

Trabajo Fin de Máster

El Yacimiento Geotérmico del Serrablo

Autor/es

Daniel Lamarca Irisarri

Director/es

Ana Rosa Soria de Miguel
Javier Elez Villar

Facultad de Ciencias
2012

EL YACIMIENTO GEOTÉRMICO DEL SERRABLO



Sondeo geotérmico en Larderello, Italia (fotografía D. Lamarca).

DANIEL LAMARCA IRISARRI

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

RESUMEN

Debido a la importancia que está adquiriendo la producción de energías renovables en la sociedad actual, y en especial con motivo del creciente interés que dentro de éstas está despertando la geotermia, se ha decidido plantear este estudio sobre el funcionamiento de un sistema geotérmico en la zona del Serrablo.

El objetivo de este estudio es caracterizar el yacimiento geotérmico del Serrablo con el fin de realizar una estimación del potencial geotérmico de la zona y desarrollar una hipótesis sobre su posible funcionamiento.

El motivo principal de la elección de la zona de Serrablo es que se trata de una zona que ya despertó interés geotérmico durante la década de 1980, en la que aprovechando los datos de los sondeos realizados en la exploración de hidrocarburos en la zona, se consiguió localizar un acuífero con posibilidades geotermiales por las avenidas de agua a alta temperatura (mayor de 150°C) producidas durante la perforación de los sondeos en los niveles carbonatados del Daniense.

La metodología aplicada, incluye la revisión bibliográfica de los informes referentes a los sondeos y al yacimiento geotérmico, la reconstrucción de las columnas de sondeo y la realización de un panel de correlación que permita determinar características como la extensión y potencia del acuífero, para realizar una modelización de carácter conservativo del sistema.

Además, a partir de estudios paleogeográficos regionales se argumenta la hipótesis de la existencia de un paleokarst que afecta a los materiales que constituyen el reservorio, y a través de comparaciones con otros sistemas geotérmicos europeos, nos permite realizar una estimación no conservativa del funcionamiento del sistema.

Los datos obtenidos al final del estudio, muestran que según la hipótesis conservativa, la capacidad de producción de la central sería de 5,16 MWel, dato que entra dentro de lo esperable según las características del acuífero, y con un rango aceptable para la producción eléctrica.

ABSTRACT

Due to the importance that nowadays renewable energies are taking in the society, and specially the upward interest that geothermal energy shows, we have decided to do this study about how Serrablo geothermal system works.

The aim of this study is to describe the Serrablo geothermal system to make an estimation about its geothermal potential and to develop a theory about its running.

Serrablo area has been selected mainly because it is an area that it was studying during 1980 decade using data of the hydrocarbons exploration wells. As a consequence of this, an thermal aquifer was located thanks to the leakage of high temperature water (<150°C) that it happened during carbonates of Daniense drilling.

The methodology applied to make this study includes a bibliografic check of the documents about wells and geothermal reservoir, a remake of the stratigraphic skill of the wells and the execution of a correlation panel that it allow us to determine area and thickness of the aquifer, this data will be used to do a conservative model of the geothermal system.

Besides of this, regional palaeogeographic data give us data to propound a hypothesis about existence of paleokarst phenomenon that it affected to reservoir's rocks. This allow us to develop a non-conservative model and compare it with other european geothermal systems.

Results of the study show us that conservative hypothesis estimates a total capacity production of 5,16 MWel, this is an expected data due to the aquifer skills.

AGRADECIMIENTOS

Gracias, a todos aquellos que supieron ser comprensivos y me apoyaron en el desarrollo del trabajo.

Gracias, por supuesto a Don Francisco Gonzalo, Jefe del departamento de Geología de Samca, por la colaboración prestada, por las enseñanzas recibidas durante los años que trabajé con él y por ser la persona que me descubrió la apasionante aventura de la geotermia.

Finalmente, un especial agradecimiento a Ana Rosa Soria de Miguel (“La Jefa”) y Javier Élez Villar (“El Jefe”) por haberse atrevido a realizar este viaje conmigo y compartir sus muchas y diversas experiencias en el camino andado durante este trabajo. Han demostrado ser unos excelentes geólogos y mejores profesores, pero además y por encima de todo, unas personas maravillosas.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	3
1.1 JUSTIFICACIÓN, CONTEXTO Y OBJETIVOS.....	3
1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	5
1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	7
1.3.1 Evolución temporal.....	7
1.3.2 Relleno sedimentario de la Cuenca de Jaca.....	10
1.4 METODOLOGÍA.....	12
2. GEOTERMIA: DEFINICIÓN Y CONCEPTO	15
2.1 DEFINICIÓN DE GEOTERMIA.....	15
2.2 EL SISTEMA GEOTÉRMICO.....	16
2.2.1 Gradiente geotérmico.....	16
2.2.2 Fluido geotérmico.....	17
2.2.3 Yacimiento geotérmico.....	17
2.2.4 Recurso geotérmico.....	20
3. PRESENTACIÓN DE DATOS.....	23
3.1 INFORMES FINALES DE SONDEOS.....	23
3.1.1 Descripciones de las columnas de los sondeos.....	25
3.1.1.1 Serrablo - 7.....	25
3.1.1.2 San Vicente – 1.....	27
3.1.1.3 Serrablo – 4	28
3.1.2 Descripciones del acuífero termal.....	29
3.2 INFORMES DEL IGME.....	29
4. EL SISTEMA GEOTÉRMICO.....	33
4.1 PANEL DE CORRELACIÓN.....	33
4.2 CÁLCULOS DE POTENCIAL.....	37
4.2.1 Descripción de fases y parámetros.....	37
4.2.2 Resultados.....	41
4.2.3 Análisis del potencial geotérmico	42
4.3 COMPARATIVA CON OTROS SISTEMAS GEOTERMALES.....	44
4.3.1 Altheim, Austria.....	44
4.3.2 Unterhaching, Alemania.....	45
5. CONCLUSIONES.....	47
6. GLOSARIO.....	49
7. BIBLIOGRAFÍA.....	51

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 JUSTIFICACIÓN, CONTEXTO Y OBJETIVOS

Según el IDAE (2008), (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), la sociedad española actual, en el contexto de la reducción de la dependencia energética exterior, de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles y de una mayor sensibilización ambiental, demanda cada vez más la utilización de las energías renovables y la eficiencia en la generación de electricidad.

Históricamente se han considerado renovables el conjunto de fuentes energéticas primarias que tienen su origen en la radiación solar, en la fuerza del viento, hidroeléctricas, y biomasa, pero también se incluye la energía geotérmica que, a diferencia del resto de energías renovables, tiene su origen en el calor interno de la Tierra. Esta energía se produce por la desintegración de isótopos radiactivos, los movimientos diferenciales entre las distintas capas que constituyen la Tierra y por el calor latente de cristalización del núcleo externo.

La energía geotérmica constituye pues un campo en alza en el mundo de la investigación que en otros países, como Alemania y Francia, ya tiene un largo recorrido de más de 20 años dedicados a la exploración de recursos y al desarrollo y estimulación de los yacimientos geotérmicos.

Este interés por la energía geotérmica se puede justificar por varios aspectos a parte de su carácter renovable, con todas las implicaciones medioambientales y morales que conlleva, es una energía claramente autóctona, que apoya la independencia energética del exterior y fomenta una fuente de trabajo para las poblaciones cercanas a las centrales.

Uno de los principales problemas a los que debe enfrentarse la energía geotérmica con respecto a otro tipo de renovables ya citadas es la dificultad de evaluación del recurso. Por ejemplo, el desarrollo de un campo eólico consta de la instalación de bases de medidas de viento a diferentes alturas durante un periodo concreto de tiempo y su posterior procesado. Un mecanismo similar es aplicado en las energías solares, sin embargo la exploración geotérmica no puede llegar a un nivel de precisión semejante sin la inversión de grandes cantidades de dinero.

Además, la energía geotérmica no tiene mecanismos tecnológicos propios para su exploración puesto que se cuenta con técnicas heredadas de la exploración de hidrocarburos. Estos, en cierta manera, son los que más se ajustan a las necesidades geotérmicas en yacimientos muy concretos, cómo por ejemplo en acuíferos sedimentarios profundos, pero no así en otro tipo de yacimientos cómo por ejemplo en rocas graníticas.

Por su parte, en nuestro país desde hace tres años se ha venido desarrollando una labor de exploración de recursos geotérmicos importante en la cual me he visto involucrado a través

de mi trabajo cómo geólogo de la empresa Molinos del Ebro, perteneciente al Grupo Samca y que decidió apostar por la investigación en geotermia como energía renovable con gran proyección de futuro. Al igual que ella, otras muchas empresas avalaron este interés como así lo demuestra el mapa de dominio minero geotérmico. Este se ha realizado principalmente basándose en los antiguos estudios efectuados en la década de los 80 por el IGME y que recogen gran cantidad de datos sobre manifestaciones geotérmicas y zonas de interés geotérmico peninsular.

El principal objetivo del presente trabajo es caracterizar el yacimiento geotérmico del Serrablo con el fin de realizar una estimación del potencial geotérmico de la zona y desarrollar una hipótesis sobre su posible funcionamiento.

La elección de éste alude a diferentes razones entre las que caben destacar:

1- La importancia de localizar un recurso energético autóctono y renovable, fundamental a la hora de impulsar valores sociales y económicos en la Comunidad Autónoma de Aragón.

2- La constancia de la existencia de avenidas de agua sufridas en los sondeos de exploración de hidrocarburos llevados a cabo en la Cuenca de Jaca durante la década de los 80 (referida anteriormente), con temperaturas superiores a los 150°C. Este es un indicio claro de la existencia de un potencial acuífero en la zona situado en las calizas del Paleoceno – Eoceno Inferior. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo se centra básicamente en esta unidad carbonatada que se sitúa sobre las calizas del Cretácico superior y por debajo de la unidad turbidítica eocena. Estas presentan peores características para constituirse cómo un acuífero geotérmico, puesto que los informes de sondeos apuntan a que son unidades con porosidades bajas.

3- Por tratarse de un área ampliamente estudiada en todos sus aspectos geológicos tanto por entidades privadas como públicas, cómo es el caso del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de Zaragoza, entre otros.

1.2 SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio queda limitada geográficamente en el Pirineo oscense, dentro de los términos municipales de Sabiñánigo, Bisecas y Jaca (Fig. 1.1). Esta área se enmarca dentro de las hojas 177 y 210 del MTN a escala 1:50.000, dentro de las siguientes latitudes, $42^{\circ} 38' N$ en su zona Norte y $42^{\circ} 29' N$ en su zona Sur, y longitudes, $0^{\circ} 18' W$ a $0^{\circ} 30' W$.

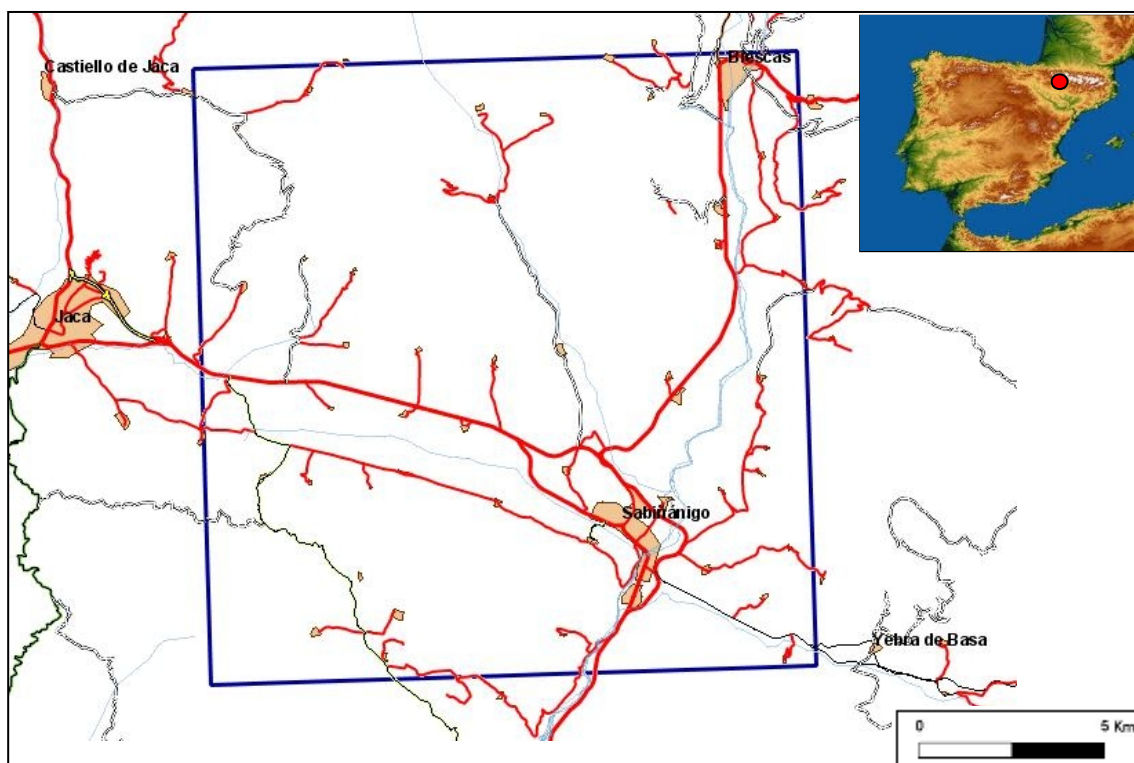


Figura 1-1. Mapa mostrando la localización geográfica de la zona de estudio.

El relieve de la zona de estudio está caracterizado en la zona Norte por un frente de elevaciones de dirección ONO a ESE, con alturas máximas de hasta 1.580 metros, y una altura media de unos 1.200 metros.

La zona media del área de estudio se encuentra ocupada por una depresión de dirección ONO a ESE, conocida como la Val Ancha, entre las localidades de Jaca y Sabiñánigo y de una altura próxima a los 800 metros.

Esta depresión se encuentra limitada hacia el Sur por la Sierra de Buyán (1.100 metros) y los relieves relacionados con Peña Oroel, que presenta valores máximos de 1.690 metros.

Hidrográficamente, el drenaje se lleva a cabo a través de los ríos Gállego y Aurín, en dirección prácticamente N – S, en la zona Este del área de estudio. Más al Sur el cauce de agua más importante que entra dentro de la zona es el río Basa, con dirección ESE a ONO (Fig. 1-2).

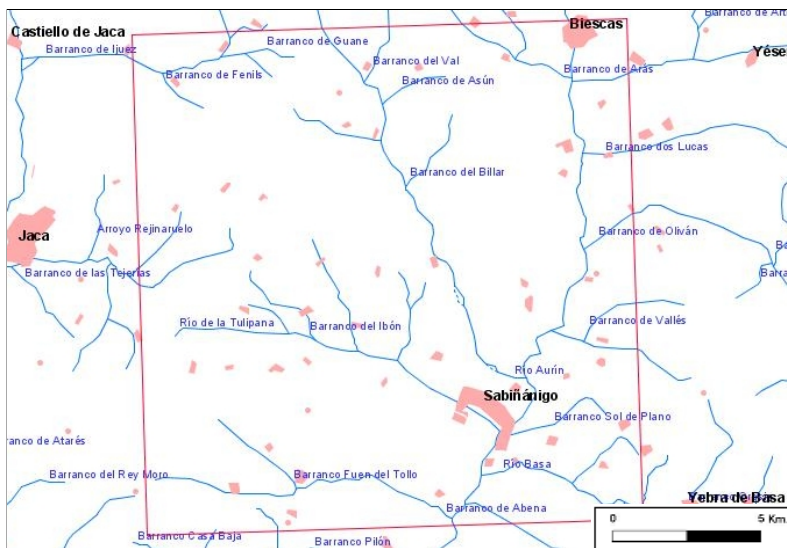


Figura 1-2. Mapa mostrando la distribución hidrográfica en la zona de estudio.

Los núcleos de población más importantes dentro del área de estudio son Sabiñánigo, que comprende multitud de pequeños núcleos a su alrededor, con 10.383 habitantes (INE 2010) y que es un núcleo con importantes funciones industriales, y Biescas con 1.634 habitantes (INE 2010) y constituido ahora en un enclave turístico muy destacado, tanto en invierno como en verano.

Las vías de comunicación que atraviesan la zona de estudio son la E-7 que llega hasta Sabiñánigo desde Huesca atravesando el puerto de Monrepós, y desde allí se dirige a Jaca, y la N-260 que une Sabiñánigo con Biescas. Existen además multitud de carreteras de menor entidad y una intrincada red de pistas forestales que se encuentran, por lo general, en buen estado. Por último es destacable también la presencia del ferrocarril que une Zaragoza con Canfranc y que cruza el área siguiendo un trayecto paralelo al de la E-7 (Fig. 1-3).

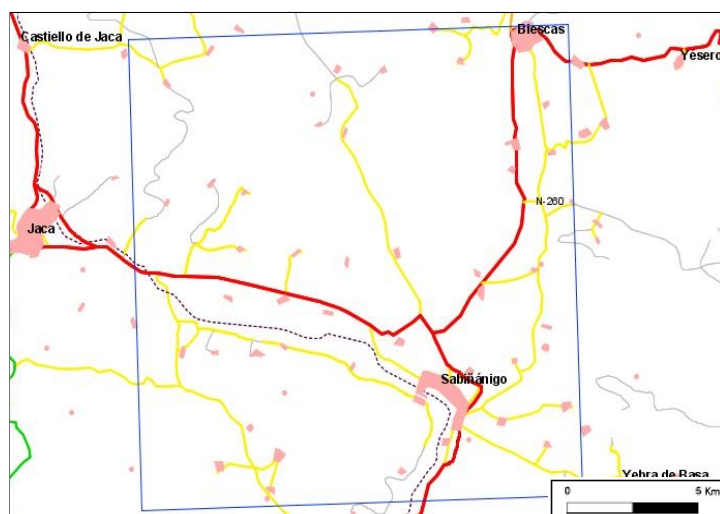


Figura 1-3. Mapa mostrando las vías de comunicación en la zona de estudio. En rojo las de orden mayor, en amarillo las de menor, y en gris las pistas forestales. La línea discontinua corresponde al ferrocarril.

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio se enmarca dentro del dominio Pirenaico. Se trata principalmente de una cuenca sinorogénica, con relleno de material terciario y cuyas estructuras siguen en general las directrices estructurales pirenaicas WNW a ESE.

1.3.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL

Según las síntesis generales del Pirineo de Casas y Pardo (2004) y Teixell (2000), los Pirineos constituyen la cordillera que limita por el Norte la microplaca Ibérica, con una longitud total que supera los 1.000 Km, desde el Atlántico hasta el Mediterráneo. No obstante, se suele considerar como cadena pirenaica propiamente dicha al segmento de la misma que separa Iberia de la zona continental europea (Pirineo ístmico). Tradicionalmente se ha dividido al Pirineo y sus cuencas de antepaís en varias zonas, en sentido transversal, que son de Norte a Sur, la Cuenca de Aquitania, Zona Norpirenaica, Zona Surpirenaica y Cuenca del Ebro (Fig. 1-4).

- Preestructura Varisca

El “zócalo” paleozoico de la Cordillera Pirenaica está compuesto por metasedimentos y rocas ígneas de edad Cambro-Ordovícico a Carbonífero. En el Pirineo central dominan los metasedimentos de edad Devónico y Carbonífero, parcialmente cubiertos por una molasa tardivarisca compuesta por areniscas, lutitas y calizas continentales. La estructura Varisca de la Cordillera Pirenaica está representada por pliegues y cabalgamientos, en general vergentes al Sur y acompañados por esquistosidad de plano axial.

Los cuerpos ígneos más importantes corresponden a rocas graníticas emplazadas en una etapa tardía en relación al período orogénico principal bajo un régimen transpresivo dextro.

- La extensión Permo - Mesozoica

Al final de la orogenia Varisca la sedimentación continental se asocia a grandes fallas transcurrentes con cierta componente normal. Las cuencas asociadas a estas fallas son restringidas arealmente aunque alcanzan espesores de sedimentos importantes. A partir del Pérmico, y durante el Triásico Inferior, la sedimentación se hace más extensiva pero manteniendo el tipo de facies y sus áreas de distribución. Es probable que durante el Triásico la sedimentación estuviera ligada a fallas normales, lo cual explicaría la ampliación de las cuencas en relación a la etapa de sedimentación pérmica.

Durante el Mesozoico la sedimentación del surco pirenaico se relaciona, primero con la separación entre la Microplaca Ibérica y la Placa Europea y después con el movimiento de desgarre sinistro entre ambas placas, ligados ambos movimientos a la apertura del Atlántico y del Golfo de Vizcaya.

En la Zona Surpirenaica el registro mesozoico no es tan continuo como en la Zona Norpirenaica o cómo en la Cuenca Vasco-Cantábrica. En las cuencas situadas sobre la Unidad Central Surpirenaica en el Pirineo central se registran espesores de sedimentos mesozoicos considerablemente reducidos, en parte por erosión o por no depósito o sedimentación de series reducidas de plataforma durante el Cretácico superior.

- La compresión Cretácico superior - Terciario.

A partir del Cretácico superior, la convergencia de las placas africana y europea cambia el régimen tectónico del surco pirenaico. Aunque una parte de la sedimentación del Cretácico terminal y del Paleoceno pudiera estar relacionada con este evento (Facies Garum). El cambio de régimen tectónico se manifiesta en el Pirineo en la génesis de cuencas de antepaís a partir del Eoceno inferior, ligadas al emplazamiento de las unidades cabalgantes de la Zona Axial. Durante el Eoceno inferior y medio domina la sedimentación de materiales turbidíticos (Grupo Hecho) en el surco pirenaico situado entre las dos áreas con sedimentación mesozoica importante (Cuenca Vasco-Cantábrica y Unidad Surpirenaica Central). El límite norte de esta cuenca surpirenaica de antepaís o Cuenca de Jaca es desconocido, y hacia el Sur la sedimentación turbidítica pasa gradualmente a margas de talud y finalmente a calizas de plataforma (Calizas de Guara) que se asientan sobre el margen continental del antepaís sur. Las paleocorrientes indican procedencia este de la mayor parte de los aportes, aunque las megacapac que aparecen dentro de la secuencia se relacionan con grandes deslizamientos desde las plataformas carbonatadas situadas al Sur. La génesis de la cuenca turbidítica puede explicarse como consecuencia del emplazamiento de láminas cabalgantes más al Norte.

A partir del Eoceno medio, una vez rellena la cuenca turbidítica, se disponen unas margas de plataforma-talud deltaico sobre las calizas del margen sur (Margas de Arguis), que pasan progresivamente a sedimentos de frente deltaico (Fm Belsué Atarés), provenientes también del Sur y del Este, y a depósitos de origen francamente continental (Grupo Campodarbe). Estos últimos depósitos alcanzan espesores de más de 6.000 metros entre los meridianos de Jaca y Pamplona y corresponden a la denominada cuenca molásica de Jaca. Su formación es contemporánea con la génesis de cabalgamientos en la Zona Axial pirenaica y con el levantamiento y erosión parcial de la cuenca turbidítica. Todo el sistema fluvio-deltaico que constituyen las formaciones de Arguis, Belsué Atarés y Campodarbe prograda hacia el O-NO según el eje de la cuenca. Sin embargo, el relleno molásico incluye materiales de origen aluvial proximal en varios abanicos de procedencia norte, que de Norte a Sur son los de Santa Orosia, Cancias y Oroel y finalmente, San Juan de la Peña. El último y más meridional de los cabalgamientos de basamento, la lámina del Guarga, transfiere su desplazamiento a través del Triásico Superior hasta el cabalgamiento frontal Surpirenaico, que presenta desplazamientos máximos de 25-30 km. Su actividad en el Oligoceno inferior supone el transporte en bloque superior de una parte de la cuenca de antepaís de Jaca que evoluciona como cuenca de *piggyback*, separada de su parte meridional no despegada que pasa a denominarse Cuenca del Ebro. En el Oligoceno superior, la Cuenca de Jaca es elevada por el

continuo avance de esta lámina y pasa a ser área fuente de la Cuenca del Ebro, dando lugar en el borde de ésta a un abanico fluvial radial de gran recorrido que colecta a otros abanicos aluviales de corto recorrido con área fuente en las Sierras Exteriores. Los depósitos apicales de estos últimos abanicos constituyen los espectaculares relieves conglomeráticos que jalonan el cabalgamiento frontal surpirenaico (Mallos de Agüero, Murillo, Riglos...).

- Estructura alpina

La estructura alpina de la Cadena Pirenaica es relativamente sencilla, y consta de un apilamiento antiformal de rocas paleozoicas, que constituyen la denominada Zona Axial, con varias escamas cabalgantes, más numerosas hacia el E. La correlación lateral entre estas escamas no es sencilla ya que en muchos tramos no existen marcadores de rocas mesozoicas que permitan determinar el rejuego alpino de algunos cabalgamientos (Fig. 1-4).

La transferencia de desplazamientos de los cabalgamientos alpinos del “zócalo” a la cobertera mesozoica y terciaria es probablemente una de las características que definen la estructura actual del Pirineo en la denominada Zona Surpirenaica, al menos en su parte central y occidental. Esta transferencia está condicionada por la existencia de un nivel de despegue basal en las facies Keuper del Triásico Superior. Algunos de los cabalgamientos situados en los niveles inferiores al despegue general no llegan a aflorar en superficie y transfieren su desplazamiento a la cobertera situada por encima de este nivel. Al igual que ocurre en otras cadenas, los límites de las unidades cabalgantes de cobertera pasan a estar más condicionadas por la geometría previa del nivel de despegue y de las unidades mesozoicas que por la propia dinámica de la cuña orogénica. Esto se hace especialmente evidente en la unidad surpirenaica central.

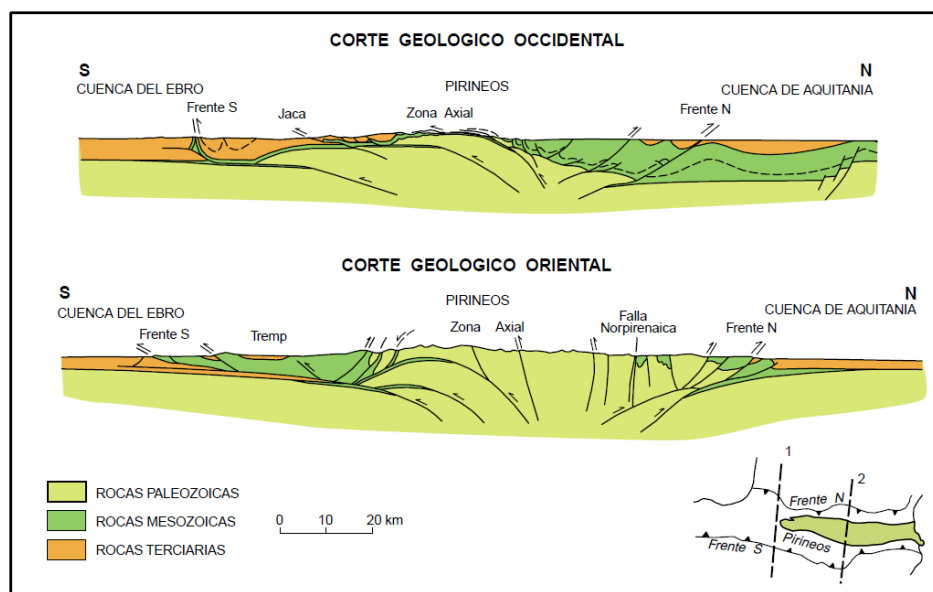


Figura 1-4. Dos cortes geológicos que atraviesan la cordillera pirenaica completa a través de su parte central. La sección oriental discurre entre las localidades de Balaguer y Toulouse. La sección occidental discurre un poco al oeste de la ciudad de Jaca, por los valles de Ansó, Belagua, Arette y Oloron, terminando al oeste de Pau (Teixell, 2000).

1.3.2 RELLENO SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE JACA

Según Teixell y García-Sansegundo (1995), y tomando cómo referencia el mapa geológico de la figura 1-5, el relleno sedimentario de la Cuenca de Jaca tiene una edad que va desde el Paleoceno hasta el Oligoceno inferior, con un substrato constituido por rocas del Cretácico superior que yacen sobre rocas pérmico-triásicas o sobre el basamento varisco.

El basamento aflora en el antiforme de la Zona Axial al norte de la cuenca y está constituido por calizas y pizarras devónicas y carboníferas que muestran deformación y metamorfismo varisco de bajo grado. Sobre éstas se encuentran ocasionalmente materiales terrígenos pérmicos. El Triásico se encuentra poco representado en la Zona Axial, pero sí en las Sierras Exteriores, donde está constituido por lutitas versicolores, yesos y calizas que constituyen el nivel de despegue principal. El Cretácico superior aflora bordeando la Zona Axial (Sierras Interiores), en las Sierras Exteriores y en culminaciones situadas en el interior de la cuenca. Su espesor y rango cronoestratigráfico se reducen de N a S, formando un prisma laxo de grosor máximo de 800 m. En las Sierras Interiores, el Cretácico superior consta de un tramo basal de calizas de plataforma, seguido de un nivel potente de margas y areniscas. En las Sierras Exteriores se encuentra una sucesión delgada de calcarenitas bioclásticas y calizas micríticas con gasterópodos, seguidas por lutitas rojas y areniscas en facies Garum.

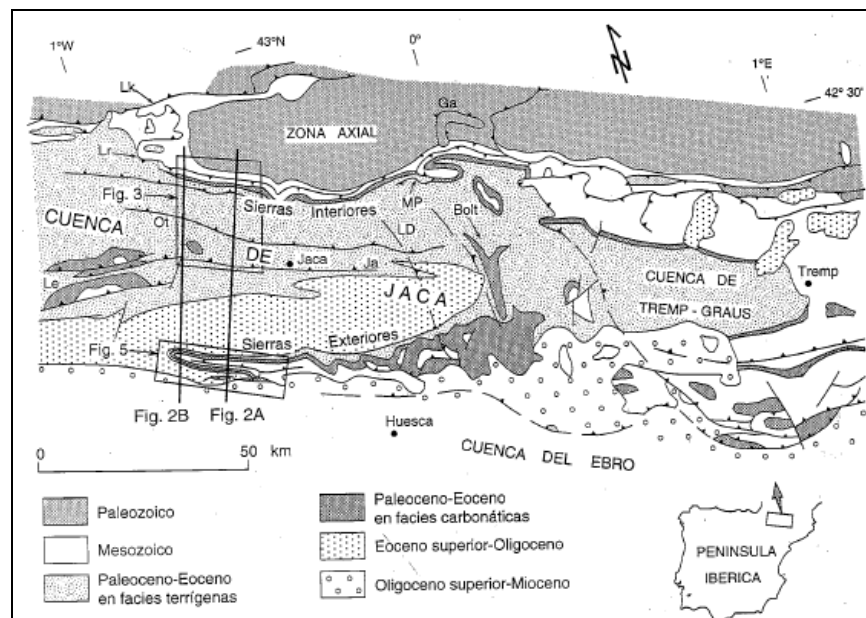


Fig. 1-5. Mapa geológico esquemático de la parte central de la vertiente surpirenaica (Teixell y García-Sansegundo, 1995).

El relleno terciario de la Cuenca de Jaca es contemporáneo de la compresión pirenaica, y se dispone de forma asimétrica registrando una migración continuada del depocentro hacia el antepaís (Puigdefábregas y Souquet, 1986).

La parte norte de la cuenca está ocupada por las turbiditas del Eoceno inferior y medio del Grupo Hecho (Mutti *et al.*, 1972), definiendo una zona denominada comúnmente como “cuenca turbidítica”. Las turbiditas del Grupo Hecho se acumularon en un surco marino profundo, orientado E-W, y son contemporáneas con las calizas de plataforma que formaban el margen sur de la cuenca. En el contexto de una cuenca de antepaís, las facies calcáreas de plataforma experimentaron un retroceso escalonado hacia el sur (Puigdefábregas y Souquet, 1986; Barnolas *et al.*, 1991; Barnolas y Teixell, 1992, 1994), mientras que las turbiditas recubrieron progresivamente en *onlap* a las calizas (Labaume *et al.*, 1985). De este modo, las calizas más antiguas se encuentran en las Sierras Interiores, donde tienen una edad paleocena-ilerdiense inferior (Robador, 1990). Más al sur, en las Sierras Exteriores pertenecen al Luteciense (Formación Guara de Puigdefábregas, 1975).

Las turbiditas del Grupo Hecho, de naturaleza predominantemente siliciclástica, presentan un espesor máximo próximo a 4500 m. Los sistemas turbidíticos inferiores estaban alimentados axialmente, pues presentan paleocorrientes de dirección E-W procedentes de plataformas deltaicas situadas al este de la cuenca. Sin embargo, los sistemas superiores derivan directamente de áreas situadas al norte de la Cuenca de Jaca, como indican el carácter grosero de sus facies y las paleocorrientes hacia el sur registradas por Estrada, (1982) y Remacha y Picart (1991). Por otra parte, es característico del Grupo Hecho la presencia de horizontes cartografiados de brechas carbonáticas y calcarenitas, de gran continuidad lateral y espesor de hasta 200 m (“megacapás” o “megaturbiditas”; Soler y Puigdefábregas, 1970; Rupke, 1976; Johns *et al.*, 1981; Labaume *et al.*, 1987).

Por encima de los materiales descritos se encuentra una sucesión de margas azules y areniscas (formaciones margosas de Larrés, Pamplona y Argüís; areniscas de Sabiñánigo y Belsué-Atarés; Puigdefábregas, 1975; Remacha *et al.*, 1987), correspondientes a ambientes deltaicos, de plataforma y talud terrígenos. Su edad es Luteciense superior-Priaboniense medio (Canudo y Molina, 1988). Estas facies yacen transicionalmente sobre las turbiditas del Grupo Hecho en los afloramientos septentrionales, mientras que en Sierras Exteriores se disponen sobre las calizas Lutecienses debido al acñamiento hacia el Sur de la serie turbidítica. De un lugar a otro, la potencia de estas series se reduce de 2600 a 700 m o menos.

Los materiales que acaban de ser descritos están a su vez recubiertos y pasan lateralmente a una potente serie de areniscas, conglomerados y lutitas de origen continental (Grupo Campodarbe), que constituye el relleno más moderno de la cuenca (Priaboniense-Rupeliense) (Puigdefábregas, 1975; Montes, 1992; Hogan, 1993). En la parte inferior del Grupo Campodarbe dominan las lutitas y areniscas de origen fluvial, que presentan paleocorrientes hacia el W. No obstante, la parte superior del grupo incluye importantes masas conglomeráticas aluviales procedentes del norte, (de la cuenca turbidítica elevada). La potencia máxima del conjunto llega a superar los 4000 m.

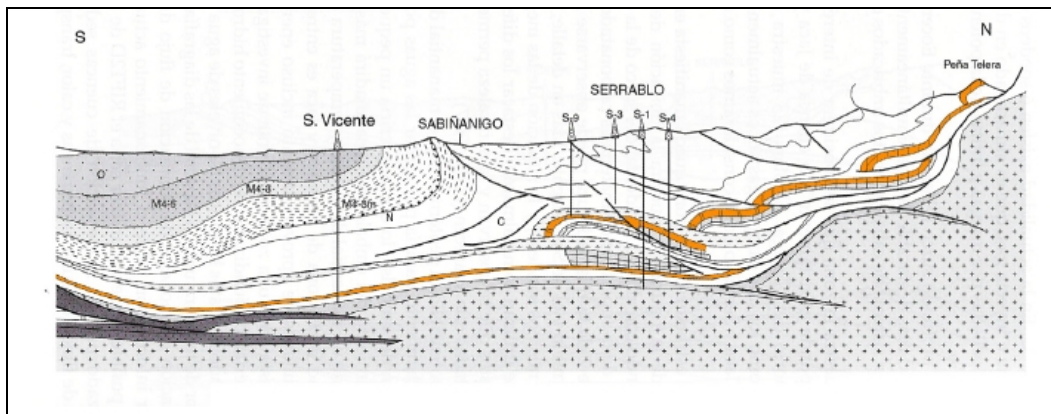


Fig. 1-6. Corte geológico tipo de la cuenca, modificado de Sánchez Navarro (2006), en naranja se destacan las calizas del Paleoceno – Eoceno inferior.

1.4 METODOLOGÍA

El principal objetivo planteado en este trabajo, es realizar una estimación de la capacidad de producción del yacimiento geotérmico del Serrablo.

Para lograr cumplir este objetivo, en primer lugar debemos enmarcar el proyecto del Serrablo dentro de alguno de los sistemas geotérmicos definidos por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España), manuales de geotermia en general y de las comunicaciones e informaciones publicadas por la EGEN (European Geothermal Energy Council), y la IGA (International Geothermal Association).

Para poder conocer las características del acuífero geotérmico, se tuvo que realizar una recopilación de la información pública disponible en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y en el Archivo Técnico de Hidrocarburos (ATH) del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio sobre la zona de Serrablo. Esto incluye tanto los informes de sondeos y de evaluación de posibilidades geotérmicas como la bibliografía científica relevante para el objetivo que se había planteado.

Para poder realizar una estimación sobre la capacidad de producción del yacimiento geotérmico era necesario proponer dos parámetros sobre los que no se encontró ningún dato en los informes de los sondeos de hidrocarburos realizados en la zona. Por un lado se necesitaba realizar un cálculo de la extensión mínima del acuífero geotérmico, para ello se ha realizado una correlación entre los sondeos en los que se tenía confirmada la existencia del acuífero. Este dato es imprescindible para calcular la cantidad de calor almacenado en el acuífero geotérmico.

Por otro lado se necesita una propuesta de permeabilidad en el acuífero, para determinar cuál es el caudal máximo extraíble en función de la profundidad de trabajo de la bomba. Como no existía ningún dato al respecto se revisaron estudios regionales en el área de trabajo que

nos proporcionaron una hipótesis de partida a la hora de estimar rangos de permeabilidad suficientes para llevar a cabo la estimación de la producción.

Finalmente se aplicaron los cálculos necesarios para definir las características del sistema geotérmico, aplicando los parámetros propuestos, y se comparó el resultado con los resultados obtenidos para otros yacimientos geotérmicos que actualmente están activos en Europa.

2. GEOTERMIA: DEFINICIÓN Y CONCEPTO

La geotermia es actualmente un campo de estudio en pleno desarrollo, por lo que en su propio proceso de crecimiento da lugar a la creación de una nomenclatura y bases de funcionamiento propios que se presentarán a lo largo de este capítulo.

2.1 DEFINICIÓN DE GEOTERMIA

La energía geotérmica se define según Geoplat (2009), (Plataforma tecnológica española de la geotermia) cómo “la energía almacenada en forma de calor en el subsuelo”; es una energía calorífica que se irradia desde el interior de la Tierra de manera natural y que procede de diversas reacciones físico-químicas:

- Calor latente de cristalización; desprendido en las reacciones exotérmicas de cristalización localizadas en el núcleo externo.
- Gravitación; durante el proceso de compresión del planeta por efecto de la gravedad se produce un calentamiento por fricción.
- Calor remanente de la formación del planeta; que es el calor remanente de los procesos de colisión entre los residuos estelares del disco protoplanetario que dio origen a la Tierra.
- Calor cinético; energía liberada en forma de calor a consecuencia del rozamiento producido por las distintas reacciones del núcleo externo y el manto ante los campos de fuerza de la Luna y el Sol.
- Reacciones fisicoquímicas exotérmicas; inestabilidades en los minerales debido a las altas presiones y temperaturas que provocan cambios de fase y que generan calor.
- Descomposición radiogénica de isótopos; los elementos radiactivos contenidos en la litosfera se descomponen a través de reacciones exotérmicas que generan calor.

Además la *Directiva 2009/28/CE*, define la geotermia cómo “la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida (Artículo 2)”. Esta definición coincide con la recogida en la *Declaración de Bruselas de 2009 del Consejo Europeo de Energía Geotérmica* (EGEC), que establece que la energía geotérmica es “la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la Tierra”. Según figura en dicha declaración, se trata de una fuente de energía sostenible, renovable, casi infinita y que proporciona calor y electricidad las 24 horas del día a lo largo de todo el año.

La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia.

2.2 EL SISTEMA GEOTÉRMICO

He decidido plantear este capítulo desde el punto de vista de estudio del “*play* – geotérmico”, definiendo este como un análogo del *petroleum – play*, en el que se estudian las características mínimas en la exploración de hidrocarburos: roca madre, roca almacén, migración, temperaturas y trampa. Así en el *play* geotérmico, los factores determinantes serían: gradiente geotérmico, fluido geotérmico y yacimiento geotérmico.

2.2.1 GRADIENTE GEOTÉRMICO

Es la relación de variación de temperatura frente a la variación en profundidad que se produce conforme se penetra hacia el interior de la Tierra. El gradiente geotérmico medio medido en el planeta varía entre 2,5-3 °C cada 100 metros (25-30 °C por Km.), si bien existen regiones del Planeta con incrementos de temperatura en función de la profundidad diferentes de este gradiente geotérmico medio. Las regiones con un gradiente geotérmico superior al gradiente medio se suelen situar en márgenes activos, zonas volcánicas, y zonas de rifting, mientras que las regiones con gradientes geotérmicos más bajos que el gradiente medio, se suelen situar en contextos compresivos con apilamiento de estructuras en cobertera o en zonas cratónicas estables.

A partir del gradiente geotérmico y la conductividad térmica de los materiales en condiciones de transporte de calor por conducción se puede determinar el flujo de calor superficial, Marzán *et al.*, (1996). Este representa la cantidad de calor que se desprende por unidad de superficie y se expresa en mW/m^2 .

Así, los estudios realizados en sondeos peninsulares permiten modelizar mapas de flujo de calor superficial que a su vez son integrados en los mapas de flujo en el entorno europeo. (Fig. 2-1 y Fig. 2-2).

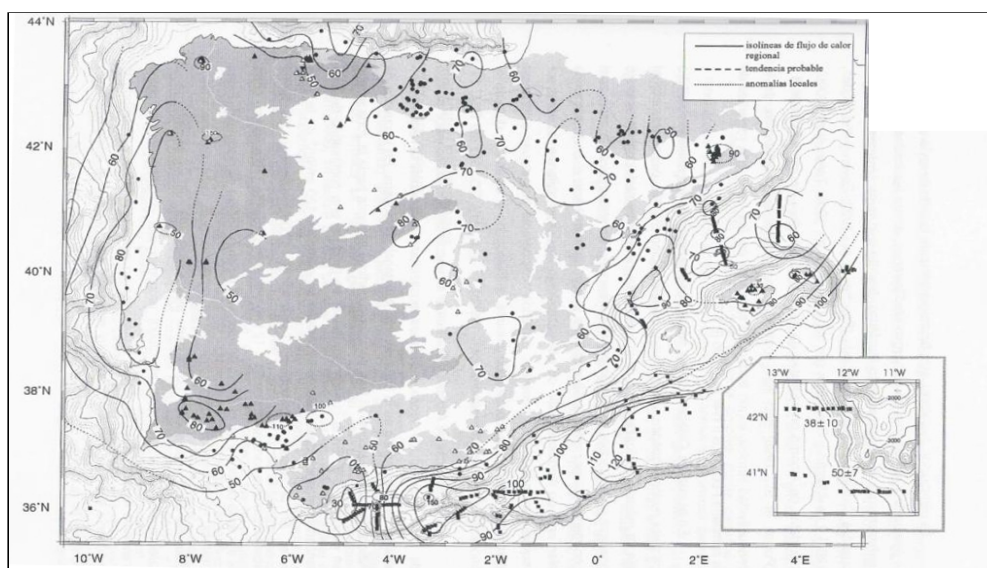


Fig. 2.1. Mapa de flujo térmico basado en los datos de sondeos tanto de hidrocarburos como de captación de aguas. (Marzán *et al.*, 1996).

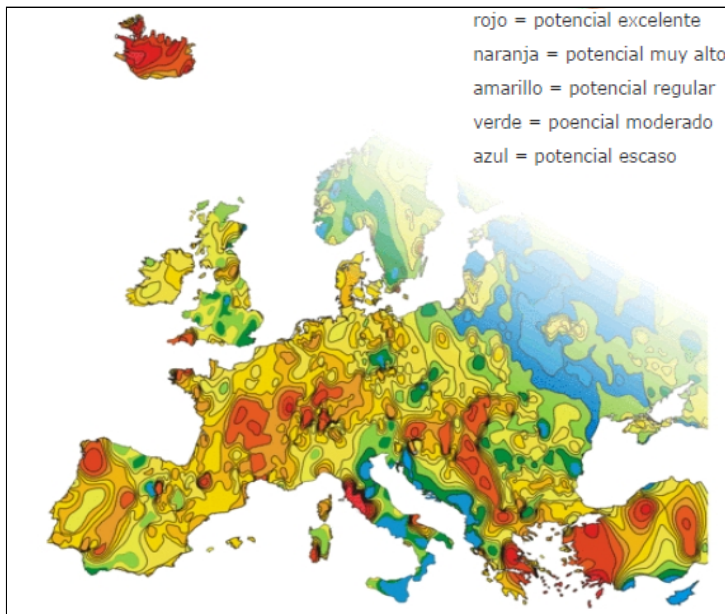


Fig. 2-2. Mapa europeo que expone la cantidad de energía que se desprende superficialmente y permite la estimación del potencial de aprovechamiento geotérmico de una región. Modificado de "Atlas of Geothermal Resources in Europe". (Hurter y Schellschmidt, 2006).

2.2.2 FLUIDO GEOTÉRMICO

El fluido geotérmico es el responsable de concentrar el calor contenido en las rocas y permitir su evacuación efectiva. Es un factor determinante ya que la temperatura de extracción condicionará el uso final de este calor, bien para la producción eléctrica usado directamente o mediante la instalación de centrales binarias (con temperaturas que rondan los 120°C) o bien para el aprovechamiento directo de calor mediante el uso de intercambiadores o bombas de calor para menores temperaturas.

En estado natural el agua es el principal fluido geotérmico, con diferentes componentes disueltos. La determinación de estos componentes será también de vital importancia a la hora de diseñar los pozos de extracción e inyección de la planta geotérmica, tanto por la potencia de las bombas necesaria como por el diseño de mecanismos inhibidores de precipitación y protección frente a la corrosión.

Finalmente cabe destacar que los estudios más avanzados sobre geotermia a nivel mundial también apuestan por el uso de fluido inyectados artificialmente ya que además optimizan el intercambio de calor al ser diseñados específicamente para este fin.

2.2.3 YACIMIENTO GEOTÉRMICO

Espacio físico ocupado por un volumen de material en el subsuelo, que incluye tanto la roca como los posibles fluidos que contenga, que alberga las características necesarias para el desarrollo de un sistema geotérmico de manera viable.

Desde una perspectiva histórica de la evolución de la exploración de sistemas geotérmicos, los yacimientos geotérmicos se pueden clasificar en dos tipos:

- Yacimientos geotérmicos convencionales, en los cuáles el yacimiento incluye la presencia de fluidos geotérmicos que serán el objetivo de la extracción y que sus características de permeabilidad y porosidad permiten que aunque en algunas ocasiones sea necesario aplicar tecnologías convencionales de mejora de producción de los pozos, pueden llegar a ser económicamente viables. Es decir son acuíferos en el sentido más tradicional de la palabra. Dentro de este tipo los yacimientos se suelen clasificar en función de la temperatura de los fluidos a extraer, quedando divididos en:

Yacimientos de alta entalpía, en los que el fluido se encuentra en condiciones de alta presión y alta temperatura (> 150 °C).

Yacimientos de media entalpía, en los que el fluido se encuentra a temperaturas entre 100 y 150 °C.

Yacimientos de baja entalpía, en los que la temperatura del fluido varía entre 30 y 100 °C.

Para el caso de energía geotérmica de muy baja temperatura no suele utilizarse el término yacimiento, ya que este recurso se encuentra difuso en toda la superficie terrestre.

- Yacimientos geotérmicos no convencionales. Son yacimientos que aunque por cuestiones de temperatura deberían incluirse entre los yacimientos de alta entalpía, su singularidad obliga a clasificarlos de manera independiente. Son:

Yacimientos de roca caliente seca (HDR: *Hot Dry Rock*), son yacimientos en los que existen anomalías térmicas positivas pero que las litologías presentes no tienen características favorables para albergar cantidades de agua significativas (porosidad y permeabilidad prácticamente nulas).

Para poder extraer el calor almacenado es necesario el desarrollo, de manera antrópica, de la permeabilidad de la formación objetivo. Esto se realiza mediante la creación de fracturas o más comúnmente el desarrollo de las fracturas preexistentes que se encuentren selladas al someter a esta formación a procesos de inyección de fluidos y sobrepresionar a través de los pozos desde superficie. Así se crea una zona de mayor permeabilidad, que permite la circulación de un fluido inyectado desde superficie y que al ser extraído arrastra consigo el calor necesario para la producción de energía.

Esta técnica se conoce como hidrofracturación, y está siendo probada en diferentes emplazamientos a nivel europeo en los que se intenta determinar cuál es la rutina de presiones de inyección frente a tiempo de inyección y cuáles son los fluidos que dan lugar a una optimización de la fracturación. Esto dependerá, entre otros factores, de las características reológicas del material y del campo de esfuerzos actual al que se vean sometidas.

Los resultados obtenidos en la investigación en este campo han dado lugar a la posibilidad de aplicación de estas técnicas en otros yacimientos de baja permeabilidad dando lugar así a los sistemas geotérmicos estimulados o EGS.

Yacimientos geotérmicos supercríticos ($T > 300$ °C), en los que las condiciones termodinámicas existentes permitirían la producción de electricidad e hidrógeno. Su localización suele estar asociada a zonas volcánicas en las que la proximidad del magma aumenta el gradiente geotérmico, y calienta la roca encajante. El fluido geotérmico aquí es normalmente vapor de agua.

Yacimientos geopresurizados, en los que el agua contenida en el acuífero está sometida a grandes presiones (entre un 40% y un 90% superiores a la presión hidrostática que correspondería a la profundidad a la que se halla). Esto es debido a que se encuentra confinada por formaciones de muy baja porosidad, de tal manera que no puede desplazarse, llegando a almacenar así una gran cantidad de energía mecánica por el exceso de presión de fluido además de la energía térmica que pueda contener por la acción del gradiente geotérmico. La presencia de este tipo de yacimientos es más común en las cuencas sedimentarias. Además, es frecuente que estas aguas contengan cierta cantidad de gases disueltos que pueden modificar de manera importante la energía mecánica del fluido debido a su compresibilidad, por eso la composición de el fluido debe ser determinada con exactitud.

Para concluir, es conveniente destacar que al igual que en los Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS), el componente imprescindible del sistema es la energía almacenada en la formación objetivo y no la presencia de fluido, ya que este puede ser introducido posteriormente para la extracción del calor. Normalmente se utiliza el nombre genérico de sistemas petrotermales para denominarlos.

Por otro lado, aquellos sistemas que aprovechan el fluido existente en el yacimiento, es decir, o bien acuíferos asociados a cuencas sedimentarias profundas (HSA o Hot Sedimentary Acuífer) o bien sistemas convectivos magmáticos en ambientes volcánicos, se denominan sistemas hidrotermales.

La transición entre ambos tipos de sistemas (hidrotermales y petrotermales) es difusa ya que es común encontrarnos situaciones intermedias. Así, en este estudio se acepta la propuesta de EGE (2009), (European Geothermal Energy Council) para el informe de visión a 2020 en el que se especifican las características necesarias para considerar a un sistema como EGS:

- 1) La formación geológica objetivo debe tener una muy baja permeabilidad, menor de 10^{-14} m².
- 2) El pozo productor no es económicamente viable sin la aplicación de la estimulación. Es decir tiene que tener un Índice de Productividad superior a 10^{-2} m³/MPa·s.

- 3) La producción del yacimiento debe haber sido doblada mediante las técnicas de estimulación.

Cómo se desarrollará más adelante, el yacimiento geotérmico del Serrablo corresponde a un sistema acuífero caliente (HSA) procedente de las calizas del Daniense, situadas a una profundidad de entre de entre 3.245 a 3.860 metros b.t.l. en la cuenca sedimentaria de Jaca y con temperaturas de formación deducidas de entre 165 y 180°C.

2.2.4 RECURSO GEOTÉRMICO

El recurso geotérmico hace referencia a la cantidad de energía geotérmica que se puede extraer de manera técnica y económicamente viable del yacimiento. El concepto de recurso geotérmico es muy amplio e incluye desde el calor que puede encontrarse en los horizontes más superficiales del suelo hasta el almacenado en rocas situadas a las profundidades que podrían alcanzarse con técnicas de perforación de pozos petrolíferos.

Los tipos de recursos geotérmicos admitidos por la *Plataforma Tecnológica Española de Geotermia* (Geoplat, 2009) se basan en una diferenciación según sus temperaturas:

- Recursos geotérmicos de alta entalpía ($T > 150$ °C).

Se encuentran en zonas con gradientes geotérmicos elevados y se sitúan a profundidades muy variables (son frecuentes entre 1.500 y 3.000), o por el contrario en zonas de gradiente geotérmico más próximo al normal, pero a grandes profundidades (alrededor de 4.000 metros). Están constituidos por vapor seco (muy pocos casos) o por una mezcla de agua y vapor y se aprovechan fundamentalmente para la producción de electricidad.

- Recursos geotérmicos de media entalpía ($T: 100-150$ °C).

Pueden localizarse en zonas con un gradiente geotérmico elevado a profundidades inferiores a los 2.000 m y en cuencas sedimentarias a profundidades entre los 3.000 y 4.000 m. Su temperatura permite el uso para la producción de electricidad mediante ciclos binarios.

También pueden aprovecharse para uso térmico en calefacción y refrigeración en sistemas urbanos y procesos industriales.

- Recursos geotérmicos de baja entalpía ($T: 30-100$ °C).

Se localizan habitualmente en zonas con un gradiente geotérmico normal a profundidades entre 1.500 y 2.500 m o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Su utilización se centra en los usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización y en diferentes procesos industriales. Los fluidos geotérmicos raras veces se utilizan directamente, lo más frecuente es el aprovechamiento de su energía mediante intercambiadores y/o bombas de calor. Suelen requerir una demanda importante de energía calorífica en las proximidades.

- Recursos geotérmicos de muy baja entalpía ($T < 30$ °C).

Las temperaturas de estos recursos suelen acercarse a la media anual del lugar donde se captan. Corresponden a la energía térmica almacenada en las aguas subterráneas, incluidas las provenientes de labores mineras y drenajes de obras civiles, siempre para uso exclusivamente energético y no consuntivo del agua. Se encuentran en el subsuelo poco profundo (normalmente a menos de 200 m e incluyen las captaciones de calor asociadas a elementos constructivos de la edificación). En este último caso, la energía renovable puede captarse de manera muy eficiente dada la estabilidad térmica del subsuelo frente a la oscilación estacional del ambiente, como consecuencia de la transmisión de calor hacia las zonas más externas de la superficie. Dicha transmisión hace posible que, a partir de 8-10 m de profundidad, la temperatura del terreno se mantenga prácticamente estable durante todo el año. Su aplicación son los usos directos del calor: aporte energético a sistemas de ventilación, calefacción y refrigeración de locales y/o procesos, con o sin utilización de una bomba de calor.

Según el informe “Evaluación de potencial de energía geotérmica” del IDAE (2011), el mapa de posibles zonas geotérmicas con interés en España sería el siguiente (Fig. 2-3):

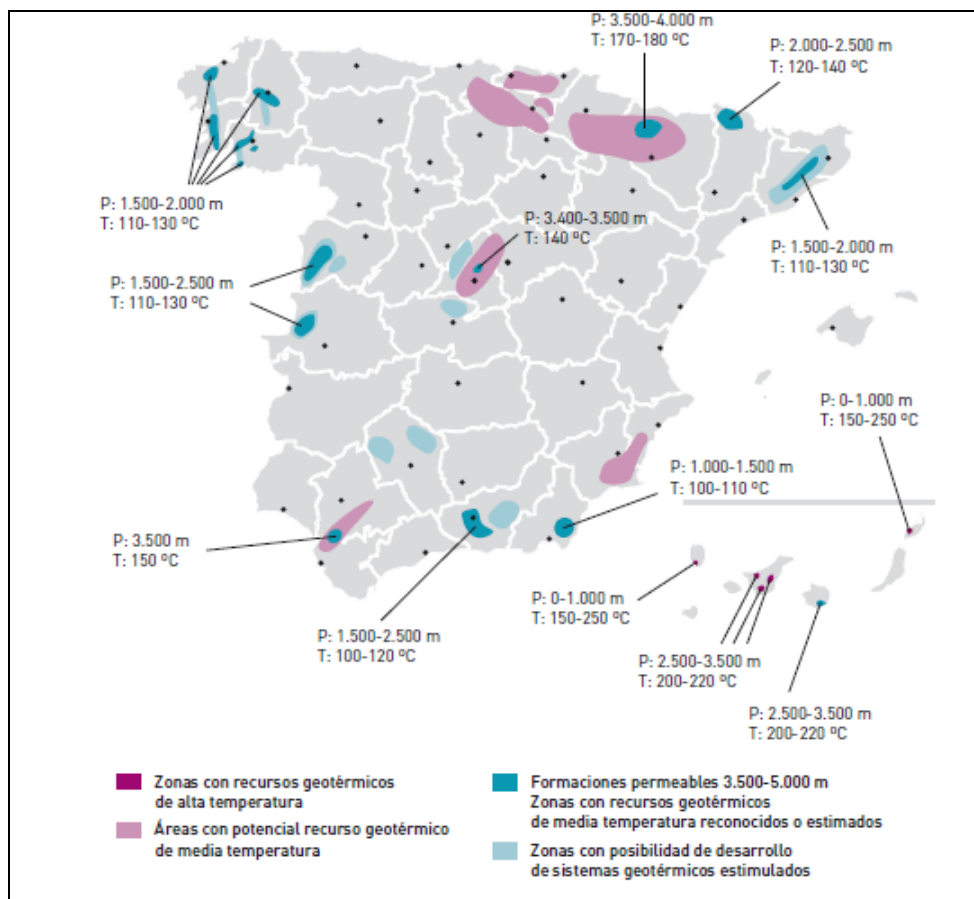


Fig. 2-3. Mapa de zonas de interés geotérmico en España IDAE (2011).

En este documento se propone el uso de otro sistema para la clasificación de los recursos, puesto que la clasificación de Geoplat tiene en cuenta únicamente las temperaturas del fluido, pero cómo ya se ha nombrado, la definición de recurso también tiene que tener en cuenta factores tecnológicos y económicos que no aparecen representados en esta clasificación. Por este motivo parece más lógico que, partiendo de la clasificación de Geoplat (2009), los recursos geotérmicos de alta y media entalpía se deban subdividir en categorías según un parámetro que pueda representar tanto las dificultades tecnológicas como económicas y que además sea de uso simple. Por eso se propone la utilización del gradiente geotérmico para la subdivisión en categorías. Este parámetro tiene en cuenta la profundidad a la que se midió la temperatura objetivo y es un factor determinante a la hora de plantearse las perforaciones. Según precios de mercado actual, el coste de perforación es aproximadamente de 2.500 euros por metro perforado, para sondeos de gran profundidad. Esto nos permitiría discriminar entre recursos que pudieran tener una mayor temperatura pero a mucha más profundidad y que pudieran resultar menos interesantes que otros recursos de menor temperatura (siempre dentro del rango de la clasificación) pero a mucha menos profundidad, que podrían ser económicamente y tecnológicamente más viables.

Así, desde mi punto de vista, la clasificación quedaría de la siguiente manera (Tabla 2.1):

TIPO DE RECURSO	INTERÉS
Recursos geotérmicos de alta entalpía (T > 150 °C).	Alto: Gradiente >5 °C/100 m.
	Medio: Gradiente 3 a 5 °C/100 m.
	Bajo: Gradiente <3 °C/100 m
Recursos geotérmicos de media entalpía (T: 100-150 °C).	Alto: Gradiente >5 °C/100 m.
	Medio: Gradiente 3 a 5 °C/100 m.
	Bajo: Gradiente <3 °C/100 m
Recursos geotérmicos de baja entalpía (T: 30-100 °C).	
Recursos geotérmicos de muy baja entalpía (T < 30 °C).	

Tabla 2.1. Clasificación de los recursos energéticos atendiendo a su gradiente geotérmico.

3. PRESENTACIÓN DE DATOS

En este capítulo se pretende realizar una presentación de los datos obtenidos sobre la estratigrafía y geología de la zona de estudio que se sitúa en la Cuenca de Jaca.

Los apartados realizados son consecuencia del origen de los datos: por un lado están los informes finales de sondeo, y por el otro lado la información extraída de los informes del IGME (realizados entre 1981 y 1990).

3.1 INFORMES FINALES DE SONDEOS

En este apartado se presentan los resultados de los sondeos realizados en el área de interés, presentando los tramos implicados en la formación objetivo.

Se ha recopilado información de los sondeos (IGME, 1981; 1982 y Lanaja, 1987):

- Serrablo – 7, finalizado el 13 – 03 – 1981, cuyo operador fue ENIEPSA, y su objetivo era evaluar el potencial gasífero de las megacapas carbonatadas intraflysch con indicios (Carbonatos del Gállego) y productora (Carbonatos del Aurín) en los sondeos Serrablo – 3 y 5, así como otras que pudieran aparecer por debajo de las anteriormente citadas e investigar las posibilidades de los carbonatos del Eoceno inferior – Paleoceno.
- San Vicente – 1, finalizado el 12 – 03 – 1982, cuyo operador fue ENIEPSA y su objetivo era la exploración de hidrocarburos, atravesando la totalidad de la sedimentación continental del sinclinal del Guarga para confirmar la posible existencia de las margas azules, y por último entrar dentro del flysch buscando posibles horizontes carbonatados dentro del mismo. Posteriormente se propuso que reconociese la serie carbonatada situada bajo el flysch hasta alcanzar el Trías.
- Serrablo – 4, finalizado el 24 – 01 – 1981, cuyo operador fue ENIEPSA, y su objetivo era la exploración de hidrocarburos.

La situación administrativa de los mismos es diferente. En los dos primeros la información del sondeo es libre, y por lo tanto se ha podido reconstruir la columna litológica con información procedente de los propios informes. Sin embargo el sondeo Serrablo – 4 ha debido ser reconstruido a partir de las curvas de Gamma ray y Sonic y de la columna general de sondeo extraída del documento “Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España”, de Lanaja (1987).

La localización de los sondeos y sus coordenadas UTM, en huso 30, se pueden observar en la fig 3.1:

SONDEO	X	Y
San Vicente 1	710179	4707371
Serrablo 7	718793	4715535
Serrablo 4	713179	4719454

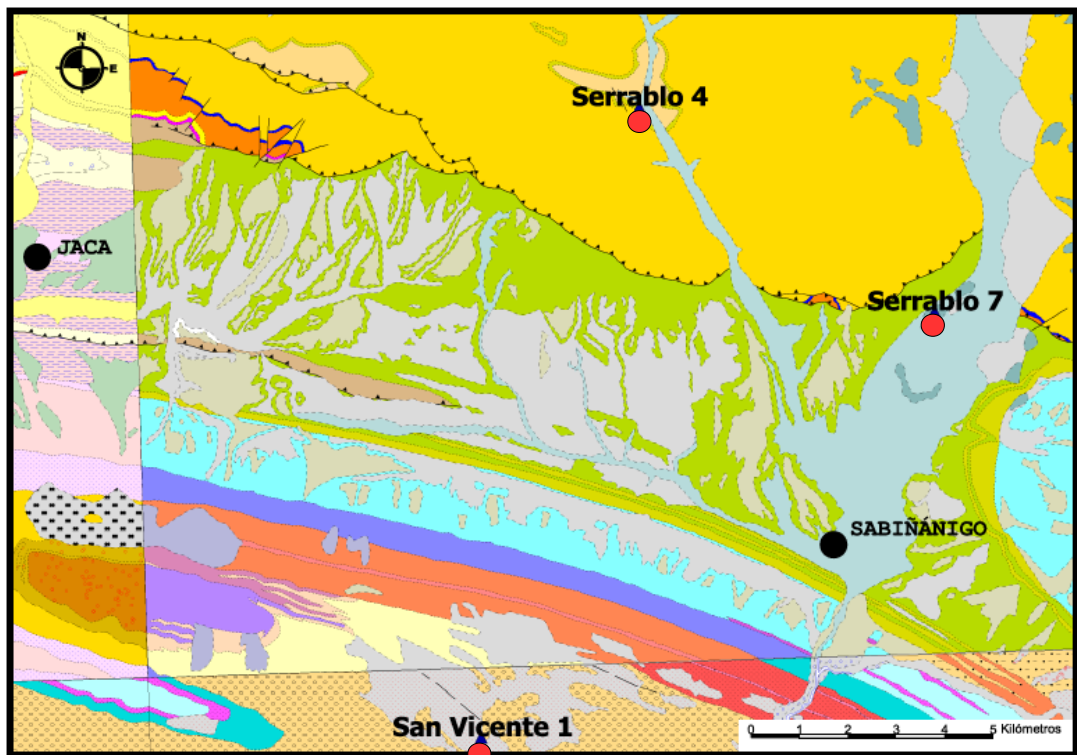
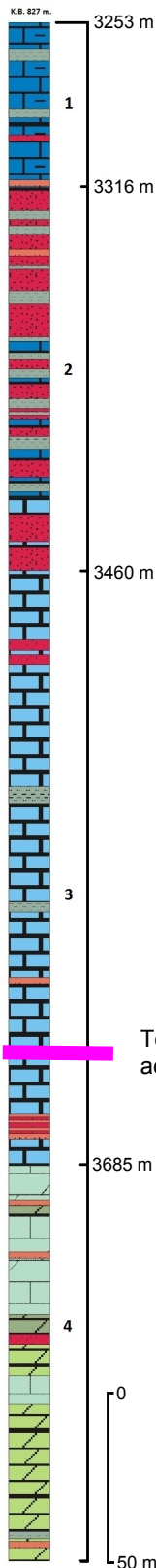


Fig. 3.1. Localización de los sondeos estudiados sobre mapa geológico.

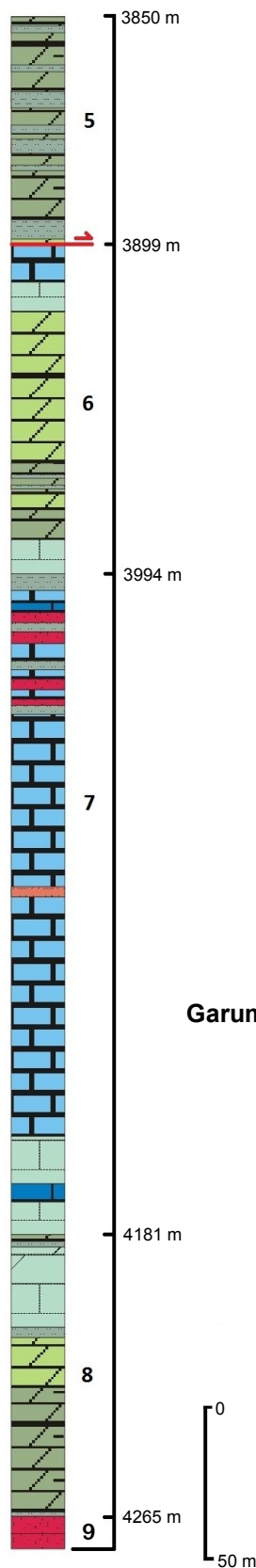
3.1.1 DESCRIPCIONES DE LAS COLUMNAS DE LOS SONDEOS

3.1.1.1 SERRABLO - 7



Eoceno inferior – Paleoceno: desde 3.253 m.b.t.l a 4.265 m. (total 1.012 m.)

- Tramo 1: 3.253 – 3.316 m. (total 63 m.)
Calizas margosas y/o arenosas gris oscuro y calizas gris claro fosilíferas. Intercalaciones de niveles de arcillas gris oscuro, y ocasionalmente de areniscas de grano fino a medio. Muestran inclusiones de pirita y venas de calcita.
- Tramo 2: 3.316 – 3.460m. (total 144 m.)
Areniscas blancas de grano fino y cemento silíceo, y areniscas gris oscuras de grano fino a medio, con tendencia a ser algo calcáreas, ocasionalmente algo arcillosas y fosilíferas. A veces presentan intercalaciones de arcilla gris en ocasiones limolítica o finamente arenosa. A 3.350 m. cuarzo masivo transparente. Inclusiones de pirita.
- Tramo 3: 3.460 – 3.685 m. (total 225 m.)
Calizas beige claro y oscuro, muy fosilífera en los términos más claros y arenosas en los más oscuros con intercalaciones ocasionales de areniscas gris oscura a marrón de grano fino a muy fino más o menos arcillosa, y escaso cemento calcáreo y areniscas blanquecinas de grano fino a muy fino con cemento silíceo. También se identifican algunos niveles de arcilla. Trazas de calcita blanca translúcida. Nivel ferruginoso característico, techo del acuífero termal.
- Tramo 4: 3.685 – 3.850 m. (total 165 m.)
Calizas dolomíticas grises a grises claro, en ocasiones arenosas, y dolomías. Algunos niveles ocasionales de areniscas y margas limolíticas grises. A partir de 3.816 m. se identifican dolomías grises ligeramente arenosas de microcristalina a cristalina, con costras de oxidación ferruginosa.



- Tramo 5: 3.850 – 3.899 m. (total 49 m.)

Dolomías arcillosas grises a beige criptocristalinas, fosilíferas y ligeramente arenosas y arcilla dolomítica gris, limolítica y/o arenosa, con abundante pirita. Trazas de calcita y arcilla roja.

- Tramo 6: 3.899 – 3.994 m. (total 95 m.)

Calizas, calizas dolomíticas grises a veces arcillosas y/o arenosas, microcristalinas y ocasionalmente fosilíferas y dolomías predominantemente grises más o menos claras y microcristalinas. Intercalación de un nivel de arcillas.

- Tramo 7: 3.994 – 4.181 m. (total 187 m.)

Calizas grises oscuras en la base, dolomíticas ocasionalmente algo arcillosas con niveles intercalados de areniscas grises claras de grano fino con cemento calcáreo, algo arcillosa. Algún nivel de arcillas.

- Tramo 8: 4.181 – 4.265 m. (total 84 m.)

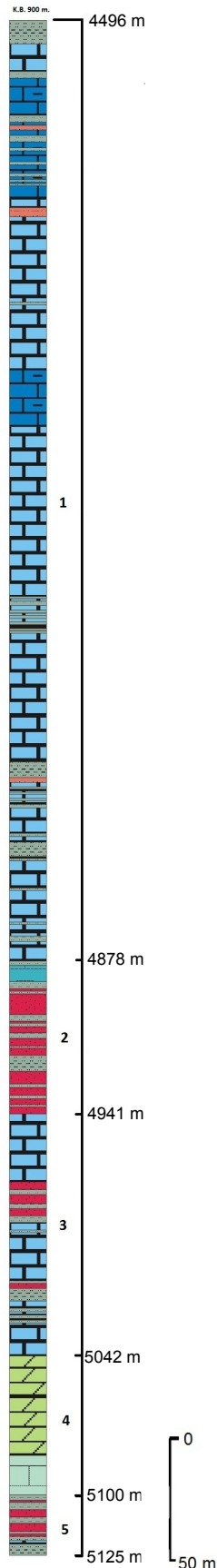
Calizas dolomíticas en el techo y dolomía gris criptocristalina en ocasiones ligeramente arenosa. Niveles de arcillas dolomíticas. En la base areniscas.

**Garum: desde 4.265 m. a 4.268 m.
(total 13 m.)**

- Tramo 9: 4.265 – 4.268 m. (total 8 m.)

Areniscas blancas con cemento dolomítico, ferruginosa, y areniscas marrones de grano fino y cemento dolomítico – arcilloso.

3.1.1.2 SAN VICENTE – 1

**Eoceno inferior: desde 4.496 m.b.t.l a 5.100 m.****(total 604 m.)**

- Tramo 1: 4.496 – 4.878 m. (total 382 m.)

Calizas beiges acarameladas a marrones claro, microcristalinas, ligeramente arenosas y localmente muy fosilífera. Intercalaciones de niveles de calizas gris claro microcristalinas y arenosa y de arcillas grises compactas. A 4.600 m. presencia de azufre.

- Tramo 2: 4.878 – 4.941 m. (total 63 m.)

Alternancia de:

- Areniscas cuarcíticas blancas a translúcidas, de grano medio, ligeramente piritosas.
- Areniscas cuarcíticas grises a grises oscuras, de grano muy fino a fino y que pasa hacia la base a areniscas con cemento calcáreo piritosas.
- Intercalaciones de arcillas grises oscuras, piritosas y margas grises claro a beiges.

- Tramo 3: 4.941 – 5.042 m. (total 101 m.)

Calizas beiges a grises, microcristalinas a cristalinas, fosilífera, con intercalaciones de calcarenitas grises claro y con algunos granos de cuarzo.

- Tramo 4: 5.042 – 5.100 m. (total 58 m.)

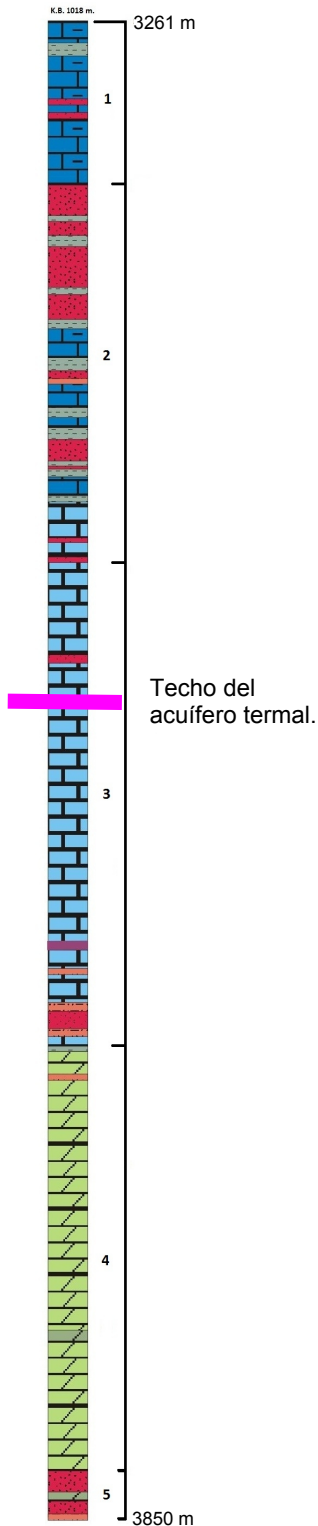
Dolomías calcáreas de color marrón claro a gris.

Garum: desde 5.100 m. a 5.125 m.**(total 25 m.)**

- Tramo 5: Arcilla roja, siltosa, plástica con niveles de areniscas cuarcíticas blancas y ocasionalmente rojizas, de grano medio a grueso, mal clasificada y con escaso cemento calcáreo-dolomítico. Intercalaciones de niveles de calizas grises a beiges microcristalinas.

3.1.1.3 SERRABLO – 4

Esta columna, de la cual no se encuentra disponible su descripción, ha sido reconstruida a partir de la representación general de la misma en el documento “Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España”, publicado por el IGME en 1987, de su registro sísmico y gamma ray y su comparación con el sondeo Serrablo – 7.



- Tramo 1:
Calizas margosas y/o arenosas gris oscuro y calizas gris claro fosilíferas.
- Tramo 2:
Areniscas blancas de grano fino y cemento silíceo, y areniscas gris oscuras de grano fino a medio.
- Tramo 3:
Calizas beige claro y oscuro, muy fosilífera en los términos más claros y arenosas en los más oscuros. Nivel ferruginoso característico, techo del acuífero termal.
- Tramo 4:
Calizas dolomíticas grises a grises claro, en ocasiones arenosas, y dolomías.
- Tramo 5:
Areniscas blancas con cemento dolomítico y areniscas marrones de grano fino y cemento dolomítico – arcilloso.

3.1.2 DESCRIPCIONES DEL ACUÍFERO TERMAL

En el informe final de sondeo Serrablo – 7 (IGME, 1981), se dedica un apartado concreto para la descripción del acuífero termal que fue perforado durante la realización del mismo, el apartado dice textualmente:

“Estando perforando con aire y desde la cota 3.660 m. algunos metros debajo de un nivel ferruginoso característico, se cortó un acuífero termal muy prolífico igual al cortado en Serrablo – 4 y correlacionable perfectamente, ya que ambos se encuentran algunos metros por debajo de dicho nivel ferruginoso dentro de los Carbonatos del Eoceno inferior. Los aportes de agua caliente obligaron a abandonar la perforación con aire a 3.753m., continuando con lodo aireado en un intento de aclarar el origen de las manifestaciones de agua y gas, teniendo que renunciar a los 3.849 m.

De las termometrías efectuadas antes del efecto refrigerador del lodo, parece deducirse que el acuífero, cuya permeabilidad se desconoce, debe mantener una temperatura in situ de 125 – 150 °C. Haciendo la extrapolación con Serrablo – 4 el nivel del agua subiría hasta 80 m. de la superficie.

El agua es de una salinidad muy baja 2.000 ppm y pH de 7.

Una vez completados los objetivos exploratorios de este pozo, se procedió a su abandono y previendo el posible interés de estos horizontes se colocaron varios tapones de cemento en el techo y muro de esta zona para no dañarlas y dejarlas listas para una eventual reentrada.”

3.2 INFORMES DEL IGME

Se ha accedido a la base de datos públicos del IGME, en la que existen informes, la mayoría de ellos redactados durante el inicio de la década de 1.980, de los que se ha conseguido extraer la siguiente información:

- IGME (1981): Informe 00660. Estudio de las posibilidades de explotación de energía geotérmica en almacenes profundos de baja y media entalpía del territorio nacional.

“En el área central del Pirineo, solamente en un escaso número de sondeos fue cortado el Eoceno, y en los que fue cortado se encontraba invadido por agua dulce. (...) La mejor zona para la explotación la constituye Jaca, en dónde se han realizado varios sondeos de explotación de gas en el Serrablo 1, 4 y 7, y se han cortado niveles acuíferos a 3500 metros de profundidad, con temperaturas comprendidas entre 130 y 160°C.”

- IGME (1985a): Informe 50333. Nota del posible proyecto de investigación geotérmica en la zona de Jaca – Sabiñánigo.

“Durante la perforación de los sondeos realizados por ENIEPSA en la estructura Serrablo, se observó la elevada temperatura del fluido de perforación (en principio

aire y posteriormente lodo) cuando se atravesaba la base del Eoceno a profundidades de 3.500 – 3.700 metros.

En dichas profundidades la litología atravesada estaba constituida por calizas y dolomías, que registraban pérdidas del fluido de perforación.

Durante la perforación del Serrablo-7 se realizaron diagráfias de temperatura que en dicha zona registraban 148°C. Teniendo en cuenta que no se alcanzaba el equilibrio, por el enfriamiento llevado a cabo con el fluido de perforación, se puede suponer que la temperatura del almacén debería alcanzar entre 150 y 160°C.

Todos estos datos hacen pensar en la existencia de un importante acuífero caliente, conteniendo vapor de agua.”

- IGME (1985b): Informe 50312. Investigación geotérmica del área de Jaca y sondeos recientes.

“Durante la investigación de hidrocarburos realizada en el área de Jaca por ENI-EPSA, se pudo observar en dos sondeos profundos la existencia de un acuífero geotérmico con temperaturas superiores a 155°C.

El descubrimiento del acuífero geotérmico se produjo por la perforación en los sondeos Serrablo 4 y 7 con aire comprimido, no habiéndose percatado de la existencia del mismo en el sondeo Serrablo 1 que se perforó con lodo.”

En concreto este informe desarrolla un comentario sobre los acuíferos detectados en los sondeos de hidrocarburos realizados en la Cuenca de Jaca, y sus conclusiones son las siguientes:

“Del análisis de todos los sondeos de la Cuenca se han podido estudiarlos siguientes acuíferos:

- Niveles carbonatados del flysch Eoceno, principalmente carbonatos del Gállego, carbonatos del Aurín y carbonatos de Jaca.
- Niveles carbonatados del Paleoceno-Eoceno inferior.
- Niveles carbonatados del Cretácico superior.

Del estudio realizado solamente se ha considerado cómo de interés geotérmico los niveles carbonatados de la parte baja del Paleoceno-Eoceno inferior.”

En cuanto a la información recopilada de los sondeos, este informe se centra claramente en los sondeos Serrablo 1, 4, y 7.

“Los sondeos que atraviesan los niveles carbonatados del Paleoceno-Eoceno inferior son:

- a- Serrablo 1, a una profundidad de entre 2.905 y 3.446 metros.

- b- Serrablo 4, a una profundidad de entre 3.262 y 3.821 metros.
- c- Serrablo 7, a una profundidad de entre 3.245 y 3.858 metros.

El resto de los sondeos de la cuenca no llegan a perforar estas unidades por haberse terminado casi todos en el Flysch Eoceno, en donde se encuentran los almacenes con gas. Los sondeos Serrablo 9 y 17 abandonaron la perforación al entrar en los carbonatos del Paleoceno-Eoceno inferior a profundidades de 3.070 y 3.599 metros respectivamente.”

Por último el informe presenta un análisis del acuífero geotérmico centrándose en sus características litológicas, de temperatura, porosidad, nivel piezométrico y salinidad. Textualmente este informe expone:

“Litología.

A techo del acuífero geotérmico se ha observado en los sondeos Serrablo 4 y 7 una costra ferruginosa con calcita y pirita. Esta costra se puede considerar cómo el techo del acuífero geotérmico, y ha sido cortada por el Serrablo 4 entre 3.614 y 3.619 metros, y por el Serrablo 7 entre 3.640 y 3.646 metros.

Por debajo de la costra ferruginosa existe una caliza gris fosilífera con calcarenitas e intercalaciones de arenisca y limolita. La caliza se va haciendo más dolomítica a medida que aumenta la profundidad, terminándose en una dolomía gris ligeramente arenosa. Estos niveles calcáreos constituyen el acuífero geotérmico.

Temperatura.

Los datos de temperatura obtenidos en los sondeos proceden de valores medidos en el fondo de pozo cuando se realizaron diagráfias y de los registros continuos con las diagráfias de temperatura. (...) Las temperaturas medidas fueron:

- Sondeo Serrablo 1.

A 2.256 metros de profundidad, con valores entre 70 y 73°C, corregidos mediante Horner* y obteniéndose como valor verdadero de temperatura de formación a 2.256 metros 96°C. A una profundidad 3.900 metros se han medido valores comprendidos entre 106 y 130°C, extrapolándose valores próximos a 150°C, con la salvedad de que los datos de partida no son muy fiables.

- Sondeo Serrablo 4.

A 3.642 metros de profundidad con valores medidos de entre 132,2 y 136°C, aplicando el método de Horner se obtienen temperaturas superiores a los 180°C, aunque con el gran interrogante de haberse extrapolado con dos valores medidos.

A 4.005 metros de profundidad se han medido valores de entre 117°C y 122°C, aplicando el método de Horner se extrapola como temperatura de formación 172°C.

* Véase Horner en el apartado 6. Glosario.

- Sondeo Serrablo 7.

A 3.329 metros de profundidad se midieron valores comprendidos entre 105 y 144°C, los cuáles corregidos y extrapolados mediante Horner permiten obtener para la formación una temperatura de 157°C.

A 4.271 metros se midieron temperaturas entre 134 y 145°C las cuáles permitieron obtener un valor de 192°C como temperatura verdadera de formación.

Por los valores medidos en los distintos sondeos podemos considerar que la temperatura verdadera de la formación en los sondeos Serrablo 4 y 7 supera los 165°C.

Porosidad.

Los valores de porosidad medidos no son muy exactos, debido a la importancia que tiene la porosidad secundaria en estos tramos calcáreos, y que no se observa bien mediante las diferencias entre las diagrafas sónicas, densidad, y neutrones.

(...) En el sondeo Serrablo 4 las calizas se presentan muy fracturadas según se ha podido observar con el registro sónico. Las porosidades calculadas entre los 3.654 y los 3.741 metros han sido de alrededor del 6%.

Nivel piezométrico.

Tanto de los datos obtenidos urante la perforación con aire como de una prueba de producción realizada en el almacén geotérmico se puede dar como nivel piezométrico probable para pozo sin bombeo y por lo tanto frío, el valor de 747 metros sobre el nivel del mar, situándose así a 215 metros de emboquille de Serrablo 1, a 270 metros de emboquille de Serrablo 4, y a 75 metros de emboquille de Serrablo 7.

Salinidad.

Las muestras de agua obtenidas en el sondeo Serrablo 4 han dado una salinidad de 2 g/l.”

4. EL SISTEMA GEOTÉRMICO

Una vez presentados los datos de que se disponen y cuáles son las fuentes utilizadas en su obtención se va a proceder a la realización de un panel de correlación que permita establecer una descripción del sistema geotérmico del Serrablo y comprender su potencial al compararlo con otros sistemas existentes en Europa.

4.1 PANEL DE CORRELACIÓN

A través de las columnas de sondeo reconstruidas (tanto a partir de su litología como de sus registros sínicos y de gamma ray) y tomando cómo datum la base del Flysch eoceno, se propone una correlación de dirección aproximada Norte a Sur para poder realizar un seguimiento de la capa acuífera y ver su evolución en esta dirección. Esto nos permitirá realizar una estimación de la extensión y potencia del acuífero termal, datos fundamentales a la hora de calcular el potencial del sistema geotérmico.

Es necesario comentar que a la hora de realizar dicha correlación, en los sondeos Serrablo 4 y 7 se han utilizado los datos de carbonatos del Paleoceno – Eoceno inferior de aquellas láminas cabalgantes en las que se supiese con certeza que no había repetición de serie. Esto ha hecho que la correlación se realice en láminas cabalgantes diferentes, ya que no sabemos cuáles han sido las consecuencias geométricas relacionadas con el plegamiento de los materiales y las potenciales rotaciones en los mismos.

El resultado final aparece en la Fig. 4-1, y en el anexo III del informe (en grande).

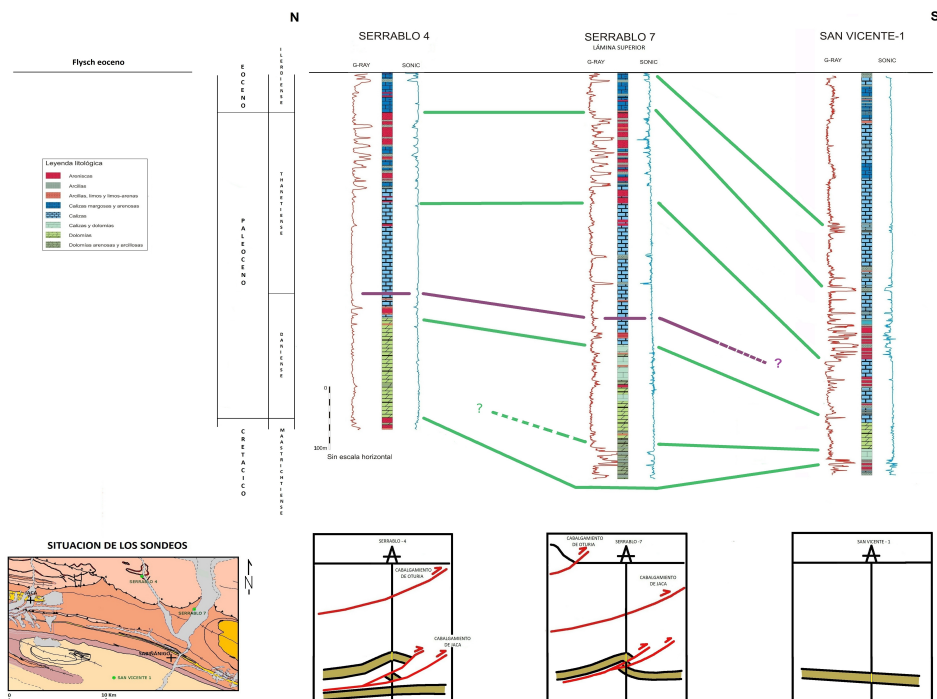


Fig. 4.1. Panel de correlación de los sondeos del Serrablo. La correlación se ha realizado teniendo en cuenta tanto la litología como los registros sínicos y de gamma ray.

A partir de este panel de correlación y de las características litológicas identificadas se puede observar que hacia el Sur la potencia de las unidades danienses y thanetienses (que incluyen el acuífero termal) disminuye a la vez que tienden a hacerse más detríticas.

Por otro lado en la correlación del acuífero termal se ha utilizado como capa guía la costra ferruginosa que los informes marcaban como techo del mismo y que aparecía claramente marcada tanto en Serrablo 4 como en la lámina superior de Serrablo 7. Aunque hacia el Sur no queda registro de dicha costra se ha interpolado su situación estratigráfica a partir de las características litológicas y de los registros sísmicos y de gamma ray del sondeo San Vicente - 1. La no constancia del registro de avenidas de agua en el tramo correspondiente del sondeo San Vicente - 1, pudo deberse a que el tramo fue perforado con espuma, aún así, en este estudio se propone situar el límite sur del acuífero termal en la zona comprendida entre Serrablo - 7 y San Vicente - 1.

La correlación entre los sondeos Serrablo - 4 y 7 nos permite estimar un área mínima de extensión del acuífero de unos 100 km². Se considera que ésta es la extensión mínima teniendo en cuenta que se están correlacionando diferentes láminas, pero de las que no sabemos ni el desplazamiento relativo que ha existido entre ellas ni está confirmado que exista una conexión directa entre dichas láminas. El área del acuífero resulta indispensable a la hora de determinar la cantidad de calor almacenado en el sistema geotérmico y estimar que cantidad del mismo puede ser extraído y utilizado para la producción de energía (tanto térmica como eléctrica).

Otra de las variables determinantes que no se encuentra disponible, ya que durante las labores de perforación y registro de los sondeos no fue determinada, es la permeabilidad de la formación acuífero. Este parámetro resulta indispensable para establecer el límite de producción del sistema geotérmico puesto que entra en juego a la hora de controlar la variación de presiones dentro del pozo en función del caudal extraído.

La hipótesis en que nos basamos para este estudio viene desarrollada a partir de los estudios paleogeográficos y estratigráficos (Baceta *et al.*, 2001, 2007 y 2011) llevados a cabo en la zona de estudio. Estos autores señalan que la paleogeografía general durante el Paleoceno y Eoceno inferior consistía en una cuenca central de 1000 a 1.500 metros de profundidad, caracterizada por una sedimentación (hemi)pelágica, y turbidítica, rodeada tanto al Norte como al Sur y al Este por sistemas de plataforma carbonatada marinas de poca profundidad que evolucionan hacia el exterior de la cuenca a una sedimentación más continental (Fig. 4.2).

De aquí se extrae que el dominio en el que nos encontramos en la zona de Serrablo pertenece a plataformas carbonatadas marinas, (lo que coincide con las características litológicas identificadas en los sondeos durante este intervalo temporal).

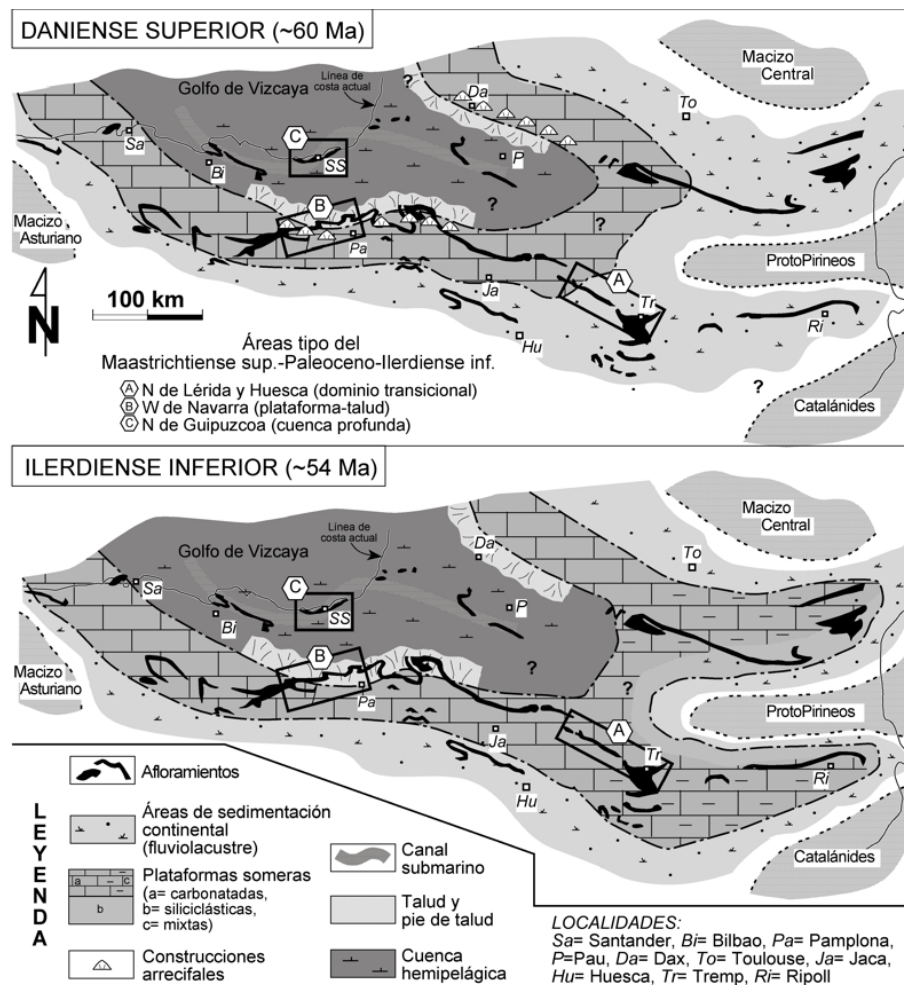


Fig. 4.2. Mapa paleogeográfico del Daniense superior e Ilerdiense inferior (Baceta *et al.*, 2011).

Por otro lado, estos mismos autores destacan en su estudio que las plataformas carbonatadas del Paleoceno – Eoceno inferior de la cuenca Pirenaica, forman un paquete de unos 300 a 600 metros de potencia, que en origen cubrió una extensión mayor de 40.000 km², es decir, de una gran continuidad lateral. En general, comentan estos autores, las secuencias deposicionales de estos periodos muestran límites entre sí correspondientes a superficies de discontinuidad, con características de exposición subaérea y que son una prueba concluyente de las bajadas del nivel del mar. La mayor y más importante de estas bajadas se produjo durante el límite Daniense – Selandiense y provocó la completa exposición de la plataforma y la formación de un sistema de paleokarst a lo largo de un periodo aproximado de 2.5 M.a. (Baceta *et al.*, 2001 y 2007) (Fig. 4.3).

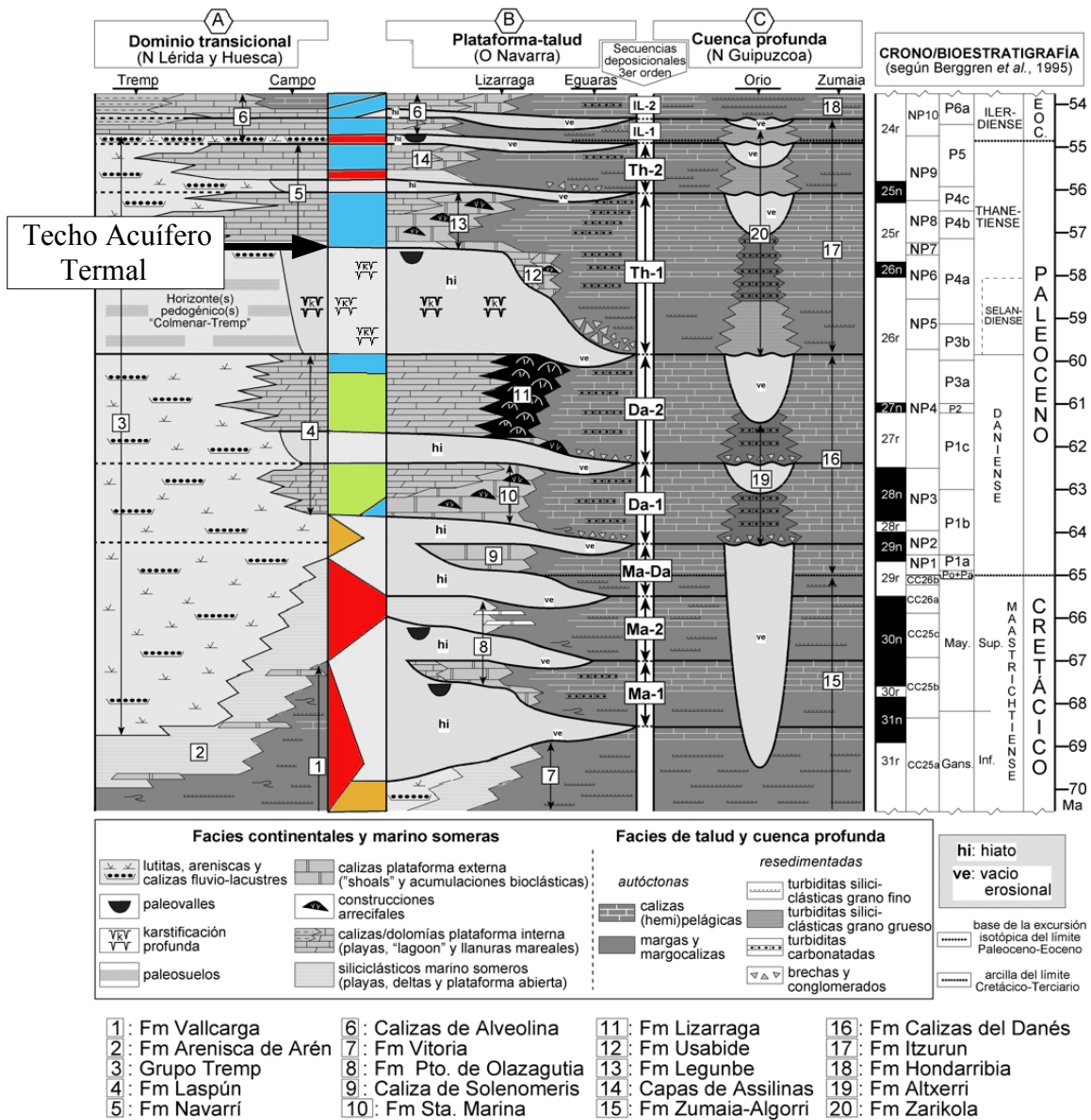


Fig. 4.3. Cuadro cronoestratigráfico donde se muestran las características litológicas y sedimentológicas de las unidades paleocenas y se destaca el paleokarst que afectó dichos materiales. (Modificado de Baceta et al., 2011)

A partir de estos datos de índole regional, podemos asumir una hipótesis de trabajo para los carbonatos del Paleoceno – Eoceno inferior, en la que éstos presentan el desarrollo de un gran sistema de paleokarst, con costras ferruginosas asociadas, correspondientes a paleosuelos. Este sistema kárstico es el que nos estaría proporcionando las avenidas de aguas termales del área del Serrablo, y uno de estos paleosuelos correspondería a la capa guía que ha sido usada en la correlación del acuífero geotérmico.

Este es un dato valioso, porque nos permite estimar un rango de permeabilidad factible para el desarrollo del sistema geotérmico, rango que será determinado en capítulos posteriores.

4.2 CÁLCULOS DE POTENCIAL

4.2.1 DESCRIPCIÓN DE FASES Y PARÁMETROS

El procedimiento usado para estimar el potencial del sistema geotérmico del Serrablo que se ha utilizado, procede de la metodología usada por Di Pippo (2008). Según este autor, la ingeniería de reservorio es el arte de describir cuantitativamente el comportamiento de los fluidos en un medio poroso y el uso de tal descripción para una gestión efectiva de la producción e inyección de estos fluidos.

Dentro de las diversas metodologías de trabajo de reservorios, se ha escogido ésta porque en primer lugar, la cantidad y calidad de los datos que se tienen es muy limitada y este método nos permite realizar las estimaciones con esos datos de partida y en segundo lugar, es una metodología específica de yacimientos geotérmicos, y así no nos vemos obligados a adaptar las formas de trabajo de otros campos de estudios de los reservorios.

La idea es ser capaces de hacer un modelo que se ajuste lo más posible a la realidad y a través del mismo poder estimar el comportamiento del sistema. El método se divide en varias fases y cada una de ellas necesita de sus propios parámetros.

Fase I

En primer lugar se debe calcular el calor contenido en el reservorio y la capacidad de producción. Es necesario para desarrollar este apartado tener parámetros como el área (extensión) del reservorio, la potencia y su porosidad, junto con el calor específico de la roca y su densidad. A través de todo ello, seremos capaces de evaluar el calor contenido en estos materiales, evaluándolo en Petajulios (10^{15} Julios). Posteriormente, en función de los años de funcionamiento estimados para el sistema geotérmico, se obtiene la cantidad de Megawatios térmicos almacenados. Por convenio, y tras los resultados obtenidos en otros laboratorios geotérmicos europeos (como el caso de Soultz o Gross Schnobeck), se estima que tan sólo el 10% de este calor podrá ser aprovechado. Además en su conversión a electricidad producida se propone una eficiencia del 14%, con lo que se obtiene la capacidad total de Megawatios eléctricos en el sistema geotérmico.

Fase II

En segundo lugar se analizan las características del sondeo y de la circulación del fluido en su interior y se modeliza el sistema con el objetivo de determinar cuál es el caudal máximo extraíble.

Existen dos factores determinantes a la hora de modelar un yacimiento geotérmico:

- Drawdown, que es una diferencia de presiones entre el yacimiento y la respuesta dentro del pozo.
- Flash horizon, que es la altura dentro del pozo a la cuál se produce el cambio de fase del fluido extraído por disminución de la presión.

En cuanto al **Drawdown**, se proponer trabajar con un caso ideal y simplificado, cómo el de la figura 4.4.

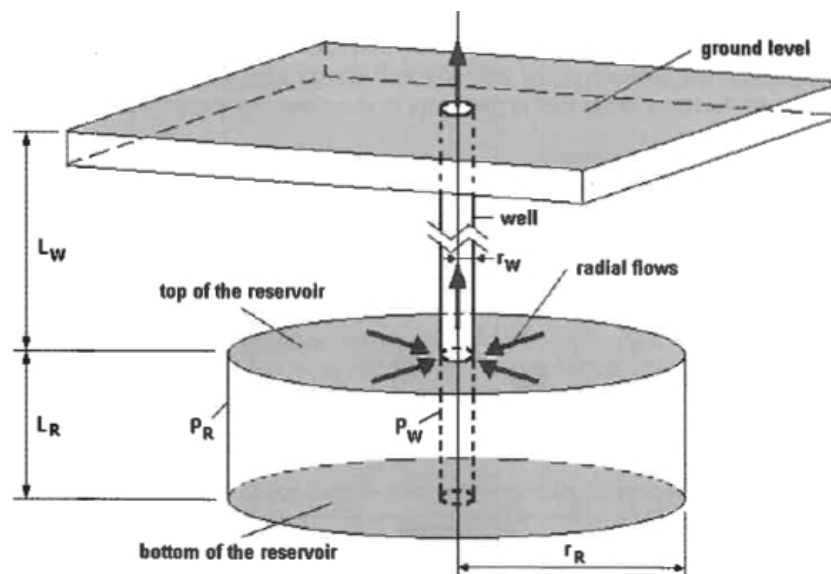


Fig. 4.4. Esquema de un yacimiento geotérmico simplificado. (Di Pippo, 2008)

A partir de este esquema, la presión se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P(r) = \frac{\mu \dot{V}_w}{2\pi K L_R} \ln r$$

En dónde μ es la viscosidad absoluta, K es la permeabilidad, V_w es la tasa de flujo volumétrico en el pozo (caudal volumétrico) a través de la interfaz entre el pozo y el reservorio y L_R es la potencia del reservorio. La presión crece conforme aumenta la distancia desde el pozo de manera logarítmica, así que la diferencia entre presión de reservorio en una zona lejana al pozo y la presión registrada en el pozo se conoce cómo drawdown (ΔP):

$$\Delta P \equiv P(r = r_R) - P(r = r_w) = \frac{\mu \dot{V}_w}{2\pi K L_R} \ln \frac{r_R}{r_w}$$

Básicamente, lo que viene a expresar esta función es que la diferencia de presión viene determinada por las características del fluido (viscosidad) y del yacimiento (potencia, permeabilidad, y área del yacimiento).

El drawdown es un factor importante ya que a partir de él, se puede determinar cuál será el descenso del nivel piezométrico en el pozo en función del caudal estimado de explotación. Este descenso viene limitado por un máximo de 300 metros, límite recomendado de trabajo para las bombas sumergibles que se instalan en los pozos de extracción al objeto de evitar los problemas de cavitación de estas bombas. Estos problemas de bombeo vienen controlados además por otro factor, el flash horizon.

El **Flash horizon** es un parámetro de bombeo que hace referencia a la altura del pozo a la que se produce el cambio de fase entre líquido y vapor debido al descenso de presión. Este es un calculo importante a la hora de situar la posición de la bomba para impedir que trabaje en vacío (efecto conocido cómo cavitación).

El método para calcular este parámetro consta de varias fórmulas que a continuación pasamos a explicar:

En primer lugar debemos introducir el término caudal másico (m), que deriva del caudal volumétrico (V), y que se relaciona con él en función de la densidad del fluido geotérmico de la siguiente manera:

$$\dot{V} = \dot{m}/\rho$$

Esto nos permite simplificar la ecuación del drawdown, y sustituir de la siguiente manera:

$$\Delta P = P_R - P_1 = \frac{\mu \ln(r_R/r_W)}{2\pi K L_R \rho_R} \dot{m} \equiv C_D \dot{m}$$

Esta fórmula nos proporciona un coeficiente de drawdown (C_D) relacionado directamente con el caudal másico.

El resultado de combinar estas ecuaciones y eliminar la velocidad usando la ecuación de continuidad, nos da como resultado final:

$$L_F = \frac{P_R - P_{sat}(T_R) - C_D \dot{m}}{\rho g + C_2 \dot{m}^2}$$

Ecuación general del flash horizon, que permite determinar a que altura se producirá el cambio de fase desde el fondo del pozo. Los parámetros que la gobiernan son: presión inicial del acuífero, presión de saturación del agua en función de la temperatura, drawdown, caudal

másico, densidad y gravedad, y por último el factor C_2 , que se encarga de introducir la dependencia del régimen de flujo, así como factores dependientes del tipo de material usado en la entubación, rugosidad, diámetro, etc...

Para este trabajo se ha realizado una tabla Excel, como la que se muestra a continuación, que permite la introducción de datos y el cálculo automático del drawdown y flash horizon (Fig. 4.5).

Flujo calorífico (militW/m2)	89.189189189		
Gradiente geotérmico (°C/100 m)	4.0540540541	°C/m	0,0405405405
Área estimada del acuífero	20		
Profundidad del acuífero (metros)	3700		
h (potencia del acuífero metros)	100	metros	
G (v.)	100	L/s	360 m3/h
At (años de operatividad)	25	años	
O (porosidad de la formación)	0,7		
CpF	1	cal/cm3°C	
CpR	0,5	cal/cm3°C	
kR	2,2	W/m°C	0,00528 cal/cms°C
t*	150	°C	
Radio del tubo (m)	0,1203125		9,625 pulgadas
Radio de influencia (m)	100		
P inicial en el acuífero (Mpa)	38		375,0308413521 atmosferas
Diámetro del pozo(m)	0,244475		9,625 pulgadas
distancia entre pozos (metros)	956,31335794		
densidad (Kg /m3) para 120° a 180°C/ 180 -250°C	939,9	960,62858236	
Permeabilidad (mD)	100,00		
BHP(Mpa)			
Viscosidad dinámica (poises) rango grande	0,001	0,0018108888	
Transmisividad (m2/día)	200		
drawdown (Atm.) para diámetro continuo	10,679871961		105,4021412358 En metros de
Coefficiente de drawdown (Mpa/Kg/s o 1/m*s)	0,0113627747		
PI m3/Mpa*s (EGEC definición de EGS) y L/s*bar	0,0093634081	0,9363408135	

Fig. 4.5. Imagen de la tabla creada. En verde aparecen aquellas celdas en las que introducimos los datos y en rojo los resultados. El funcionamiento del programa se contrastó y verificó con diferentes problemas propuestos por Di Pippo (2008).

Fase III

Por último, se realiza una estimación de la producción en función de los caudales de extracción, puesto que conocemos el volumen de roca (a partir de la extensión y potencia del acuífero), el volumen de agua almacenada (puesto que además conocemos la porosidad), y el tiempo de funcionamiento del sistema (que viene marcado por el usuario y normalmente se sitúa en 25 años), y se puede calcular la relación existente entre la energía producida por cada litro extraído. Además aplicando el tiempo de funcionamiento del sistema se puede llegar a estimar cuál sería el caudal necesario para extraer toda la energía posible en ese periodo de tiempo. Esto nos permite evaluar cuál va a ser la producción final del campo geotérmico en función del caudal que nosotros podamos extraer.

4.2.2 RESULTADOS

En el caso del acuífero geotérmico del Serrablo, los parámetros usados y resultados obtenidos son (la hoja excel usada en el cálculo se encuentra en el Anexo IV):

- Para la Fase I, cálculo del calor contenido en el reservorio y capacidad de producción a 25 años vista:
 - Área estimada del acuífero, 100 Km², según la información extraída del panel de correlación, y que marcan la extensión mínima del mismo.
 - Potencia del acuífero, 150 metros, deducida de las columnas del sondeo Serrablo – 7.
 - Temperatura: 170°C según datos de sondeo.
 - Porosidad: 0,08 según informes IGME.
 - Calor específico de la roca: 0.9 KJ/Kg°C. Datos estándar.
 - Densidad de la roca: 2.500 Kg/m³. Datos estándar.
 - Años de operatividad: 25 años.

Los resultados obtenidos en este apartado fueron los siguientes:

- Calor almacenado en el reservorio recuperable: **4.161 MWth**.
- Capacidad de producción: **58 Mwel**.
- En la Fase II, estimación del caudal máximo de extracción (ver cálculo en el Anexo IV):
 - Viscosidad dinámica; 0,0015 poises (extraído de Rivera, 2001).
 - Permeabilidad: 100 mD. Estimación realizada en función de las características del sistema y el caudal máximo extraíble para mantener el drawdown por encima de los 300 metros, y comparado con los rangos mínimos de permeabilidad usuales según litologías (Bear, 1972).
 - Potencia del acuífero, 150 metros, deducida de las columnas del sondeo Serrablo – 7.
 - Radio de influencia del pozo: 1,5 Km. (Espert *et al.*, 2000).
 - Radio del pozo en la zona de extracción: 22,6 cm.
 - Límite de Drawdown, limitado a 300 metros, por necesidades de la bomba.
 - Límite de Flash horizon, por encima del drawdown.

- Nivel piezométrico, 77 metros desde superficie, extraído de los informes de sondeo Serrablo - 7.
- Presión inicial en el acuífero: 38 MPa de los informes de sondeo.

Los resultados obtenidos en este apartado fueron los siguientes:

- Caudal máximo extraíble: **135 l/s.**
- Drawdown: **288 m.** desde superficie.
- Flash horizon: **184 m.** desde superficie.
- En la Fase III, estimamos la producción obtenida:
 - Caudal máximo extraíble: 135 l/s.

El resultado obtenido fue:

- Capacidad de producción final: **5,16 MWel.**

4.2.3 ANÁLISIS DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO

Los mínimos de producción que resultarían rentables, según comparaciones con otros sistemas geotérmicos de Europa y la estimación de producción necesaria para la rentabilidad de una planta en España, diseñado por la empresa GeoThermal Engineering (2009), son los representados en la Tabla 4.1. En ella se proponen diferentes tipos de centrales en función de las características del yacimiento (fundamentalmente temperatura) y forma de explotación (fundamentalmente cantidad de sondeos).

Concept Project		A	B	C	D
Plant (nameplate, type)	-	20 MW flash	100 MW flash	20 MW binary	5 MW binary
Resource					
Type	-	Active volcanic	Active volcanic	Hydrothermal	Hydrothermal
Temperature	degC	220-250	220-250	150-180	100-150
Wells					
Depth	m	2500	2500	3600	3600
# production	-	3	13	5	2
# injection	-	2	7	5	2
Unit cost - production well	€/well	4,7	4,7	7,0	7,0
Well stimulation	€/well	n/a	n/a	n/a	n/a
Plant					
Net Plant Capacity	MW _{el} net	18,8	96	16	3,5
Capacity factor	%	95	95	90	90
Output to Grid	GWh	156	799	126	28
Opex - fixed cost	€/annum	1,6	8,3	2,2	1,5
# makeup wells / 5 years	-	0,5	2,0	1,0	0,5
Opex - periodic cost	€/5 years	2,4	9,4	7,0	3,5
Capex					
Well	€m	24	94	70	28
Plant	€m	40	167	46	16
Grid connection	€m	2	10	2	0,5
Contingency	%	10	10	10	10
Total	€m	72	299	129	48
Specific capex	€/MW _{el} net	3,8	3,1	8,1	13,8
Development Duration	Years	5	6	5	4

Tabla 4.1 Tabla con los datos de producción y características del sistema geotérmico modificada del estudio de GeoThermal Engineering sobre el potencial geotérmico de la península (GeoThermal Engineering, 2009).

El rango estimado para el yacimiento geotérmico del Serrablo, permite situarlo entre los modelos C y D. Esto teniendo en cuenta que ambos modelos proponen un sistema con varios sondeos de extracción e inyección, mientras que en este estudio se está modelizando un sistema con un único sondeo de extracción y otro de inyección (por motivos de simplificación del modelo y porque ya entramos en rangos rentables de producción). El modelo apunta a que con una permeabilidad de la formación de 100 miliDarcys y una temperatura del fluido de 170°C, a través de la extracción de un caudal de 135 l/s se conseguiría una capacidad de producción de 5,16 Mwe, con la instalación de una bomba productora a 288 metros de profundidad y un flash horizon situado a 184 metros de superficie.

En cualquier caso, conviene destacar que los valores de los parámetros utilizados para esta simulación son de carácter muy conservativo, ya que:

- Se ha diseñado el modelo para un yacimiento que en ningún caso usara tecnología de estimulación de reservorios, tecnología que en aquellos lugares que se ha aplicado, cómo es el caso de Soultz, ha llegado a duplicar la productividad del sondeo. Esto se ha hecho así, porque resulta necesario determinar cuál es la capacidad de producción sin estimulación ninguna y comparar con los requisitos citados en el apartado 2.2.3 Yacimiento geotérmico, que según la EGEC definen cuáles son los parámetros que caracterizan un yacimiento estimulado. En concreto, el índice de productividad propuesto es aquel que está por debajo de $10^{-2} \text{ m}^3/\text{MPa}\cdot\text{s}$ y en nuestro modelo del Serrablo tenemos un índice de productividad de $6\cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{MPa}\cdot\text{s}$, es decir seis veces superior al límite marcado.
- No se ha tenido en cuenta la acción de la hipótesis de la paleokarstificación sobre las características del reservorio. En caso de que se decidiera aplicar parámetros más condicionados por esta paleokarstificación, se podría tomar cómo modelo la central de Unterhaching. Está desarrollada en un sistema muy similar (paleokarst), y calculó transmisividades para su acuífero del orden de $5\cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ frente a la transmisividad calculada para el acuífero del Serrablo que es de $1,5\cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, comparativamente menor que la de el acuífero alemán.

Si queremos lanzar una propuesta no conservativa de capacidad de producción para nuestro acuífero, podríamos modelizar nuestro doblete geotérmico ajustando su permeabilidad a una equivalente a la de Unterhaching. Si tomamos la transmisividad de Unterhaching, sabiendo que su potencia de acuífero es de 300 m, y la transformamos en permeabilidad a través de las equivalencias propuestas por la EGEC ($10^{-5} \text{ m s}^{-1} = 1 \text{ D}$; $1 \text{ m s}^{-1} = 10^{-7} \text{ m}^2$), el resultado es de 300 mD.

Cuando aplicamos este dato a nuestro modelo, los resultados se optimizarían hasta poder llegar a plantear una capacidad de producción por encima de los 7 MWel., que se encontraría

muy limitada por la necesidad de plantear más sondeos de extracción, ya que los caudales extraíbles serían tan grandes que el doblete geotérmico no podría asumirlos, por problemas con el horizonte de cambio de fase.

4.3 COMPARATIVA CON OTROS SISTEMAS GEOTERMALES

El propósito del siguiente capítulo es presentar los esquemas de dos sistemas geotérmicos similares desarrollados en diferentes países de Europa, para comparar sus características con las del yacimiento geotérmico del Serrablo.

4.3.1 ALTHEIM, AUSTRIA

La información del proyecto fue obtenida de <http://engine.brgm.fr/>, página oficial de ENGINE, organismo europeo destinado a la presentación de diferentes proyectos geotérmicos en Europa.

El proyecto de Altheim, se caracteriza por ser uno de los primeros proyectos piloto en Europa, sus características de desarrollo se pueden observar en la figura 4.6.

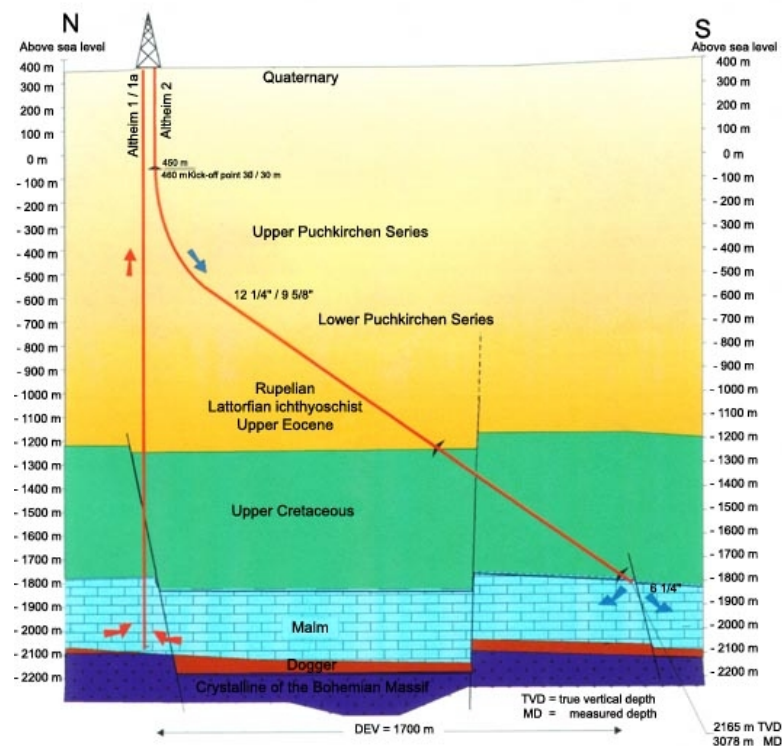


Fig. 4.6. Esquema de organización de las perforaciones en el sistema geotérmico de Altheim. (Perneckner y Uhlíq, 2002).

Es un diseño basado en un doblete geotérmico que trabaja a 2.300 metros de profundidad con su sondeo productor y a 2165 m con el inyector.

La temperatura de trabajo es de 106°C y consiguen un caudal de producción de 100 l/s. Los materiales que actúan como acuífero son los carbonatos del Jurásico superior. Su producción es de 1 MWeI. y por tanto susceptiblemente menor a la esperada en el Serrablo debido a que la temperatura de trabajo es mucho menor.

4.3.2 UNTERHACHING, ALEMANIA

La central geotérmica de Unterhaching, es un claro ejemplo del funcionamiento mixto o en cascada de estas centrales. El principio de este esquema de funcionamiento en cascada es que una vez aprovechado el fluido geotérmico para la producción de electricidad, en vez de reinyectar directamente el fluido en el reservorio, se aprovecha para otros usos en los que se requieran fluidos que puedan aportar calor a menores temperaturas, como puede ser el district heating*, ACS** o la producción en piscifactorías.

El aprovechamiento comienza con la perforación de un doblete geotérmico que extrae el agua a 3.350 de profundidad, con un caudal de 150 l/s y con una temperatura de trabajo de 122°C (Fig 4.7).

La formación de la que se extrae el agua corresponde a unos carbonatos Jurásicos afectados por un proceso de paleokarstificación, que es el que provoca que la permeabilidad de esta formación sea lo suficientemente alta como para extraer estos caudales sin problemas de descenso de presiones (Wolfgramm *et al.*, 2007).

Esta central tiene una capacidad de producción 3,5 MWeI, y 40 MWth aprovechados en red de calor para abastecer a la población. Este ejemplo se acerca mucho más al modelo del Serrablo, para el que se calcula una capacidad de producción eléctrica de 5 MWeI. La diferencia de producción en positivo para el Serrablo es debida a la mayor temperatura del fluido extraído. No se ha realizado el cálculo del aprovechamiento térmico para el Serrablo, pero las previsiones serían mucho más altas que en el caso de Unterhaching.

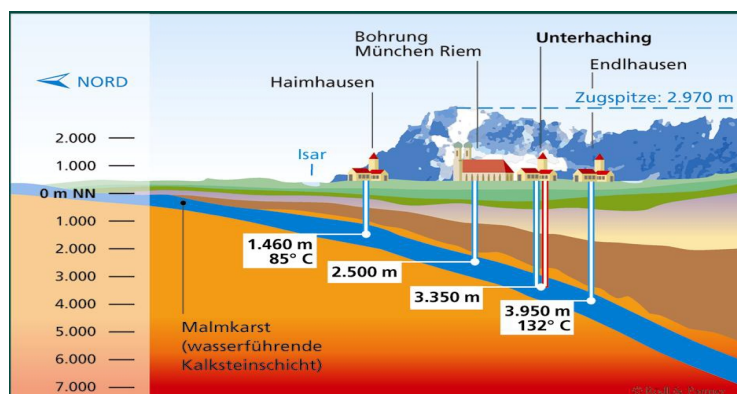


Fig. 4.7. Corte que representa la situación de la formación que se explota en la central de Unterhaching, y las características que presenta. (figura extraída del informe inédito realizado por la empresa Röld & Partner, 2006).

* Véase district heating en el apartado 6. Glosario.

** Véase ACS en el apartado 6. Glosario.

5. CONCLUSIONES

A partir de las características litológicas y el Gamma ray y el sónico se han correlacionado 3 sondeos del área del Serrablo (Serrablo - 7 con Serrablo -4 y San Vicente).

Según la correlación establecida entre estos sondeos se determina un área mínima del acuífero de 100 Km², dato que junto con su potencia, nos permite estimar la cantidad de energía, en forma de calor almacenado, presente en el yacimiento correspondiente a 4.161 MWth.

Sobre un modelo conservativo, en función de la permeabilidad estimada de 100 mD, y tomando cómo límite la profundidad de la bomba de 300 m., se calcula un caudal de producción de 135 l/s. Esto nos llevaría a una producción de 5,16 MWeI, que según el esquema de tipos de centrales geotérmicas entraría dentro de los rangos factibles para la producción eléctrica.

Por otro lado, si la hipótesis de la existencia de un gran sistema de paleokarst que afectara a los materiales se viera confirmada a través de la realización de ensayos de producción, la permeabilidad aumentaría considerablemente hasta valores de 300 mD, resultando un sistema mucho más eficiente, con capacidades de producción para un doblete geotérmico de 7 MWeI.

6. GLOSARIO

– **Horner.** Es un método de corrección de temperaturas de sondeos, diseñado por Horner en 1951, y que trata de estimar la temperatura real de la formación, es decir, la que se debe alcanzar una vez reestablecido el equilibrio, que en su momento fue roto por el efecto enfriador del lodo de perforación en el sondeo. Se define en función de T_m , que es la temperatura medida, t que es el tiempo de circulación del lodo, y Δt que equivale al TSC, que es el tiempo transcurrido desde el final de la circulación del lodo. Actualmente es un método que todavía conserva buena reputación, a pesar de que se ha demostrado que usualmente subestima las temperaturas reales de la formación entre 7° y 24°C (Waples y Ramly, 2.001).

– **District heating.** La calefacción urbana (también denominada calefacción de distrito) es aquella en que el calor (la energía térmica) se distribuye por una red urbana, del mismo modo en que se hace con el gas o el agua. Se organiza desde una central de producción de calor, se distribuye agua caliente, por medio de conducciones aisladas térmicamente, hacia las subcentrales de edificio dónde, con un intercambiador, se adecua el agua a las características (presión y temperatura) propias de la instalación del edificio. Ésta subcentral es como cualquier central térmica de edificio, pero con el intercambiador en lugar de calderas.

– **ACS.** Agua caliente sanitaria, es agua destinada a consumo humano (potable), que ha sido calentada. Se utiliza para usos sanitarios humanos (baños, duchas, etc...) y limpieza.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Baceta, J. I., Wright, V. P. y Pujalte, V. (2001): Palaeo-mixing zone karst features from Paleocen carbonates of north Spain: criteria for recognizing a potentially widespread but rarely documented diagenetic system. *Sedimentary Geology*, 139: 205 – 216.
- Baceta, J.I., Pujalte, V., Aguirre, J., Braga, J.C., Serra-Kiel, J. y Barattolo, F. (2007): The record of the Danian-Selandian boundary in shallow (sub)tropical platform successions from the Pyrenees. *International Workshop of the Paleocen Working Group, Zumaia, Basque Country*. Volume of Abstracts: 10 – 12.
- Baceta, J.I., Pujalte, V., Wright, V.P., Schmitz, B. (2011): Carbonate platform models, sea-levels changes and extreme climatic events during the Paleocene – early Eocene greenhouse interval : a basin-platform-coastal plain transect across the southern Pyrenean basin. In: *Free-Meeting Field trips Guidebook, 28th IAS Meeting. Zaragoza. Sociedad geológica de España. Geo-guías 7*: 101 – 111.
- Baceta, J.I., Pujalte, V., Serra-Kiel, J., Robador, A. y Orue-Etxebarria, X. (2004): El Maastrichtiense final, Paleoceno e llerdiense inferior de la Cordillera Pirenaica. In: *Geología de España. Sociedad Geológica de España, IGME*: 308 – 313.
- Barnolas, A. y Teixell, A. (1992): La cuenca surpirenaica de Jaca como ejemplo de cuenca de antepaís marina profunda con sedimentación carbonática en el margen distal. Simposio sobre Geología de los Pirineos, *III Congr. Geol. de Esp., Salamanca*, 2: 205 – 214.
- Barnolas, A. y Teixell, A. (1994): Platform sedimentation and collapse in a carbonate-dominated margin of a foreland basin (Jaca basin, Eocene, southern Pyrenees). *Geology*, 12: 1107 – 1110.
- Barnolas, A., Samsó, J. M., Teixell, A., Tosquella, J. y Zamorano, M. (1991): Evolución sedimentaria entre la cuenca de Graus-Tremp y la cuenca de Jaca-Pamplona. *I Congreso Grupo Español del Terciario*, Libro-Guía Excursión nº 1, Vic: 123 pp.
- Bear, J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*, Dover.
- Canudo, J. I. y Molina, E. (1988): Biocronología con foraminíferos planctónicos de la secuencia deposicional de Jaca (Pirineo aragonés): Eoceno medio y superior. *II Congreso Geológico de España, Comunicaciones, Granada*, 1: 273 – 276.
- Casas, A. y Pardo, G. (2004): Estructura pirenaica y evolución de las cuencas sedimentarias en la transversal Huesca – Oloron. *Geo – Guías*, cuaderno 1: Itinerarios Geológicos por Aragón: 63 – 86.

-
- Di Pippo, R. (2008): Geothermal power plants. *Elsevier Advanced Technology*: 50 – 59.
 - EGEN (2009): *Define EGS technology. Enhanced Geothermal Systems*. Informe inédito.
 - Espert, V.B., Baeza, I., López G. y Martínez, F.J. (2000): Acoplamiento de la hidráulica de pozos y la teoría de bombas para la determinación de caudales en régimen permanente. *Ingeniería del agua*, (7), nº2: 129 – 132.
 - Estrada, M. R. (1982): Lóbulos deposicionales de la parte superior del Grupo Hecho entre los anticlinales de Boltaña y el río Aragón (Huesca). *Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona*: 164 pp.
 - Geoplat (2009): *Documento de visión a 2030*: 8 – 12.
 - GeoThermal engineering (2009): Geothermal potential in Spain and support schemes necessary to facilitate geothermal developments. *Documentación APPA – Alta entalpía*.
 - Hogan, P. (1993): Geochronologic, tectonic and stratigraphic evolution of the southwest Pyrenean foreland basin, Northern Spain. *Ph. D.Thesis, University of Southern California*: 208 p.
 - Hurter, S. y Schellschmidt, R. (2006): Atlas of Geothermal Resources in Europe. *JOULE II program of the European Commission*.
 - IDAE (2008): *Manual de geotermia*: 8 – 10.
 - IDAE (2011): *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio técnico PER 2011 – 2020*: 39 – 43.
 - IGME (1985b): *Informe 50312. Investigación geotérmica del área de Jaca y sondeos recientes*. Informe inédito.
 - IGME (1981): *Informe 00660. Estudio de las posibilidades de explotación de energía geotérmica en almacenes profundos de baja y media entalpía del territorio nacional*. Informe inédito.
 - IGME (1981): *Informe final de sondeo Serrablo – 7*. Informe inédito.
 - IGME (1982): *Informe final de sondeo San Vicente – 1*. Informe inédito.
 - IGME (1985a): *Informe 50333. Nota del posible proyecto de investigación geotérmica en la zona de Jaca – Sabiñánigo*. Informe inédito.
 - Johns, D. R., Mutti, E., Rosell, J. y Séguret, M. (1981): Origin of a thick, redeposited carbonate bed in the Eocene turbidites of the Hecho Group, South-Central Pyrenees, Spain. *Geology*, 9: 161 – 164.

-
- Labaume, P., Mutti, E. y Séguret, M. (1987): Megaturbidites: A Depositional Model From the Eocene of the SW-Pyrenean Foreland Basin, Spain. *Geo-Marine Letters*, 7: 91 – 101.
 - Lanaja, J.M. (1987): *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la geología de España*: 465 pp.
 - Márzan, I., Fernández, M., Cabal, J. (1996): Estudio geotérmico en la mitad Occidental de España. *Geogaceta*, 20 (3): 745 – 748.
 - Montes, M. J. (1992): Sistemas deposicionales en el Eoceno medio-Oligoceno del sinclinatorio de Guarga (Cuenca de Jaca, Pirineo central). Simposio sobre Geología de los Pirineos. *III Congreso Geológico de España, Salamanca*, 2: 150 – 160.
 - Mutti, E., Luterbacher, H., Ferrer, J. y Rosell, J. (1972): Schema stratigrafico e lineamenti di facies del Paleogeno Marino della zona centrale sudpirenaica tra Tresp (Catalogna) e Pamplona (Navarra). *Mem. Soc. Geol. Italia*, 11: 391 – 416.
 - Pernecker, G. y Uhlig, S. (2002): Low-enthalpy power generation with ORC-turbogenerator, the Altheim project, upper Austria. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 23 (1): 26-30.
 - Puigdefàbregas, C. (1975): La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca. *Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos*, 104: 188 pp.
 - Puigdefàbregas, C. y Souquet, P. (1986): Tecto-sedimentary cycles and depositional sequences of the Mesozoic and Tertiary from the Pyrenees. *Tectonophysics*, 129: 173 – 203.
 - Remacha, E. y Picart, J. (1991): El complejo turbidítico de Jaca y el delta de la arenisca de Sabiñánigo. Estratigrafía. Facies y su relación con la tectónica. *I Congreso del Grupo Español del Terciario*, Libro-Guía excursión nº 8, Vic: 116 p.
 - Remacha, E., Arbués, P. y Carreras, M. (1987): Precisiones sobre los límites de la secuencia deposicional de Jaca. Evolución de las facies desde la base de la secuencia hasta el techo de de la arenisca de Sabiñánigo. *Boletín Geológico y Minero*, 98: 40 – 48.
 - Rivera, E. (2001): Introducción a la mecánica de fluidos. *Facultad Nacional de Ingeniería. (Bolivia)*.
 - Robador, A. (1990): Early Paleogene Stratigraphy. *In: Introduction to the early Paleogene of the south Pyrenean basin. Field trip guide-book. I.G.C.P. Project 286 Early Paleogene Benthos*), IUGS-UNESCO, Chap. 2: 41 – 87.
 - Röld & Partner (2006): Geothermal energy, pilot project Unterhachin, Germany. *Strasbourg Geothermal Congress 15 – September – 2006*. Informe inédito.

- Rupke, N. A. (1976): Sedimentology of very thick calcarenite-marlstone beds in a flysch succession, southwestern Pyrenees. *Sedimentology*, 23: 43 – 65.
- Sánchez, J. (2010): Yacimientos Geotérmicos Estimulados. Potencial en España. *Ponencias del II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria*.
- Soler, M. y Puigdefàbregas, C. (1970): Líneas generales de la geología del Alto Aragón occidental. *Pirineos*, 96: 5 – 19.
- Teixell, A. (2000): Geotectónica de los Pirineos. *Investigación y ciencia*, 188: 54 – 65.
- Teixell, A. y García-Sansegundo, J. (1995): Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8 (3): 215 – 228.
- Waples, D. y Ramly, M. (2001): A statistical method for correcting log-derived temperatures. *Petroleum geoscience*, 7: 231 – 240.
- Wolfgramm, M., Bartels, J., Hoffmann, F., Kittl, G., Lenz, G., Seibt, P., Schulz, R., Thomas, R. y Unger, H.J. (2007): Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany). *Proceedings European Geothermal Congress 2007*: 1 – 6.

ANEXOS



LEYENDA



ZONA DE ESTUDIO

HUSO 30

EUROPEAN DATUM 1950



Kilómetros

YACIMIENTO GEOTÉRMICO
DEL SERRABLO

ANEXO I
MAPA TOPOGRÁFICO
ESCALA 1:65.000

720000.0

715000.0

710000.0

705000.0

4720000.0

4715000.0

4710000.0

720000.0

715000.0

710000.0

705000.0



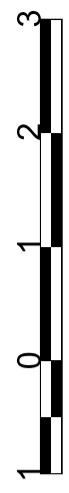
LEYENDA

CUATERNARIO	29	30	31	32
PALEOGENO	SUPERIOR			
	MEDIO			
TERCIARIO	LUTECIENSE			
	MIOCENO			
CRET. SUP.	LUTECIENSE			
	MIOCENO			
CRET. SUP.	LUTECIENSE			
	MIOCENO			

- 32 Fondo de valle
- 31 Cono de depresión
- 30 Depósito coluvial
- 29 Depósito aluvial
- 28 Glacia
- 27 Terrazas fluviales
- 26 Depósitos glaciares y periglaciares
- 25 Conglomerados masivos (Peña Ornel)
- 24 Lutitas pardas esquizadas con niveles de areniscas y calizas con gastropodos
- 23 Conglomerados areniscas y lutitas rojizas
- 22 Conglomerados masivos y lutitas rojizas
- 21 Lutitas rojas y niveles de conglomerados
- 20 Conglomerados masivos (Sta. Orosia)
- 19 Areniscas
- 18 Niveles areníferos de corales
- 17 Margas grues (Fm. margas de Pamplona)
- 16 Areniscas con glauconita (Fm. Areniscas de Sabitanga)
- 15 Margas grues (Fm. margas de Lanes)
- 14 Lutitas y areniscas en facies turbidíticas
- 13 Megacapa 8 o de Estalín
- 12 Areniscas en capas gruesas y lutitas en facies turbidítica
- 11 Lutitas y areniscas en facies turbidíticas
- 10 Megacapa 5 o de Roncal
- 9 Lutitas y areniscas en facies turbidíticas
- 8 Megacapa 4 o de Garde Colefábo
- 7 Megacapa 3 o de Villana
- 6 Lutitas y areniscas en facies turbidíticas
- 5 Caliza con sílex. Areniscas y margas
- 4 Caliza masiva. Arenisca calcárea
- 3 Dolomitas tabuladas
- 2 Calizas, arenas y areniscas margosas.
- 1 Calizas

ZONA DE ESTUDIO

HUSO 30
EUROPEAN DATUM 1950



4710000.0

4710000.0

720000.0

715000.0

710000.0

705000.0

4720000.0

4720000.0

4715000.0

4715000.0

4710000.0

4710000.0

720000.0

715000.0

710000.0

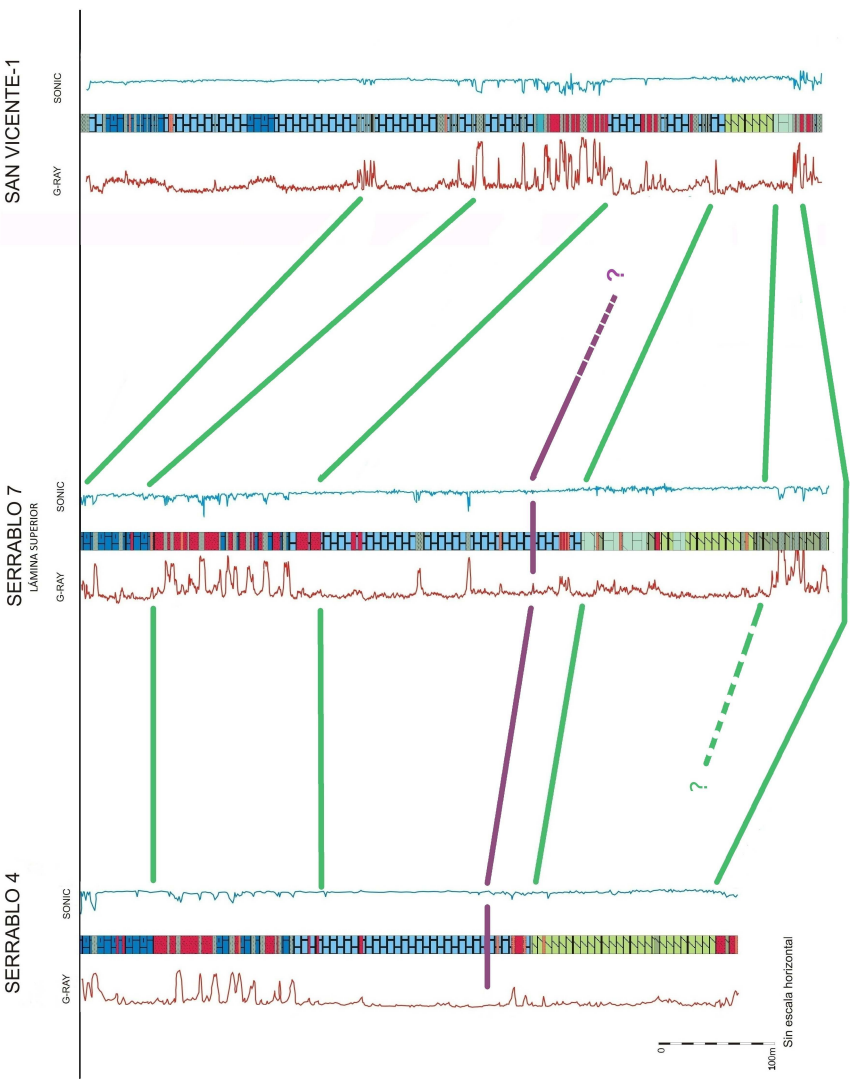
705000.0

YACIMIENTO GEOTÉRMICO
DEL SERRABLO

ANEXO II
MAPA GEOLÓGICO
ESCALA 1:65.000

S

N

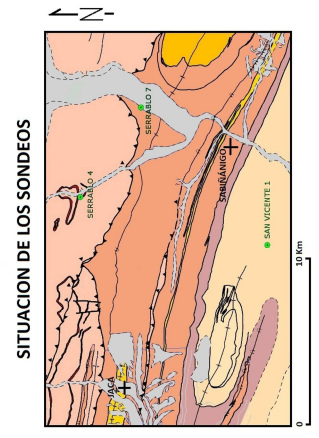
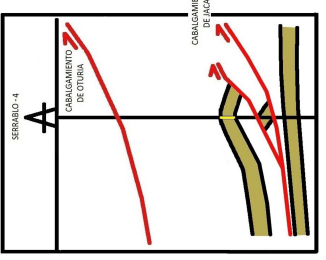
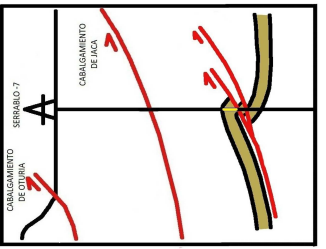
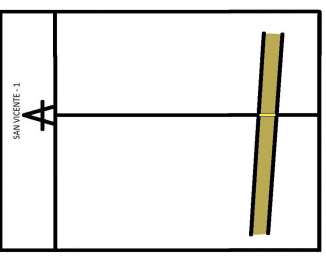


Flysch eoceno

Leyenda litológica

[Red]	Areniscas
[Green]	Acilias
[Blue]	Acilias, limas y limas-arenas
[Orange]	Calizas margositas y arenosas
[Purple]	Calizas
[Light Green]	Calizas y dolomías
[Dark Green]	Dolomías
[Yellow]	Dolomías arenosas y arcillosas

YACIMIENTO GEOTÉRMICO DEL SERRABLO
ANEXO III
PANEL DE CORRELACIÓN



Flujo calorífico (mJ/W/m2)	103.8838883				
Gradiente geotérmico (°C/100 m)	4.722222222	0,0472222222			
Área estimada del acuífero	100				
Profundidad del acuífero (metros)	3600				
h (potencia del acuífero metros)	150 metros				
G (L)	135 L/s	486 m3/h			
At (años de operatividad)	25 años				
O (porosidad de la formación)	0,08				
CpF	1 cal/cm3°C				
CpR	0.5 cal/cm3°C				
KR	2.2 W/m²°C	0.00528 cal/cm²°C			
tr	178 °C				
Radio del tubo (m)	0.1203125	9.625 pulgadas			
Radio de influencia (m)	1500				
P inicial en el acuífero (Mpa)	38	375.0308413521 atmosferas			
Díametro del pozo (m)	0.2265934	8.921 pulgadas			
distancia entre pozos (metros)	1137.4467342				
densidad (Kg /m3) para 120° a 180°C/ 180 -250°C	921.88198198	928.74286079			
Permeabilidad (mD)	100,00				
BHP(Mpa)					
Viscosidad dinámica (poises) rango grande	0.0015854567	0.0015854567			
Transmisividad (m2/día)	7.29676				
drawdown (Atm.) para diámetro continuo	21.584047897	212.8208059388	En metros desde n topográfico		288.8200059388
Coefficiente de drawdown (Mpa/Kg/s o 1/m²s)	0.0173269129				
PI m3/MPa*sg (EGEC definición de EGS) y L/s*bar	0.0062604202	0.6260420152			
Flash horizon	3414.4155777	Desde superficie	185.3844222 Metros		
p sat agua (Mpa)	0.791143308	7.8079773796 atmosferas			
Rugosidad del tubo (epsilon)	0.0000457				
reynolds	441303.9316				
factor fricción	0.0133906102				
C2	0.0789186131				

PRODUCCION	Q (MWth)	416.15694	MWth Recuperable (%)	10	MWth	416.15694	PJ totales.	5278.5
	Calor específico KJ/m3°C)	2223.4011618						
	Calor específico KJ/Kg°C) agua 100°	2.08	eficiencia (%)	14	MWel	58.2619718		
	Calor específico KJ/Kg°C) roca	0.9	MWel/	4.8552E-011	Consumo de bombas	0		
	Densidad de la roca KG/m3	2500	Caudal óptimo extraíble (l/s)	135	Caudal necesario l/s	1522.0700152207		
					MWel final	5.1675455711		

