

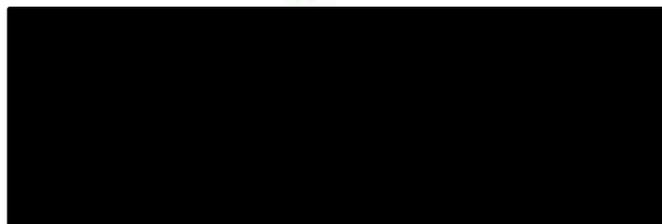


PLAN DE TRABAJOS E INVERSIONES

PERMISO DE INVESTIGACIÓN PARA GEOTERMIA “CIBELES ESTE NORTE”

PROVINCIA DE MADRID

(COMUNIDAD AUTÓNOMA DE MADRID)



JUNIO 2023





presenta memoria de
Plan de Trabajos e Inversiones del Permiso de Investigación para Geoterminia denominado “Cibeles Este Norte” ubicado en la provincia de Madrid (Madrid).

Realiza dicho Proyecto de Investigación para Geoterminia, la empresa “Gabinete de Estudios Ambientales y Agronómicos. Ingenieros S.L.” con domicilio a efectos de notificaciones en la ciudad de Ávila (España), C/Cronista Eduardo Ruiz Ayucar, nº 10, CP 05004 - Tfno. (+34) 658 41 62 49 y e-mail: director@geaingenieros.com.

Junio de 2023

Este documento es propiedad intelectual de GABINETE DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y AGRONÓMICOS. INGENIEROS S.L quedando prohibida su reproducción y/o publicación a través de impresión o de cualquier otro medio de transmisión como fotocopias o grabación, entre otros, sin previo consentimiento por escrito de GABINETE DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y AGRONÓMICOS. INGENIEROS S.L.

GABINETE DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y AGRONÓMICOS. INGENIEROS S.L autoriza al Cliente el uso de este documento con el propósito expresado en el mismo y en las condiciones acordadas entre el Cliente y GABINETE DE ESTUDIOS AMBIENTALES Y AGRONÓMICOS. INGENIEROS S.L.



PLAN DE TRABAJO E INVERSIONES

PERMISO DE INVESTIGACIÓN PARA GEOTERMIA "CIBELES ESTE NORTE"

PROVINCIA DE MADRID (MADRID)



CONSULTOR

GA. INGENIEROS

Gabinete de Estudios Ambientales y Agronómicos. Ingenieros, S.L

CIF: B-05.208.871

C/Cronista Eduardo Ruiz Ayucar, nº 10

05004 - Ávila

director@geaingenieros.com

www.geaingenieros.com

PROMOTOR

ÍNDICE GENERAL

1.	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2.	<u>LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO</u>	4
3.	<u>GEOTERMIA Y LEGISLACIÓN MINERA</u>	5
4.	<u>JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO</u>	6
4.1	SITUACIÓN DE LA GEOTERMIA EN ESPAÑA	6
4.1.1	BALANCE ENERGÉTICO	6
4.1.2	MARCO RETRIBUTIVO	6
5.	<u>EL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA CUENCA DE MADRID</u>	7
6.	<u>GEOLOGÍA</u>	9
6.1	LA CUENCA DE MADRID	11
7.	<u>POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA ZONA NORTE DE MADRID</u>	15
7.1	GEOTERMIA DE ALTA ENTALPÍA	15
7.2	GEOTERMIA DE MEDIA ENTALPÍA	15
7.3	GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA	16
7.3.1	CONTINUIDAD Y POTENCIA DEL ALMACÉN DE BAJA TEMPERATURA	16
8.	<u>CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS OBJETIVO</u>	18
9.	<u>CALIDAD DE LAS AGUAS</u>	19
10.	<u>ESTIMACIÓN DEL RECURSO GEOTÉRMICO</u>	20
11.	<u>ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN</u>	21
11.1	EXPLORACIÓN SISMOLOGÍA. SÍSMICA DE REFLEXIÓN	21
11.2	PERFORACIÓN	24
11.2.1	PLATAFORMA DE PERFORACIÓN	24
11.2.2	LODOS DE PERFORACIÓN	26
11.2.3	ENTUBADO Y CEMENTACIÓN	27
11.2.4	ELEMENTO DE CONTROL DE LA PERFORACIÓN	29
11.2.5	CONTROL DIRECCIONAL	29
11.2.6	CONTROL GEOLÓGICO DURANTE LA PERFORACIÓN	30
11.2.7	CONTROL DE SURGENCIA	31
11.2.8	REGISTRO DE LOS CONTROLES	32

11.3 PROGRAMA DE TRABAJO	32
11.3.1 PRIMER AÑO	33
11.3.2 SEGUNDO AÑO	33
11.3.3 TERCER AÑO	34
11.4 CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN	35
11.5 RESUMEN DE INVERSIONES	35
12. REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Planta tipo Flash (elaborado por Celestino García de la Noceda Márquez – IGME)	2
Figura 2.	Planta tipo ORC (elaborado por Celestino García de la Noceda Márquez – IGME).....	3
Figura 3.	Localización del proyecto	4
Figura 4.	Sección N-S de la Cuenca de Madrid, modificada de IGME que muestra la posición de los pozos geotérmicos.	8
Figura 5.	Esquema geológico de la Comunidad de Madrid.	9
Figura 6.	Principales estructuras tectónicas que afectan a la corteza terrestre en la zona central de la Península Ibérica. Las siglas se refieren a las capitales.	10
Figura 7.	Corte geológico esquemático mostrando la estructura interna de la corteza terrestre en la zona central de la Península Ibérica. La situación del corte está indicada en la Figura 3.	11
Figura 8.	Estructura de la Cuenca de Madrid modificada de Calvo et al (1989).	13
Figura 9.	Diferentes vehículos utilizados en la adquisición de sísmica de reflexión en tierra.....	22
Figura 10.	Diferentes vehículos utilizados en la adquisición de sísmica de reflexión en tierra.....	22
Figura 11.	Esquema de la metodología utilizada para la construcción de modelos geológicos 3D, partiendo de datos sísmicos y geológicos de diferentes fuentes. En cada uno de los pasos se detalla el software usado.	23
Figura 12.	Línea sísmica RV-71V interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells. Acuífero Mediodía. Línea sísmica y corte 8 se posicionan en la figura 9B (el acuífero principal es el Cretácico Superior).	23
Figura 13.	Plataforma de perforación	25
Figura 14.	Esquema con los principales elementos a la plataforma de perforación.....	26
Figura 15.	Esquemas de dos tipos de sistemas de prevención de surgencias (BOP).	31
Figura 16.	Esquemas de dos tipos de sistemas de prevención de surgencias (BOP).	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Vértices de la cuadrícula objeto de estudio.	4
Tabla 2.	Cronograma de ejecución de los trabajos propuesto.....	35
Tabla 3.	Resumen de las inversiones propuestas.....	35

1. INTRODUCCIÓN

La geotermia es fundamentalmente un recurso minero, tal como reconoce la propia legislación minera al incluirla dentro de la sección D) de los recursos minerales, no obstante, su marco jurídico y especialmente técnico no se ha desarrollado convenientemente para las instalaciones, sobre todo para las de muy baja entalpía, que ya se están introduciendo en España, si bien no todas las instalaciones llevan el mismo tratamiento administrativo.

Antes el aprovechamiento geotérmico requería una serie de condiciones (temperatura, profundidad y existencia de agua), que era lo que conocíamos como yacimientos hidrogeotérmicos, y que hoy día ya no son pilares rígidos, sino que han ido evolucionando.

La estructura de la Tierra está ordenada en capas en las que a medida que penetramos en ellas va aumentando la temperatura. Lógicamente, nosotros sólo podemos alcanzar las capas más superficiales. Luego, en cualquier caso, la Tierra está emitiendo calor desde el interior. Nos encontramos por lo tanto con una corteza terrestre afectada por un aporte de calor desde el interior, pudiéndose distinguir zonas de mayor intensidad (donde se está formando nueva corteza, dorsales oceánicas o zonas donde se destruye corteza chocando dos placas) de las zonas donde hay menos (mucho más estables donde prima el desprendimiento de calor por radiación).

En cualquier caso, vemos que nos encontramos un yacimiento geotérmico cuando se produce una concentración de calor concentrado en un fluido en el interior de la tierra. En ese sentido, hablamos de tipos de yacimientos según su entalpía, la cual la podemos asimilar a la temperatura:

- Yacimientos de baja temperatura (menos de 100°C) donde no se puede producir electricidad, pero resultarían útiles para acondicionamiento en la edificación.
- Yacimientos de alta temperatura (más de 150°C), adecuados para producir directamente electricidad.
- Finalmente, se habla también de yacimientos de media temperatura (entre 100°C y 150°C), los cuales se podrían usar para producción de electricidad mediante ciclos binarios (uso de fluido intermedio).

Sin embargo, ésta no es la clasificación que permite determinar su régimen normativo, sino que es el uso del recurso el que va a determinar su proceso de autorización al amparo de la Ley de Minas o excluida de ella.

Una característica de los yacimientos geotérmicos es que el aprovechamiento del recurso debe hacerse en el mismo lugar del yacimiento, ya que el transporte de calor es complejo y poco eficiente. Así, por ejemplo, para el aprovechamiento de manera directa del recurso de baja temperatura para calefacción se utilizan perforaciones muy profundas, parecidas a las usadas en perforaciones

petrolíferas, pero en las proximidades del lugar donde se hará la misma edificación. Una dificultad con la que se encuentran estas plantas es la concentración de sales que suele aparecer en el fluido de recurso.

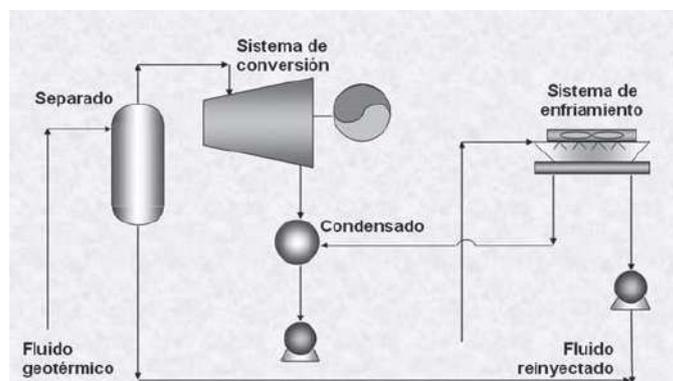
En cuanto a la producción de electricidad con geotermia, ésta no es muy diferente a la de otros métodos. La diferencia fundamental es la caldera (en este caso es el suelo quien hace las veces de esta) y la red de tuberías que lleva el calor hacia la superficie. Según el tipo de recurso y fluido que contiene el calor bajo la tierra, el sistema de aprovechamiento cambiará.

Podemos clasificar los distintos tipos de plantas como sigue:

- Plantas de vapor seco:
 - **Ciclo directo sin condensación.**
 - **Ciclo directo con condensación.**
 - **Ciclo indirecto con condensación y recuperación de aguas mineralizadas.**
- Plantas flash:
 - **Simple flash.**
 - **Doble flash.**
- Plantas binarias:
 - **ORC.**
 - **Kalina.**

Las primeras, plantas de vapor seco, son menos abundantes dada la dificultad de encontrar un recurso con vapor sin humedad. Son mucho más habituales sin embargo las de tipo flash, donde el recurso se encuentra en forma de mezcla de vapor-agua.

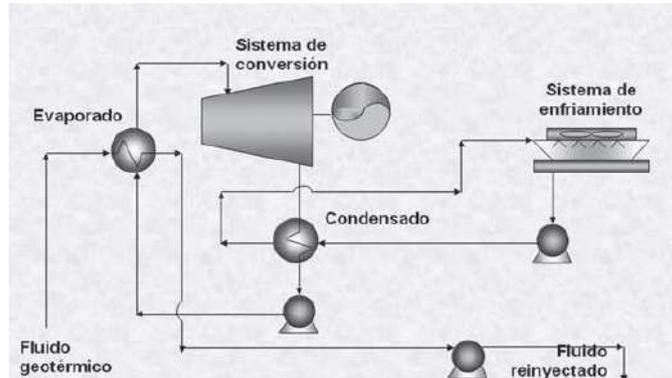
Figura 1. Planta tipo Flash (elaborado por Celestino García de la Noceda Márquez – IGME)



La figura 1 muestra como en ellas se utiliza directamente el agua del recurso, separándose el vapor del líquido y llevándose sólo el vapor a la turbina. Puede ser el vapor separado en una única fase (simple flash) o en dos fases, lo cual es más eficiente desde el punto de vista energético y tecnológico. En el

caso del aprovechamiento de baja temperatura, el calor una vez extraído del yacimiento es introducido en un ciclo de potencia Kalina u ORC (Ciclo Rankine Orgánico), como puede verse en la figura 2, que utiliza un fluido de trabajo adecuado (circuito binario) elegido de tal manera que tenga un bajo punto de ebullición. Algo así también se haría en el caso de que el fluido primario (el del recurso) estuviera demasiado cargado en sales.

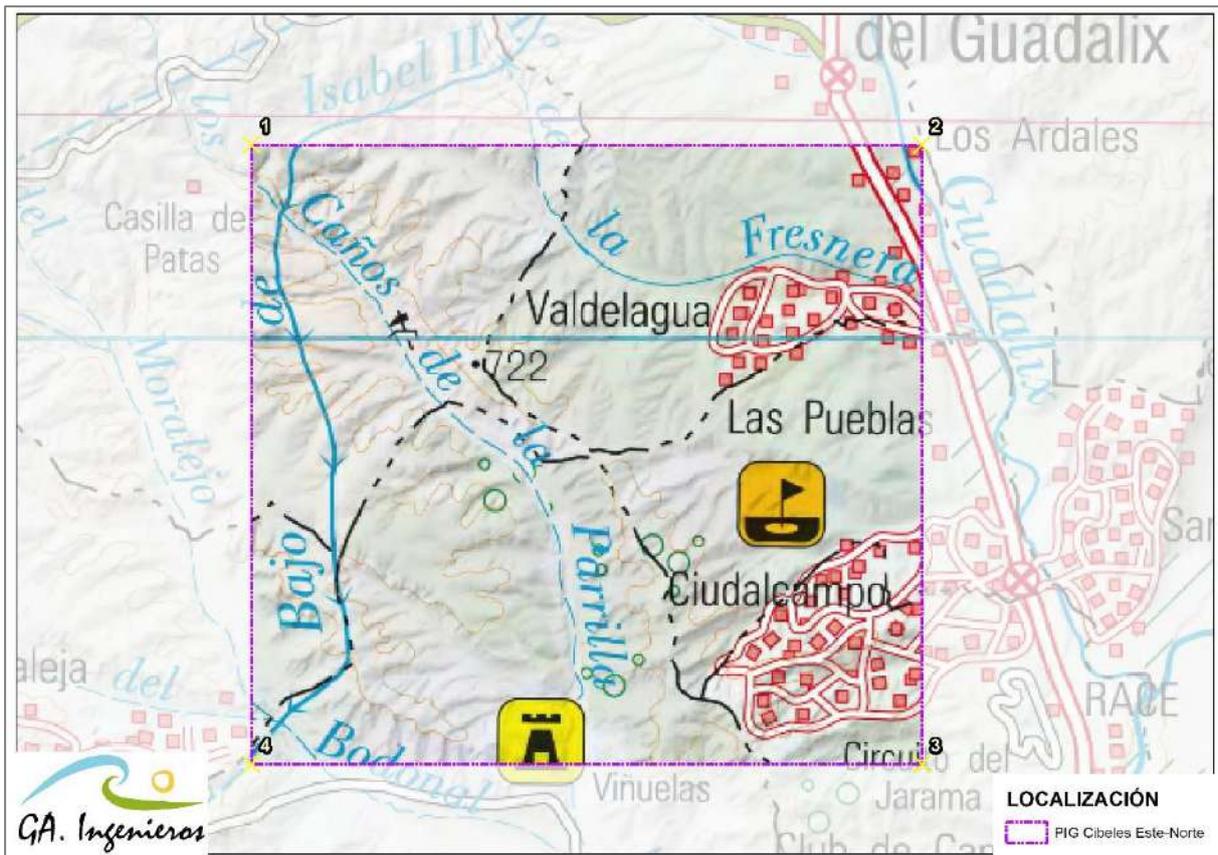
Figura 2. Planta tipo ORC (elaborado por Celestino García de la Noceda Márquez – IGME)



2. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El Proyecto de Investigación para Geotermia tiene unas grandes dimensiones, concretamente de 4.086,74 Hectáreas y queda enmarcado de forma íntegra en la Comunidad de Madrid, concretamente en los términos municipales de Colmenar Viejo, Madrid y Tres cantos, San Agustín de Guadalix y San Sebastián de los Reyes. En la siguiente imagen, se puede ver la ubicación de los vértices y el recinto de análisis sobre el mapa cartográfico del IGN.

Figura 3. Localización del proyecto



A continuación, se muestran las coordenadas de los vértices del área de estudio:

Tabla 1. Vértices de la cuadrícula objeto de estudio.

ETRS 89 HUSO UTM 30N		
VÉRTICES	COORDENADAS X	COORDENADAS Y
VÉRTICE 01	442.616,50	4.501.928,00
VÉRTICE 02	449.243,50	4.501.928,00
VÉRTICE 03	449.243,50	4.495.761,20
VÉRTICE 04	442.616,50	4.495.761,20

3. GEOTERMIA Y LEGISLACIÓN MINERA

En cuanto a la Ley de Minas, la energía geotérmica tiene cabida en su sección D), donde se establece el régimen jurídico de ciertos recursos energéticos, entre los que se incluye ya la energía geotérmica.

La Ley de Minas establece tres figuras jurídicas:

- **El Permiso de Exploración.**
- **El Permiso de Investigación.**
- **La Concesión Administrativa.**

Cada una de las cuales perfectamente regulada y ampliamente utilizada para los recursos mineros de la sección C), que engloba gran parte de los recursos mineros existentes en España. De las tres figuras, cabe destacar la Concesión de aprovechamiento, a la que se puede llegar directamente o derivada de los permisos anteriores, pero que permite el aprovechamiento durante periodos de concesión de 30 años por un máximo de 90, y lleva asociada una serie de derechos y obligaciones, como resulta el caso de su condición de Utilidad Pública que permite al titular beneficiarse incluso de la expropiación forzosa.

La Concesión minera, al igual que los Permisos de Exploración e Investigación se otorgan por cuadrículas mineras, que llevan implícitas ciertas obligaciones como la de nombramiento de director facultativo, presentación anual de planes de labores y restauración final de los terrenos, por citar algunos. No obstante, no todos los aprovechamientos geotérmicos deben encajarse en alguna de estas figuras, ya que la propia Ley de Minas contempla que determinados aprovechamientos de escaso valor económico, que se aprovechan en la parcela donde se obtienen y por el dueño de los terrenos, sean incluidos dentro del ámbito de aplicación de la Ley de Minas, y consecuentemente quedan fuera de este régimen.

Así, la mayor parte de los aprovechamientos geotérmicos de muy baja entalpía, frecuentemente aprovechados para climatización, calefacción, etc. escapan a este régimen jurídico, permitiéndose un tratamiento mucho más simple. De todas las posibilidades de aprovechamiento existentes de este último tipo se puede establecer una clasificación en función de su topología en aprovechamientos mediante cimentación activa, disposición horizontal y perforaciones verticales, siendo estas últimas las que por requerir el empleo de técnica minera en la realización del sondeo necesitan una aprobación específica.

En el caso de la Comunidad de Madrid se da la circunstancia de que los sondeos geotérmicos están recogidos en la Ley de Evaluación Ambiental, por lo que, en función de su profundidad, mayor o menos de 200 m, requerirán o no someterse a dicho proceso de evaluación.

4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La geotermia, como energía renovable, cumple con todos los requisitos que la normativa europea exige ahora mismo. Es renovable, eficiente (ahorros energéticos en sus aplicaciones térmicas de calefacción y refrigeración), autóctona (nos reduce la dependencia energética exterior) y, por supuesto, es una energía limpia (mínimo impacto medioambiental y escasa emisión de gases de efecto invernadero). Por otra parte, es también gestionable, constante y conlleva unos demostrados beneficios socioeconómicos (desarrollo regional y generación de nuevos puestos de trabajo).

Todo ello justifica el esfuerzo en fomentar la energía geotérmica, ya que resulta imprescindible para alcanzar los objetivos establecido por la UE, en términos de consumo mínimo de energía final con energías renovables.

4.1 SITUACIÓN DE LA GEOTERMIA EN ESPAÑA

4.1.1 BALANCE ENERGÉTICO

Es cierto que, hoy en día, la influencia de la geotermia es insignificante lo cual es debido a su reciente desarrollo en España. De hecho, no existen datos acerca de la potencia geotérmica producida en el país actualmente.

Sin embargo, estudios sectoriales actuales indican que la potencia geotérmica instalada en España, ceñida a 2018, arroja una potencia de 293 MW en sus distintos aprovechamientos, encabezados por la calefacción (252 MW), el agua caliente sanitaria (71), la refrigeración (153) y atemperar el agua de piscinas (1), según los datos hechos públicos por el Departamento de Planificación y Estudios del IDAE.

4.1.2 MARCO RETRIBUTIVO

El régimen económico y jurídico de las instalaciones que pueden acogerse al Régimen Especial se establece en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

Las centrales geotérmicas para generación de electricidad quedarían englobadas dentro del grupo "b.3": instalaciones que únicamente utilicen como energía primaria la geotérmica, la de las olas, la de las mareas, las rocas calientes y secas, la océano-térmica y la energía de las corrientes marinas.

5. EL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA CUENCA DE MADRID

El potencial geotérmico de la Cuenca de Madrid fue descubierto en 1980 gracias a un pozo exploratorio de petróleo perforado por Shell-Campsa que mostró temperaturas de 88°C y 156°C grados a 1700 m y 3400 m de profundidad respectivamente. Esa energía geotérmica de baja entalpía El yacimiento fue evaluado adicionalmente por cuatro pozos exploratorios. El último pozo fue perforado en 1990. Estos pozos han identificado un recurso geotérmico confiable, alojado en un reservorio de arenisca terciaria, clástica y consolidada consistente en una gruesa secuencia multicapa (200-800m) con temperaturas que van desde 70° a 90°C y profundidades de 1500 a 2150 m., sobre una secuencia mesozoica, adecuada para ser explotada para usos térmicos en varias redes de calefacción urbana de Madrid en zonas que presenten cargas térmicas adecuadas.

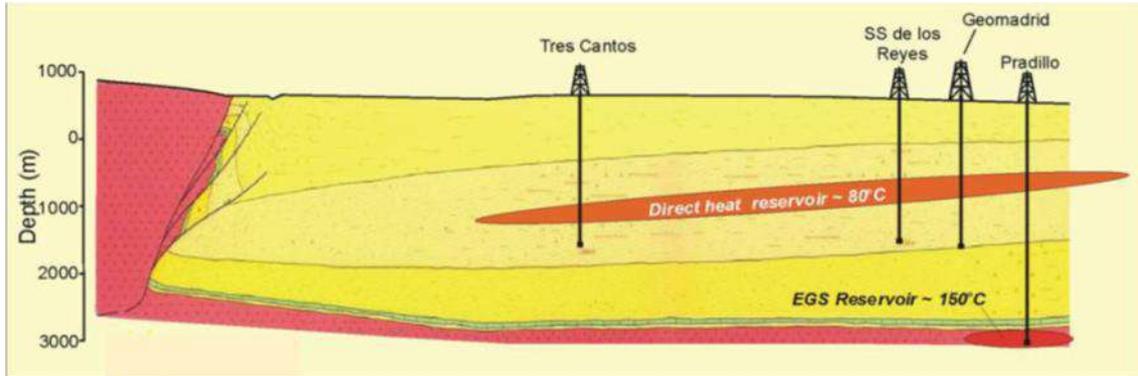
También se identificó un reservorio de entalpía media en el contacto entre calizas del Mesozoico Cretácico y basamento fracturado granitos a 3400m de profundidad, con temperaturas medidas de 156°C, que podría ser desarrollado y aprovechado mediante un combinado esquema de producción de energía y calor (CPH) dentro del áreas suburbanas.

El yacimiento geotérmico de baja entalpía fue evaluado gracias a cuatro pozos exploratorios perforados en la década de 1980 en Pradillo (pozo de petróleo Shell), San Sebastián de los Reyes, Tres Cantos y Geomadrid-1 ubicaciones. Permitieron identificar un confiable recurso geotérmico, alojado en un Terciario, clástico, consolidado yacimiento de arenisca que consta de una gruesa secuencia multicapa (200-800m) con temperaturas que oscilan entre los 70° y los 90°C, por encima una secuencia mesozoica. El embalse se encuentra debajo de la ciudad de Madrid y localidades limítrofes.

Las áreas suburbanas del norte de Madrid disfrutan de una de las más ambientes geotérmicos favorables identificados hasta la fecha en España. Los cuatro pozos exploratorios perforados en el área (ver ubicaciones en el mapa de la Figura 1), a saber:

- **El Pradillo 1 (Shell, 1980) 3400 m**
- **Tres Cantos (IGME, 1981) 2400 m**
- **San Sebastián de los Reyes (ENADIMSA, 1982) 2100 m**
- **Geomadrid-1 (ENADIMSA, 1990) 2000 m,**

Figura 4. Sección N-S de la Cuenca de Madrid, modificada de IGME que muestra la posición de los pozos geotérmicos.



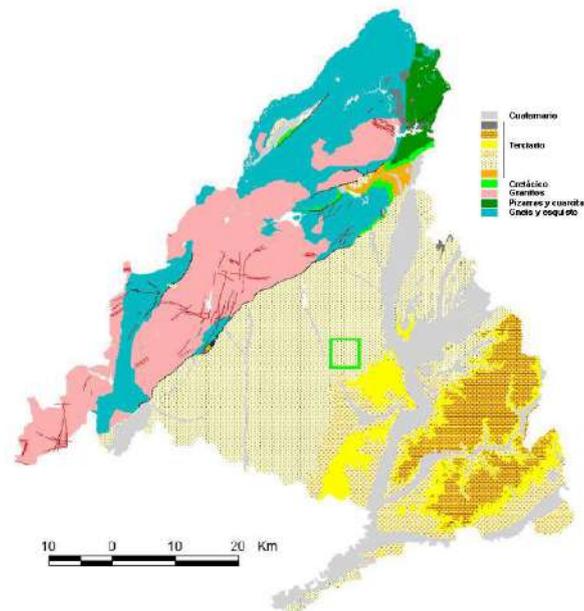
Esto junto con investigaciones geofísicas (principalmente líneas sísmicas) y pruebas de pozos, llevaron al potencial geotérmico local, retratado en Figura 1 que mapea las características de los depósitos clásticos del Terciario fijado como meta prioritaria de desarrollo, dado que es superior a temperaturas subsuperficiales normales (75 – 90 °C a aproximadamente 1800 a 2400m de profundidad), y además, sus propiedades de reservorio fiables son de más de 100 m de espesor neto con transmisividades de 20 a 45 dm) elegible para capacidades productivas de pozo 200 – 250 m³/h.

6. GEOLOGÍA

Las Sierras de Guadarrama y Somosierra se encuentran en la franja noroeste del territorio de la Comunidad de Madrid y forman parte del Sistema Central (Figura 2). El sustrato geológico de esta zona está formado por rocas muy diversas (magmáticas, metamórficas y sedimentarias) caracterizadas por su gran antigüedad (Paleozoico y Mesozoico). Las rocas más antiguas son los gneises, mármoles y esquistos (azul en la Figura 2). En algunos casos, la edad de estas rocas metamórficas puede superar los 500 millones de años, transcurridos desde su formación original como sedimentos en el fondo de un mar.

Les siguen en antigüedad las pizarras y cuarcitas del norte de la Comunidad (verde oscuro en la Figura 2), rocas sedimentarias originalmente depositadas en el fondo de un océano durante el Ordovícico y Silúrico, cuando la Península Ibérica formaba parte del borde del supercontinente Gondwana, y que posteriormente sufrieron un metamorfismo menor que los esquistos y gneises. Los granitos de la Sierra de Guadarrama (rosa en la Figura 2) son rocas ígneas plutónicas que se formaron en el Carbonífero, durante la llamada Orogenia Varisca (antes también conocida como Hercínica), una época en la que se formaron relieves que obligaron al mar a retroceder. Las montañas formadas durante esta orogenia se fueron erosionando durante más de 200 millones de años hasta que, en el Cretácico, la zona central de la Península Ibérica (Madrid y Segovia) quedó más o menos plana y volvió a quedar cubierta por el mar.

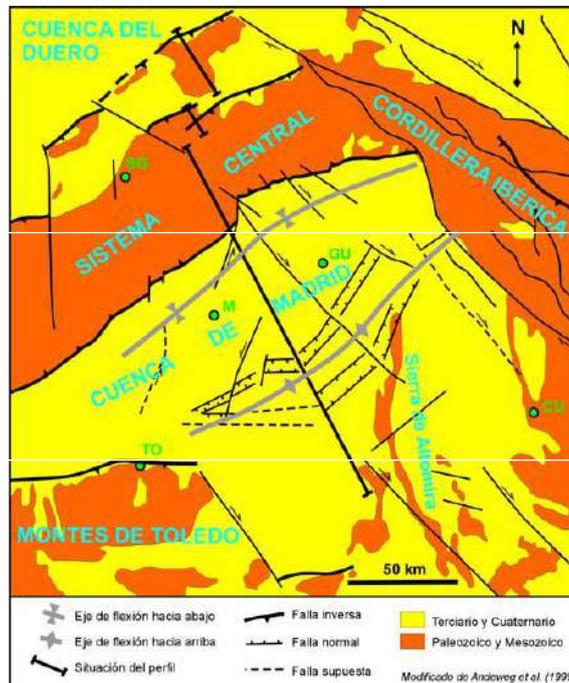
Figura 5. Esquema geológico de la Comunidad de Madrid.



De esta forma, durante el transcurso de algunos millones de años, casi hasta el final del Cretácico, se sedimentaron arenas, calizas y dolomías en las costas y mares tropicales que existían entonces en la Comunidad de Madrid. Las extensas capas que se depositaron en el fondo de este mar durante el

Cretácico fueron después plegadas y fracturadas al levantarse el Sistema Central en el Cenozoico (Orogenia Alpina). Actualmente, podemos ver algunos restos de estas rocas marinas en pequeñas franjas adosadas a los relieves principales (verde claro en la Figura 2 y en Figura 4).

Figura 6. Principales estructuras tectónicas que afectan a la corteza terrestre en la zona central de la Península Ibérica. Las siglas se refieren a las capitales.



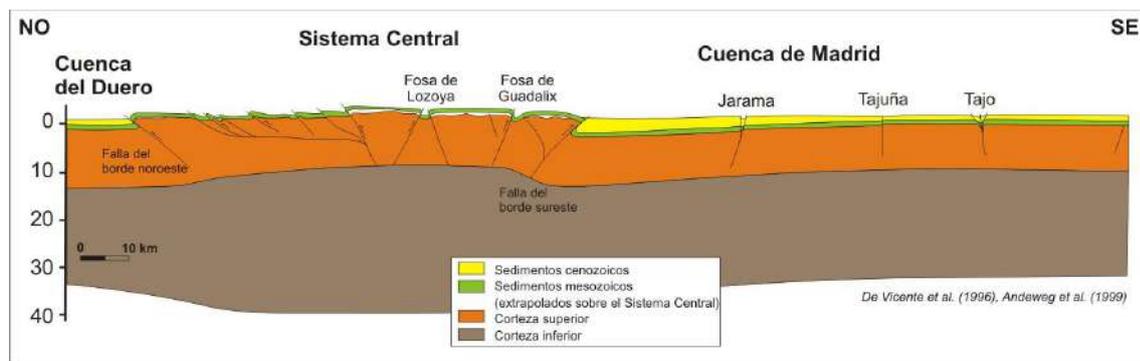
El movimiento continuo de las placas litosféricas que forman la corteza terrestre, y las colisiones entre esas placas, han generado las cordilleras y montañas. De ahí el nombre de orogenia, que significa origen del relieve, génesis de montañas. Las actuales alineaciones montañosas de la Península Ibérica -entre ellas el Sistema Central del norte y oeste de la Comunidad de Madrid- se formaron durante la Orogenia Alpina, que comenzó a finales del Cretácico, hace unos 80 millones de años.

En la Península Ibérica, la Orogenia Alpina se debió a una doble colisión: por un lado, la colisión de la Placa Ibérica con la Placa Euroasiática para dar lugar a los Pirineos, Cordillera Cantábrica y Cordillera Ibérica, y, por otro lado, la colisión de la Placa de Alborán con las Placas Ibérica y Africana para dar lugar a las Cordilleras Béticas y al Sistema Central por el norte y al Rif Marroquí por el sur. Después de la formación de estas montañas, en el Plioceno, hace unos 5 millones de años, tuvo lugar otra consecuencia de la Orogenia Alpina, el progresivo drenaje cada vez mayor de la Península Ibérica hacia el oeste, hacia el Océano Atlántico, de tal forma que las cuencas sedimentarias del Cenozoico que había en el interior de la península y que hasta entonces eran endorreicas (Duero y Tajo), empezaron a 'vaciar' hacia el oeste, estableciéndose la red de drenaje de las cuencas hidrográficas que vemos actualmente.

Durante la Orogenia Alpina no sólo se elevaron cordilleras, sino que, al mismo tiempo, según se iban formando los nuevos relieves, éstos se erosionaban. Los torrentes y ríos que entonces, igual que ahora,

bajaban de las montañas del Sistema Central, arrastraban sedimentos y, cuando cesaba el transporte, los sedimentos se depositaban y se iban rellenando las zonas bajas con dichos materiales. De esta forma, durante el Mioceno, en la región de Madrid existía una gran depresión o cuenca de sedimentación que se iba rellenando con los sedimentos procedentes de los sistemas montañosos que la rodeaban. En aquella época el clima era más cálido y árido que el actual, y los cursos fluviales que discurrían entre las montañas, al llegar a la zona llana de la cuenca formaban extensos abanicos aluviales con los materiales que transportaban. Como siempre ocurre en estos casos, los de mayor tamaño (gravas y arenas) se quedaban más cerca del área fuente, y los más finos (limos y arcillas) llegaban a las zonas lacustres, colmatándolas gradualmente. Además, los compuestos que se encontraban disueltos en el agua también llegaban a los lagos y dieron lugar a sales y evaporitas, llamadas así porque precipitan cuando se evaporan las aguas. Los seres vivos, fundamentalmente algas, bacterias y moluscos, también contribuyeron a la formación de rocas como las calizas.

Figura 7. Corte geológico esquemático mostrando la estructura interna de la corteza terrestre en la zona central de la Península Ibérica. La situación del corte está indicada en la Figura 3.



6.1 LA CUENCA DE MADRID

La Cuenca de Madrid constituye el sector central del Tajo Cuenca una de las mayores cuencas no deformadas del Terciario del Ibérico Península. Muestra una forma triangular limitada al norte por el Sierra de Guadarrama, al sur por la Sierra de Toledo y al este por la cordillera de Altamira con dirección N-S (Figura 2).

Presenta una morfología en forma de cuña; los espesores son máximos al norte donde los sedimentos alcanzan los 4.000 m y están delimitados por las rocas de basamento cristalinas, principalmente granitos y gneises. Los sedimentos son empujados por las rocas del basamento hacia el norte, delineados por el Sierras del Norte de Madrid (Cordillera del Sistema Central). Aquellos Las estructuras de cabalgamiento se evidencian por profundas fallas paralelas que tienden SSW-NNE (Sánchez Guzmán, 2007) (Figura 5).

Aproximadamente dos tercios de la Comunidad de Madrid forman parte de esta amplia cubeta sedimentaria que los geólogos llamamos la Cuenca de Madrid, limitada al norte y oeste por el Sistema Central (Gredos, Guadarrama, Somosierra), al este por la Sierra de Altomira, y al sur por los Montes de

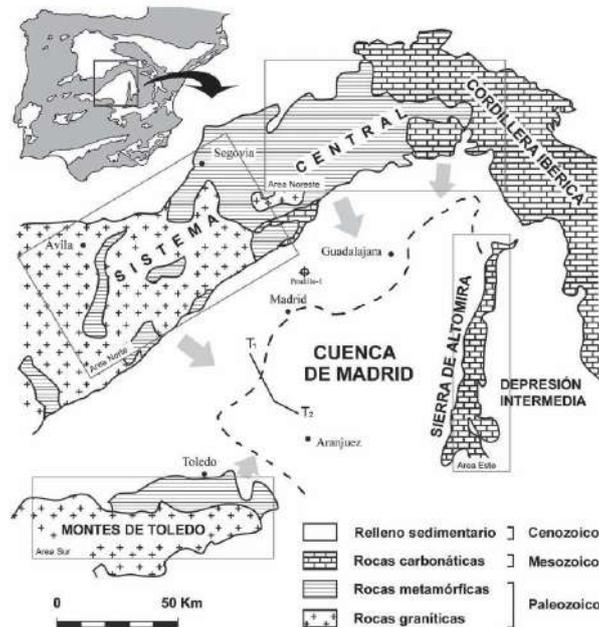
Toledo (Figura 3). La misma ciudad de Madrid se encuentra inmersa en esta vasta depresión tectónica que estuvo recibiendo sedimentos de los relieves circundantes durante millones de años. Toda la zona centro y sureste de la Comunidad pertenece a la Cuenca de Madrid, y en ella podemos encontrar dos grandes grupos de formaciones geológicas. El primer grupo, el más antiguo, lo forman los sedimentos predominantemente aluviales y lacustres depositados durante el Terciario, que fueron rellenando la cuenca cuando ésta estaba cerrada y sin salida al mar (cuenca endorreica).

El segundo grupo de materiales, que son los más recientes y con mucho menor espesor, está formado por sedimentos predominantemente fluviales depositados por los ríos desde el final del Plioceno hasta la actualidad. En su erosión remontante, el río Tajo alcanzó la Cuenca de Madrid por el oeste y empezó a llevarse los sedimentos de esta zona al Océano Atlántico (cuenca exorreica), igual que lo hacen actualmente, dando lugar a las morfologías que ahora vemos.

El sustrato de la franja central de la Comunidad de Madrid está compuesto por arcosas y conglomerados del Mioceno (amarillo con gris en la Figura 2), originalmente depositados en abanicos aluviales procedentes de los relieves de la Sierra. En el tercio sureste de la Comunidad destacan los yesos y calizas depositados en lagos y charcas por la evaporación del agua o por la acción de seres vivos, y las arcillas y limos depositados también en los lagos y charcas, pero por decantación (caída lenta) del sedimento que llegaba en suspensión en el agua de los ríos y arroyos (amarillo y naranja en la Figura 2). Entre las formaciones fluviales del Cuaternario -mucho más recientes a escala geológica- destacan las gravas de relleno de los canales fluviales, y los limos y arenas de las terrazas y llanuras de inundación fluvial (gris en la Figura 2).

La red hidrográfica que vemos actualmente, con sus terrazas y sus valles fluviales, se formó a partir del final del Plioceno, desde hace unos dos o tres millones de años (varía según los sitios). Esta red discurre en su mayor parte por los valles que se excavaron en los materiales del Terciario que se habían depositado hasta entonces. Todo este proceso de erosión en laderas y montañas, transportando los materiales por los valles fluviales hacia el mar, se viene desarrollando desde el Plioceno y durante el Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno) hasta nuestros días. Los procesos geológicos permanecen hoy igual de activos que hace millones de años. Mirando a nuestro alrededor, interpretando el paisaje y las rocas y sedimentos que forman su sustrato, podemos comprender la historia geológica de la Comunidad de Madrid.

Figura 8. Estructura de la Cuenca de Madrid modificada de Calvo et al (1989).



El basamento o zócalo de carácter impermeable en general está constituido por granitos y rocas metamórficas tipo pizarras cuarcíticas, micacitas y gneises, de Somosierra y Guadarrama. Su intensa fracturación se refleja en las fallas paralelas a los afloramientos cretácicos, que se traducen en una disposición en escalones del Cretácico en el borde de la cuenca.

Los granitos y metagranitos de las series más evolucionadas presentan valores anómalos en elementos radiogénicos tales como uranio, torio y potasio que podrían estar actuando como verdaderos focos de calor en profundidad. Este basamento granítico fracturado se constituye en un entorno propicio para el desarrollo de sistemas geotérmicos estimulados (EGS).

El Cretácico está representado por depósitos de calcarenitas, calizas, dolomías y margas de potencia variable entre los 100 y 250 metros que podrían en algunos casos y dependiendo de aspectos tales como grado de karstificación y fracturación constituirse en buenos almacenes geotérmicos por los caudales que podrían aportar al sistema geotérmico. El cretácico se sitúa en la zona norte de la cuenca de Madrid a más de 3.000m de profundidad, donde ya se han definido temperaturas próximas a los 150°C y donde podríamos encontrar caudales superiores a los 80 l/s. Estos parámetros harían viable el desarrollo de sistemas geotérmicos asociados a sedimentos profundos para la generación de energía eléctrica.

El Terciario Inferior está formado por depósitos lagunares donde predominan las litologías margosas y margocalizas, que alcanzan potencias comprendidas entre los 40 y los 200 metros.

El Paleógeno Superior - Neógeno constituye la formación detrítica de la zona norte de la Cuenca de Madrid y tradicionalmente se divide en dos unidades de edad difícilmente diferenciable debido a su

carácter continental y de litología similar. La unidad detrítica inferior se encuentra, hacia los bordes de la cuenca, sobre el Terciario Inferior carbonato- evaporítico. Constituida de elementos aluviales conglomeráticos y areniscas que lateralmente se transforman en arenas y arcillas. Su potencia es muy variable y se le atribuye edad de Oligoceno Medio a Superior. Esta es la unidad sobre la que se encaja el reservorio geotérmico multicapa de muy baja temperatura (70-90°C) asociado a los niveles de arenas y areniscas intercalados entre niveles de arcillas. La unidad detrítica superior es reconocible en todo el límite próximo a la Sierra Norte. Litológicamente está formada por elementos detríticos, conglomerados y areniscas. Hacia el sur de la cuenca el registro sedimentario Terciario sufre un notable cambio generalizado a facies evaporíticas con ausencia casi total de sedimentación clástica.

7. POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LA ZONA NORTE DE MADRID

El volumen y calidad técnica de la información generada en el área norte de la comunidad de Madrid nos permite tener datos muy detallados para poder valorar en detalle el potencial del almacén geotérmico de baja temperatura encajado en los niveles permeables de arenas y areniscas terciarias localizados a profundidades que oscilan entre los 1.500 y los 2.000 m. También permite definir con bastante fiabilidad el potencial del posible almacén geotérmico situado en el límite Cretácico-basamento Hercínico, si bien en este caso, aunque se confirmen las temperaturas por encima de 150°C quedaría por estudiar y definir los caudales de producción que podrían obtenerse de manera natural en los materiales cretácicos o de forma estimulada en el basamento granítico fracturado. (Ver figura 1).

7.1 GEOTERMIA DE ALTA ENTALPÍA

Existe un interés creciente de esta energía, especialmente desde que se conoce el potencial de las tecnologías de geotermia estimulada (EGS). Sin embargo, para lograr el éxito es imprescindible tener un profundo conocimiento del potencial geotérmico. Aunque el plan energético nacional de los años 70 y 80 incluye investigaciones al respecto, desafortunadamente el esfuerzo inicial no tuvo continuidad, por lo que no se llegó a definir con detalle el potencial.

En el caso de la cuenca de Madrid podrían verse representados por los recursos geotérmicos potenciales del acuífero confinado cretácico en contacto con el basamento granítico que alcanza temperaturas superiores a los 150°C en el sondeo petrolífero Pradillo-1 perforado por la compañía SHELL.

7.2 GEOTERMIA DE MEDIA ENTALPÍA

Este capítulo se centra en los aspectos de la producción de energía eléctrica a partir de yacimientos geotérmicos de media temperatura, que pueden ser de tres tipos: natural, de roca caliente seca (HDR, Hot Dry Rock) y estimulados (EGS, Enhanced Geothermal System). Los yacimientos naturales vienen siendo explotados desde hace años (el primero se realizó en Italia en 1904), y utilizan una tecnología relativamente convencional.

Los de roca caliente seca se explotan de forma experimental desde los años 70 del siglo pasado, siendo los estimulados de concepción más reciente y habiendo despertado gran interés debido a que permitirían extender la geotermia para la producción eléctrica de forma decisiva en el futuro.

Los yacimientos geotérmicos de tipo natural que se pueden calificar de media entalpía son aquéllos que producen agua a una temperatura de entre 90 y 150°C con una profundidad no excesiva. El gradiente térmico habitual es de unos 30°C/km, que en profundidades de 3 a 4 km produce temperaturas entre 90 y 120°C. Existen yacimientos con gradiente más acusado, entre 40 y 50°C/km,

que en profundidades entre 2,5 y 3 km producen temperaturas entre 90 y 150°C. Además del gradiente térmico, un yacimiento natural requiere de la existencia de rocas permeables que contengan agua, que será aprovechada posteriormente.

La permeabilidad de las rocas y la presencia del agua pueden crearse artificialmente, dando lugar a los yacimientos de roca caliente seca y estimulados. Los primeros (HDR) constan de rocas calientes secas (de entre 180°C y 200°C) por las que se hace circular agua a presión a través de fracturas naturales en la roca o creadas artificialmente. La permeabilidad será muy baja o nula, y la profundidad elevada (5 a 6 km), a no ser que los gradientes de temperatura con la profundidad sean altos (en cuyo caso la profundidad sería de unos 4 km). Están en investigación desde los años 70 del siglo pasado, encontrándose hoy en día cerca de su operación comercial.

Finalmente, los yacimientos geotérmicos estimulados (EGS) están basados en el hecho de que las técnicas de HDR se pueden extender a yacimientos de baja permeabilidad, de modo que se aumente su nivel de fracturación. Así se pueden recuperar yacimientos considerados poco productivos, extendiendo la geotermia a muchas más regiones.

7.3 GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA

El potencial de geotermia somera en España, el cual tiene un enorme alcance, pues se trata de una energía renovable disponible, a priori, en cualquier emplazamiento en el que esté previsto construir un edificio. Las limitaciones de esta tecnología son principalmente de índole económica y están relacionadas con el coste de ejecución del sistema de intercambio geotérmico, la demanda energética del edificio y los precios de la energía. Con la relación de costes actual se está trabajando en una horquilla de periodos de retornos simple, comprendidos entre los 5 y los 15 años.

La energía térmica que las bombas de calor transfieren entre el edificio y el terreno multiplica la energía eléctrica consumida por un factor entre 3 y 5. Técnicamente resultaría posible, mediante mejora tecnológica de elementos e integración de los componentes más avanzados disponibles en el mercado, incrementar dicho efecto multiplicador hasta un rango entre 6 y 8, hasta el límite teórico próximo a 14. Siguiendo la filosofía de la Directiva Europea de Renovables, la diferencia entre el flujo de energía térmica útil generada por el sistema geotérmico y la energía primaria consumida se considera como energía térmica renovable a efectos de la consecución de los objetivos de la Directiva. Por todo ello, queda patente el elevado potencial de ahorro energético y de generación de energía renovable de los sistemas geotérmicos someros.

7.3.1 CONTINUIDAD Y POTENCIA DEL ALMACÉN DE BAJA TEMPERATURA

En el caso de la cuenca de Madrid, en términos generales puede decirse que el acuífero multicapa del paleógeno superior se halla presente en toda la Cuenca de Madrid. Sin embargo, su espesor es muy

variable desde los más de 600 metros en la zona más próxima a la Sierra hasta los 50 metros en las áreas al Sur de Madrid (Pinto, Arganda, etc.).

La información de los cuatro sondeos geotérmicos profundos y los estudios de sismica de reflexión han permitido realizar una estimación precisa de las posibilidades y potencial geotérmico de la formación, que confirma la continuidad del almacén al menos dentro de un área de 50 Km² constituida por el límite de los sondeos, si bien entendemos que el área de influencia del almacén y por tanto su potencial geotérmico se extiende hacia el norte, este y oeste principalmente.

La potencia estimada para el tramo productivo de la formación en esta zona de 50km² (figura 5) está comprendida entre los 300 y los 600 metros, ENADIMSA (1983). Los datos de los límites litológicos de techo y muro reconocidos por estos sondeos se recogen en la tabla 1. La continuidad lateral y el rango de potencias confirmado permiten asignar una buena capacidad productiva.

Durante la perforación del sondeo petrolífero El Pradillo-1 se obtuvieron los primeros valores de temperatura en profundidad; dos medidas dentro del acuífero terciario detrítico (67°C a 1.500 m y 88°C a 1.750 m), ADARO (1981). La perforación posterior de los otros tres sondeos profundos permitió confirmar un nivel térmico superior a los 70°C dentro del área de estudio. Los datos de temperatura disponibles se recogen en la tabla 2. A partir de ellos se obtuvieron los valores del gradiente geotérmico en dos de los sondeos, con los siguientes resultados: en el sondeo Tres Cantos el gradiente calculado es de 3,04°C por cada 100 metros de profundidad; en el sondeo San Sebastián de los Reyes la temperatura varía a razón de 3,25°C por cada 100 metros de profundidad. Ambos valores son muy similares y pueden considerarse correspondientes a un gradiente geotérmico normal, en cuencas sedimentarias.

8. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS OBJETIVO

Los sondeos que atraviesan la formación permeable en el área de estudio confirmaron buenas características hidráulicas. Sus completos programas de ensayos aportan datos estimables sobre la mayoría de los parámetros hidráulicos, permitiendo una buena caracterización del acuífero. Los sondeos Tres Cantos, San Sebastián de los Reyes y GeoMadrid-1 tenían como objetivo ensayar el almacén geotérmico. Sin embargo, el sondeo El Pradillo-1 no fue perforado con fines geotérmicos, por lo que los resultados de sus ensayos hidráulicos se recogen solo a título orientativo. Ha de resaltarse, no obstante, que sus valores están en concordancia con los del resto de los sondeos. En todos ellos los datos de perforación, litológicos, diagráfias, ensayos hidráulicos, etc., coinciden indicando la presencia de un reservorio geotérmico de gran productividad.

La potencia de los tramos de alta permeabilidad varía entre 250 y 300 metros aproximadamente. Son almacenes multicapa compuestos de series de arenas y areniscas con intercalaciones arcillosas. Estas secuencias están descritas en las columnas litológicas de los sondeos a partir de 1.500 metros de profundidad. La naturaleza detrítica del acuífero, formado por arenas y areniscas limpias en sus tramos permeables, establece un modelo de flujo a través de un medio de porosidad primaria (intergranular), en estas condiciones los valores de porosidad constituyen un excelente indicador del comportamiento hidráulico del acuífero. En general, la porosidad en el almacén nunca es inferior al 10-12%, a excepción de tramos con presencia de materiales evaporíticos (anhidrita o yeso).

En los cuatro sondeos se realizaron ensayos hidráulicos mediante pruebas de descenso y recuperación. Los resultados confirman la excelente productividad del almacén, en el que se midieron transmisividades comprendidas entre 20,3 Dm (Tres Cantos) y 44,4 Dm (GeoMadrid-1). Las permeabilidades medias inferidas varían entre los 88 md y los 453 md, obtenidas en los mismos sondeos. La capacidad específica del acuífero observada durante los bombeos de ensayo está comprendida entre 0,87 l/sm-1 y 1,5 l/sm-1. El nivel piezométrico en el área de estudio se sitúa aproximadamente entre los 500 y los 570 m sobre el nivel del mar.

9. CALIDAD DE LAS AGUAS

Las variaciones de salinidad en el agua dentro del acuífero terciario detrítico fueron estudiadas principalmente mediante análisis cuantitativo de diagráffas. Los logs revelan distribuciones de salinidad con la profundidad muy parecidas en todos los sondeos, a excepción del sondeo Geomadrid-1, donde se observa la presencia de agua más dulce a profundidades similares.

En general, la degradación de la calidad del agua es progresiva hasta los 900-1.000 metros, en donde los logs reflejan aumentos más bruscos de salinidad hasta valores aproximados de 10.000-15.000 ppm. A mayor profundidad se produce otro salto cuantitativo importante sobre los 2.000 metros de profundidad, en donde las salinidades superan fácilmente las 30.000 ppm.

10. ESTIMACIÓN DEL RECURSO GEOTÉRMICO

En 2008, P. Ungemach et al., llevaron a cabo una primera tentativa al cálculo de los potenciales recursos geotérmicos que alberga la cuenca de Madrid; particularmente en su zona norte. Se han realizado dos estimaciones: La primera considera un área de 150 km² que se circunscribe a la zona reconocida por sondeos descritos en los capítulos anteriores. La segunda contempla un área más amplia, de 1.400 Km² sin una información tan detallada como la que se encuentra en los sondeos pero que se circunscribe a un entorno geológico similar donde se esperan obtener resultados de temperatura flujo térmico, caudales, etc similares a los encontrados en los sondeos ejecutados hasta ahora.

El potencial geotérmico profundo ha sido evaluado por debajo de los 1000 m y hasta profundidades de 5 kilómetros, estimándose tanto los recursos de baja temperatura susceptibles de ser aprovechados para usos térmicos, como los de media temperatura que podrían tener doble aplicación; la generación de energía eléctrica y los usos térmicos.

Según estos cálculos se estima que el recurso geotérmico profundo potencialmente explotable en la zona norte de la cuenca de Madrid es de unos 22.000 Petajulios lo que correspondería aproximadamente a 20 veces el consumo anual de toda la energía eléctrica de España.

11. ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN

11.1 EXPLORACIÓN SISMOLOGÍA. SÍSMICA DE REFLEXIÓN

La exploración sismológica utiliza ondas elásticas generadas artificialmente para localizar depósitos de minerales (incluyendo hidrocarburos, yacimientos minerales, agua, **depósitos geotérmicos**, etc.). Mediante la exploración sismológica se obtienen datos correlacionados con otros datos geofísicos, obtenidos de pozos de sondeos y geológicos, y con conceptos de física y geología, pueden proporcionar información sobre la estructura y distribución de diversos tipos de rocas.

Los métodos de exploración sísmica se sustentan básicamente de la misma forma que las mediciones de los terremotos. A diferencia de los terremotos, las fuentes de energía de la exploración sísmica están controladas y son móviles; las distancias entre la fuente y los puntos de registro son relativamente pequeñas. Gran parte del trabajo sísmico consiste en la cobertura continua, en donde la respuesta de porciones sucesivas de tierra se muestra a lo largo de líneas de perfilaje.

Los explosivos y otras fuentes de energía se usan para generar ondas sísmicas, y los tendidos de sismómetros o geófonos para detectar el movimiento de tierra resultante. Usualmente los datos se registran en forma digital en cinta magnética, de modo que se puedan usar procedimientos de computadora para acentuar las señales con respecto al ruido, extraer información significativa y presentar visualmente los datos de tal forma que se efectúe rápidamente una interpretación geológica.

Generada la onda sísmica se mide el tiempo requerido para que estas viajen desde la fuente hasta una serie de geófonos, distribuidos usualmente a lo largo de una línea recta orientada hacia la fuente. Si se conoce los tiempos de viaje hasta los diversos geófonos y la velocidad de las ondas, entonces se pueden reconstruir las trayectorias de las ondas sísmicas.

El objetivo de la exploración sísmica consiste en deducir información acerca de las rocas, especialmente de las posiciones de las capas, partir de los tiempos de llegada observados y (hasta cierto límite) de las variaciones en la amplitud, frecuencia y forma de las componentes longitudinales y transversales de la onda sísmica.

Figura 9. Diferentes vehículos utilizados en la adquisición de sísmica de reflexión en tierra.



Figura 10. Diferentes vehículos utilizados en la adquisición de sísmica de reflexión en tierra.



El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad. El objetivo fundamental de todo procesado multiseñal es aislar en los registros las reflexiones de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental, GR, onda aérea, etc.).

Actualmente, debido al gran incremento del volumen de datos (mayor capacidad instrumental) y al desarrollo de nuevos algoritmos (mayor potencia de cálculo), el dominio de las técnicas de procesado es el pilar básico de la prospección geofísica. Otro factor decisivo en sísmica de alta resolución que afecta al procesamiento es la necesidad de preservar las altas frecuencias ya que las estructuras geológicas superficiales están en el límite de la detectabilidad sísmica y la aplicación de filtros para suprimir los eventos que no pertenecen a reflexiones caen, a menudo, en el mismo rango de frecuencias, de manera que cualquier disminución de este rango supone una menor definición de la sección sísmica.

Es también un precepto que todo algoritmo empleado durante el procesado debe preservar el máximo posible las reflexiones originales, de manera que su aplicación no se superponga a éstas creando "artefactos" que puedan considerarse como falsas reflexiones.

Figura 11. Esquema de la metodología utilizada para la construcción de modelos geológicos 3D, partiendo de datos sísmicos y geológicos de diferentes fuentes. En cada uno de los pasos se detalla el software usado.

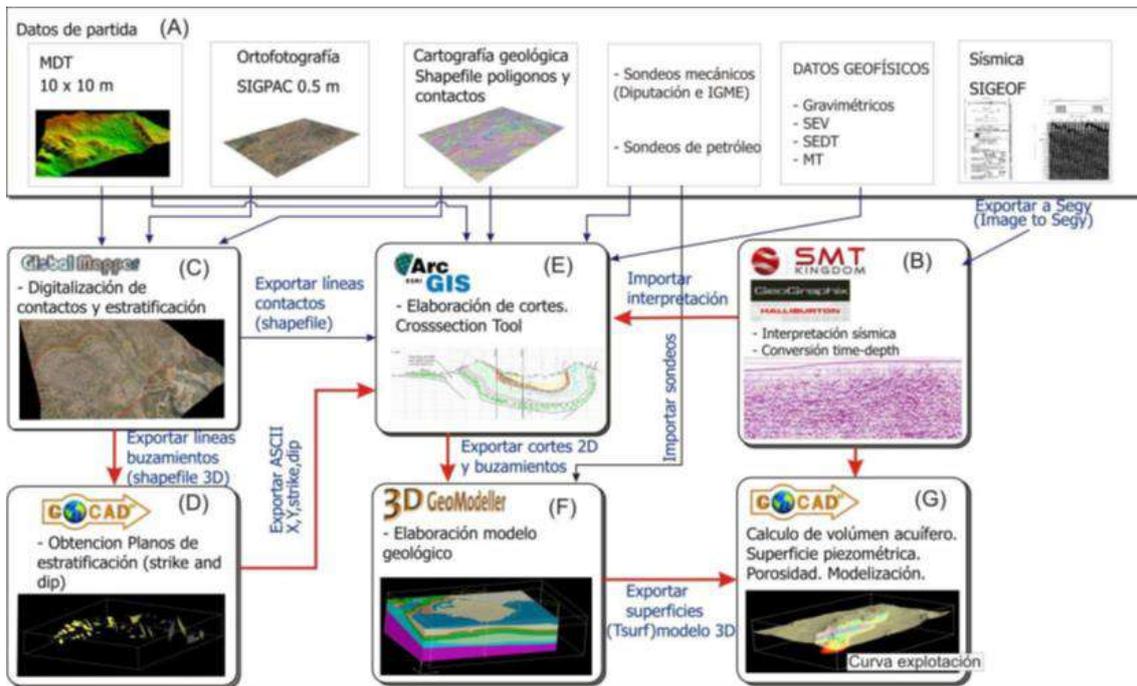
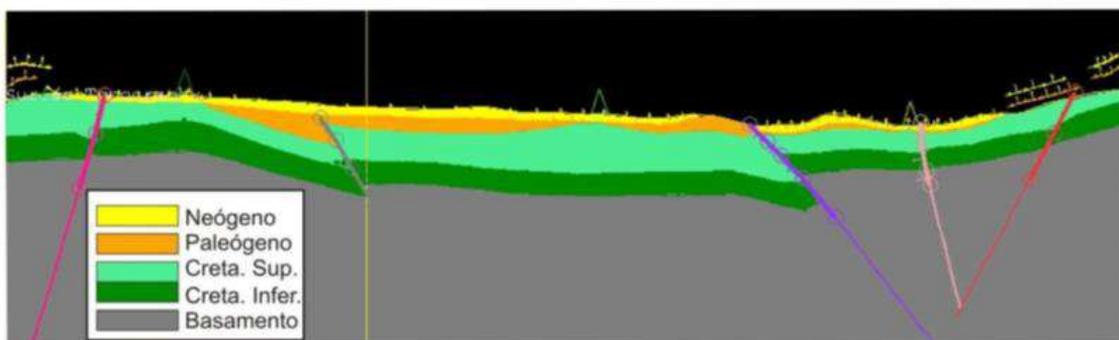
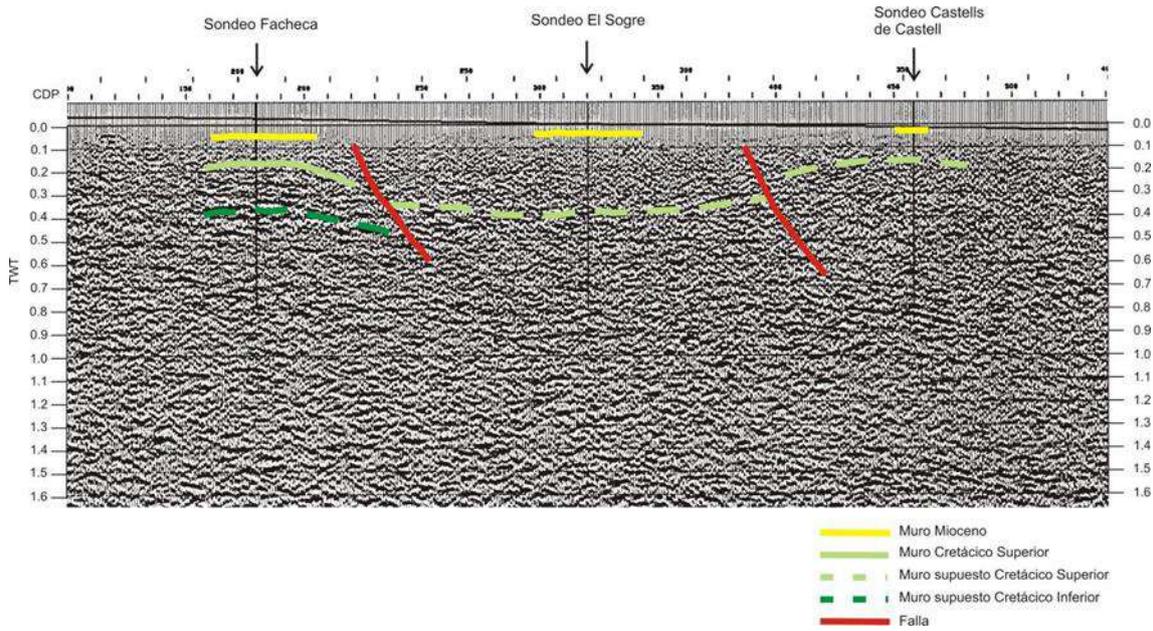


Figura 12. Línea sísmica RV-71V interpretada a partir de los sondeos Facheca, El Sogre y Castell de Castells. Acuífero Mediodía. Línea sísmica y corte 8 se posicionan en la figura 9B (el acuífero principal es el Cretácico Superior).





11.2 PERFORACIÓN

El proceso de perforación descrito en el presente apartado incluye los trabajos necesarios para alcanzar la profundidad a la que se ubican las formaciones objetivo. Dichos trabajos de perforación siguen una metodología similar a la empleada para la perforación de pozos de agua, con la excepción de la perforación de tramos horizontales. Esta perforación horizontal, permite alcanzar las formaciones objetivo con una mayor superficie de contacto del pozo con dicha formación.

Los trabajos de perforación son ejecutados por una torre de perforación instalada a tal efecto que perfora el terreno mediante rotación. Los diámetros de perforación para cada tramo serán establecidos en el proyecto de perforación para cada pozo. Dichos diámetros, de mayor tamaño que las tuberías a emplazar, permiten la cementación del espacio anular (espacio entre la tubería y el terreno perforado).

El material natural perforado, llamado ripio de perforación, es retirado mediante el uso de lodos de perforación, que además constituyen un elemento estabilizador del agujero perforado. A continuación, se procede a explicar el alcance de los trabajos de perforación previstos, desde su diseño hasta sus elementos de control.

11.2.1 PLATAFORMA DE PERFORACIÓN

La disposición de equipos en fase de perforación se muestra en la siguiente figura, la cual muestra un detalle de una plataforma de trabajo similar a la que se podría utilizar en este proyecto con la distribución de equipos inicialmente planteada para la fase de perforación. El tamaño y distribución específica de los diferentes elementos en el emplazamiento sólo son indicativos, pero se prevé que todos los emplazamientos en este proyecto tengan unas dimensiones y configuración similares.

Figura 13. Plataforma de perforación



Durante las actividades de perforación dentro de la citada plataforma se instalarán los siguientes equipos o unidades:

- Torre de perforación. Generalmente divide en dos partes la subestructura y la torre o mástil de perforación. La subestructura es la parte inferior de la torre que está sobre la plataforma de perforación. Es un conjunto de vigas o módulos resistentes, que soportan las cargas de otros equipos como el mástil o torre de perforación.
- Línea de lodos. Este sistema proporciona los equipos, materiales y áreas de trabajo que se necesitan para la preparación, el mantenimiento y la verificación de las características físicas de los fluidos de perforación. El lodo de perforación se conduce a través del stand pipe al interior de la sarta de perforación.
- Bastidores metálicos para el almacenamiento de tuberías. En el perímetro de la plataforma de trabajo se acopiarán las tuberías de perforación y tuberías de revestimiento. En el catwalk se van posicionando las tuberías para ser introducidas en el pozo a medida que se va perforando.
- Grupo generador eléctrico y almacenamiento de combustible. Para el funcionamiento de la mayoría de los equipos de perforación serán necesarios generadores, siendo los más comunes los generadores diésel. Además, se cuenta con salas de control que equilibran y controlan la energía hasta los elementos utilizados en la perforación.

- Transmitir la energía hidráulica, a los motores de fondo en la perforación horizontal.

Para la perforación del Pozo Vertical y los tramos verticales del resto de pozos se utilizarán exclusivamente lodos en base agua (WBM, del inglés water based muds). Para la perforación del tramo horizontal y de partes del tramo vertical (en contacto con las formaciones objetivo) se usarán lodos sintéticos en base aceite (SBM, del inglés synthethic oil based muds).

El uso de los lodos sintéticos en base aceite es muy extendido en la industria, dadas las ventajas que tienen respecto a los lodos base agua:

- Buen comportamiento a altas temperaturas.
- Reduce el riesgo de atascamiento de la tubería.
- Mejor rendimiento como lubricante.
- Excelente comportamiento en ambientes con presencia de hidratos.
- Conservar el diámetro del hoyo, disminuyendo la formación de ripios.

El lodo en base agua es una suspensión de partículas minerales, sales disueltas, y compuestos orgánicos en agua y se pueden dividir en varias categorías. En cada categoría existen muchas composiciones alternativas con propiedades ligeramente diferentes. La mayoría de estos aditivos son añadidos en pequeñas cantidades para cambiar las propiedades del lodo y están destinados a resolver necesidades técnicas específicas del pozo (asociadas a las condiciones que la perforación encuentra según se alcanzan mayores profundidades). Además del agua, que constituye un porcentaje superior al 95%, los ingredientes más abundantes en la mayoría de los WBM son la barita y la bentonita.

Se puede observar cómo durante la perforación de la primera sección, la composición se limitará al uso de agua, bentonita, un controlador de la alcalinidad y celulosa polianiónica. En las zonas más profundas por razones de seguridad y de integridad del pozo es recomendable la inclusión de aditivos adicionales que permitan trabajar con las condiciones de temperatura y presión esperadas.

Como en cualquier otra operación de perforación, la proporción exacta de agua, bentonita y aditivos se tendrá que refinar en continuo según la perforación atraviese las diferentes formaciones geológicas (por ejemplo, para incrementar o reducir la densidad del lodo, modificar ligeramente el pH, etc.). Esto es importante tanto para una mayor eficacia en la perforación (acortar tiempos e incrementar la eficiencia de las operaciones) como para garantizar que se mantienen las condiciones de seguridad en las operaciones.

11.2.3 ENTUBADO Y CEMENTACIÓN

El pozo está diseñado para asegurar que tanto el fluido que será bombeado a través del pozo, que será eventualmente recogido queden confinados dentro de la estructura del pozo. Para ello, y como primer elemento, según se perforan las diferentes secciones del pozo se coloca el entubado (tubería de revestimiento).

Estas tuberías de revestimiento, en concreto la de producción, soporta presiones de prueba de 800 bares (siendo la presión máxima admisible de la tubería 1.000 bares) y con un peso que varía entre los aproximadamente 140 kilos por metro lineal para las tuberías de mayor diámetro y los 35 kilos por metro lineal. Estas tuberías cumplirán con los estándares API 5CT para tubos de revestimiento y producción.

Al finalizar la perforación de cada tramo, el espacio entre el entubado y el sondeo (espacio anular), se rellena con una lechada de cemento. Este proceso se repite en cada sección usando diámetros menores de entubado cada vez, hasta alcanzar la formación geológica objetivo de acuerdo con el esquema de entubación que se haya propuesto en el diseño del pozo. Se rellena con cemento el espacio existente entre la TR de superficie y hasta un mínimo de 150 metros por encima de cada cambio de diámetro para el resto. De esta manera se cuenta con múltiples barreras de protección formadas por cemento y entubado metálico.

El entubado y el cemento forman el principal componente estructural del pozo y cumple varias funciones de gran importancia:

- Evita hundimientos de las paredes del sondeo.
- Aísla las diferentes formaciones, evitando flujos de fluidos o gases.
- Permite el control de los fluidos de la formación, de los gases y de la presión, mientras la perforación avanza.
- Permite la presencia de un equipo de control de presión en superficie, así como un equipo para evitar la pérdida de control del pozo por presión. Estos equipos se denominan habitualmente como BOP (del inglés, Blowout Preventer).

Para la cementación se empleará lechada formada por cemento tipo G. Dicho cementos seguirán el estándar API Spec. 10 A (Cementos y material para proceso de cementación en pozos), y están formados exclusivamente por materiales inertes. Los cementos tipo G se han diseñado específicamente para actividades de la industria de gas y petróleo para cementaciones en profundidades elevadas.

Los esfuerzos a los que se ve sometido el pozo producen estados de tensión o fatiga por este motivo la industria utiliza cementos en los que entre sus características se cuenta con la capacidad de sellar posibles grietas producidas durante estos procesos.

La cementación se realiza mediante bombeo de la lechada desde el interior de la tubería de revestimiento. La presión ejercida por el bombeo empuja la lechada hasta el fondo de la perforación haciendo que desde ahí ascienda por el espacio anular rellenándolo completamente hasta la superficie o las profundidades previstas. Durante este proceso, con el objetivo de garantizar una correcta cementación y asegurar la integridad del pozo, se seguirán las mejores prácticas, enumeradas a continuación:

- Para las actividades de cementación de la tubería superficial (instalada desde superficie y hasta aproximadamente 550 metros de profundidad) durante el proceso dicha tubería será sometida a rotación con objeto de mejorar la adherencia y distribución del cemento en el espacio anular.
- Control continuo de la presión y velocidad de bombeo, así como de los volúmenes y densidad de la lechada bombeada.
- Uso de centralizadores con objeto de asegurar la posición correcta de la tubería y de rascadores con objeto de permitir una limpieza exterior de la tubería de manera que se mejore la adherencia de la lechada.

Se prevé que durante la cementación pequeñas cantidades de cemento, tanto en estado líquido como en estado sólido, retornen a la superficie. Ambos tipos de cemento serán recogidos y gestionados en una planta autorizada de gestión de residuos.

La composición del cemento y aditivos utilizados, sobre todo en los primeros metros (TR de superficie) donde se encuentran los acuíferos de agua dulce explotables para consumo de agua potable, no difieren en los comúnmente utilizados en otros ámbitos como la construcción de pozos de agua.

Todos los parámetros, tales como, la densidad de la lechada de cemento, la velocidad y presión de bombeo y las concentraciones de los aditivos, serán calibrados en el laboratorio a medida que se obtengan más datos durante las operaciones de perforación.

11.2.4 ELEMENTO DE CONTROL DE LA PERFORACIÓN

Los trabajos de perforación y los elementos que en ellos intervienen cuentan con una serie de elementos o medidas de control para asegurar la correcta ejecución de los trabajos de perforación planeados y para evitar la generación de eventos no esperados.

Los principales elementos de control son:

- Controles en continuo de las operaciones.
- Sistemas de válvulas, que será específico para el equipo de perforación.
- Registro de los controles.

A continuación, se incluye un mayor nivel de detalle de algunos elementos de control:

11.2.5 CONTROL DIRECCIONAL

El mantenimiento de la verticalidad del sondeo (tramos verticales) se comprueba a intervalos regulares mediante la medición de la inclinación del sondeo, utilizando herramientas específicas. En caso de detectarse desviaciones respecto a la verticalidad, se modificarán los parámetros de la tubería de perforación, para corregir la inclinación y mantener el sondeo en una trayectoria lo más próxima a la verticalidad posible.

En los tramos horizontales se utilizarán herramientas MWD (Measuring While Drilling – Medición durante la perforación) que proporcionan información en tiempo real de la posición de la broca de perforación y permiten controlar la trayectoria de los sondeos. Igualmente se usarán herramientas LWD (Logging While Drilling - Registro durante la perforación) para asegurar el correcto posicionamiento de la broca de perforación a lo largo de la formación objetivo en la dirección esperada.

Los parámetros de perforación se envían en tiempo real a través de sistemas telemétricos integrados en los equipos de perforación, las compañías de servicios de perforación horizontal, los geólogos e ingeniero de perforación monitorean estos parámetros de perforación y los ajustan según se va avanzando el pozo. Los informes se envían cada 3 horas todo el personal implicado en las operaciones para que tengan un seguimiento del avance de la perforación y de los parámetros clave.

11.2.6 CONTROL GEOLÓGICO DURANTE LA PERFORACIÓN

Los datos de los parámetros de perforación y de las unidades de registro de lodos se cargan en tiempo real en sistemas informáticos de geo navegación y ubicación del pozo. El geólogo en campo actualizará todas las ventanas de perforación y se lo comunicará a la cuadrilla de perforación. Durante toda la operación de perforación se contará con la presencia de una unidad de registro de lodos para recoger ripios de sondeo y controlar si se da cualquier signo de la presencia de recurso geotérmico. Se comunicará al geólogo responsable mediante informes comúnmente denominados mud log/strip log. En estos informes se detalla la descripción de las formaciones atravesadas, los análisis de presencia de recurso geotérmico y los parámetros de perforación.

Se recogerán muestras cada 10 metros en la capa cretácica y cada 5 metros en la capa objetivo. En el tramo horizontal se recogerán muestras cada 5 metros en la sección curva y cada 10 en la horizontal. Como mínimo, se harán dos juegos de muestras inalteradas para uso de Tervalis. Durante la operación de perforación se recogerán muestras de IsoTube y IsoJar. Se analizará la composición de cualquier recurso geotérmico contenido en estas muestras para conocer cuál es la madurez termal de la roca. Se recogerán muestras cada 100 metros de profundidad en la capa cretácica, cada 30 metros en el Dogger y cada 10 metros a lo largo de la formación objetivo. Además, se recogerá un juego de muestras adicional por cada indicador de presencia de recurso (se considerará un indicador de presencia de recurso geotérmico cuando se produzca un aumento de más del 50% respecto a las lecturas de base).

Además, durante la perforación se realizarán diagráfias de sondeo para registrar y evaluar las características de la roca y las propiedades mecánicas del reservorio, junto con tecnología de cromatografía de gas, los cuales consisten en el análisis en tiempo real de la concentración de gas.

11.2.7 CONTROL DE SURGENCIA

A lo largo del proceso de perforación se instalarán diferentes sistemas de válvulas de seguridad cuyo objetivo fundamental será impedir surgencias. Este sistema, más conocido como BOP (blow out preventer), ayuda a controlar de forma segura los posibles flujos no esperados de fluidos de la formación (surgencia imprevista de presión) durante la perforación.

En la línea del BOP, y conectado al mismo, se encuentran los estranguladores, juego de válvulas instaladas como parte del sistema, resistentes a altas presiones. En caso de surgencia el sistema actúa cerrando el pozo y enviando el lodo y fluidos hacia los depósitos de circulación de lodos a través de la línea del estrangulador hasta quedar controlado el golpe de fluido.

Los sistemas BOP están diseñados para soportar presiones muy altas. Si se diese un flujo inesperado de fluido de la formación, el pozo se cerrará en la superficie con un sistema de válvulas capaz de cortar el flujo en cualquier tubería de acero dentro del pozo. Tras lo cual, el BOP permitiría bombear la circulación de lodo al pozo para retirar el flujo de fluido de la formación y retomar el control del pozo para continuar con las operaciones normales.

Figura 15. Esquemas de dos tipos de sistemas de prevención de surgencias (BOP).

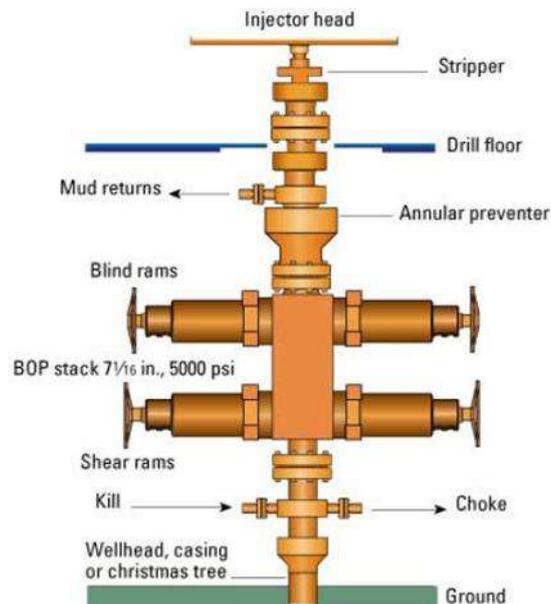
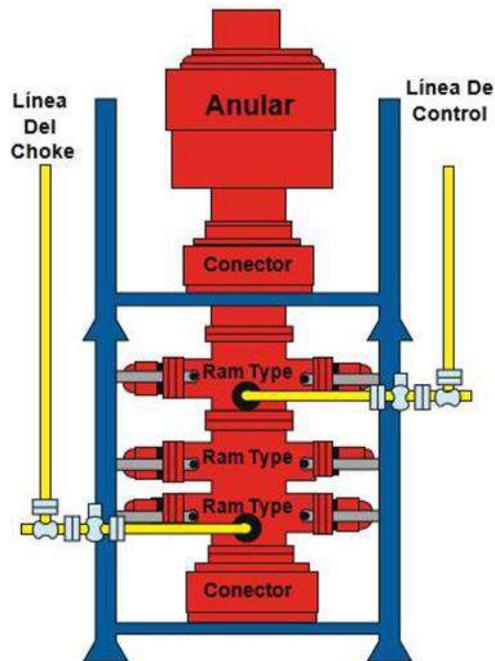


Figura 16. Esquemas de dos tipos de sistemas de prevención de surgencias (BOP).



La verificación y las pruebas de presión de los equipos de control de surgencia serán realizadas una vez instalados y posteriormente con una periodicidad mínima de 21 días.

11.2.8 REGISTRO DE LOS CONTROLES

Regularmente se generarán los siguientes registros de controles:

- Parte diario de perforación, donde se incluye un resumen detallado de las operaciones correspondiente a las últimas 24 horas, un resumen de los datos de los lodos de perforación, costes, y alguna otra información que se pueda considerar relevante.

Al finalizar el sondeo se realizará asimismo un informe final del sondeo, en el cual se incluirán todas las actividades realizadas.

11.3 PROGRAMA DE TRABAJO

El programa de trabajo de un Proyecto de exploración debe ser flexible, en cuanto a las operaciones específicas a realizar, para poder así adaptarse a los resultados obtenidos en sus varias fases de trabajo. Esta flexibilidad permite la obtención de un mayor rango de datos y evaluar de un modo más preciso el potencial económico del recurso contenido en el reservorio de la concesión.

Los trabajos previstos en este programa de trabajos para el primer año de vigencia del permiso de investigación representan un compromiso firme. Al final del primer año, en función del análisis de los datos obtenidos de los trabajos realizados, se podrá optar, si fuese necesario, por la renuncia del permiso; disponiendo asimismo de dicha opción de renuncia año a año para el resto del programa.

A continuación, se detallan las labores previstas, así como las inversiones a realizar:

11.3.1 PRIMER AÑO

La primera fase del programa de exploración se tratará de establecer los modelos conceptuales, establecer correctamente la geología, la geoquímica y la hidrogeología. El objetivo es localizar las áreas con mejores posibilidades de albergar un almacén geotérmico.

Los trabajos consistirán en volver a examinar la sísmica existente, historial de los pozos, y la construcción de mapas detallados del subsuelo para identificar las condiciones más favorables para la ubicación de los pozos. Es nuestra intención, si es posible utilizar las ubicaciones previas de pozos antiguos tanto para el control de las operaciones de extracción de muestras, así como para minimizar el impacto ambiental. En líneas generales estas son las actividades a realizar:

- Recopilación, escaneo y reprocesado de información sísmica disponible en el área.
- Reprocesado de información sísmica aún no reprocesada (en formato digital).
- Digitalización, procesado y evaluación de logs pertenecientes a pozos perforados en el área.
- Estudio de análisis de velocidades para sísmicas disponibles en el área.
- Interpretación sísmica regional, evaluación de necesidades para una nueva campaña sísmica y diseño de esta si fuera necesaria.
- Recogida de muestras aflorantes para estudios y evaluación geoquímica.
- Diseño preliminar de ubicaciones para un sondeo de exploración.
- Obtener permiso e iniciar programa de sísmica 2D o 3D, entre 75 y 200 kms, en el caso 2D y entre 30 y 50 km. en el caso 3D; en función de los resultados del procesado de la información existente.

Según los resultados obtenidos durante cada año, podrá continuarse con el plan de trabajos para el siguiente periodo, ser modificado, o solicitarse la renuncia del permiso.

La inversión mínima a realizar durante el PRIMER año de vigencia del permiso será de 200.000€.

11.3.2 SEGUNDO AÑO

En función de los resultados obtenidos durante el primer año de investigación, se propone el siguiente plan de labores con el objetivo de determinar el modelo geotérmico preliminar y seleccionar la mejor ubicación de los pozos de investigación

- Campaña sísmica. Finalización de los trabajos de reprocesado de sísmicas comenzado el primer año, e inicio de la campaña sísmica 2D o 3D y por lo tanto realizar inicio del procesado de los datos obtenidos.
- Recogida de muestras de testigos de pozos poco profundos para estudios geoquímicos y geomecánicos, y su evaluación económica.

- Iniciación de los trámites para la obtención de la autorización para el primer pozo con los consecuentes estudios de la viabilidad técnica y económica de la perforación del pozo. En el caso de decidir perforar, comienzo de un estudio de impacto medioambiental del sondeo.

Según los resultados obtenidos durante cada año, podrá continuarse con el plan de trabajos para el siguiente periodo, ser modificado, o solicitarse la renuncia del permiso.

La inversión mínima a realizar durante el SEGUNDO año de vigencia del permiso será de 1.000.000€.

La segunda fase del programa de exploración consistirá en la perforación de un pozo exploratorio que permita el estudio del reservorio geotermal y empezar la confirmación viabilidad (proof of concept). Para el pozo exploratorio, los acuíferos de agua dulce serán aislados con un entubado especial de cemento. La profundidad total del pozo se determina en base a los resultados de la primera fase. El tamaño de la perforación será de tamaño suficiente para permitir la posibilidad de una reentrada horizontal basada en los resultados del programa de pruebas.

11.3.3 TERCER AÑO

Mientras que se perforan los pozos, se tomaran muestras de testigo de los principales tramos de las litologías con mayor potencial. El objetivo de estos núcleos será determinar la mineralogía, la porosidad, la saturación, geoquímica, y el análisis de resistencia de la roca. Para ayudar a determinar la permeabilidad del sistema, tenemos previsto llevar a cabo pruebas de producción en todos los intervalos posibles. En esta prueba se inyecta un pequeño volumen de agua salada en la formación. Después de la inyección, el pozo se cierra con indicadores de presión de control de fugas. A partir de esta información se será capaz de determinar el esfuerzo de cierre, la permeabilidad del sistema, y la presión de poros.

Los trabajos a realizar durante el tercer año de vigencia del permiso de investigación son los siguientes:

- Perforación pozo monitor, estudio de reentrada con perforaciones horizontales y test de producción del primer pozo.
- Inicio de los trámites para la obtención e inicio de la ejecución potencial del segundo pozo. Estudios de la viabilidad técnica y económica de la perforación de un pozo de exploración. En el caso de decidir perforar, comienzo de un estudio de impacto medioambiental del sondeo.

Según los resultados obtenidos durante cada año, podrá continuarse con el plan de trabajos para el siguiente periodo, ser modificado, o solicitarse la renuncia del permiso.

La inversión mínima a realizar durante el TERCER año de vigencia del permiso será de 1.500.000€.

En la perforación de los sondeos siempre se considerará una cuidadosa planificación y diseño de los trabajos junto con los estudios de impacto ambiental si fuesen requeridos. En la ejecución de los sondeos se realizarán todas las pruebas pertinentes, así como toma de muestras, como ya se ha

comentado anteriormente, con las consiguientes pruebas de laboratorio sobre las muestras. Con estos datos se procederá a la evaluación de los datos sísmicos integrando los con los datos de sondeo para realizar una modelización geológica de la estructura. Estos datos son los que harán posible la evaluación final de la viabilidad técnica y económica del sondeo.

En el caso de que las autorizaciones requeridas a las instituciones competentes, medioambientales o de otro tipo, así como los retrasos o no disponibilidad de maquinaria adecuada fundamentalmente para la realización de la sísmica o de la perforación de los sondeos,

se ruega que los compromisos económicos de este programa sean pospuestos hasta la obtención de dichas autorizaciones o exista la disponibilidad de la maquinaria.

Del mismo modo las inversiones comprometidas se podrán anticipar a cualquiera de los años anteriores, computándose no obstante para la suma total de compromisos al final del periodo de vigencia.

11.4 CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

Se muestra a continuación un diagrama resumen con los trabajos propuestos y el cronograma de ejecución de los mismos.

Tabla 2. Cronograma de ejecución de los trabajos propuesto.

TRABAJO	AÑO		
	1	2	3
Modelos conceptuales			
Campaña Sísmica			
Pozos someros			
Tramitación de sondeos			
Sondeo Monitor			

11.5 RESUMEN DE INVERSIONES

En la siguiente tabla, se puede ver el resumen general de las inversiones previstas a realizar por el presente proyecto.

Tabla 3. Resumen de las inversiones propuestas.

Año	Inversión
1º Año	200.000 €
2º Año	1.000.000 €
3º Año	1.500.000 €
Total	2.700.000 €

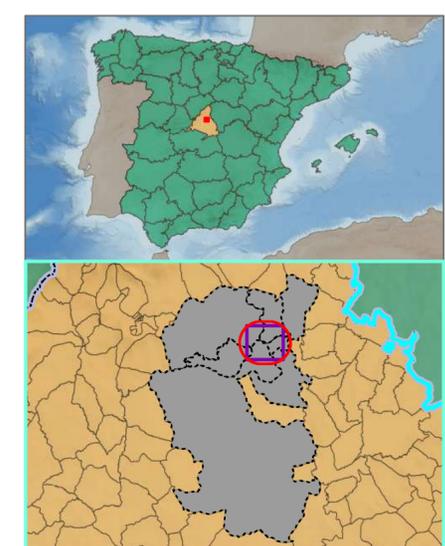
12. REFERENCIAS

- ADARO (1981) “Estudio Geotérmico Cuenca de Madrid, Sondeo Pradillo 1” Estudio para el Plan Energético Nacional.
- ANTICS, M. SANNER, B (2007) “Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe” Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June (2007).
- COMUNIDAD DE MADRID. Guía de la Energía Geotérmica, 2008.
- ENADIMSA. (1983) “Evaluación de Recursos Geotérmicos en la Cuenca de Madrid” Estudio para El plan energético Nacional”.
- GARCÍA DE LA NOCEDA, C. Sistemas geotérmicos estimulados: el futuro de la geotermia,
- GEOENER. Actas del I Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria –, Madrid, 15 a 16 de octubre de 2008.
- IGME (1979) “Estudio de los Materiales de la Cuenca de Madrid Susceptibles de constituir Acuíferos Profundos Capaces de ser Soporte de Energía Geotérmica de Baja Entalpía”. Plan Nacional de Investigación Geológico Minera de recursos Energéticos.
- IGME. Fase Preliminar de prospección de recursos geotérmicos de baja entalpía en el Vallés (Barcelona)., 1997.
- IGME. Geología de España., 2004.
- IGME-IDEA. Manual de Geotermia., 2008.
- INSTITUTO DE LA INGENIERÍA DE ESPAÑA. Energía Geotérmica., 1984.
- MONASTERIO, R., HERNÁNDEZ, P., SAIZ, J., La bomba de calor. Fundamentos, técnicas y aplicaciones. McGraw-Hill, Madrid, 1993.
- R. DIPIPO, Geothermal power plants, Elsevier, 2005.
- SANCHEZ GUZMÁN J. (2007) “Exploración geotérmica en la Cuenca de Madrid”, Jornada sobre energía geotérmica. 7 de noviembre de 2007. Dirección General de Industria, Energía y Minas. COMUNIDAD DE MADRID.
- SANCHEZ GUZMÁN J. (2007) “Síntesis de datos Geotérmicos del Yacimiento Detrítico-Terciario de la Cuenca de Madrid”, Petratherm España S.L.
- SCHUSTER, S. KARELLAS, E. KAKARAS, H. SPLIETHOFF, Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications, Applied Thermal Engineering, 29, 1809-1817, 2009.
- UNGEMACH, P., and M. ANTICS, M. (2006). “Geothermal Reservoir Management – a Thirty Year Practice in the Paris Basin.” ENGINE Lauching Conference, Orléans, France.
- URCHUEGUÍA, J. (Coord.), Geothermal Heat Pump for Cooling-and Heating along European Coastal Areas, EU V Framework Programme, Contract NNE5-2001-00847, Publishable version of the Final Report (200 3 to 2006).

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 01. LOCALIZACIÓN

MAPA 02. ORTOFOTOGRAFÍA



Legenda
 Cibeles Este Norte

Elaborado por:

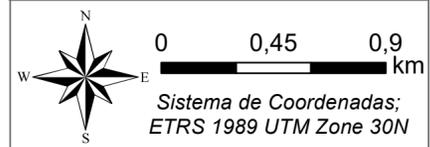
 GA. Ingenieros

Elaborado para:
 Objeto:
PLAN DE TRABAJOS E INVERSIONES
 Nombre:
PERMISO DE INVESTIGACIÓN PARA GEOTERMIA "CIBELES ESTE NORTE"

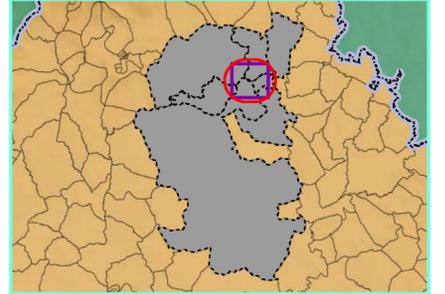
Situación:
Provincias de Madrid (C.A. de Madrid)

Título:
LOCALIZACIÓN GENERAL

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN)



Mapa Nº: **01** Fecha: ene. de 2023
 Escala: 1:20.000



Leyenda

 Cibeles Este Norte

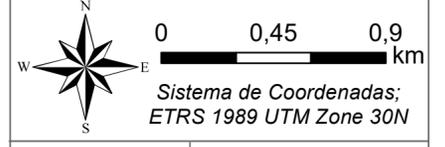
Elaborado por:


Elaborado para:

Objeto:
PLAN DE TRABAJOS E INVERSIONES
 Nombre:
PERMISO DE INVESTIGACIÓN PARA GEOTERMIA "CIBELES ESTE NORTE"
 Situación:
Provincias de Madrid (C.A. de Madrid)

Título:
ORTOFOTOGRAFÍA GENERAL

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN)



Mapa Nº: **02** Fecha: ene. de 2023
 Escala: 1:20.000