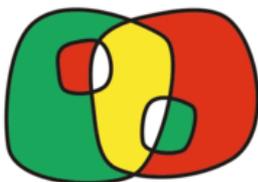




**INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DE
EXTREMADURA (ESPAÑA), ALENTEJO Y REGIÓN CENTRO
(PORTUGAL) EN EL MARCO DEL PROYECTO
PROMOEENER_A_4_E**

**Guía Metodológica para la Ejecución de
Perfiles Térmicos en Prospección
Geotérmica**



PROGRAMA
COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA
ESPAÑA ~ PORTUGAL
COOPERAÇÃO TRANSFRONTEIRIÇA
2007 - 2013

Unión Europea
**Fondo Europeo
de Desarrollo Regional**
"Una manera de hacer Europa"



ÍNDICE

1. Introducción y Objetivos	1
2. Conceptos Generales	1
3. Equipos de Medida	3
4. Selección de Puntos para la ejecución de las Termometrías	4
5. Preparación y Ejecución de las Termometrías	6
6. Presentación de Resultados	7

1. Introducción y Objetivos

La determinación del flujo de calor subterráneo regional es indispensable en los estudios de prospección geotérmica. Para lo cual debe determinarse por una parte la conductividad térmica de las rocas y por otra el gradiente geotérmico.

La determinación de la conductividad térmica de las rocas suele realizarse mediante medidas en laboratorio de muestras de sondeos, o de afloramientos rocosos; también se puede calcular la conductividad térmica de un sondeo mediante los ensayos denominados TRTs "test de respuesta térmica"; además existen numerosas tablas experimentales con valores de conductividad térmica en función de la litología, composición mineral de las rocas, etc.

El cálculo del gradiente geotérmico habitualmente se realiza mediante la interpretación de los denominados perfiles térmicos que se realizan sobre sondeos profundos existentes o perforados para ello. Como la ejecución de sondeos es muy costosa, habitualmente se recurre a aprovechar sondeos existentes perforados para otros fines, fundamentalmente investigación minera, hidrogeológica, de hidrocarburos, etc.

La ejecución de termometrías no es muy habitual, la temperatura es un parámetro muy sensible a perturbaciones y requiere un instrumental preciso y un trabajo metódico y cuidadoso para obtener datos de calidad que permitan extraer información válida; a pesar de ello, en la mayor parte de las ocasiones las perturbaciones del gradiente, por diversas causas hacen que sea muy complicado obtener información fidedigna del flujo del calor regional, o incluso cuando dichas anomalías son excesivas y causan perturbaciones excesivas en el gradiente, puede llegar a ser imposible, teniendo que desecharse la termometría realizada.

Esta Guía se prepara con objeto de ofrecer una sistemática que permita orientar sobre la instrumentación, seleccionar los sondeos que puedan ofrecer mejor orientación y una sistemática adecuada para su ejecución.

2. Conceptos Generales

La temperatura en la tierra se incrementa desde la superficie con una temperatura media ambiental que en la península ibérica puede oscilar generalmente entre los 10 y 19 °C, hasta su centro donde puede superar los 6.700 °C.

El calor se transmite en la zona litosférica de la tierra, fundamentalmente de forma conductiva, esta transmisión conductiva del calor requiere la existencia de un gradiente térmico, necesario

para que el calor fluya de las zonas de mayor temperatura a las zonas de menor temperatura. El flujo calórico q que pasa de una zona caliente a una fría depende, además, del coeficiente de conductividad térmica, K , que es una constante para cada material.

La ley fundamental de la conductividad térmica es la ley de Fourier, que tiene la siguiente expresión:

$$Q = -k \frac{dT}{dZ}$$

, donde Z es la distancia en la dirección de la variación de la temperatura, y T es la temperatura. El signo menos significa que el calor fluye en una única dirección y que es hacia la zona de menor temperatura.

La temperatura en el subsuelo aumenta con la profundidad, es lo que se suele conocer con el nombre de gradiente geotérmico, que corresponde a la medida dT/dz , en la vertical y que se expresa en milikelvin por metro (mK/m). Su valor medio en las zonas continentales es de 30 mK/m, y de 50 mK/m en las zonas oceánicas.

Para obtener datos de gradiente geotérmico en las zonas continentales se realizan medidas sistemáticas de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades, es lo que habitualmente se conoce como termometrías, cuya representación gráfica constituyen los perfiles térmicos.

Sobre el gradiente geotérmico natural se superponen diversas perturbaciones que dificultan la determinación de este gradiente, estas perturbaciones corresponden a distintas causas, entre las que destacan los procesos convectivos ligados a la circulación del agua subterránea, heterogeneidades del medio que pueden comportar variaciones de conductividad térmica, o la presencia de fuentes de calor fundamentalmente radiogénicas, o incluso generadas por la fricción de fallas. También existen alteraciones provocadas por variaciones de la temperatura superficial (atmosféricas y del suelo) y otros factores ambientales (topografía, vegetación, etc.); y finalmente, las asociadas al propio proceso de perforación del sondeo.

Para el cálculo del flujo de calor regional se requieren termometrías con escasas alteraciones, o con anomalías de escasa longitud de onda que puedan ser controladas, por lo que muchas de ellas deben ser desechadas por presentar excesivas perturbaciones.

3. Equipos de Medida

Actualmente existen una serie de sensores de precisión que acumulan información temporal y térmica simultáneamente lo que permiten realizar mucho mas rápida y cómodamente los registros térmicos.

Se trata de un registrador, unos sensores y una batería de litio, con capacidad para decenas de miles de lecturas de temperatura y tiempo, encapsulados y sellados en una funda de acero inoxidable de titanio resistente a la corrosión con un recubrimiento de PVD, que aguantan presiones hidrostáticas de hasta mil metros. Algunos de ellos permiten registrar además la presión hidrostática a nivel centimétrico.

Los datos almacenados durante la termometría son transvasados mediante un transductor y un software a formato digital, con pares de valor tiempo-temperatura.



Una de las sondas y transductor y software empleado en las termometrías del Proyecto PROMOEENER

Finalmente debemos considerar que las sondas térmicas a utilizar deben tener una exactitud superior a la décima de grado, preferiblemente milésimas de grado. Es aconsejable que el tiempo de estabilización térmica sea rápido, habitualmente inferior a 2-3 minutos.

Un aspecto importante al elegir la sonda a utilizar es la presión que puede soportar, muy variable de unas sondas a otras. En la campaña termométrica del proyecto PROMOEENER, se utilizaron dos sondas una de la marca solinst, que soporta presiones hidrostáticas de hasta 100 m; y otra de Antares que soporta presiones hidrostáticas de más de 1000 m.

Aunque habitualmente existen cables conectores de lectura directa, por el volumen y peso, junto con su elevado coste no suelen ser habitualmente utilizados.

Para el descenso de los sensores se utilizan tambores de carretes de cable de acero de alta resistencia con manivela que permiten liberar más fácilmente el sensor en caso de atasco de la sonda en el sondeo, o carretes de cable flexible con marcas de distancia cada 5 metros,

similares a los empleados en geofísica eléctrica, que presentan mayor riesgo de perder la sonda ante un atasco, aunque son mucho más cómodos de manejar.

4. Selección de Puntos para la ejecución de las Termometrías

Como se ha comentado anteriormente las termometrías útiles son aquellas en las que las perturbaciones térmicas son escasas, y debidas exclusivamente a variaciones litológicas conocidas, que de este modo permiten calcular el flujo térmico y determinar el gradiente natural. Siendo por ello importante el conocimiento de la litológica atravesada.

La presencia de cambios litológicos suele conllevar variaciones de las propiedades térmicas del medio y, en particular, de la conductividad térmica. Para rocas consolidadas, la conductividad térmica suele oscilar entre 2 y 4 W m⁻¹ K⁻¹ por lo que el gradiente geotérmico puede presentar variaciones asociadas a cambios litológicos de hasta un factor 2, dependiendo de la litología, geometría y disposición de los estratos litológicos.

Las perturbaciones más perjudiciales son las siguientes:

- Las derivadas de la ejecución de la captación. Por las que los fluidos de perforación utilizados y la removilización de materiales y agua, provoca una alteración térmica en el entorno; esta perturbación es transitoria y se elimina paulatinamente a medida que se restablece el equilibrio térmico con el medio. Otro efecto indeseado de la perforación, es la posible conexión hidráulica entre niveles acuíferos o zonas de fractura permeables con diferente carga hidráulica, lo que provoca la circulación de agua entre ambos. Se recomienda que exista un periodo de reposo de uno a dos meses antes de ejecutar la termometría y que en ese tiempo el sondeo se encuentre tapado para evitar entrada de agua y que puedan arrojarse piedras u otros objetos que alteren la estabilidad térmica u obstruyan el pozo.
- Las ligadas a procesos convectivos y de circulación del agua subterráneas, por lo que se desaconseja la ejecución de termometrías para uso geotérmico en sondeos implantados en acuíferos significativos, son preferibles sondeos “secos”.
- Las ligadas a procesos convectivos en pozos mineros de gran diámetro, en este tipo de pozos y más cuando suelen estar conectados con galerías laterales, se producen movimientos convectivos que tienden a la homogenización térmica, por lo que los resultados de las termometrías en este tipo de puntos, es muy problemático.

Otras alteraciones del gradiente son provocadas por variaciones de la temperatura superficial (atmosféricas y del suelo) y otros factores ambientales (topografía, vegetación, etc.), que como máximo alcanzan los primeros 25 metros del sondeo.

Otras fuentes de calor como emplazamiento de magmas o fricción mecánica de fallas pueden ocasionar significativas alteraciones en los perfiles térmicos.

Es necesario considerar que si los sondeos o tuberías colocadas en ellos son excesivamente estrechas, o como en el caso de sondeos ejecutados para climatización geotérmica, con tuberías en U, el desplazamiento de la sonda puede conllevar el desplazamiento del agua y una alteración térmica artificial notable que puede impedir una correcta interpretación de la termometría.

En la selección de puntos se debe atender a las siguientes recomendaciones:

- Uno.** - Conocer los procesos de circulación de agua que pueden afectar a nuestra medida para una correcta interpretación.
- Dos.** - Seleccionar a poder ser sondeos lo mas profundo posible, para tener un registro más significativo, y en los que exista información de la columna litológica atravesada.
- Tres.** - Cerciorarse de la verticalidad de la perforación y tener en cuenta que para sondeos sin revestir, puede ser complicado suspender la sonda para inclinaciones de menos de 70 °.
- Cuatro.** - Cerciorarse de que el sondeo o captación ha estado en reposo durante al menos un mes para que se haya alcanzado un equilibrio térmico.
- Cinco.** - Tomar con precaución los resultados termométricos de pozos mineros de gran diámetro, sobre todo de los que pudieran estar conectados con galerías.
- Seis.** - En caso de sondeos de investigación a ejecutar, solicitar que estos se entuben con tubería con un diámetro superior a 50 mm, o en su caso que no se retire el emboquille y se tapen, para evitar la obstrucción del sondeo y que se deje en reposo durante al menos un mes y hasta que se pueda ejecutar la termometría.
- Siete.** - Evitar la mala práctica de comprobar previamente mediante una sonda la profundidad del sondeo y la posible existencia de obturaciones, porque provocan circulación de agua perturbando la columna de temperaturas. A no ser que la termometría se prevea ejecutar en el plazo mínimo de un mes.

Ocho.- En el caso de ejecución específica del sondeo con fines de investigación geotérmica, se recomienda la toma de muestras inalteradas en cada uno de las diferentes litológicas atravesadas, o en su caso toma de muestras en afloramiento de las litologías atravesadas por el sondeo, para calcular en laboratorio su conductividad térmica.

5. Preparación y Ejecución de las Termometrías

Debe prepararse inicialmente una carpeta con la información relativa a cada uno de los puntos donde se ejecutará la termometría, recopilando con anterioridad todos los datos relativos a la captación: situación (coordenadas, sistema y proyección), facilidad de acceso, datos y teléfonos del propietario o encargado, y permisos, detalles de situación (fotografía aérea, plano de situación, plano geológico), características de la perforación: diámetros de perforación (ver si es telescópica), profundidad, inclinación, columna litológica, revestimiento del sondeo, presencia de emboquille y tapa, año de ejecución, uso, profundidad del nivel piezométrico, etc.

Además es útil un estadillo de campo en el que se anoten las características verificadas del punto.

Las sondas se introducen en el sondeo programadas para registrar la temperatura cada 5-10 segundos, con el fin de verificar la estabilidad completa de los registros a cada profundidad y sincronizadas temporalmente con el reloj del ordenador y el del operador.

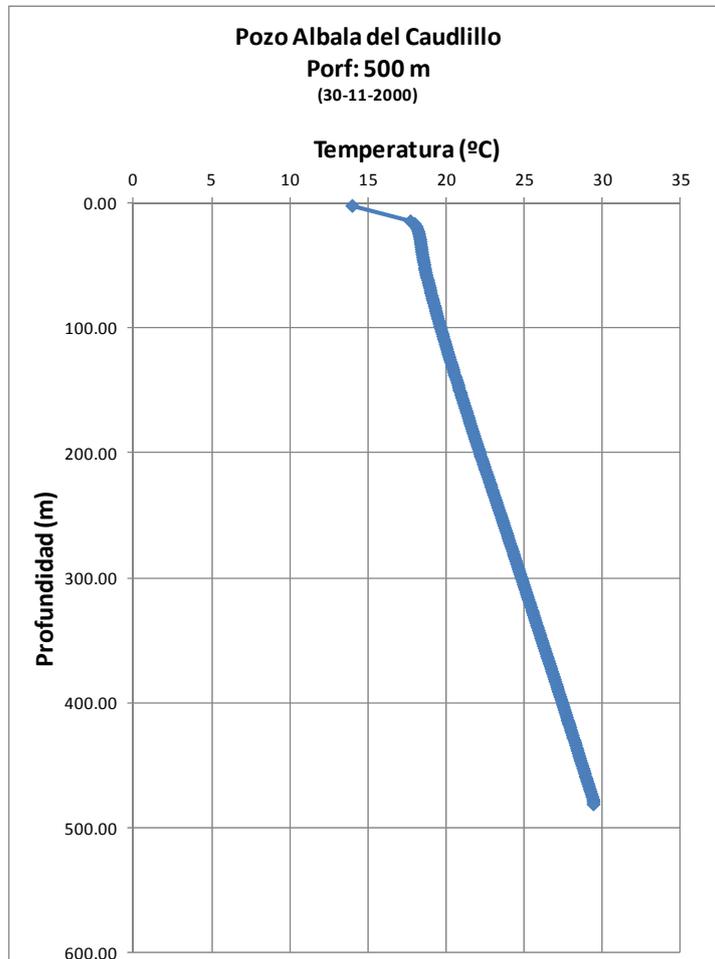
Las sondas se van bajando con rapidez a lo largo del sondeo, a intervalos de 5 metros de profundidad, esperando 2-3 minutos para estabilización térmica en cada tramo (dependiendo de la sensibilidad de cada sonda), anotando en el estadillo la profundidad y los datos temporales.

Se debe tener especial atención a la localización del nivel del agua, por el sonido que transmite la sonda al tocarla; en el caso de sondas con registro de presiones, este dato quedará reflejado en la información acumulada en el sensor.

El operario debe tener especial sensibilidad táctil, para discriminar obstrucciones de disminuciones de diámetro, y de la profundidad real del sondeo y evitar atranques debidos a atranques del cable de sujeción. En caso de sondeos realizados a rotación con lodos es adecuado utilizar suspensión mediante cable de acero, que permite ejercer mayor tracción para sacar la sonda en caso de atranque.

Una vez ejecutada la termometría, se recomienda que los datos sean volcados en bruto al ordenador, para evitar pérdidas de información en caso de romperse o perderse la sonda con posterioridad.

Los datos volcados deben ser tratados con el programa informático específico de cada sonda, incorporando en su caso los datos de profundidad para cada dato temporal, y finalmente con los datos de estabilización en cada profundidad se elabora la termometría y su ficha.

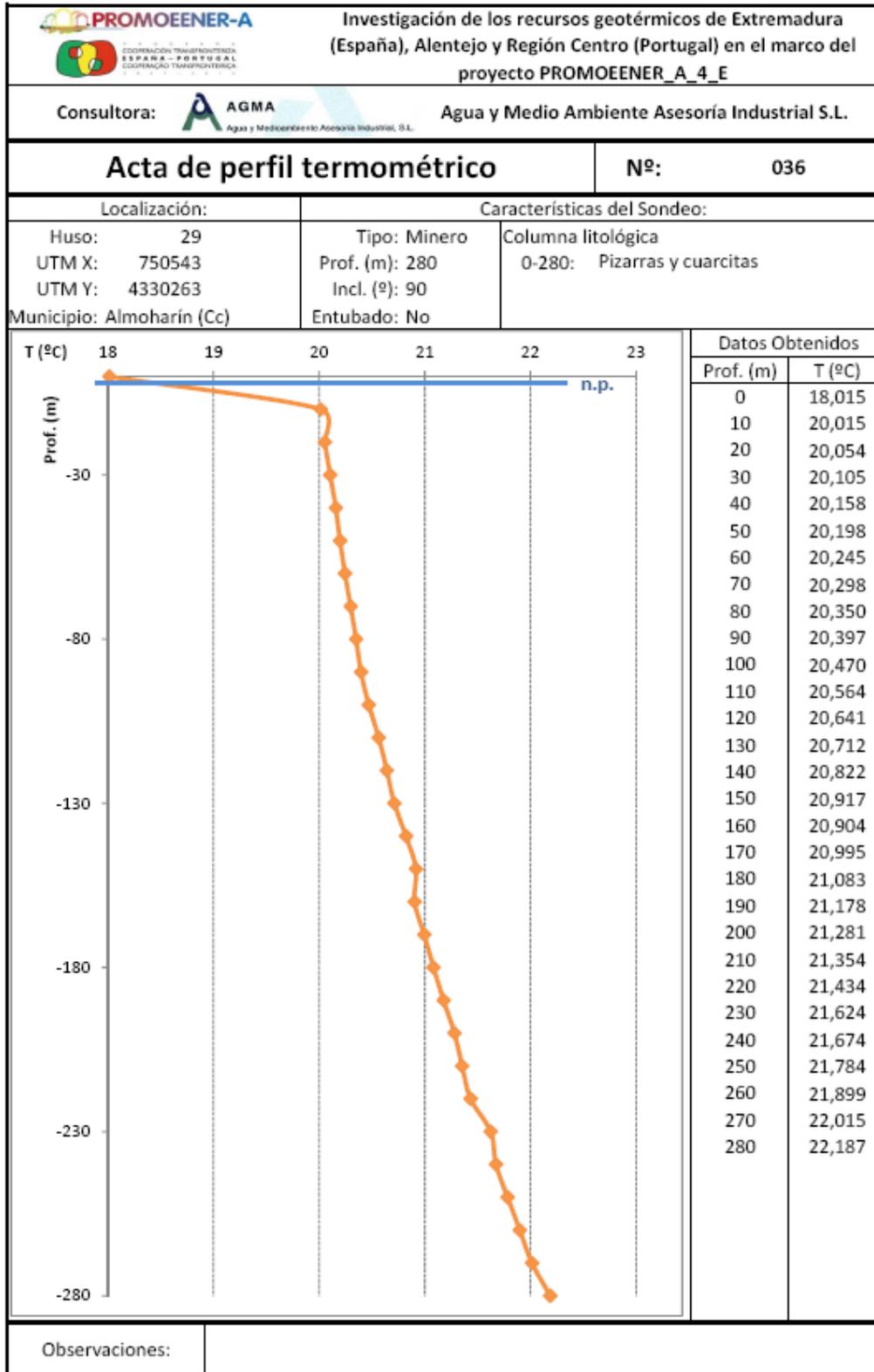


Registro térmico del sondeo Albala del Caudillo, que muestra un perfecto gradiente geotérmico, sin aparentes perturbaciones

6. Presentación de Resultados

Finalmente los resultados deben presentarse en una ficha lo mas completa posible en la que se indiquen las referencias del punto muestreado, sus características litológicas, los datos de la termometría y su representación gráfica, aunque puede completarse con un plano de situación, fotografías y otros detalles que pueden ir en el reverso, también en ocasiones es útil la presentación a modo de carpeta en cuyo interior se pueden incorporar todos los datos recopilados con anterioridad.

Nótese, que los datos de temperatura incluyen milésimas de grado que pueden ser de interés en ocasiones para determinadas interpretaciones de las termometrías.



Ficha de la termometría