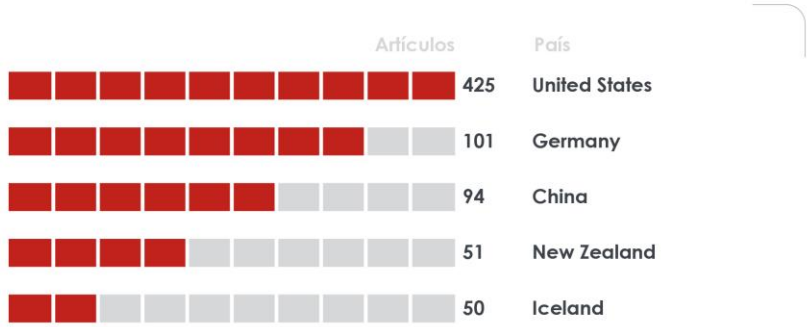


Figura 34. Artículos publicados por país sobre temas de perforación en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Las publicaciones son emitidas tanto por universidades como por empresas y laboratorios reconocidos en la industria geotérmica. Destaca la Universidad de Nevada como la institución con mayor número de artículos publicados, además del Laboratorio Nacional Sandia del departamento de Energía de los Estados Unidos (Figura 35).

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

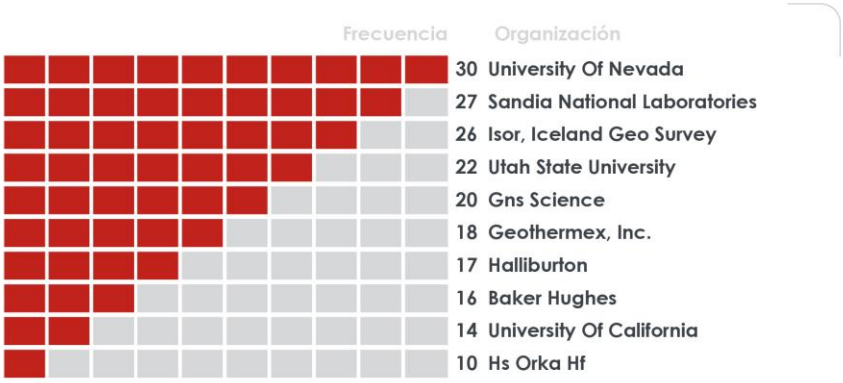


Figura 35. Organizaciones con más registros acerca de perforación en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

3.3 Fluidos súper calientes

De acuerdo al mapa de ruta tecnológica de energía geotérmica (Beerepoot, 2011), más de dos tercios de la energía generada actualmente provienen de recursos geotérmicos de alta y mediana entalpía, utilizando plantas de vapor flash y plantas de vapor seco. Las temperaturas para el aprovechamiento de estos recursos son generalmente superiores 180°C.

Con el proyecto de perforación profunda en Islandia (Iceland Deep Drilling Project *IDDP*) se inició la investigación de los sistemas geotérmicos súper calientes, cuyo fin es determinar si utilizando fluidos hidrotermales supercríticos se puede incrementar su poder económico productivo con respecto a los sistemas hidrotermales de alta y mediana entalpía.

En las lecciones aprendidas del proyecto IDDP (Gudmundur, 2015), menciona que el principal objetivo económico del IDDP es encontrar fluidos geotérmicos súper calientes, entre 450 y 600°C, en profundidades factibles de alcanzar a través de la perforación de pozos. El proyecto busca investigar si este tipo de recursos pueden ser aprovechados para la generación de electricidad, considerando que los fluidos súper calientes son más agresivos químicamente que los fluidos hidrotermales convencionales. Por ~~lo~~ tanto, a través del proyecto se debe también determinar si los materiales pueden resistir este tipo de condiciones.

El resultado del estudio bibliométrico en la Figura 36 muestra que con respecto a los recursos súper calientes, es muy reducido el material publicado, siendo 2014 el año con mayor número de publicaciones acerca de este tópico.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

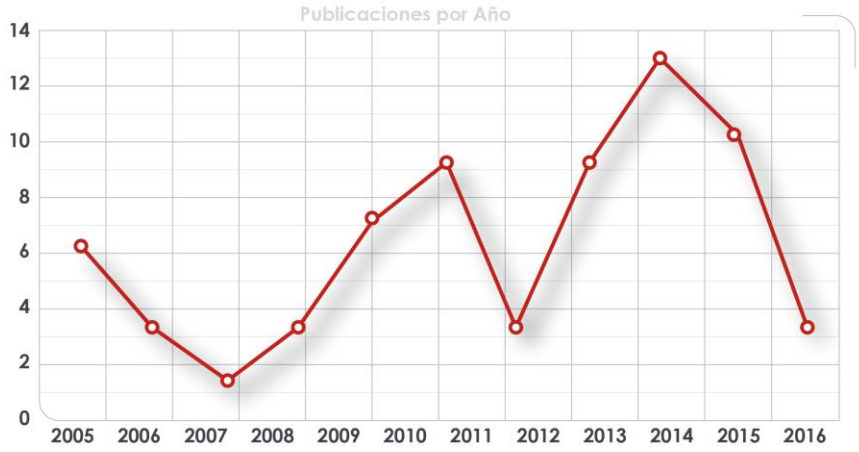


Figura 36. Publicaciones por año acerca de fluidos súper calientes.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

En la figura 37 se puede apreciar que los temas que comúnmente se encuentran en los artículos relacionados con los fluidos súper calientes son: termodinámica (thermodynamics), componentes inorgánicos (inorganic compounds), corrosión de metales (metal corrosión), entre otros.

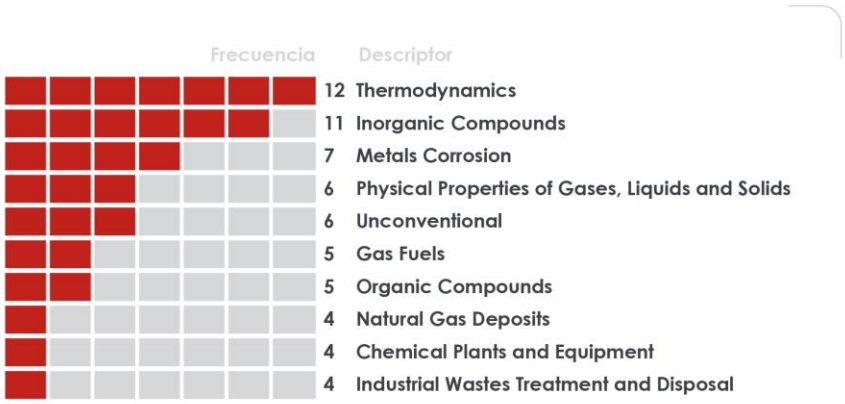


Figura 37. Palabras claves relacionadas con fluidos súper calientes.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Los Estados Unidos e Islandia son los países con mayores artículos publicados anualmente en temas de fluidos súper calientes según se muestra en la figura 38.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

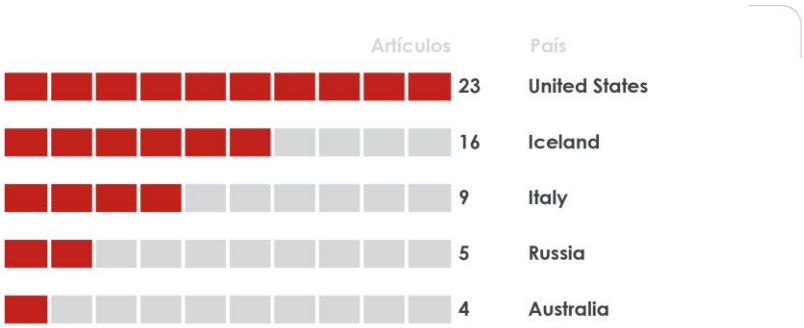


Figura 38. Artículos publicados por país sobre temas de fluidos súper calientes.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Aunque Estados Unidos es el país que aglomera el mayor número de instituciones que han realizado publicaciones relacionadas con los fluidos súper calientes (figura 39), también destacan la Universidad y el Centro de Innovación de Islandia como las organizaciones con mayor número de publicaciones respecto a este tipo de fluido.

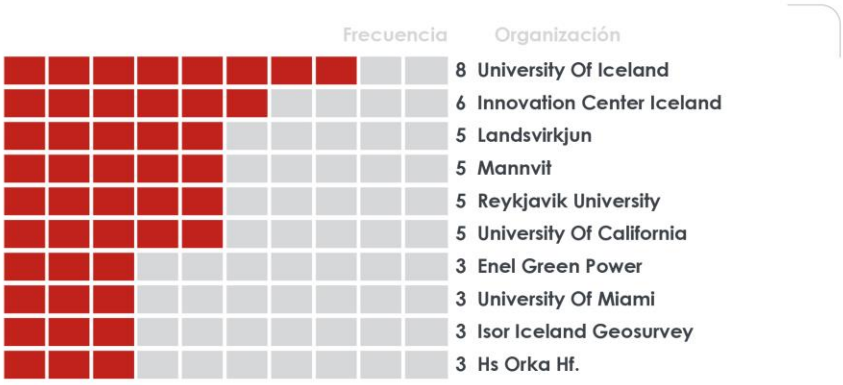


Figura 39. Organizaciones con más registros acerca de fluidos súper calientes en geotermia.

Fuente: Estudio bibliométrico realizado durante la investigación.

El profesor en ciencias de los materiales Ingolfur Thorbjomsson de Islandia destaca en la figura 40 como el investigador con mayor número de artículos publicados acerca de fluidos súper calientes.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

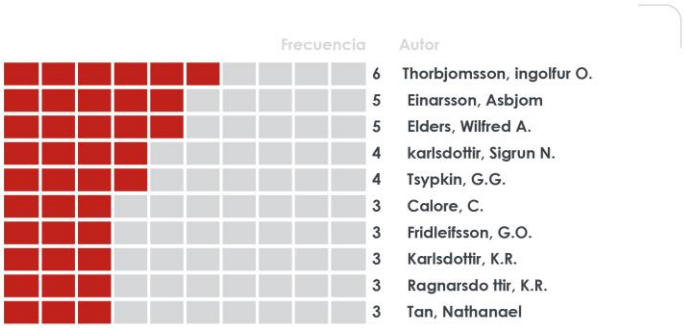


Figura 40. Investigadores con mayor número de artículos publicados relacionados con fluidos súper calientes.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación

3.4 Patentes identificadas en generación de electricidad

Como parte del análisis bibliométrico para el período comprendido de 1995-2015, se obtuvieron datos referentes a las patentes registradas, para la generación de electricidad a través de recursos geotérmicos.

Los registros de patentes para la generación de electricidad con recursos geotérmicos muestran notable variabilidad en el período de análisis, en donde es observable que existen años como 1999 y 2005 donde se tienen las inflexiones con menor número de familias de patentes registradas, por el contrario sucede en los años 2006 y 2012 donde se alcanzan los picos más altos, mostrando que durante estos dos años se registró el mayor número de patentes. Esto es observable en la figura 41.

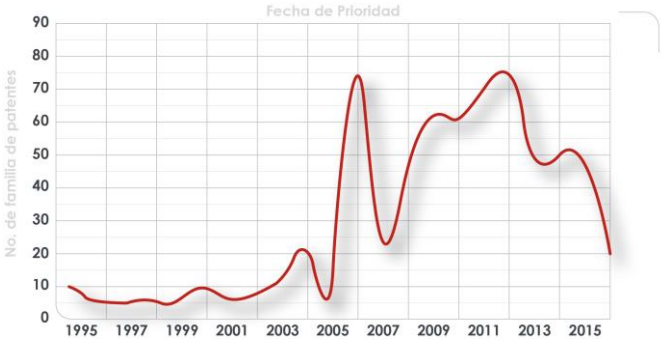


Figura 41. Distribución anual de familia de patentes registradas para la generación de electricidad con recursos geotérmicos.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Los registros de patentes para la generación de electricidad con recursos geotérmicos muestran a China y Estados Unidos como los países con el mayor número de registros de patentes. En la figura 42 se observa cómo estos dos países tienen un número muy similar de patentes, sin embargo el país que les antecede muestra una diferencia de magnitud considerable, Japón, éste último muestra un número muy similar a países como República de Corea, Alemania y Taiwan.

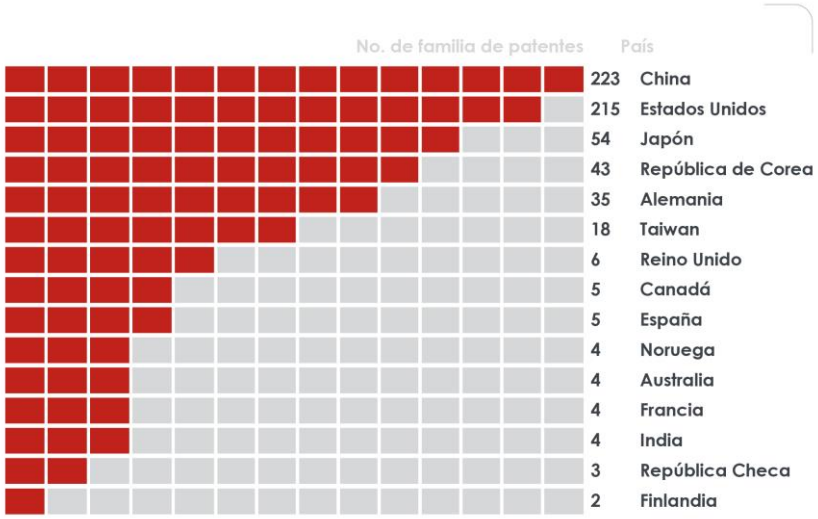


Figura 42. Distribución por país de familia de patentes registradas para la generación de electricidad a través de recursos geotérmicos.

Fuente Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

3.5 Patentes identificadas para los usos directos de la energía geotérmica

De igual forma, en el análisis bibliométrico para el período comprendido de 1995-2015, se obtuvieron datos referentes a las patentes registradas para usos directos de la geotermia a través de recursos geotérmicos.

Los registros de patentes para los usos directos de los recursos geotérmicos muestran en general, un crecimiento notable en el período de análisis. Se observa que el período comprendido entre 1995 a 2001 registró el menor número de patentes, por el contrario el período de 2001 a 2013 muestra el mayor número de registros.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Figura 43. Distribución anual de familia de patentes registradas para los usos directos de los recursos geotérmicos.

Fuente: Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

Los registros de patentes para usos directos de los recursos geotérmicos muestran a República de Corea como el país con el mayor número de registros de patentes. En la figura 44 se observa como este país tiene una diferencia de aproximadamente el 50% de publicaciones por arriba del país que le antecede Japón.

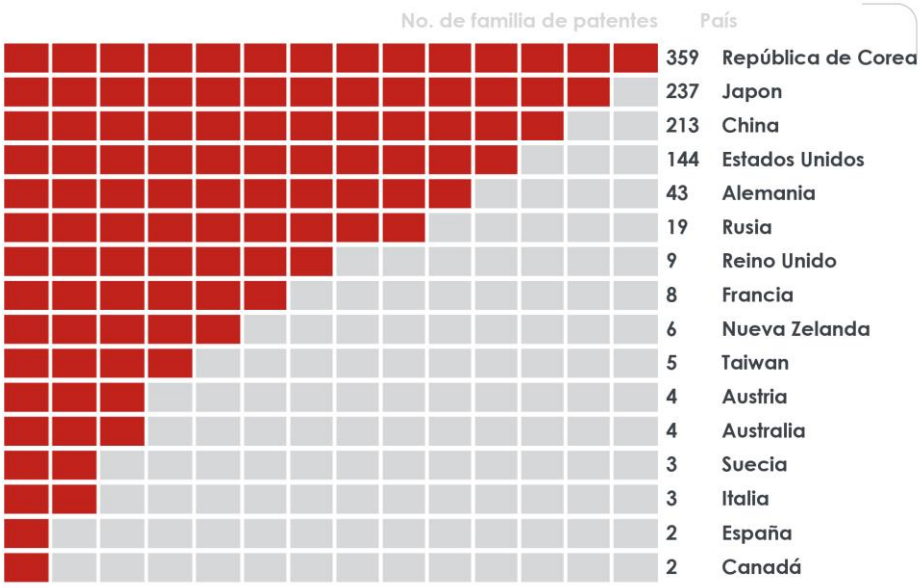
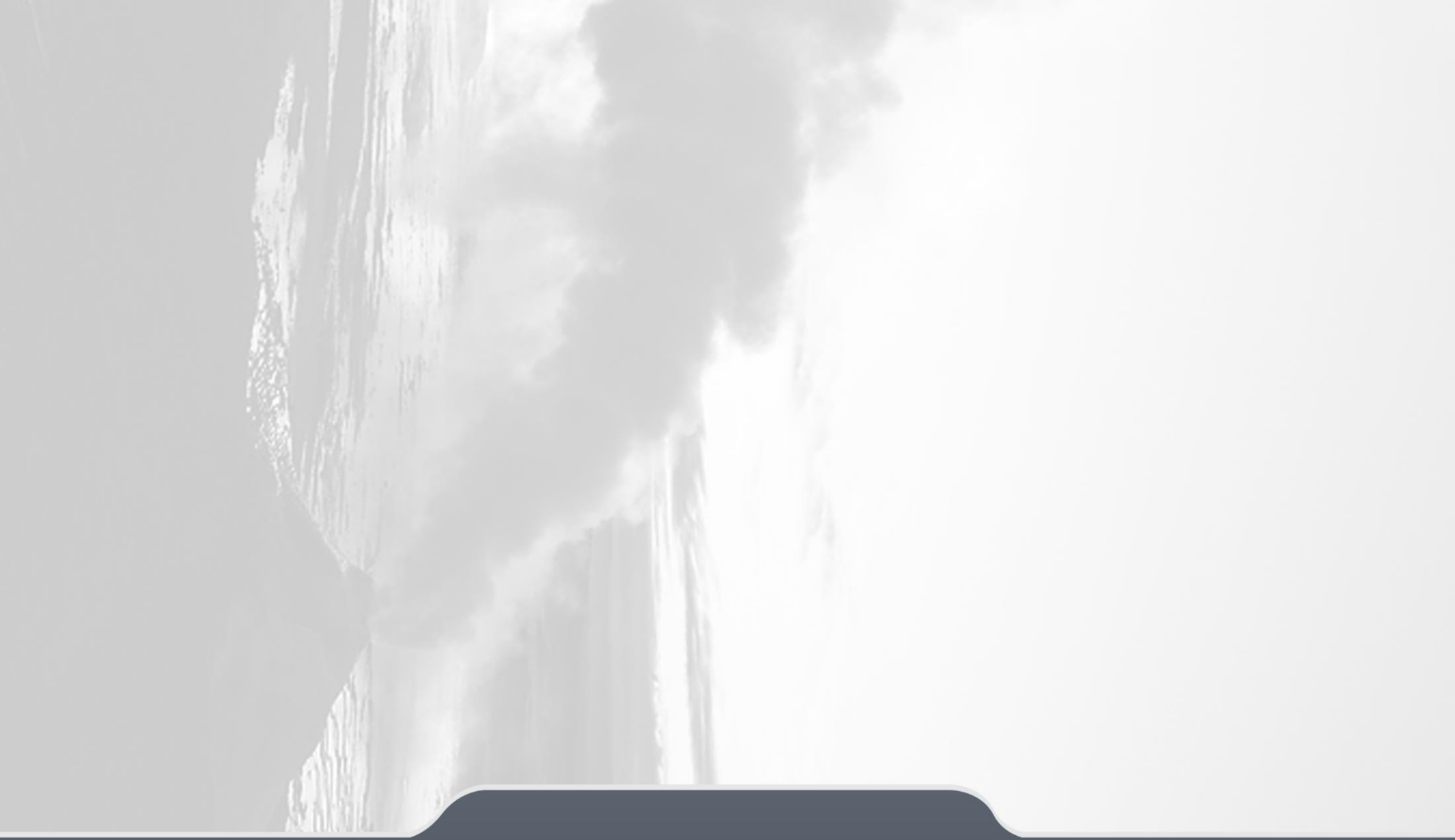


Figura 44. Distribución por país de familia de patentes registradas para los usos directos de los recursos geotérmicos.

Fuente Estudio bibliométrico desarrollado durante la investigación.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.



4.

OTROS ASPECTOS IDENTIFICADOS PARA EL DESPLIEGUE DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

4 OTROS ASPECTOS IDENTIFICADOS PARA EL DESPLIEGUE DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

De acuerdo al Consejo Europeo de Energía Geotérmica (2007), los principales instrumentos para lograr un incremento sustentable en el uso de los recursos geotérmicos son:

- Incentivos financieros;
- Regulaciones;
- Estándares;
- Difusión;
- Capacitación; y
- Proyectos demostrativos de I&D.

El Mapa de Ruta de Geotermia de la IEA (Beerepoot, 2011), el Seminario Internacional de Geotermia en México (2015) y la Asociación Internacional de Geotermia (*IGA*, por sus siglas en inglés) consideran las siguientes acciones para fomentar el uso de los recursos geotérmicos.

4.1 Incentivos financieros

Aunque no precisamente para la generación de energía eléctrica, Alemania, durante cuatro años, estableció un subsidio por KW de calor instalado, lo que dio como resultado un desarrollo del mercado de bombas de calor. Se instalaron alrededor de 1000 nuevas plantas por año de aplicaciones geotérmicas. El crecimiento anterior continuó incluso después de haber finalizado el subsidio. Además, Alemania extendió en 2015 una línea de crédito para proyectos de energía geotérmica en Centroamérica.

La Unión Europea lanzó el programa ELAN (*European Union and Latin America business services and innovation network*), para promover el desarrollo de negocios en América Latina.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Comisión Europea tienen un acuerdo para fomentar la cooperación en proyectos geotérmicos; así mismo existen grupos financieros como el Banco Europeo de Inversiones (BEI) y el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF) que también apoyan estos proyectos. Además, bancos de desarrollo bilaterales, incluyendo la propiedad estatal alemana KfW, la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) están financiando el desarrollo geotérmico en todo el mundo.

Estados Unidos creó el programa FORGE (*Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy*) dedicado a desarrollar, probar y acelerar avances en técnicas y

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

tecnologías en EGS (*Enhanced Geothermal System*). Además, dispone del apoyo financiero del Departamento de Energía.

El Banco europeo para la reconstrucción y desarrollo (*EBRD* por sus siglas en inglés) apoyó la cofinanciación del proyecto Efeler, la planta de energía geotérmica más grande en Turquía.

En Turquía el Turcas Petrol AS planea invertir en energía renovable, aprovechando incentivos del gobierno para energías limpias.

Filipinas realiza préstamos para exploración, dispone de participación extranjera y financiamiento de capital de riesgo para nuevos desarrollos.

En Islandia, el IDDP (*Iceland Deep Drilling Project*) es un consorcio entre el gobierno y las principales compañías de energía del país para la investigación de fluidos súper calientes.

En Asia se crean plataformas de cooperación entre los países en desarrollo respecto a las reformas de políticas, mecanismos de financiamiento, desarrollo de recursos humanos y la tecnología. Algunos ejemplos son la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN), la Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) y los acuerdos bilaterales de Indonesia con Nueva Zelanda y Filipinas.

En Indonesia se realizan dos proyectos geotérmicos, con financiamiento del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL); y para atraer inversiones del sector privado se implementó una serie de políticas de energía geotérmica en el año 2010. Tales políticas incluyen incentivos fiscales y exenciones de derechos de aduana y del pago de impuestos en las transacciones de importación de tecnología geotérmica.

4.2 Regulaciones

A partir de un taller realizado en Kistelek en el 2015, Hungría definió un marco regulatorio para la energía geotérmica que tiene como finalidad los siguientes propósitos:

- Garantizar que la explotación de los recursos geotérmicos sea ambientalmente respetuosa;
- Se haga un uso amigable de la energía geotérmica, en particular la protección de las aguas del subsuelo que son para el consumo humano y de animales;
- Regulaciones del uso sustentable y seguro de la energía geotérmica; y
- Garantizar a los inversionistas el uso correcto de la energía en un área dada.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

En Italia, el marco regulatorio ha sido modificado para impulsar el desarrollo geotérmico, por ejemplo, hay liberación de mercado, incentivos para proyectos en nuevas áreas e incentivos para proyectos ambientalmente amistosos.

4.3 Estándares

Actualmente sólo existen algunos estándares en pocos países, específicamente para sistemas geotermales someros (por ejemplo VDI 4640 en Alemania). Los estándares están relacionados principalmente a la exploración, diseño e instalación.

La comunidad mundial geotérmica, a través de la IGA (*International Geothermal Asociation*), está trabajando en el desarrollo de protocolos estándar internacional para su adopción en otras partes del mundo.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Amend, B., & Yee, J. (2013). *Selective Application of Corrosion Resistant Alloys Mitigates Corrosion in pH-Modified Geothermal Fluids.* Houston: NACE International.

Aposteanu, A., Berre, I., Bertani, R., Clauser, C., Jaudin, F., Kujbus, A., & Urchueguia, J. (2014). *Getohermal Technology Roadmap.* Bruselas: Secretariat of the Geothermal Panel of the RHC-Platform (EGEC).

Beerepoot, M. (2011). *Technology Roadmap-Geothermal Heat and Power.* París: International Energy Agency.

Daim, T. U., Rueda, G., Martin, H., & Gerdsri, P. (2006). Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 981-1012. doi:10.1016/j.techfore.2006.04.004

Diario Oficial de la Federación. (24 de 12 de 2015). Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación*.

ESMAP. (2012). *Manual de Geotermia: Como planificar y financiar la generación de electricidad.* .

Gudmundur, O. (2015). *Iceland Deep Drilling Project - IDDP.* Iceland.

Harvey Consultants Ltd. (2013). *Geohtermal Exploration Best Practices.* Bochum.

Hiriart Le Bert, G., Gutiérrez-Negrín, L., Quijano, J., Ornelas, A., Espindola, S., & Hernández, I. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmia en México.* Ciudad de México.

Kagel, A. (2008). *The State of Geothermal Technology Part II: Surface Technology.*

Lee, M. (2014). *Operational Challenges in Geothermal Power Generation.*

Olasolo, P., Juárez, M., Morales, M., Liarte, I., & D´Amico, S. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133-144.

Phillips, B., Ziagos, J., & Thorsteinsson, H. (2013). A Roadmap for Strategic Development of Geothermal Exploration Technologies. *Proceedings: Thirty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.

REN21. (2015). *Renewables 2015 Global Status Report.* París: REN21 Secretariat.

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

Romo-Jones, J. (2015). The Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CEMIE-Geo). *Proceedings World Geothermal Congress*, (pág. 7). Melbourne.

Rybach, L. (2010). The Future of Geothermal Energy and its Challenges. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.

Santoyo, E., & Barragán Reyes, R. (2010). *Energía Geotérmica. Ciencia*. abril-junio, 40-51.

Sigfusson, B., & Uihlein, A. (2016). 2015 JRC Geothermal Energy Status Report.

Thomson Reuters. (2008). *Using Bibliometrics.* Recuperado el 07 de 2016, de A guide to evaluating research performance with citation data: http://ip-science.thomsonreuters.com/m/pdfs/325133_thomson.pdf

Ziagos, J., Phillips, B., Boyd, L., & Jelacic, A. (2013). *Technology Roadmap for Strategic Development of Enhanced Geothermal Systems.*

copyright © Instituto Mexicano del Petróleo
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

copyright © **Instituto Mexicano del Petróleo**
Queda prohibido copiar, reproducir, distribuir, publicar, transmitir o en cualquier modo explotar cualquier parte de este documento sin la autorización previa por escrito de la Secretaría de Energía o del Instituto Mexicano del Petróleo.