



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Potencial Geotérmico Depresión de La Selva

Autor: Susana Piqueras Ibáñez

Tutor: Dr. Albert Casas Ponsati

Curso académico: 2017-2018

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



INDICE DE CONTENIDOS

1. Objetivos y alcance	2
2. Introducción	2
3. Energía geotérmica	3
3.1. Gradiente geotérmico	3
3.2. Flujo y propagación del calor terrestre	3
3.3. Tipos de recursos geotérmicos	4
3.3.1. Aprovechamiento según el recurso geotérmico	5
3.3.2. Tipos de centrales según el recurso geotérmico	6
3.4. Tipos de Yacimientos Geotérmicos	6
3.4.1. Enhanced Geothermal System EGS	8
3.4.1.1. Funcionamiento sistema geotérmico estimulado EGS	8
3.4.1.2. Aprovechamiento del yacimiento EGS en Europa	9
4. Estado del arte de la energía geotérmica	9
4.1. Nivel mundial	9
4.2. Nivel europeo	10
4.3. Nivel estatal	11
5. Caso de estudio: Depresión de La Selva	12
5.1. Contexto geográfico	12
5.2. Contexto geológico	12
5.3. Hidrogeología	14
5.3.1. Interacción agua-roca	14
5.3.1.1. Geotermómetros	14
5.3.1.1.1. Geotermómetros químicos	14
5.3.1.1.2. Geotermómetros isotópicos	16
5.3.1.2. Geoquímica de gases	16
5.3.2. Caracterización fluidos termales	17
5.3.2.1 Modelo de circulación y recarga de fluidos	17
5.4. Potencial aprovechamiento geotérmico de la cuenca de La Selva	21
5.4.1. Contexto distensivo	21
5.4.2. Yacimiento EGS	23
6. Modelamiento de circulación geotérmica con <i>Hydrotherm Interactive</i>	25
6.1. Software <i>Hydrotherm Interactive</i>	25
6.1.1. Limitaciones	26
6.2. Modelamiento preliminar en el área de estudio	26
6.3. Modelamiento propuesto	26
6.3.1. Resultados	28
7. Conclusiones	31
8. Referencias bibliográficas	32
9. Anexos	34
10. Abstract	35

1. Objetivos y alcance

El desarrollo de un proyecto de explotación de energía geotérmica es complejo e integra la suma de muchos esfuerzos enfocados en primer término en el estudio en detalle del subsuelo. En la actualidad la energía de origen geotérmico se aprovecha principalmente en ambientes geológicamente favorables para ello. La tendencia a futuro es que el conocimiento y los avances tecnológicos ofrezcan la posibilidad de explotarla en otros contextos. En Cataluña existen sectores contemplados como potenciales yacimientos geotérmicos.

Este trabajo se centra en uno de ellos, la cuenca de La Selva. Por una parte pretende integrar la información bibliográfica disponible que caracteriza los rasgos que permiten considerarla objeto de interés y valorar su potencial geotérmico. Esta investigación se complementa con la elaboración propia de varios recursos que facilitan el entendimiento y visualización de conceptos, como los mapas incluidos en los anexos realizados con *Quantum Gis*, un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre, así como el trazado del modelo geoestructural propuesto elaborado con la herramienta de dibujo también gratuita *Inkscape*.

Por otra parte se llevará a cabo una modelización geotérmica con el software *Hydrotherm Interactive* que analiza la circulación de fluidos en contextos hidrotermales. En base a una modelización preliminar realizada en la cuenca de La Selva, este trabajo pretende repetir la simulación, proponiendo un nuevo modelo geoestructural más ajustado a la realidad y diferente al inicial, donde se valorarán los resultados extraídos.

Este trabajo aspira a ser un aporte más en la labor pedagógica que actualmente necesita esta energía renovable todavía minoritaria desde un punto de vista geológico, así como una contribución a hacer visible el potencial geotérmico de Cataluña.

2. Introducción

El amplio consenso alcanzado por la comunidad científica sobre la existencia de un calentamiento global se ha constatado con un ascenso de la temperatura media terrestre durante el último siglo de unos 0.6°C. Gobiernos y población están cada vez más concienciados de la necesidad de contribuir para frenar los efectos negativos de este aumento.

El cambio de perspectiva ha fomentado la demanda creciente de fuentes de energía primaria de origen renovable. Una de las fuentes menos conocida es la energía geotérmica.

Actualmente este tipo de energía se aprovecha en países que cuentan con una geología favorable para ello, pero los avances tecnológicos están permitiendo otras opciones de aprovechamiento del recurso, como es el caso de la zona de estudio de este trabajo, donde la presencia de indicios como surgencias termales o su propio contexto geológico, han alentado al estudio de su potencial.

3. Energía geotérmica

La energía geotérmica es la única fuente de energía primaria renovable que no proviene de la radiación solar. A diferencia del resto, su origen se encuentra en el interior de la Tierra, donde el calor generado por la desintegración de isótopos radioactivos en la corteza y en el manto, especialmente U^{238} , U^{235} , Th^{232} y K^{40} o el calor latente de cristalización originado en la transición entre el núcleo externo (líquido) y el núcleo interno (sólido); se desplaza hacia la superficie por conducción y convección, permitiendo su aprovechamiento como recurso térmico y/o como fuente para la generación de electricidad.

3.1. Gradiente geotérmico

La temperatura del subsuelo aumenta con la profundidad una media de $3^{\circ}C$ cada 100 metros. La relación entre la variación de temperatura y la profundidad recibe el nombre de gradiente geotérmico.

Además del calor generado por los procesos físicos y químicos que se dan en el interior del planeta, “existen otros factores que intervienen en la ecuación térmica”¹:

- Factores regionales: a escala regional, el contexto geológico y estructural condiciona la distribución de las temperaturas. Zonas con vulcanismo activo o con adelgazamiento de la litosfera tendrán un gradiente más elevado que otras sin actividad volcánica o con grosor litosférico superior a la media.
- Factores locales: a escala local, las litológicas condicionan la evolución vertical y lateral del gradiente, ya que llevan asociadas diferentes propiedades térmicas, características de cada tipo de roca. El factor más determinante es la presencia de agua subterránea, que tiene la capacidad de redistribuir el calor. Por eso, en zonas de recarga de acuíferos el gradiente geotérmico disminuye por la infiltración de agua fría, mientras que en las zonas de descarga aumenta por la ascensión de agua profunda más caliente. Asimismo, las fracturas también condicionan el gradiente localmente, como en los planos de fractura por los que circula el agua subterránea caliente.

En resumen, los factores que influyen en las variaciones del gradiente geotérmico además de la profundidad son el contexto geológico y estructural, las diferencias de propiedades térmicas de las rocas y la circulación de las aguas subterráneas.

3.2. Flujo y propagación del calor terrestre

El flujo de calor superficial es la cantidad de calor que pierde el planeta por unidad de superficie y tiempo. Se calcula como el producto del gradiente geotérmico (variación de la temperatura con la profundidad) y la conductividad térmica del medio (facilidad de un material para transmitir el calor).

El valor típico de flujo de calor en continente es de 60 mW/m^2 , siendo de 30 mW/m^2 en zonas continentales más antiguas donde la litosfera tiene mayor grosor, y alcanzando los 120 mW/m^2 en zonas más jóvenes donde la litosfera tiene menor grosor.

El mapa del Anexo I identifica la distribución a nivel europeo del flujo de calor (en mW/m^2) dentro de la corteza terrestre. Los valores más altos, representados con colores anaranjados y rojo, se encuentran en zonas de límites de placa activas y vulcanismo, como Islandia o el

¹ Ver www.icgc.cat

Mediterráneo septentrional (90-120 mW/m²). Por otra parte, la gama de verdes y azules muestran zonas con un flujo de calor más bajo correspondientes a regiones sin actividad tectónica o litosferas más gruesas. Los valores mínimos se localizan en la zona estable de la plataforma rusa (<40 mW/m²).

Así, las zonas con mayor actividad tectónica tenderán a manifestar adelgazamiento cortical, relacionado con un mayor flujo de calor, que da lugar a la presencia de anomalías geotérmicas.

3.3. Tipos de recursos geotérmicos

Los recursos geotérmicos son la “fracción de la energía geotérmica que puede ser aprovechada de forma técnica y económicamente viable, incluyendo tanto los recursos actualmente reconocidos como los que lo serán en un futuro próximo”² y se clasifican según su entalpía o calidad térmica en (Fig.1):

- Recurso de alta entalpía ($T^a > 150^{\circ}\text{C}$), puede estar constituido por vapor seco o, más frecuentemente, por una mezcla de agua y vapor, y su aprovechamiento fundamental es la producción de electricidad.
- Recurso de media entalpía ($T^a 100\text{-}150^{\circ}\text{C}$), permite el aprovechamiento directo como recurso térmico para climatización, o como fuente de generación de electricidad mediante ciclos binarios.
- Recurso de baja entalpía ($T^a 30\text{-}100^{\circ}\text{C}$), permite su aprovechamiento como recurso térmico para climatización mediante el uso de intercambiadores y/o bombas de calor.
- Recurso de muy baja entalpía ($T^a < 30^{\circ}\text{C}$), permite su aprovechamiento térmico para climatización con o sin el uso de bombas de calor. Las tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento son función de la accesibilidad del recurso geotérmico, y pueden clasificarse en dos tipos:
 - Circuitos abiertos, basados en el uso de aguas subterráneas extraídas de un acuífero para su aprovechamiento. En este caso, el agua subterránea es el medio de transporte del calor.
 - Circuitos cerrados, cuyo fundamento es el empleo de un fluido termoportador (agua con algún aditivo), para extraer el calor de los materiales existentes a poca profundidad en el subsuelo. Implican la instalación de un intercambiador (vertical u horizontal) en el terreno, cuya pared separa el fluido de la roca y del agua subterránea.

² Ver Sánchez J., Sanz, L., Ocaña, L. (2011)

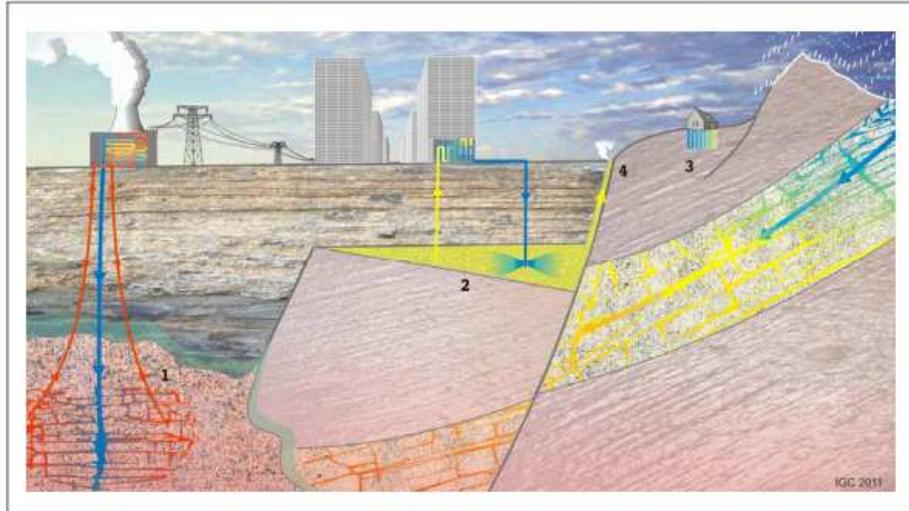


Figura 1. Tipos de explotación. 1) Alta temperatura tipo roca seca, se inyecta agua fría y mediante un ciclo combinado se obtiene electricidad. 2) Media temperatura, de un acuífero profundo se extrae agua caliente para climatización de distrito. 3) Baja temperatura, mediante un intercambiador de calor enterrado se explota la inercia térmica del terreno para climatizar una casa. 4) Manifestación termal originada por un proceso de circulación de agua: infiltración en una zona de carga, transición lenta por un acuífero profundo y descarga rápida a través de la falla de contacto entre cuenca y basamento. Fuente: www.icgc.cat

3.3.1. Aprovechamiento según el recurso geotérmico

El aprovechamiento del recurso geotérmico dependerá de sus características y de la tecnología disponible. “La generación de electricidad puede obtenerse a partir de tres tipos de fluidos que representan, a su vez, tres tipos de recursos diferentes”³ (Fig.2):

- Recurso de vapor seco, donde la fase líquida es muy limitada y los poros de la roca están básicamente saturados por vapor. La generación de electricidad es más eficiente, ya que no existe consumo de energía en la separación de la fase vapor-agua.
- Recurso de vapor húmedo, donde el fluido es mayoritariamente líquido, pero al ascender se transforma en una mezcla de vapor y agua líquida, aprovechándose el vapor directamente para la generación de electricidad.
- Recurso de moderada entalpía, donde el fluido es un líquido sin fase vapor en todo el proceso, y el transporte de calor se realiza mediante un intercambiador de calor a un fluido de trabajo, con temperatura de vaporización inferior a la del agua, generándose un vapor a alta presión capaz de mover una turbina.

³ Ver Sánchez J., Sanz, L., Ocaña, L. (2011)

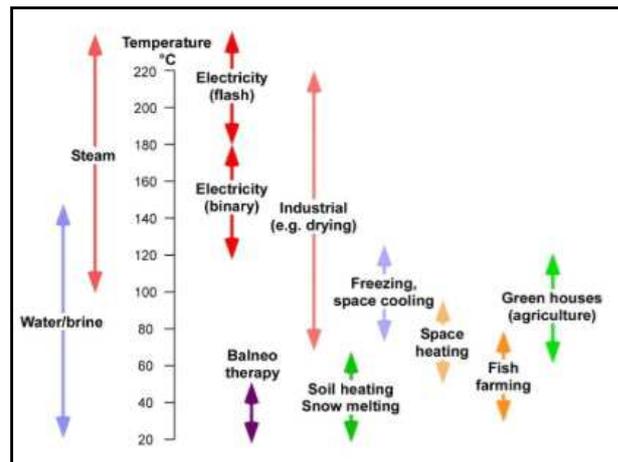


Figura 2. Opciones de aprovechamiento en base al tipo de recurso geotérmico disponible. Fuente: www.unugtp.is

3.3.2. Tipos de centrales según el recurso geotérmico

Existen tres tipos de centrales de generación de electricidad en función de las características del fluido (Sánchez et al., 2011). Estas son:

- Plantas de vapor seco, donde el vapor en estado de saturación o recalentado se dirige directamente a la turbina para la generación de electricidad.
- Plantas flash, donde el fluido a temperaturas entre 180 y 250°C está en fase gas y líquido, y es preciso separarlas primero. La fase vapor será aprovechada para generar electricidad, y la salmuera en fase líquida tendrá diferentes opciones de aprovechamiento como agricultura o uso industrial.
- Plantas de ciclo binario (ciclo Rankine), donde se usa un fluido de trabajo contenido en un circuito cerrado como medio de aprovechamiento de calor, por lo que es posible aprovechar la energía de yacimientos de media temperatura con recursos de moderada entalpía, o trabajar con fluidos geotérmicos de elevada salinidad.

En el mapa del Anexo II se ubican los países que actualmente aprovechan recursos geotérmicos, principalmente de alta entalpía, mediante alguno de los tres tipos de centrales mencionadas.

3.4. Tipos de Yacimientos Geotérmicos

Cuando un área geográfica reúne las condiciones adecuadas para que un recurso geotérmico pueda explotarse de manera rentable, se habla de yacimiento geotérmico. Éste debe cumplir 3 requisitos geológicos indispensables:

1. Un flujo de calor superficial elevado que reduzca los costos de explotación.
2. Un volumen de agua termal que asegure un caudal de explotación adecuado.
3. Una permeabilidad que asegure un régimen de explotación constante.

El potencial de explotación de un yacimiento es función de la temperatura asociada al propio recurso, y se clasifica según este criterio en 4 tipos (Sánchez et al., 2011):

- Yacimientos de alta entalpía (T^a de fluido $>150^{\circ}\text{C}$): ubicados a profundidades entre 1.500 a 3.000 metros en zonas geográficas con gradiente geotérmico muy elevado, y relacionados con la existencia de fenómenos geológicos excepcionales como actividad volcánica, actividad sísmica, o límites entre placas litosféricas. Asimismo, debe existir un acuífero que recoja el calor y lo mueva hacia el exterior, con una capa impermeable que mantenga el fluido a una presión adecuada para su extracción. Los yacimientos que presentan esta configuración aprovechan el recurso de vapor seco, siendo un ejemplo el ubicado en Larderello (Italia), el primero del mundo en usar energía geotérmica para generar electricidad (Fig.3).

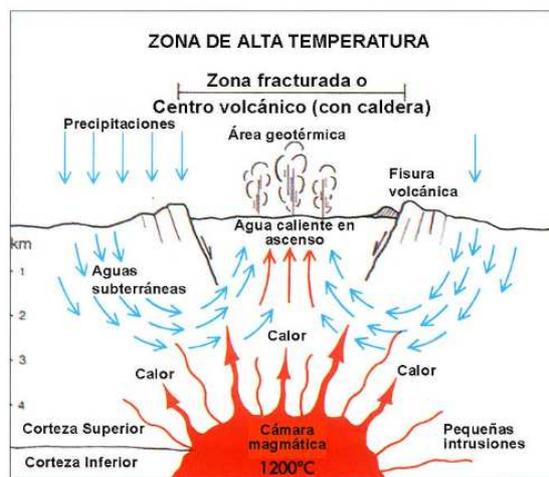


Figura 3. Esquema yacimiento alta temperatura. Fuente: www.redes-cepalcala.org

- Yacimientos de media entalpía (T^a de fluido $100-150^{\circ}\text{C}$): el origen del yacimiento comprende varios contextos, como puede ser zonas con elevado gradiente en profundidades inferiores a los 2.000 m o cuencas sedimentarias con profundidades entre 3.000 y 4.000 m. Los depósitos se relacionan con la presencia de discontinuidades o fallas, a través de las cuales existe una circulación de fluido calentado por una fuente de calor en profundidad hasta la superficie. En diversos sectores de Centroeuropa existen cuencas sedimentarias con características óptimas para la explotación de este tipo de yacimientos.
- Yacimientos de baja entalpía (T^a de fluido $30-100^{\circ}\text{C}$): ubicados en cuencas sedimentarias con un gradiente geotérmico normal que cuentan con formaciones geológicas permeables que dejan circular los fluidos que extraen el calor de las rocas hacia el exterior. Por lo tanto, con un gradiente normal, pueden alcanzarse temperaturas de más de 70°C . Además, existen zonas del planeta donde, debido a la composición química y la edad de las rocas, este gradiente aumenta y ofrece mayores posibilidades de extracción de energía (Fig.4).

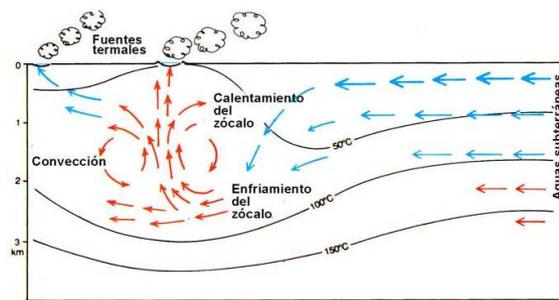


Figura 4. Esquema yacimiento baja temperatura. Fuente: www.redes-cepalcala.org

- Yacimientos de muy baja entalpía (T^a de fluido $<30^{\circ}\text{C}$): pueden ubicarse en cualquier punto de la corteza terrestre a profundidad somera, donde la temperatura del subsuelo a partir de los 20 metros es constante a lo largo del año e independiente de las condiciones meteorológicas. El foco de calor está alojado en las capas más superficiales del subsuelo o en acuíferos poco profundos.

3.4.1. Enhanced Geothermal System EGS

Existe un caso particular englobado dentro de los yacimientos de alta entalpía llamado Enhanced Geothermal System (sistema geotérmico estimulado). Se trata de un yacimiento “no convencional”⁴, que aumenta de manera substancial el potencial geotérmico mundial y abre la puerta a la producción de electricidad en áreas con recursos geotérmicos de media entalpía.

3.4.1.1. Funcionamiento sistema geotérmico estimulado EGS

Un sistema geotérmico estimulado es un yacimiento geotérmico creado artificialmente.

En concepto se basa en seleccionar zonas con elevado potencial geotérmico pero que cuentan con poca o nula permeabilidad, por lo que ésta es generada de manera artificial por fracturación hidráulica, o caso que la roca cuente con poca permeabilidad, ésta se amplifica aprovechando su red natural de fracturas.

Esto se consigue por estimulación antrópica, inyectando grandes cantidades de fluido a elevada presión en profundidad por un pozo de inyección que logran crear un sistema de fracturas en el almacén por las que circula el fluido inyectado, el cual es recuperado posteriormente por un pozo de extracción una vez haya obtenido el calor de las rocas en contacto con la cámara magmática (Fig.5).

El fluido recalentado se envía a una central de ciclo binario que lo utiliza para la producción de electricidad, y una vez extraído el calor de él es inyectado al subsuelo para iniciarse de nuevo el ciclo (EGEC, 2017).

⁴ Ver Sánchez J., Sanz, L., Ocaña, L. (2011)

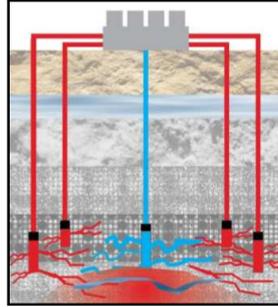


Figura 5. Esquema de un sistema geotérmico estimulado EGS. Fuente: EGEC, 2017.

3.4.1.2. Aprovechamiento del yacimiento EGS en Europa

El aprovechamiento de los EGS se inició de manera pionera en Europa (EGEC, 2017). Actualmente existen tres centrales de generación eléctrica en funcionamiento que explotan este tipo de yacimiento. Estas plantas son Insheim y Landau en Alemania y Soultz-sous-Forêts en Francia (primer proyecto desarrollado en Europa e inaugurado en 2008), así como la planta térmica Rittershofen en Francia. Existen otras diez plantas en desarrollo englobadas dentro de la Iniciativa NER 300 para la *Financiación de proyectos innovadores en materia de Energías Renovables y Captura y Almacenamiento Geológico de CO₂*, ubicadas en Hungría (Battonya) y Francia (Grand Est/Eckbolsheim), además de otras instalaciones proyectadas en etapa de diseño, especialmente en Francia, Alemania, Reino Unido y Suiza.

El mapa del Anexo III muestra la ubicación de las tres centrales europeas que actualmente están aprovechando el recurso de un yacimiento de tipo estimulado para generar electricidad. Las tres centrales se sitúan en zonas con una gama de colores verdes y amarillentos, que indican un flujo de calor entre 80 y 120 mW/m², adecuado para considerar su desarrollo.

A pesar de que actualmente la capacidad instalada de la tecnología EGS es de apenas 60 GW, ésta podría alcanzar entre 1.200 GW y 12.000 GW en todo el mundo. En el caso de Europa, el potencial de producción estimado alcanzaría los 2.570 TWh en 2050 (EU SCIENCE HUB, 2015).

La exploración de los yacimientos EGS puede impulsar a la geotermia a contribuir de manera significativa al mix energético a nivel europeo.

4. Estado del arte de la energía geotérmica

4.1. Nivel mundial

La concienciación de la comunidad internacional sobre la necesidad de tomar acción para frenar el calentamiento global ha forjado un marco jurídico dentro del cual en las últimas décadas se han pactado una serie de compromisos que apuestan por alcanzar un modelo energético más sostenible. Los más relevantes son la Cumbre de las Naciones Unidas de Río de Janeiro de 1992, donde surgió el plan de acción Agenda 21; el de Johannesburgo de 2002; el Protocolo de Kyoto, adoptado en la Convención Marco del Cambio Climático de las Naciones Unidas de 1997 y ratificado en febrero de 2005; la Declaración del Milenio de 2000; el Plan de Acción de la Conferencia de Bonn sobre las Energías Renovables de 2004, así como el último compromiso adoptado, el Acuerdo de París de 2015.

A nivel mundial, el uso de la geotermia juega un papel secundario en comparación con otros tipos de energías renovables, mucho más asentadas. A pesar de esto, se prevé un crecimiento notable en los próximos años, especialmente en países como Indonesia, Filipinas y Kenia, ricos en recursos geotérmicos (www.renewableenergyworld.com).

Según datos actualizados del World Energy Council (www.worldenergy.org), la capacidad global instalada de origen geotérmico es de 83,4 GW (considerando uso térmico y electricidad), liderando la lista Europa, Estados Unidos y el Sudeste asiático.

En base a los proyectos adjudicados desde enero del 2015, se refleja un incremento del 16% de capacidad instalada hasta diciembre del presente año (2018), tomando especial relevancia Indonesia (636 MW), Turquía (298 MW) y Kenia (255 MW), y sumándose Irán, Croacia, Chile y Honduras a la lista de nuevos países generadores (Fig.6).

Generación eléctrica geotermia EU-27	2007	2010	2020
Geotermia convencional (MWe)	815	920	1.200
Ciclos binarios baja temperatura (MWe)	15	70	300
EGS (MWe)	-	70	4.500
Capacidad instalada total (MWe)	830	1.000	6.000
Producción anual de energía (TWh)	6,5	5	50

Figura 6. Evolución de la capacidad instalada de origen geotérmico. Fuente www.idae.es

En 2015 se fundó la Global Geothermal Alliance bajo la bandera de IRENA, una asociación con más de treinta países líderes en la industria, que tiene como meta crear un aumento del 500% en la capacidad instalada mundial y un aumento del 200% en calefacción geotérmica para 2030. Este acuerdo permite a los países con recurso geotérmico desarrollarse más rápidamente, y a los que no tienen recibir ayuda para desarrollarlo.

Por tanto, la industria geotérmica está entrando en una “nueva era de cooperación internacional, crecimiento en el hogar, nuevas inversiones y tecnología de vanguardia, que hace augurar un futuro prometedor”⁵.

4.2. Nivel europeo

En el ámbito europeo, la aprobación de la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, así como la Directiva 2001/77/CE relativa al fomento de la energía eléctrica a partir de fuentes renovables en los mercados energéticos, suponen una gran oportunidad de desarrollo para el sector de la geotermia.

En base a los datos aportados por el World Energy Council (www.worldenergy.org), la capacidad instalada de origen geotérmico es de 29 GW (considerando uso térmico y electricidad), que representa el 36% de la capacidad instalada mundial y una producción anual

⁵ Ver www.renewableenergyworld.com

de 7,23 Mtoe al año. Los países que encabezan la lista son Suecia (5.600MWt), Turquía (624 MWe y 2.886 MWt), Alemania (38 MWe y 2.848 MWt), Islandia (665 MWe y 2.040 MWt), Francia (16 MWe y 2.347 MWt), Italia (824 MWe y 1.014 MWt), Suiza (1.733 MWt), Finlandia (1.560 MWt), Noruega (1.300 MWt) y Austria (1,4 MWe y 903 MWt).

Los principales enclaves de yacimientos geotérmicos en Europa se sitúan en Italia, Islandia, Francia, Turquía, Austria, Hungría y Bulgaria, y en menor grado Alemania y Suiza. Todas estas regiones cuentan con centrales geotérmicas de generación eléctrica (Ver Anexo II).

En base a datos del European Geothermal Energy Council, la evolución prevista de generación eléctrica en Europa para 2020 es alcanzar los 6.000 MWe de capacidad instalada, de los cuales se estima que el 75% corresponderán al desarrollo de sistemas geotérmicos estimulados EGS.

Los grupos geotérmicos europeos, entre ellos la Asociación Turca de Inversionistas en Centrales Geotérmicas JESDER, ha lanzado el proyecto *Geo-Energy Europe*. El proyecto comenzó oficialmente el 1 de enero de 2018 con una duración de 2 años e involucra a 7 países: GEODEEP en Francia, EGEC en Bélgica, GEOPLAT en España, GEOENERGY CELLE en Alemania, CAPES en Hungría, JESDER en Turquía y GEOCIENCE IRLANDA en Irlanda. El programa se enfoca en crear redes, habilidades intersectoriales y transferencia de tecnología, así como en planificación estratégica para la promoción e implantación a nivel industrial y distrital de la geotermia profunda, en línea con los objetivos de transición energética europeos.

Según fuentes de JESDER, los socios de *Geo-Energy Europe* se reunieron por primera vez en las instalaciones de EGEC en Bruselas el 21 de febrero de 2018, tras el lanzamiento oficial del programa *Clusters Go International* en la Agencia Ejecutiva para las PYME (EASME) el 20 de febrero y en el marco de los Días de la industria de la Comisión Europea, del 21 al 23 de febrero.

4.3. Nivel estatal

El estado español ha adoptado como base de sus políticas ambientales la Directiva europea 2009/28/CE. Esta Directiva ha marcado las directrices para el diseño de los diferentes planes de acción tanto nacionales, como es el caso del Plan Nacional en Materia de Energía Renovable (PANER) en el que se definen las estrategias a seguir para alcanzar las metas fijadas, así como de las Comunidades Autónomas y Locales, dando lugar a documentos como el Plan Estatal de Energías Renovables 2011-2020 PEER, Plan de la Energía y el cambio Climático de Cataluña 2012-2020, Plan de Mejora Energética de Barcelona 2011-2020.

La energía geotérmica no tiene a día de hoy una presencia relevante en España. Respecto a la geotermia de alta entalpía, no cuenta con ninguna central de generación de energía eléctrica, y en este sentido se encuentra en los últimos puestos de la lista de países que actualmente se están beneficiando del conocimiento y tecnologías disponibles para su aprovechamiento. Por otra parte, respecto a la geotermia de baja entalpía, esta sí está siendo explotada para uso térmico en sector terciario, del mismo modo que la geotermia de muy baja temperatura, que es ampliamente utilizada para climatización en el sector residencial y terciario.

5. Caso de estudio: Depresión de La Selva

5.1. Contexto geográfico

La depresión de La Selva se ubica en el extremo septentrional de la Cadena Costero Catalana o Catalánides (Fig.7). Tiene una extensión de 200 km² y una altura media sobre el nivel del mar de 150 metros. Morfológicamente constituye una unidad cerrada y bien definida, tanto desde el punto de vista geográfico como geológico (Pous et al., 1990).



Figura 7. Ortofoto de la depresión de la Selva. Fuente: www.icgc.cat

5.2. Contexto geológico

La depresión de La Selva es una llanura deprimida que forma parte del sistema de fosas tectónicas distensivas que afectaron al margen occidental del Mediterráneo durante el Neógeno. Su estructura y dinámica geológica está determinada por el movimiento de un sistema de fallas alineadas ENE-WSW, conjugadas con otro sistema de dirección NW-SE, que dan lugar a la compartimentación de la fosa. El zócalo está constituido por granitoides del Paleozoico en su mayoría, y en menor proporción por rocas metamórficas. Desde el inicio de su hundimiento, durante el Mioceno superior, hasta la actualidad, se ha ido rellenando con sedimentos detríticos (de origen marino y continental) aportados por abanicos aluviales procedentes de los macizos de las Gavarres y de las Guilleries (Fig.8). El espesor de estos materiales acumulados llega a superar localmente los 300 metros. A su vez, esta región estuvo afectada por manifestaciones volcánicas durante el Neógeno y el Cuaternario, de las que se conservan algunos edificios muy destacables, como el volcán de la Crosa de Sant Dalmai (Linares et al., 2004).

La evolución estructural de dicha zona puede resumirse en tres etapas (Anadón et al., 1979). La primera etapa o etapa preorogénica, comprende desde el inicio de la sedimentación postherciniana hasta las primeras compresiones (220-60 Ma). La etapa orogénica o compresiva abarca la mayor parte del Paleógeno (60-20 Ma). Durante esta etapa se forman y se remobilizan dos sistemas de fallas de direcciones ENE-WSW y NW-SE. Por último, tiene lugar una etapa postorogénica distensiva que se desarrolla desde el Neógeno hasta la actualidad. Es durante esta última etapa cuando se individualizan las fosas tectónicas del Vallés-Penedés, La Selva, L'Empordá, etc. rellenas fundamentalmente por materiales neógenos (Fig.9). Este proceso distensivo forma parte de un sistema de rifting mucho más amplio que se extiende a lo largo de la costa Mediterránea española (Vegas et al., 1980).

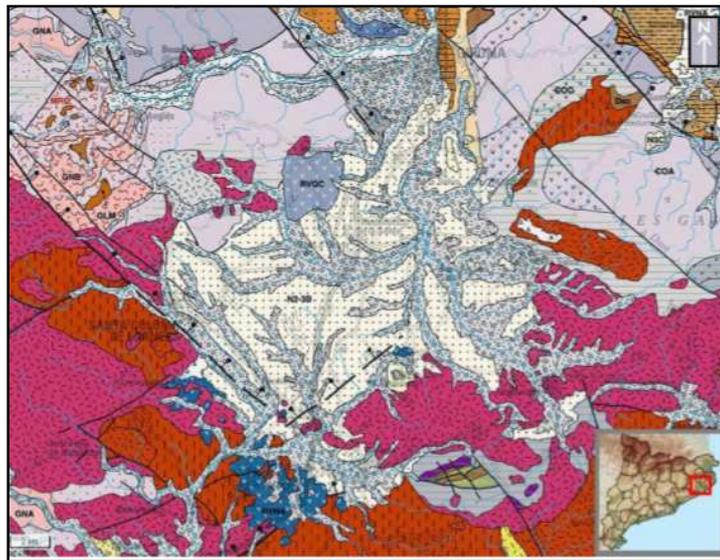


Figura 8. Mapa geológico depresión de La Selva. Fuente: www.icgc.cat

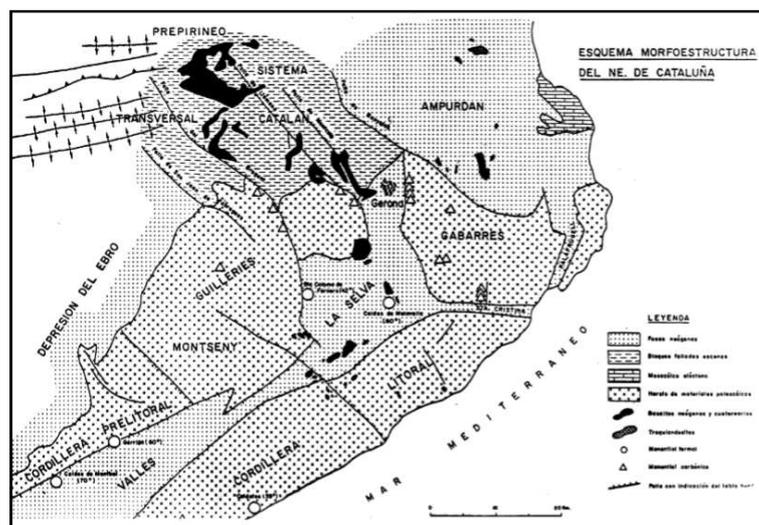


Figura 9. Esquema morfoestructural depresión de La Selva. (IGME, 1979)

5.3. Hidrogeología

5.3.1. Interacción agua-roca

La temperatura de los sistemas hidrotermales varía desde valores próximos al ambiental, hasta cerca de los 360°C. Cuando un fluido hidrotermal a elevada temperatura está en contacto con una roca en profundidad, interacciona con ella y adquiere una determinada composición química, que dependerá del tipo de reacción ocurrida y de la temperatura a la que se ha dado. Al caracterizar estos fluidos se podrá identificar si la temperatura anómala observada en superficie (mediante una manifestación natural) es el resultado de una circulación profunda en regiones de gradiente geotérmico normal, o de haber alcanzado temperaturas más elevadas en profundidad y haber sufrido un enfriamiento durante su circulación hacia la superficie (Panichi et al., 1978).

Por esto, durante la etapa de exploración geotérmica, es fundamental estimar las temperaturas en profundidad que soportan la estimación sobre el potencial energético del yacimiento objeto de estudio. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen de manantiales hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados en la etapa de exploración (Díaz-González et al., 2008).

5.3.1.1. Geotermómetros

Un geotermómetro es un modelo matemático que relaciona la temperatura del yacimiento con la composición química de los fluidos hidrotermales (Arellano, 2008).

El empleo de cualquier método de termometría hidroquímica implica una serie de supuestos previos que es necesario precisar (Albert, 1975).

- 1) Las reacciones entre el agua y la roca deben depender de la temperatura.
- 2) Los elementos reactivos deben ser suficientemente abundantes para que no exista limitación cuantitativa.
- 3) Las reacciones deben haber alcanzado el equilibrio a la temperatura que se pretende averiguar.
- 4) No se deben dar cambios de composición química durante el ascenso de fluido.
- 5) No ha de existir interacción entre el agua termal ascendente y las aguas frías de infiltración.

5.3.1.1.1. Geotermómetros químicos

Permiten determinar las condiciones alcanzadas en el equilibrio roca-fluido, definidas por una determinada concentración de un elemento, así como una presión y temperatura de reacción. Los principales geotermómetros químicos utilizados son (Albert, 1975):

- SiO₂: se fundamenta en el gráfico de Fournier y Truesdell, 1970 (Fig.10), basado en la concentración de SiO₂ respecto a la temperatura. La curva A corresponde a aguas que se enfrían por conducción y la curva B para aguas que lo hacen por expansión adiabática a entalpía constante. Ambas gráficas coinciden para valores de temperatura inferiores a 115°C, equivalentes a un contenido de sílice de 68 ppm.

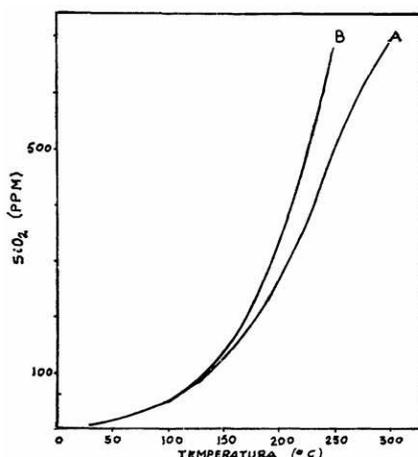
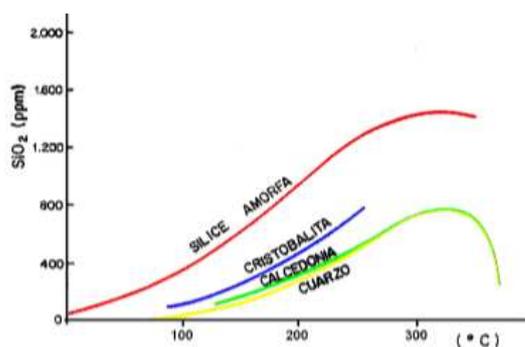


Figura 10: Relación entre la concentración de SiO₂ y la temperatura. Fuente: Fournier y Truesdell, 1970.

Por otra parte, existen los métodos basados en la solubilidad de las especies minerales de fórmula química SiO₂ (cuarzo, calcedonia, cristobalita y sílice amorfa), (Fig.11). La solubilidad de estas especies minerales es exclusivamente función de la temperatura en un rango de pH entre 2 y 9,3, donde el cuarzo es la más insoluble y la sílice amorfa la más soluble. La temperatura en profundidad puede calcularse en función de la concentración en sílice (expresada en mg/L) a partir de las siguientes expresiones:



$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1533.5}{5.768 - \log \text{SiO}_2} - 273 \quad \text{cuarzo}$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1015.1}{4.655 - \log \text{SiO}_2} - 273 \quad \text{calcedonia}$$

Figura 11. Relación solubilidad de especies minerales de sílice y temperatura. Fuente: Fournier y Truesdell, 1970.

La concentración en sílice (SiO₂) de las aguas frías es generalmente inferior a 20 mg/l, por lo que elevados valores de sílice implican siempre altas temperaturas en el acuífero.

- Na-K: basado en el equilibrio químico entre feldespato y mica. Este geotermómetro no es válido para temperaturas inferiores a 100°C. Por otro lado, debido a que el potasio es fácilmente absorbido por los minerales arcillosos hidrotermales como la montmorillonita, debe usarse con precaución.

La temperatura en profundidad puede calcularse a partir de la siguiente expresión (1), donde las concentraciones de Na y K están expresadas en mg/l:

$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{855.6}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)+0.8573} - 273 \quad (1)$$

- Na-K-Ca: método empírico válido desde 4 a 340°C y consistente en aplicar una corrección debida al calcio en el método del Na-K. Este geotermómetro se desarrolló para paliar los elevados valores de temperatura que proporcionaba el Na-K en aguas excepcionalmente ricas en Ca.

La temperatura en profundidad puede calcularse con la siguiente formula (2), donde las concentraciones en Na, K y Ca se expresan en moles/l:

$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1647}{\log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)+\beta\left(\sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}}\right)+2.24} - 273 \quad (2)$$

$$B = \frac{4}{3} \text{ si } \sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}} > 1 \quad ; \quad B = \frac{1}{3} \text{ si } \sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}} < 1$$

Los geotermómetros catiónicos anteriores, Na-K y Na-K-Ca, dependen del equilibrio entre el agua caliente y los minerales aluminio-silicatados. Por tanto, las temperaturas deducidas serán erróneas si no se ha alcanzado el equilibrio. En consecuencia, es recomendable combinar varios geotermómetros e interpretar los resultados en función del ambiente geoquímico local.

5.3.1.1.2. Geotermómetros isotópicos

Este tipo de geotermómetro se utiliza especialmente en yacimientos ricos en fluido en fase vapor. Se apoya en los procesos de fraccionamiento de diferentes componentes del fluido, considerando que la distribución relativa entre especies es función de la temperatura. Se utiliza normalmente para la evaluación de temperaturas comprendidas entre los 100 y 400°C. La fiabilidad del geotermómetro isotópico se fundamenta en si se ha alcanzado o no el equilibrio isotópico de las especies consideradas. Algunos ejemplos de geotermómetros isotópicos son los basados en el equilibrio CO₂-CH₄, CH₄-H₂ o SO₄-H₂O (IGME, 1985).

5.3.1.2. Geoquímica de gases

Los análisis isotópicos de la molécula de agua (hidrógeno y oxígeno) permiten conocer la dinámica del sistema desde el momento de la infiltración hasta su salida. Los contenidos de oxígeno-18 (¹⁸O) y deuterio (²H) son indicadores de la longitud, latitud y altura topográfica de la zona de recarga. El tritio (³H), único isótopo radiactivo integrante de la molécula de agua, permite calcular el tiempo de residencia del fluido termal y las posibles mezclas con aguas de lluvia actual (Fig.12).

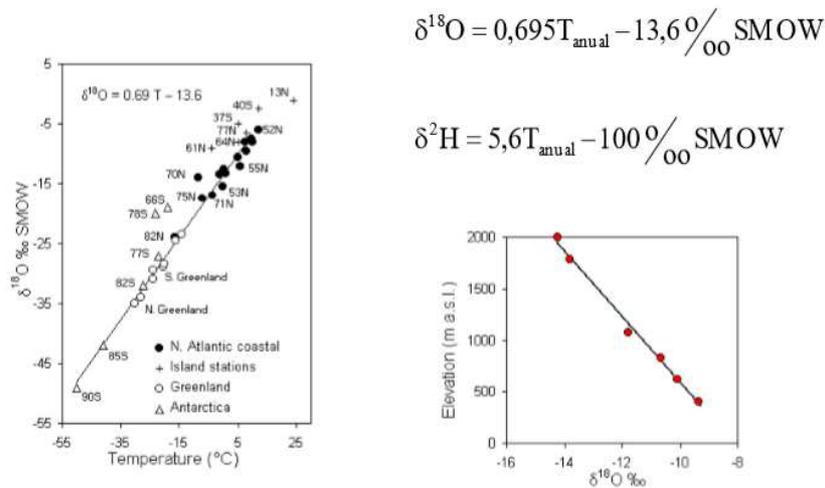


Figura 12. Relación isótopos estables ^{18}O ^2H y temperatura. Fuente: Fournier y Truesdell, 1970.

5.3.2. Caracterización fluidos termales

5.3.2.1. Modelo de circulación y recarga de fluidos

En el contexto de las aguas subterráneas se distinguen dos grandes tipos de recargas: los flujos locales y los flujos regionales, diferenciados por motivos topográficos o por influencia de la geología.

Por un lado, los sistemas de flujo local son los que afectan a los acuíferos libres. El tiempo de tránsito del fluido es menor y éste circula siguiendo la topografía del relieve, menos en la zona de recarga y descarga, que suelen estar separadas varios kilómetros. Estos sistemas están supeditados a los cambios del relieve, a la tasa de infiltración que estará en función de los cambios estacionales de la recarga, o a su relación con los sistemas hídricos superficiales. Por tanto, responden con mayor rapidez a esta clase de cambios.

Por otro lado, los sistemas de flujo regional se relacionan con acuíferos confinados, que se encuentran subyacentes a los sistemas de tipo local. Registran mayores capacidades de almacenamiento, mayores distancias entre la zona de recarga y descarga (sobre los 50 km), y mayores tiempos de tránsito del fluido a través del subsuelo. Estos sistemas son mucho más estables respecto a los cambios en superficie. Asimismo, el fluido reacciona por más tiempo con las rocas por las que circula, por lo que su quimismo es más evolucionado (Fig. 13).

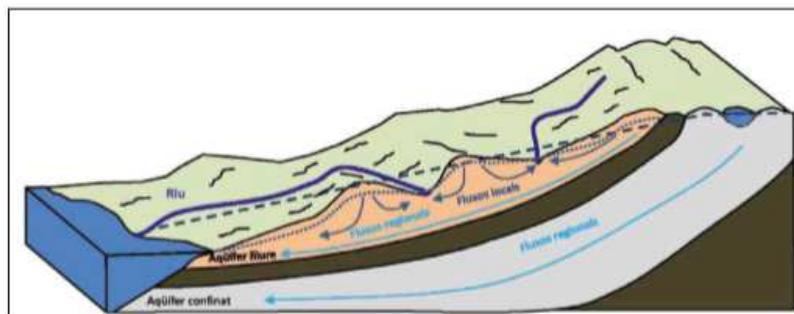


Figura 13. Sistemas de flujos locales y regionales. Fuente: Menció et al. 2012

A nivel hidrológico, la depresión de La Selva está dividida en dos cuencas hidrográficas principales, la de la riera de Santa Coloma en el sector SW, afluente del Tordera y con un caudal medio de 2,05 m³/s; y la del río Onyar situada al NE, afluente del Ter y con un caudal medio de 1,72 m³/s (Fig.14). El sistema de flujo subterráneo es análogo a la red de drenaje, en la conca de Onyar tiende al norte, mientras que la de la riera de Santa Coloma tiende al sur. Así, el centro de la cuenca encierra la divisoria de aguas de los dos ríos. De esta forma, “en la distribución de niveles de las cuencas se reflejan el control geomorfológico que supuso la formación y evolución de las fracturas que originaron la depresión”⁶ (Fig.15). Este hecho es el que origina los dos sistemas hidrogeológicos independientes, que drenan en direcciones opuestas (Menció et al. 2012).

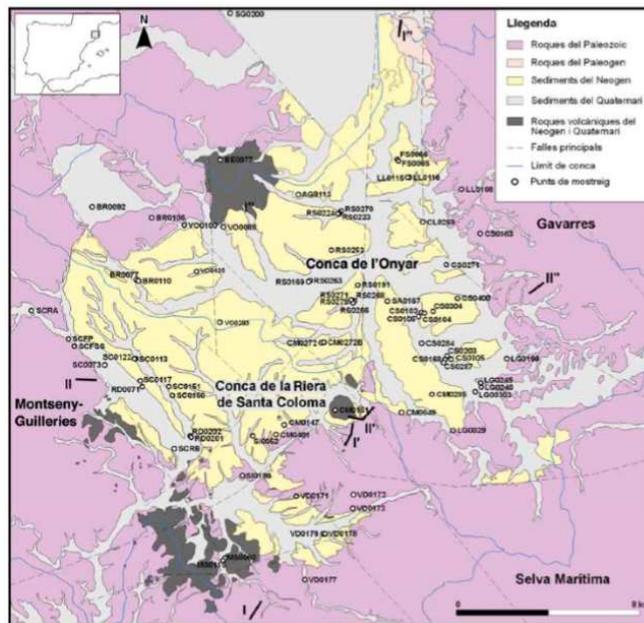


Figura 14. Situación geográfica y geológica de la cuenca de la Selva. Fuente: Menció et al, 2012

⁶ Ver Mas-Pla, J., Trilla, J., Pallí, L. (1985)

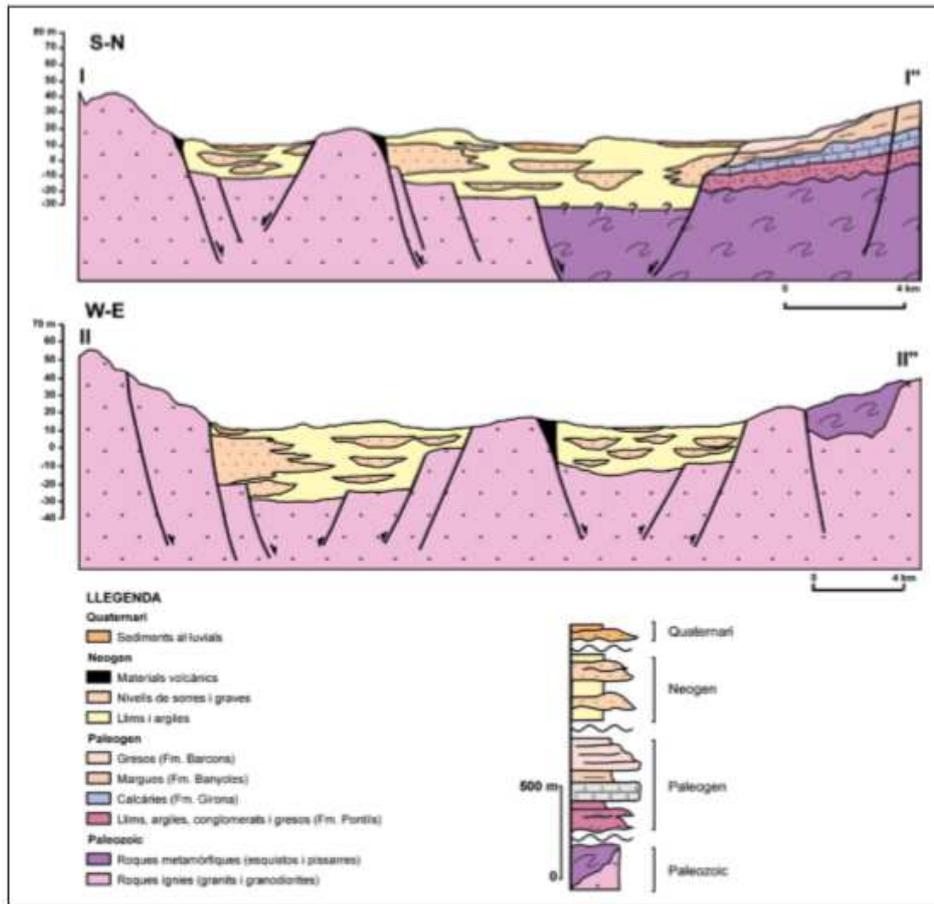


Figura 15: Cortes geológicos esquemáticos I-I' y II-II' de la depresión de La Selva. Fuente: Menció et al, 2012

A nivel hidrogeológico, se pueden distinguir diferentes acuíferos en función de su litología. En el área de estudio se diferencian tres grandes unidades hidrogeológicas (Menció, 2005):

- (1) un acuífero formado por estratos sedimentarios neógenos.
- (2) un acuífero formado por sedimentos aluviales cuaternarios.
- (3) un acuífero formado por materiales paleozoicos, que se encuentran en las áreas de recarga y en la base de la cuenca.

Diversas campañas de campo realizadas entre 2000 y 2006 permitieron profundizar en el conocimiento sobre la hidrogeología de la cuenca (Menció, 2005; Folch, 2010), por las que se dedujo que existía una conexión hidráulica lateral entre las cordilleras y los acuíferos de la depresión, indicando una recarga efectiva a través de las zonas de fractura de los relieves circundantes y del propio zócalo, además de la presencia de acuíferos libres y acuíferos confinados i/o semiconfinados en la zona de estudio.

Se realizaron un total de 4 campañas que proporcionaron datos hidroquímicos e isotópicos del agua subterránea del sector entre los años 2003 y 2006. En estas campañas se tomaron hasta 62 muestras de agua. Los puntos de muestreo se situaron tanto en los sedimentos que rellenan la depresión, como en las cordilleras que la rodean, en pozos con profundidades entre los 7 y los 150 metros. Gracias a los análisis realizados en las muestras (Folch et al. 2011) se

interpretó la evolución geoquímica de los diferentes flujos de agua subterránea, que permitió identificar los flujos regionales de la cuenca y su importancia en la recarga de los acuíferos en las depresiones tectónicas. En la cuenca de La Selva, estos flujos de tipo regional son los que permiten la estabilidad de los recursos disponibles.

Los datos de la campaña realizada en mayo de 2006 y analizados por Folch et al. en 2011 han permitido extraer datos isotópicos sobre el valor de δO^{18} en las aguas de la cuenca. Los resultados indican áreas de recarga en altura coherentes con los relieves de las Guillerries y de la cordillera Transversal. Concretamente, son compatibles con alturas entre los 500 y los 800 metros sobre el nivel del mar. De manera puntual, se observan resultados compatibles con una recarga local en cotas más bajas, tanto en la zona de la cuenca de la Riera de Santa Coloma como en la cuenca de Onyar, conformando el sistema de flujo local de la cuenca.

En conclusión, estos resultados confirman la existencia de sistemas de gran escala, con mayores tiempos de tránsito y flujos regionales, así como otros de menor dominio de escala local (Menció, Folch y Mas-Pla, 2012).

La actividad geotérmica en la cuenca de la Selva se focaliza en los sistemas geotérmicos de baja entalpía de Caldes de Malavella y de Santa Coloma de Farners, situados en el margen SE y en el margen SW de la cuenca respectivamente (Piqué et al., 2010). Estas anomalías geotérmicas se manifiestan en superficie en las localidades de Sant Joan de Fàbrega en el caso de Santa Coloma de Farners, y en Amer en el caso de Caldes de Malavella. Las fuentes termales son de tipo bicarbonatada-sódica en ambos casos y además las de Caldes de Malavella son ricas en CO_2 (París y Albert, 1976). Según los datos de isótopos estables, estas aguas son de origen meteórico (Redondo y Yélamos, 2000).

Según Llopis-Lladó (1951), las aguas termales de Caldes de Malavella migran a través de una fractura del zócalo, de orientación NW-SE, que antes de llegar a la superficie corta una unidad sedimentaria y da lugar a la formación de diversas fuentes, que actualmente se explotan, como la Font de la Mina, la Font del Bullidors y la Font de Sant Narcís.

En la depresión de La Selva se hace patente la estrecha relación existente entre los manantiales hidrotermales y las grandes fallas de escala regional, que a su vez determinan la estructura en bloques del sector NE de Cataluña. Como ya se ha comentado, estas fracturas tienen dirección predominante N-S y NW-SE, y constituyen las vías preferentes de circulación ascendente de agua formando manifestaciones hidrotermales en superficie. El esquema de la Fig.16 muestra un modelo representativo de la relación entre los componentes del sistema geotérmico, y la manera cómo se forman las manifestaciones hidrotermales en la cuenca de La Selva. El relleno detrítico de la cuenca está en contacto con el basamento granítico inicialmente poco permeable. Este basamento está ampliamente fracturado, factor que induce a la meteorización y disolución del cuarzo en el granito por la interacción con el agua caliente⁷. Así, las zonas de fractura se vuelven más porosas y permeables, favoreciendo la circulación convectiva del agua termal, que forman las manifestaciones en superficie. Por tanto, las estructuras extensionales principales de la cuenca actúan de zonas de recarga de fluidos, los

⁷ Como se ha visto en el apartado 5.3.1.1.1. sobre geotermómetros químicos, la presencia de sílice en las aguas implica altas temperaturas en el acuífero.

cuales se filtran y llegan a profundidades con una temperatura elevada donde se mezclan con otras aguas subterráneas calentadas por la anomalía geotérmica. Posteriormente, las aguas calentadas ascienden a través de las zonas de fractura principales, donde llegan a la superficie en forma de surgencias en Caldes de Malavella y Santa Coloma de Farners.

Las manifestaciones de Caldes de Malavella y de Santa Coloma de Farners, con temperaturas de surgencia que alcanzan los 60°C y 42°C respectivamente, corresponden a manantiales termales. Los caudales de la descarga natural son de unos 8 l/s, en Caldes de Malavella, y del orden de 1 l/s en Santa Coloma de Farners (Linares et al., 2004).

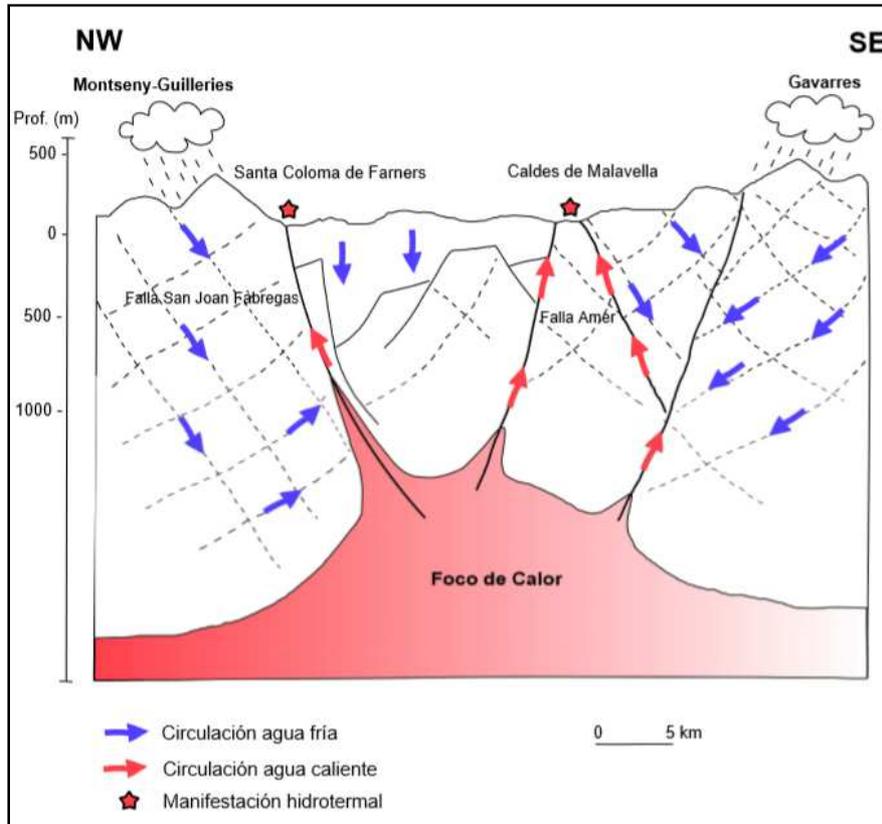


Figura 16. Modelo geotérmico con esquema de circulación y recarga de fluido en la fosa de la Selva. Fuente: Elaboración propia basado en Linares et al., 2004 y Navarro et al. 2011.

5.4. Potencial aprovechamiento geotérmico de la cuenca de La Selva

5.4.1. Contexto distensivo

La zona de estudio se engloba dentro del sistema de fosas tectónicas de la zona central europea, conocido como fosa del Rin, que se originó durante el Oligoceno hace 25 millones de años, y que se prolonga por el SE de Francia y todo el levante de la Península Ibérica (Fig.17), englobando la Depresión Prelitoral Catalana. La estructura en forma de graben tectónico formada por el sistema de fallas normales en la corteza, ha dado lugar a un adelgazamiento del grueso cortical, que ha favorecido la ascensión a niveles más superficiales de materiales de la astenosfera que se encuentran a elevada temperatura, ocasionando una anomalía térmica a nivel regional.

El rasgo común del sistema de fosas que conforman la fosa del Rin es la presencia de fallas de borde de orientación NW-SE que afectan tanto al relleno de la cuenca como a los materiales paleozoicos o ígneos del zócalo.

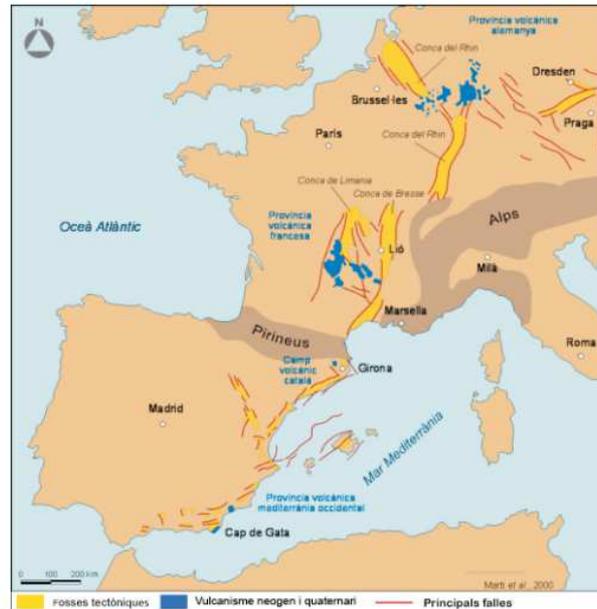


Figura 17. Sistema de fosas distensivas de Europa. Fuente: www.icgc.cat

Como muestran los valores del mapa del Anexo I, el contexto geotectónico en el que se encuentra gran parte de Cataluña lo hace un territorio en el que los valores de flujo calórico son especialmente elevados. El valor medio de flujo de calor en Cataluña es de 85-90 mW/m², superior a la media europea, que ronda los 55-60 mW/m² (Linares et al, 2004) (Fig.18). En este contexto, la fosa distensiva de La Selva es una de las áreas con mayor flujo calórico registrado de toda la geografía catalana. Este mayor gradiente geotérmico favorece la convección natural de los fluidos, que emergen en superficie en forma de manifestaciones termales en el caso de la cuenca de La Selva.

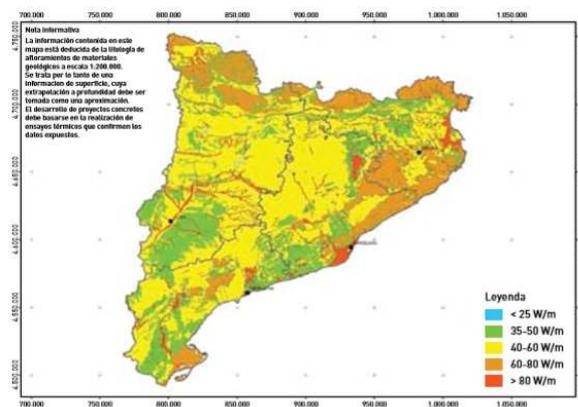


Figura 18. Potencia térmica superficial de Cataluña. Fuente: www.idae.es

A escala local, las fallas normales que dan forma a la fosa tectónica llevan asociadas una franja de roca muy triturada llamada milonita. La milonita es un material con elevada permeabilidad que frecuentemente alberga agua caliente y facilita su manifestación superficial en forma de surgencia. En las zonas profundas de estas fallas, a profundidades de entre 500 y 2.000 metros, se almacenan y circulan fluidos geotérmicos de baja o media salinidad (menos de 10.000mg/l de sales disueltas) y elevada temperatura 60-90°C, constituyéndose yacimientos geotérmicos (Sánchez et al., 2011). Estas anomalías locales son debidas a la circulación de fluidos a través del sistema de fracturas formadas en el contexto distensivo. Estas fracturas pueden tener una gran entidad permitiendo circular fluidos calientes desde grandes profundidades a la superficie. En el caso de la depresión de La Selva, el recurso geotérmico se encuentra ubicado en la franja de milonización de fracturas del sustrato granítico, que en determinados puntos y por efecto de un incremento de permeabilidad en los materiales, invade las formaciones detríticas de borde de fosa formadas por materiales arcósicos. Para que se produzcan manifestaciones hidrotermales en superficie, las fracturas deben tener una profundidad de unos 4 kilómetros, y el grosor de la milonita debe ser superior a 500 metros (Bächler et al., 2003).

Por todo lo comentado, la naturaleza geoestructural de la fosa de La Selva proporciona unas condiciones de base muy favorables para que la fuente de calor interna coherente con el contexto de adelgazamiento cortical que se da en ella, pueda aprovecharse gracias a la presencia del sistema de fracturas que permiten recircular el fluido caliente hacia cotas menores.

5.4.2. Yacimiento EGS

Un sistema geotérmico estimulado (EGS) es un tipo de yacimiento de roca caliente seca (HDR) en el que la fracturación ya existe y debe mejorarse la permeabilidad artificialmente. Las condiciones que deben darse para la consideración de un sistema geotérmico de este tipo son las siguientes:

- (1) Existencia de masa de roca consistente, granítica o metamórfica con baja permeabilidad.
- (2) Existencia de fracturación regional, preferentemente de tipo distensivo y que afecte a la masa de roca.
- (3) Existencia de una anomalía geotérmica.

Respecto al primer punto, en los bordes de la fosa de La Selva existen grandes fracturas de dirección preferente NW-SE, que presentan una gran envergadura tanto longitudinal como vertical, por lo que afectan a las masas graníticas del zócalo. Estas grandes fracturas presentan en superficie buena permeabilidad, que disminuye en profundidad. Estas mismas fracturas a profundidades menores a 2.000 metros, permiten encontrar recursos de baja y media temperatura, como ya se ha visto en apartados anteriores, que pueden ser utilizados para generar electricidad en centrales de ciclo binario (GEOELEC, 2013).

Por tanto, la permeabilidad de los granitoides del zócalo, que ya se encuentran fracturados, podría mejorarse por fracturación hidráulica, permitiendo aumentar el volumen del almacén y favoreciendo la adecuada circulación del fluido disponible.

Respecto al segundo punto, la depresión de La Selva se ubica en un contexto extensional, formado por un graben tectónico y afectado por un sistema de fallas alineadas ENE-WSW, que se conjugan con otro sistema de dirección NW-SE, dando lugar a la compartimentación de la fosa. Estas fracturas permiten la infiltración de fluidos desde la zona de recarga y su transporte en profundidad, donde pueden estar bajo la influencia de la fuente de calor.

Respecto al tercer punto, como ya se ha comentado, bajo los almacenes de baja temperatura existentes en las fallas de borde de la depresión de La Selva, pueden existir recursos de media temperatura.

Concretamente, en la zona de estudio las temperaturas en profundidad alcanzan entre 60° a 120°C (ITGE, 1979) como también lo confirman datos del IDAE (Fig.19).

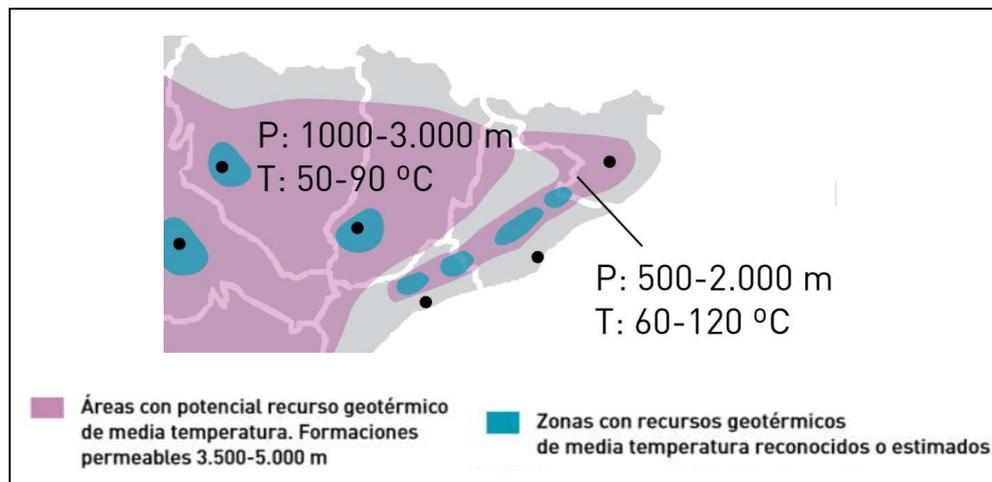


Figura 19. Geotermia de media temperatura en Cataluña. Fuente: Sánchez et al., 2011

Según IDAE, la cuenca de La Selva forma parte del conjunto de regiones que cuentan con recursos de media temperatura, catalogados como “recursos reconocidos o estimados”⁸, lo que significa que la precisión de esta afirmación es elevada. También se considera la zona extensional en la que se engloba la cuenca de La Selva como un sector con posibilidades para el desarrollo de un sistema geotérmico estimulado (Fig.20).

⁸ Ver Sánchez, J., Sanz, L., Ocaña, L. (2011)

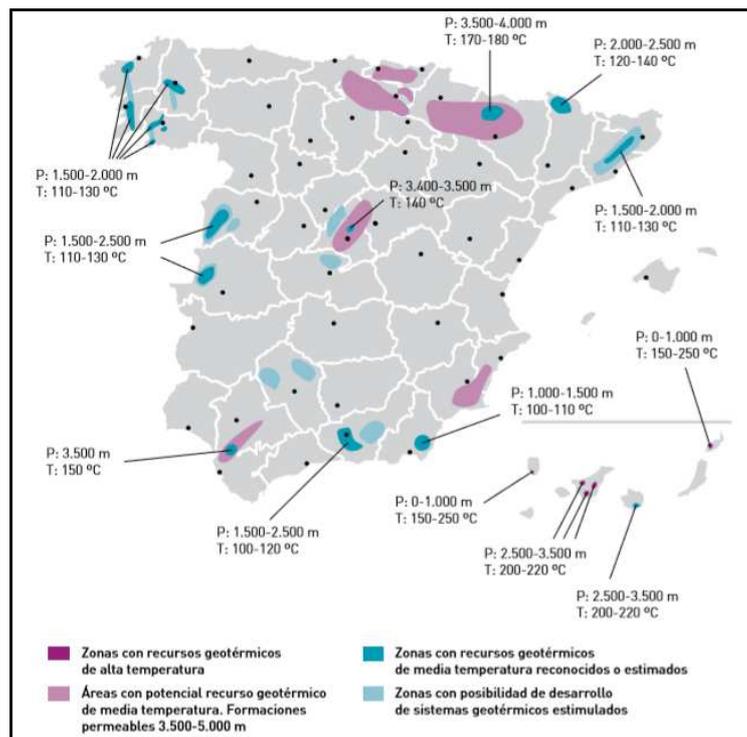


Figura 20. Mapa de recursos geotérmicos de media y alta temperatura y posibles sistemas geotérmicos estimulados. Fuente: Sánchez et al., 2011

En el mapa del Anexo III, donde se visualiza el flujo térmico en las zonas que actualmente explotan un yacimiento EGS mediante centrales de ciclo binario, éstas se ubican en sectores con igual flujo térmico superficial y contexto extensional que la depresión de La Selva, por lo que pueden darse las condiciones iniciales necesarias para la creación y aprovechamiento de un yacimiento geotérmico en este emplazamiento.

Por todo lo visto con anterioridad, se puede concluir que la fosa tectónica de La Selva engloba los requerimientos iniciales básicos y necesarios para su valoración como yacimiento EGS.

6. Modelamiento de circulación geotérmica con *Hydrotherm Interactive*

6.1. Software *Hydrotherm Interactive*

El software *Hydrotherm Interactive* fue creado en 1994 por el *United State Geological Survey* (U.S.G.S). Es un simulador en dos dimensiones que permite representar la energía geotérmica asociada a procesos hidrotermales y sistemas de flujo de agua subterránea.

Admite un rango muy amplio de contextos hidrotermales, con presiones de hasta 10^4 atmósferas y temperaturas cercanas a los 1.200°C .

El programa utiliza el método de diferencias finitas para calcular de manera aproximada las ecuaciones diferenciales. Para ello, es necesario fijar los límites apropiados, considerando las condiciones iniciales y los parámetros necesarios. Se obtiene de manera simultánea las soluciones numéricas para las variables dependientes primarias, la presión y la entalpía. Las

variables dependientes secundarias, que son temperatura, saturación, densidad de flujo y viscosidad de flujo, se calculan a partir de las variables primarias.

6.1.1. Limitaciones

Hydrotherm Interactive necesita el valor de los parámetros físicos de las rocas para llevar a cabo la simulación. Este trabajo se ha basado en los datos considerados en la primera modelización, que en su día tomó valores obtenidos de fuentes bibliográficas, y que más adelante se relatarán.

Como ya se consideró en el anterior estudio, los materiales que rellenan la cuenca se han englobado en un único material, llamado 'material cenozoico', y ya que comparten similares propiedades físicas, no aportan errores importantes a la simulación.

El enrejado de las celdas de cálculo trabaja con contornos paralelos al eje de coordenadas, por lo que tiene dificultades al trabajar con líneas en pendiente, pudiendo dar lugar a errores de cálculo.

6.2. Modelamiento preliminar en el área de estudio

Esta modelización se basa en un estudio previo de la depresión de La Selva llevado a cabo por Pla en el año 2012. El objetivo del trabajo era el estudio de las anomalías geotérmicas de la depresión de La Selva, por lo que se escogió el programa *Hydrotherm* para caracterizar la evolución de las células convectivas del sistema geotérmico del sector. Para este trabajo se han replicado los parámetros y condiciones iniciales que en su día se consideraron. Por otra parte, el modelo geoestructural que ha servido de base para ejecutar de nuevo la simulación es diferente⁹ (Fig.21), por lo que los resultados del modelamiento se espera sean también ligeramente distintos.

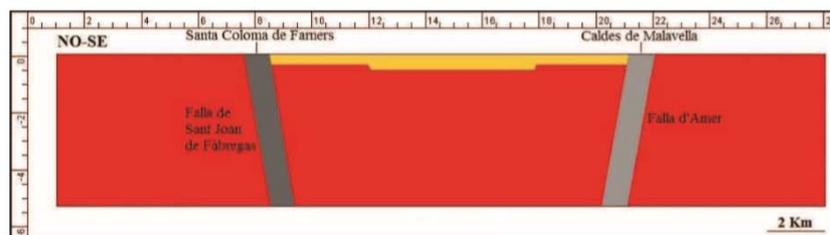


Figura 21. Modelo geoestructural considerado en la simulación previa. Fuente: Pla, 2012.

6.3. Modelamiento propuesto

Efectuar de nuevo la simulación implica completar una serie de pasos marcados por *Hydrotherm Interactive*, que se han seguido de manera análoga a lo hecho en el trabajo previo.

El primer paso es definir las unidades de los parámetros implicados en la modelización (Fig.22).

⁹ Ver Figura 16 de la página 21.

Simulation Time: year	Thermal Conductivity: W/m-K
Domain Length: km	Specific Heat: kJ/kg-K
Pressure: bar	Basal Heat Flux: mW/m ²
Enthalpy: kJ/kg	Precipitation Flux: mm/yr
Permeability: darcy	Source Flow Rate: kg/yr
Compressibility: Pa ⁻¹	Source Enthalpy/Temperature: Deg.C
Rock Density: g/cm ³	

Figura 22. Unidades de los diferentes parámetros considerados.

Posteriormente se definen los materiales de la fosa y los valores de sus propiedades físicas, los cuales se han tomado del trabajo previo de Pla (Fig.23). En este trabajo se considera un valor de permeabilidad más elevado para la milonita de Caldes de Malavella, ya que las aguas contienen gas, que hace aumentar la permeabilidad, generando una temperatura de las aguas en superficie mayor (60°C en Caldes de Malavella frente a los 42°C en Santa Coloma de Farners).

Asimismo, la permeabilidad vertical y horizontal es la misma, ya que ha considerado que los materiales son isotrópicos y homogéneos en la escala considerada. Por otra parte, la compresibilidad no se ha considerado porque existe permeabilidad en los materiales.

Color	Name	Poros	X-perm	Z-perm	ThCond	SpHeat	RxDen	Comprs
	Inactive	0	0	0	0	0	0	0
	Granit Paleozoic	0,001	1E-5	1E-5	2,7	1,1	2,6	0
	Materials Cenozoics	0,02	1E-5	1E-5	1,8	0,86	2,3	0
	Milonita de Caldes de Malavella	0,1	0,03	0,03	1,8	0,86	2,4	0
	Milonita de Santa Coloma de Farners	0,1	0,025	0,025	1,8	0,86	2,4	0

Figura 23. Propiedades físicas de los materiales de la fosa. De izquierda a derecha: Porosidad (Poros) en tanto por 1, Permeabilidad lateral y vertical (X-perm y Z-perm) en darcy, Conductividad térmica (ThCond) en W/m.K, Calor específico de la roca (SpHeat) en KJ/Kg.K, Densidad (RxDen) en g/cm3, y la Compresibilidad (Comprs) en Pa-1

A continuación se definen las condiciones de contorno del modelo teórico: la temperatura y presión superficial, y el flujo de calor basal. Estas condiciones quedan limitadas dentro del dominio considerado, que se ha definido por una sección bidimensional de 27 km de longitud y 5 km de profundidad. La orientación de la sección es NW-SE y pasa por las localidades de Santa Coloma de Farners y Caldes de Malavella (Fig.24).

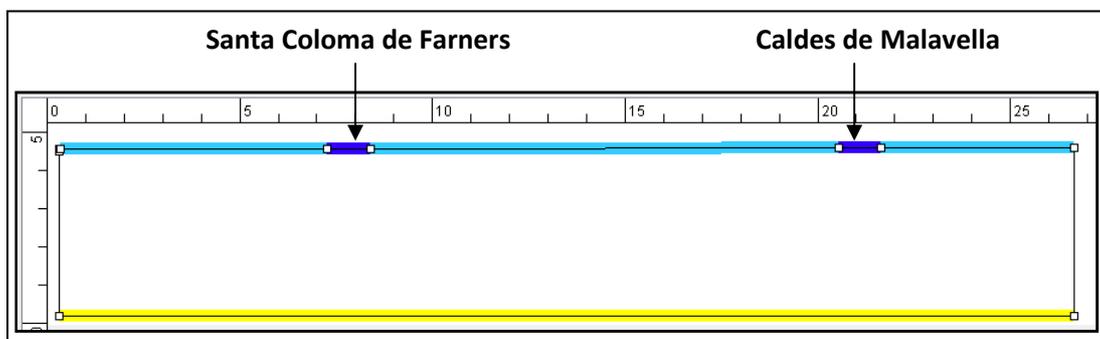


Figura 24. Condiciones de contorno

En este dominio, las condiciones de contorno consideradas son análogas a las del estudio previo. La presión superficial es de 1.01 bares (presión atmosférica) y la temperatura superficial de 15°C, ambas representadas por una línea azul claro. Se consideran, a igual presión, una temperatura anómala de 60°C para Caldes de Malavella y de 42°C para Santa Coloma de Farners, representadas en azul oscuro. Finalmente, se ha considerado un flujo de calor basal de 81 mW/m², representado con una línea amarilla.

Posteriormente, se define el enrejado de celdas del dominio, que marcará el detalle de cálculo, y que es este caso se ha fijado en una red uniforme de celdas cuadradas de 0.21 km de lado. En total 130 columnas y 26 filas (Fig.25).

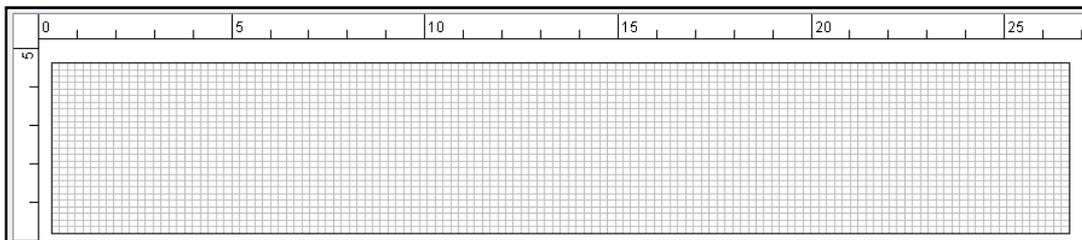


Figura 25. Enrejado de celdas de cálculo

Finalmente, con las herramientas que ofrece el programa, se ha dibujado el nuevo modelo geoestructural considerando una relación de materiales más próximas a la realidad, como por ejemplo la existencia de diversos bloques de granito fracturados y basculados en dirección noroeste en el centro de la cubeta¹⁰ (Fig.26).

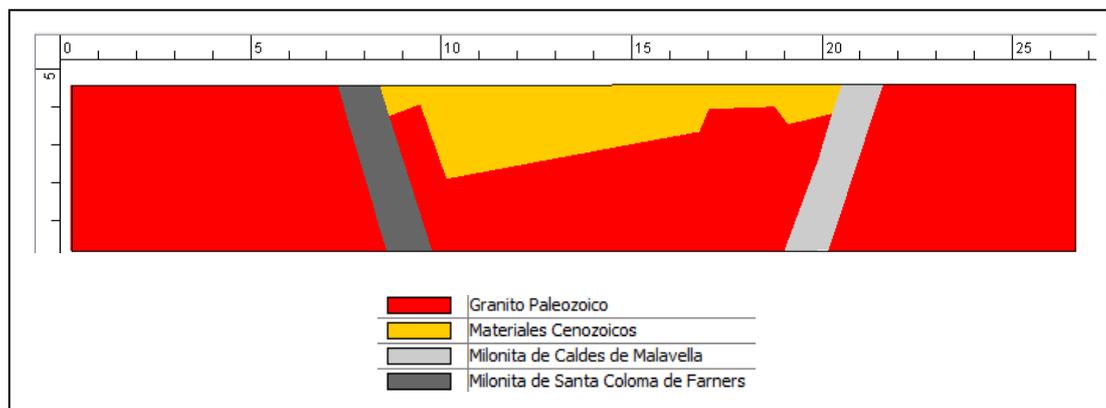


Figura 26. Nuevo modelo geoestructural teórico propuesto de la depresión de La Selva

6.3.1. Resultados

Se parte de un estado inicial, que corresponde a un momento donde el contexto geológico y estructural es compatible con la formación de convecciones (Fig.27). En este estado, las isotermas son horizontales y paralelas, con un gradiente geotérmico coherente con los

¹⁰ Ver Figura 16 de la página 21.

40°C/km. Se aprecian las temperaturas anómalas en Caldes de Malavella y Santa Coloma de Farners que se han fijado en la tercera etapa de la simulación.

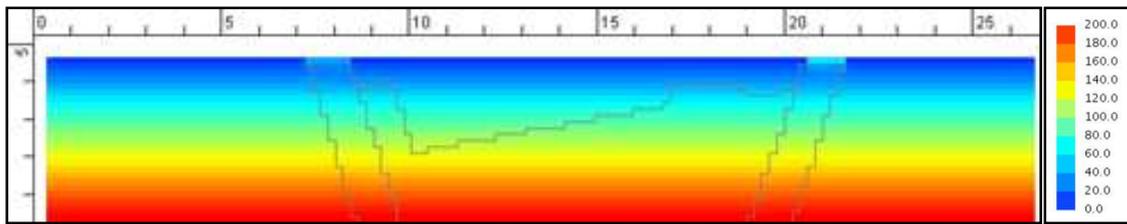


Figura 27. Estado inicial (Tiempo=0) previo al inicio de las anomalías y rango de temperaturas en °C.

Se percibe el inicio de las células convectivas a los 1.719 años después del comienzo de la simulación (Fig.28). En ambos casos las células convectivas se dan en las milonitas de falla. Las primeras señales se dan antes en las milonitas de Caldes de Malavella, debido a su mayor permeabilidad, como ya se ha explicado. La evolución de estas células convectivas dará lugar a las anomalías geotérmicas.

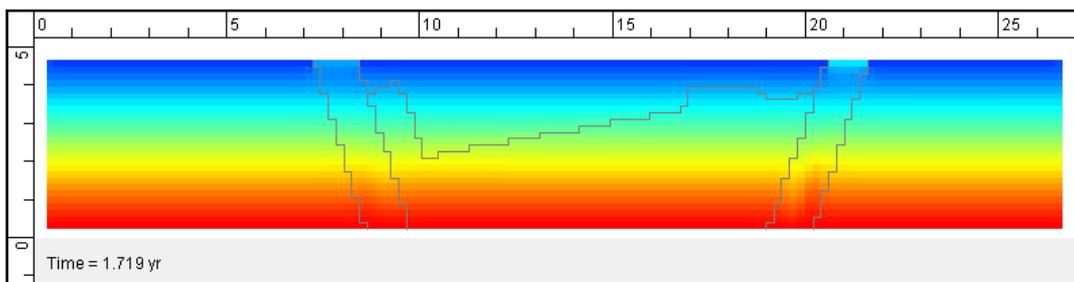


Figura 28. Inicio anomalías geotérmicas.

Para un tiempo de 5.663 años desde el inicio de la simulación, la anomalía se manifiesta en superficie en Caldes de Malavella (Fig. 29), asimismo sucede en Santa Coloma de Farners en un tiempo de 8.911 años (Fig. 30). En ambas figuras se aprecia claramente cómo el fluido circula a través de las milonitas, confirmándose que las estructuras principales estimulan la formación de las anomalías de la cuenca. De hecho, se aprecia que circulan por los extremos de la misma, por diferencias de densidad, generándose la célula convectiva.

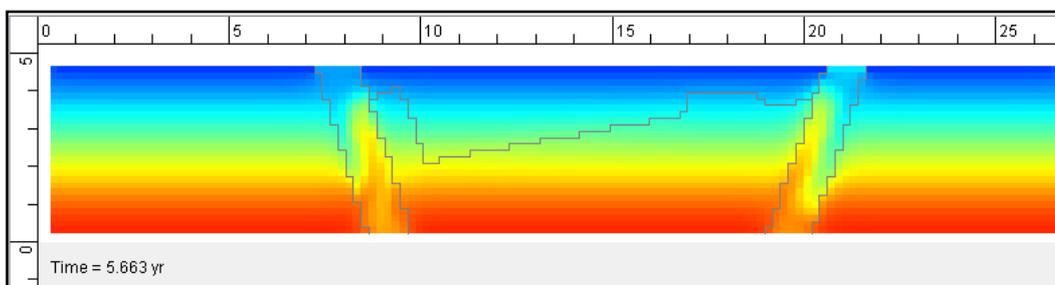


Figura 29. Manifestación superficial en Caldes de Malavella.

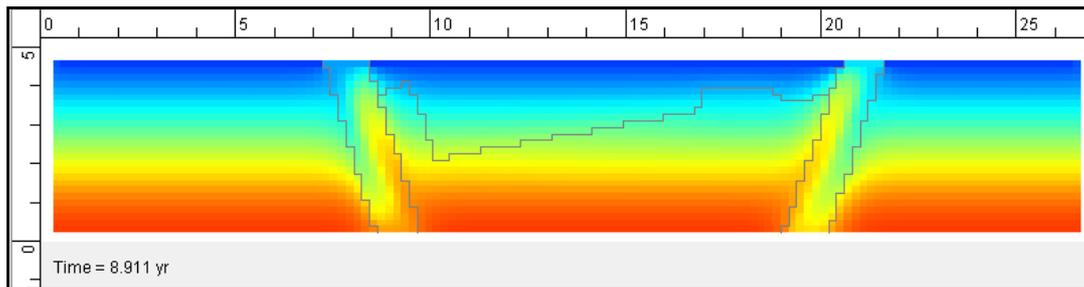


Figura 30. Manifestación superficial en Santa Coloma de Farners.

Para un tiempo de 76.074 años se observan manifestaciones en superficie en ambos sectores de la fosa de La Selva, correspondientes a 60°C en Caldes de Malavella y 40°C en Santa Coloma de Farners y una temperatura de base de unos 120-130°C. Este contexto puede ser coherente con las condiciones que se dan en la actualidad (Fig. 31). A su vez, se aprecia una disminución de la anomalía, que evoluciona desde los 40.000 años desde el inicio de la simulación y que en la Fig.31 ya es notable.

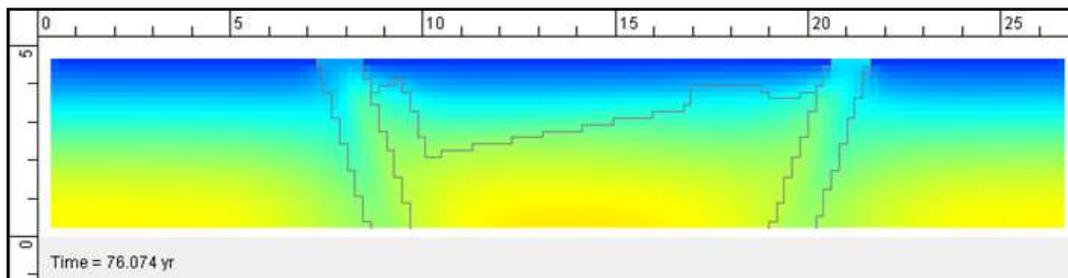


Figura 31. Evolución de la anomalía geotérmica.

La convección continúa pero la temperatura del sistema va disminuyendo progresivamente. Para un tiempo de 197.943 años, ya no se observan las manifestaciones en superficie en ninguna de las dos localidades (Fig. 32). La temperatura en la base del modelo ha disminuido a unos 90°C, y la temperatura superficial rondaría los 15°C. Se puede decir que la situación actual (2018) se sitúa en algún momento entre los 8.911 años y los 197.943 años.

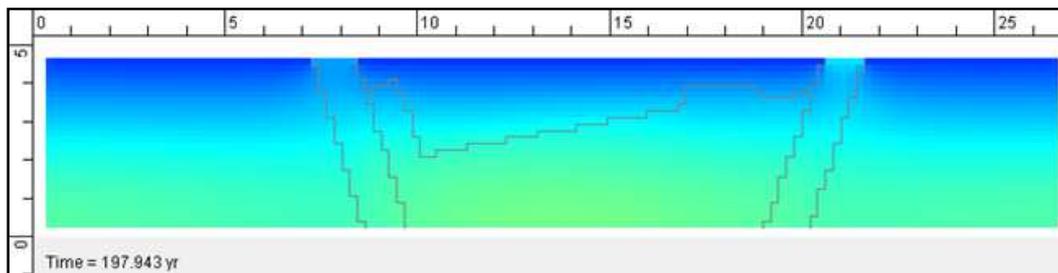


Figura 32. La anomalía deja de manifestarse en superficie.

A partir de este punto, las anomalías se disipan hasta finalizar la modelización, que se ha fijado en 1.900.000 años, presentándose estabilidad en las isotermas desde un tiempo 556.224 en adelante.

7. Conclusiones

El aprovechamiento de la energía de origen geotérmico se verá potenciada en los próximos años, gracias a las iniciativas a nivel internacional, y a cada vez un mayor conocimiento, avance tecnológico y predisposición a ello.

A nivel europeo, actualmente se explota en zonas con contextos geológicos favorables para ello, pero el conocimiento de los yacimientos EGS abre una puerta a la explotación en otros ambientes.

La cuenca de La Selva se engloba en un contexto extensional a nivel regional, que da lugar a un adelgazamiento cortical y a una anomalía geotérmica en profundidad. Su caracterización muestra que reúne los requerimientos geoestructurales básicos y necesarios para su valoración como yacimiento EGS.

El modelamiento en *Hydrotherm Interactive* ha permitido observar que el inicio de las convecciones en la cuenca de La Selva que dan lugar a la anomalía geotérmica se sitúan en los 1.719 años posteriores al contexto ideal favorable a su generación.

Las manifestaciones en superficie nacen a los 5.663 años en Caldes de Malavella y a los 8.911 años en Santa Coloma de Farners, y dejan de manifestarse aproximadamente 190.000 años después.

Respecto a la modelización previa realizada en la cuenca de La Selva, los tiempos resultantes mantienen el mismo rango de valores y evolución, iniciándose las convecciones a los 1.564 años, manifestándose en superficie primero en Caldes de Malavella a los 2.722 años y posteriormente en Santa Coloma de Farners a los 3.712 años. Estas manifestaciones superficiales dejan de presentarse a los 237.587 años, después de un período de unos 200.000 años reduciéndose la anomalía geotérmica. Por tanto, el factor influyente en el desarrollo de las convecciones, más que la disposición de los materiales, son las propiedades físicas de los mismos, determinantes en la configuración y evolución del sistema geotérmico.

8. Referencias bibliográficas

- Albert, J. F. (1975): *El equilibrio albita-anortita como termómetro hidrogeotérmico en zonas graníticas*. Acta Geológica Hispánica, (5):170-174.
- Albert Bertrán, J.F. & Corominas, J. (1985): *L'energia geotérmica a Catalunya*. Historia Natural del Paisos Catalans, Vol. 3: 197-223.
- Anadon, P., Colombo, F., Esteban, M., Marzo, M., Robles, S., Santanach, P., Sole Sugrañes, LL. (1979): *Evolución tectonoestratigráfica de los Catalánides*. Acta Geol. Hispánica, 14: 242-270.
- Arellano Gómez, V. (2008): *La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura*. Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).
- Bächler, D., Kohl, T., i Rybach, L. (2003): *Impact of graben-parallel faults on hydrothermal convection-Rhine Graben case study*. Phys Chem Earth. 28: 431-441 p.
- Díaz-González, L., Santoyo, E. y Reyes-Reyes, J.(2008): *Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquímicas: aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(3):465-482.
- EGEC European Geothermal Energy Council 2017. *Proceedings 2016 EGEC Geothermal Market Report*, 6th edition, may 2017.
- Folch, A. (2010): *Geological and human influences on groundwater flow systems in range-and-basin areas: the case of the Selva Basin (Catalonia, NE Spain)*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Folch, A., Menció, A., Puig, R., Soler, A., Mas-Pla, J. (2011): *Groundwater development effects on different scale hydrogeological systems using head, hydrochemical and isotopic data and implications for water resources management: The Selva basin (NE Spain)*. Journal of Hydrology, 403:83-102.
- Fournier, R., Truesdell, A. (1970): *Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A.* U.N. Symp. Development Utilization Geothermal Resources, Pisa.
- Instituto Geológico y Minero de España IGME, (1979). *Proyecto de investigación geotérmica en el Vallés mediante sondeos de reconocimiento y síntesis hidrogeotérmica*, v. 3, Síntesis hidrogeológica de la Selva.
- Instituto Geológico y Minero de España IGME, (1985). *Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección Geotérmica*.
- ITGE (1979): *Estudio geotérmico preliminar de la depresión de la Selva (Gerona)*. Informe Geoquímico, Tomo I, memoria y anexos.

Linares, R., Pallí, L., Roqué, C, Vall, E. (2004): *La divulgación de la singularidad geológica y minera: las manifestaciones hidrotermales del NE de Cataluña*. Actas V Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico, ISBN 84-688-4017-3.

Llopis-Lladó, N. (1951): *Estudio hidrogeológico de los alrededores de Caldas de Malavella (Gerona)*. Speleon 2, 103-164.

Mas-Pla, J., Trilla, J., Pallí, L. (1985): *Imposicions estructurals en el drenatge de la conca del riu Onyar (Girona)*. Scientia Gerundensis, 11:103-118.

Menció, A. (2005): *Análisi multidisciplinaria de l'estat de l'aigua a la depressió de la Selva*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

Menció, A. , Folch, A., Mas-Pla, J. (2012): *Identificació de fluxos subterranis regionals en la recàrrega d'aqüífers en depressions tectòniques mitjançant l'ús de dades geoquímiques: el cas de la Selva (Girona)*. (Eds.) 2016. Geoquímica ambiental a Catalunya: recull d'articles. Monografies tècniques de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 5:125-142.

Navarro, A., Font, X., Viladevall, M. (2011): *Geochemistry and groundwater contamination in the La Selva geothermal system (Girona, Northeast Spain)*. Geothermics, 40:275-285.

Panichi, C. y Badiola, E.R. (1978): *Utilización del Geotermómetro Na-K-Ca en la prospección preliminar de áreas geotérmicas*. Boletín Geológico y Minero, LXXXIX-V:459-467. ISSN: 0366-0176.

París, C., Albert, J.F. (1976): *Sobre la génesis de las aguas carbónicas de la Provincia de Gerona*. Acta Geológica Hispánica, 6: 124-128.

Piqué, A., Grandia, F., Canals, A. (2010): *Geoquímica de l'arsènic al sistema geotèrmic de Caldes de Malavella*. (Eds.) 2016. Geoquímica ambiental a Catalunya: recull d'articles. Monografies tècniques de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 5: 109-123.

Pla, O. (2012): *Estudi de les anomalies geotèrmiques de la depressió de La Selva. Manantials termals de Santa Coloma de Farners i Caldes de Malavella*. Treball Final de Grau. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona, 53 pàgs.

Pous, J., Solé Sugrañes, Ll., Badiella, P. (1990): *Estudio geoelectrico de la depresión de La Selva (Girona)*. Acta Geológica Hispánica, 25 (4):261-269.

Programme of the European Union. *A prospective study on the geothermal potential in the UE* Proceedings GEOELEC, Deliverable nº 2.5, November 2013.

Redondo, R. & Yélamos, J.G. (2000): *Hidrogeoquímica convencional e isotópica de las aguas carbónicas de Cataluña*. Geogaceta, 28: 121-124.

Sánchez, J., Sanz, L., Ocaña, L. (2011): *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio técnico PER 2011-2020*. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía IDAE, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital.

Vegas, R., Fontbote, J.M., Banda, E. (1980): *Evolution and Tectonics of the Western Mediterranean and Surrounding Areas: Widespread groundwater Neogene rifting superimposed on Alpine regions of the Iberian Peninsula*. Proc. EGS Symp. Inst. Geogr. Nac., Madrid, Spec. Publ., 201: 109-128.

Referencias recursos en línea

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía IDAE, Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital [online]. *Geotermia* [consulta: 22 abril 2018] Disponible en: <http://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/geotermia>

International Renewable Energy Agency IRENA. *Geothermal power: Technology brief*. [online]. ISBN 978-92-9260-036-5 [consulta: 22 abril 2018] Disponible en: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA_Geothermal_Power_2017.pdf

World Energy Council. *Energy Resources: Geothermal* [online] [última consulta: 16 mayo 2018] Disponible en: <https://www.worldenergy.org/data/resources/resource/geothermal/>

Renewable Energy World. *2017 Outlook: Geothermal Is Trending Upwards*, [online] [última consulta: 16 mayo 2018] Disponible en: <https://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-20/issue-1/features/geothermal/2017-outlook-geothermal-is-trending-upwards.html>

GeoELEC Graphical Information System [online] [última consulta: 8 junio 2018] www.thermogis.nl/geoelec/ThermoGIS_GEOELEC.html

EU SCIENCE HUB. *Geothermal energy-new report analyses the sector* [online]. Febrero 2015. [última consulta: 15 mayo 2018] Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/new-report-analyses-geothermal-energy-sector>

www.icgc.cat

www.redes-cepalcala.org

www.worldenergy.org

www.unugtp.is

9. Anexos

I. Flujo térmico superficial en Europa

II. Aprovechamiento geotérmico alta entalpía en Europa

III. Centrales geotérmicas en yacimientos EGS

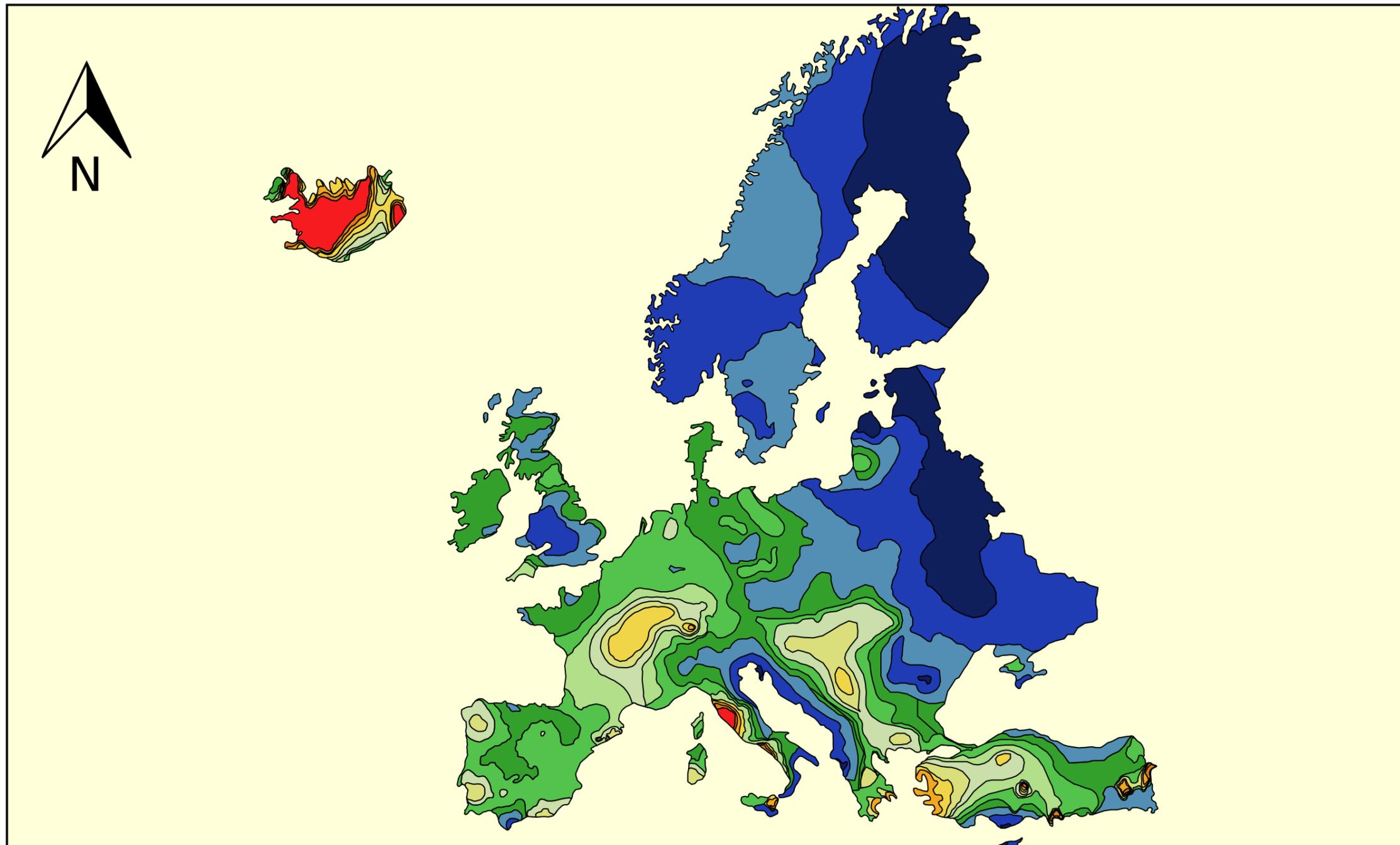
10. Abstract

Geothermal energy is the only source of renewable primary energy that does not come from solar radiation and it is also one of the least known. Its origin within the Earth itself makes the difference between the other renewable energies. Therefore, it is considered a clean, renewable and efficient energy source. The applications of geothermal energy depend on the characteristics of each source. Thus, medium and high temperature geothermal resources (100-150°C) are allowed to be used in electricity production.

At present, electricity production based on geothermal energy is mainly placed in geologically favorable environments for this purpose. The natural evolution towards deeper understanding and technological advances offer the possibility of exploiting it in other contexts. Specifically, many sectors in Catalonia have been an object of interest and study as potential geothermal deposits. The tectonic basin located in La Selva meets the basic conditions to assess its potential as an EGS deposit due to its geological and structural traits.

ANEXO I

Flujo térmico superficial en Europa



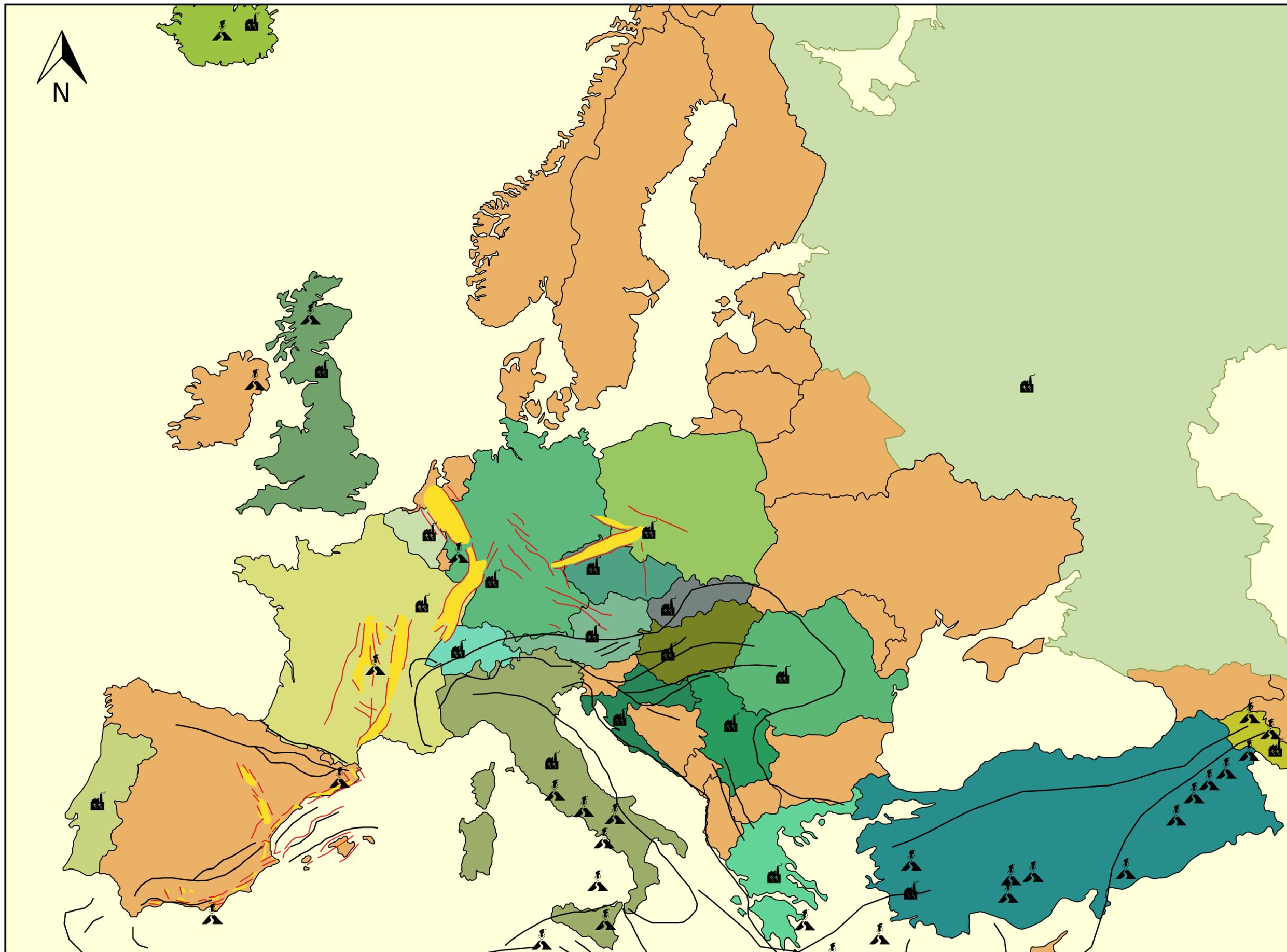
Flujo de Calor (mW/m²)

- > 140
- entre 130 y 140
- entre 120 y 130
- entre 110 y 120
- entre 100 y 110
- entre 90 y 100
- entre 80 y 90
- entre 70 y 80
- entre 60 y 70
- entre 50 y 60
- entre 40 y 50
- < 40

1000 0 km

ANEXO II

Aprovechamiento geotérmico alta entalpía en Europa



Leyenda

- ▲ Actividad Volcánica
- ⚡ Centrales geotérmicas
- Geotectónica
- Fallas distensivas
- Sistema fosas tectónicas
- Sin aprovechamiento
- Portugal
- Italia
- Suiza
- Alemania
- Bélgica
- Austria
- Croacia
- Serbia
- Polonia
- República Checa
- Hungría
- Rumanía
- Eslovaquia
- Reino Unido
- Islandia
- Rusia
- Grecia
- Turquía
- Armenia
- Francia

0 500 km

ANEXO III

Centrales geotérmicas en yacimientos EGS

