

Uso conjunto de diagraffías y TRT para la determinación de parámetros térmicos de un sondeo.

Patricia del Valle Fernández⁽¹⁾, T. Alonso-Sánchez⁽²⁾, M.A. Rey-Ronco⁽³⁾

1 Alumno. Máster en Ingeniería Energética. Universidad de Oviedo. (uo170205@uniovi.es)

2 Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo, Oviedo 33004, Spain. (tjalonso@uniovi.es)

3 Departamento de Energía. Universidad de Oviedo, Oviedo 33004, Spain. (rey@uniovi.es)

Resumen: En este trabajo de investigación se obtienen los valores de los parámetros térmicos del subsuelo de dos maneras distintas y complementarias: la primera es a través experimentos llevados a cabo con los detritus de perforación en combinación con el registro geofísico “Rayos Gamma” del sondeo, y la segunda es a través de un ensayo TRT (Test de Respuesta Térmica) convencional. Se muestran los marcos teóricos necesarios para el análisis térmico de los detritus de perforación y del ensayo TRT. Se explican los términos en los que se han desarrollado los experimentos y se muestran los resultados de la experimentación así como los pasos necesarios para calcular los parámetros térmicos de las formaciones originales y del sondeo. Finalmente se comparan estos resultados con los obtenidos sobre el sondeo, en el ensayo TRT.

Palabras clave: sondeo geotérmico, conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propone un nuevo procedimiento para determinar las propiedades térmicas del terreno. Este procedimiento incluye en primer lugar la realización de diagraffías en el sondeo, y, por otra parte, la recogida, agrupación y el análisis térmico de los detritus de perforación o de los testigos: Las diagraffías permiten determinar el porcentaje lineal de cada litología cortada en el sondeo. Por otra parte, por medio de un experimento específicamente diseñado, se determina la conductividad térmica de los detritus o de los testigos. Con este valor, y teniendo en cuenta la porosidad de los detritus, se estima la conductividad térmica de las distintas litologías. Se determina la capacidad térmica efectiva en el sondeo, como una combinación lineal de las conductividades de cada formación atravesada por el sondeo. Finalmente el valor se compara con el obtenido con un TRT convencional. De la misma forma se procede con la capacidad calorífica volumétrica del sondeo.

Los sistemas geotérmicos con bomba de calor acoplada al terreno, pueden utilizar intercambiadores de circuito cerrado, cuyo funcionamiento depende de la conductividad térmica aparente de los materiales atravesados por el sondeo, y de la resistencia térmica del mismo. La realización de un ensayo de respuesta térmica (TRT) en el sondeo establece un método convencional para la estimación de estos dos parámetros [ALONSO et al (2012); AUSTIN, W.A. (1995); BEIER, R.A. (2011); ESEN, H. y INALLI, M. (2009); FLORIDES, G. y KALOGIROU, S. (2008)]. En el Test de Respuesta Térmica se registra la variación de temperatura de un fluido de intercambio a la entrada y a la salida de las tuberías geotérmicas introducidas en el sondeo. El cambio de temperatura está relacionado directamente con el valor de la conductividad térmica aparente del sondeo, si las condiciones ambientales y experimentales satisfacen los criterios de ensayo establecidos. El ensayo TRT puede predecir de manera efectiva el valor de la conductividad térmica aparente del sondeo,

con un error aproximado $\pm 10\%$ [SHARQAWY, M.H. et al. (2009)]. La ecuación básica del TRT es la siguiente:

$$\bar{T}_f(t) = \frac{q_c}{4\pi k_b} \ln(t) + q_c \left[R_b + \frac{1}{4\pi k_b} \left(\ln \left[\frac{4\alpha}{r_b^2} \right] - \gamma \right) \right] + T_{(t=0)}$$

Donde,

- $\bar{T}_f(t)$ es la temperatura media entre la entrada y la salida del fluido en las sondas geotérmicas introducidas en el sondeo ($^{\circ}\text{C}$);
 - $T_{(t=0)}$ es la temperatura no perturbada del terreno ($^{\circ}\text{C}$);
 - t tiempo de cada temperatura medida (s);
 - q_c potencia lineal del sondeo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$);
 - r_b radio del sondeo (m);
 - γ constante de Euler igual a 0,5772;
 - k_b conductividad térmica aparente del sondeo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);
 - R_b resistencia térmica del sondeo ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$);
 - $\alpha = k_b / \rho C_p$ difusividad térmica del sondeo ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);
- ρC_p la capacidad calorífica volumétrica.

En esta ecuación son conocidos, porque se miden en el experimento, $T_{(t=0)}$, $\bar{T}_f(t)$, q_c , y $\ln(t)$, mientras que son incógnitas k_b , R_b , y α . En un análisis convencional, se determinan k_b y R_b , a través de la ecuación, mientras que α se obtiene a partir de catálogos generales o de anteriores investigaciones sobre el terreno.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

A continuación se describen los fundamentos teóricos de la investigación que permiten determinar, por una parte, las propiedades térmicas del terreno, incluyendo el uso de las diagráfias, y por otra parte la interpretación de un ensayo TRT.

2.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL TERRENO A PARTIR DE LOS DETRITOS DE PERFORACIÓN. NECESIDAD DE LAS DIAGRAFÍAS.

La perforación del sondeo geotérmico permite disponer o bien del testigo, o bien de los detritus de perforación. A partir de cualquiera de estos medios es posible medir las propiedades térmicas del terreno. Sin embargo, si se utilizan como muestras los detritus de perforación, es necesario tener en cuenta lo siguiente para determinar la conductividad térmica de la formación:

- La conductividad térmica de un agregado de materiales k puede ser determinada a partir de la medida de la conductividad térmica de cada componente individual (k_{ci}) a través de la fórmula siguiente [VASSEUR, G. et al. (1995)]:

$$k = \prod_{i=1}^m (k_{ci})^{y_i} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

- k_{ci} es la conductividad térmica individual tanto de cada componente mineral como del fluido,
- y_i su fracción volumétrica.

Los componentes que se encuentran en una muestra seca de detritus de perforación, son

- los fragmentos de la formación y
- el aire que rellena los poros,

luego la expresión anterior permite determinar la conductividad térmica de la formación $k_{formation}$ en función de la conductividad térmica de los detritus k_{cutt} para una porosidad \emptyset con la ecuación modificada siguiente:

$$k_{cutt} = k_{air}^{\emptyset} \cdot k_{formation}^{(1-\emptyset)}; k_{formation} = \left(\frac{k_{cutt}}{k_{air}^{\emptyset}} \right)^{1/1-\emptyset} \quad \text{Ecuación 2}$$

En ambos casos (uso de detritus o uso de testigos), es necesario determinar la conductividad térmica aparente del sondeo puesto que es la que se obtiene en un ensayo TRT.

Se puede considerar la *conductividad térmica aparente del sondeo* como una combinación lineal de las conductividades térmicas de las formaciones atravesadas en el sondeo:

$$k_b = \sum_{i=1}^{i=n} (k_{formación})_i \cdot (x)_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Las diagráfias permiten determinar $(x)_i$ fracción de longitud del material en el sondeo respecto a la longitud total del mismo.

Por otra parte, igualmente, la capacidad calorífica volumétrica $(\rho C_p)_b$ de los materiales atravesados por el sondeo se puede obtener como una combinación lineal de la capacidad calorífica volumétrica de cada material individual. La expresión matemática es:

$$(\rho C_p)_b = \sum_{i=1}^{i=n} (\rho C_p)_i \cdot (x)_i \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $(\rho C_p)_i$ es la capacidad calorífica volumétrica de cada material.

2.2 ECUACIÓN FUNDAMENTAL PARA LA INTERPRETACIÓN DEL TRT (*THERMAL RESPONSE TEST*)

El análisis de las medidas obtenidas en un ensayo TRT está basado en la teoría de transmisión de calor con un modelo de fuente de calor lineal infinita.

La temperatura a una distancia r del eje del sondeo en un instante determinado t , expresada como $T_{(r,t)}$ viene definida por la expresión siguiente: [WAGNER, R. y CLAUSER, C. (2005)]

$$T_{(r,t)} - T_{(t=0)} = \frac{q_c}{4\pi k_b} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q_c}{4\pi k_t} E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

- u es la variable independiente y
- $E_i(x)$ la función exponencial integral que puede aproximarse, si $\frac{\alpha t}{r^2} > 5$, a:

$$E_i \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) = \ln \left[\frac{4\alpha t}{r^2} \right] - \gamma \quad \text{Ecuación 6}$$

esto significa que:

$$T_{(b,t)} = \frac{q_c}{4\pi k_b} \left[\ln \left[\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right] - \gamma \right] + T_{(t=0)} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde $T_{(b,t)}$ es $T_{(r,t)}$ para $r = r_b$.

Se define la resistencia térmica del sondeo R_b como la relación que hay entre la diferencia de temperaturas entre el fluido portador de calor y la pared del sondeo, para una velocidad de calentamiento dada, es decir,

$$R_b = \frac{\bar{T}_f(t) - T_{(b,t)}}{q_c} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde $\bar{T}_f(t)$ es, como se ha indicado anteriormente, la media entre la temperatura de entrada y de salida del fluido en el sondeo y viene dado por la expresión:

$$\bar{T}_f(t) = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Sustituyendo tenemos:

$$\bar{T}_f(t) = R_b \cdot q_c + \frac{q_c}{4\pi k_b} \left[\ln \left[\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right] - \gamma \right] + T_{(t=0)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Como la variable es t , se puede poner la ecuación anterior en la forma:

$$\bar{T}_f(t) - T_{(t=0)} = \frac{q_c}{4\pi k_b} \ln(t) + q_c \left[R_b + \frac{1}{4\pi k_b} \left(\ln \left[\frac{4\alpha}{r_b^2} \right] - \gamma \right) \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

La ecuación anterior es una recta del tipo $y = m \cdot x + n$ en un sistema de coordenadas donde el eje de las abscisas es $\ln(t)$, y el de ordenadas $\bar{T}_f(t) - T_{(t=0)}$. Para resolver esta ecuación se debe registrar la evolución de la temperatura con respecto al tiempo $\bar{T}_f(t)$. Se tiene que conocer q_c y r_b y se debe determinar con anterioridad $T_{(t=0)}$. La pendiente de la recta es $m = \frac{q_c}{4\pi k_b}$. Respecto al otro término de la ecuación existen dos incógnitas, una α , y otra R_b .

3 REALIZACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA.

Se ha perforado un sondeo geotérmico de 113 mm de diámetro exterior en los 12 primeros metros y 101 mm en los 16 restantes. El método de perforación utilizado fue por rotación con obtención de testigo. Por otra parte, al finalizar el sondeo, se ha testificado el sondeo con un equipo MOUNT SOPRIS 3000. El sondeo se encontraba sin agua, y entubado con tubería metálica, por lo que solo se obtuvo el registro de Rayos Gamma. Este log permite identificar las diferentes litologías. En la Figura 1 se muestra la consola del equipo de testificación.



Figura 1. Equipo de testificación MOUNT SOPRIS 3000

3.2 INSTALACIÓN DE LAS SONDAS GEOTÉRMICAS Y DE LA INSTRUMENTACIÓN DE INTEGRADOS.

En el sondeo se introdujo una sonda geotérmica de polietileno con una configuración en U y un diámetro exterior de 25 mm. Junto a la sonda se colocaron 10 sensores integrados DS18S20 de temperatura encapsulados en TO-92 que, para minimizar el cableado se montan en un bus de tres hilos en el interior de una tubería de poliamida. Este dispositivo de sensores de temperatura se conecta a un convertidor que conectado a un PC permite su registro cada minuto.

El sensor más superficial se encuentra a 2,5 m de profundidad y los sucesivos se encuentran cada 2,5 metros por lo que el último está a 25 m de profundidad. Dichos equipos vienen definidos en el Trabajo Fin de Master “*Aprovechamiento de sondeos geotérmicos para el estudio del comportamiento térmico del terreno*”.

Estos sensores integrados son los que miden las temperaturas cada minuto de las 10 profundidades tomadas, que vienen reflejadas en los gráficos como T1 a T10.

3.3 PUESTA EN MARCHA DEL TRT.

Se puso en marcha el equipo TRT representado en la Figura 2, una vez verificadas las conexiones de todos los equipos de medición, se realiza con aporte de calor, se deja circular el agua a través de las sondas geotérmicas, se pone en marcha la bomba del equipo TRT, el circuito se encuentra bajo presión, y se activa el dispositivo de toma de datos Data logger HOBO U12-006 Figura 2, con un régimen constante del fluido en el circuito, y según la tensión de red y el caudal de la bomba.

El dispositivo Data logger HOBO U12-006, ha medido el valor del tiempo cada minuto y las temperaturas de entrada y salida del fluido en el sondeo que vendrán definidas como $T_{caliente}$ y $T_{fría}$.

Se pone en funcionamiento también el software que controla a los sensores integrados.



Figura 2. Equipo TRT y dispositivo Data logger HOBO U12-006 utilizados en el sondeo geotérmico.

3.3.1 ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA NO PERTURBADA DEL SUELO.

En primer lugar se dejó circular fluido, a temperatura ambiente, a través de la sonda geotérmica, el resultado de la medida en los sensores del Hobo y de los sensores integrados representa la temperatura no perturbada del suelo $T_{(t=0)}$.

Este ensayo tuvo una duración aproximada de 5 días. Se muestra a continuación en la Figura 3, la evolución de las temperaturas medidas por los sensores integrados, T_1 a T_{10} , por un lado, y por otro, las temperaturas $T_{fría}$ y $T_{caliente}$ del TRT.

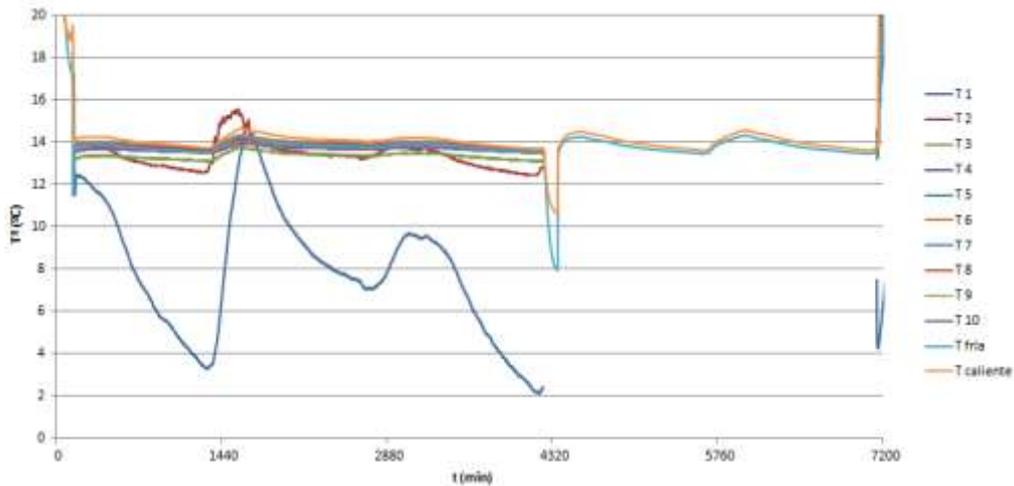


Figura 3. Evolución de $T_{(t=0)}$ con respecto al tiempo.

- Los sensores integrados más superficiales, $T1$ y $T2$, muestran claramente las variaciones diurnas de la temperatura y, por un fallo de corriente de alimentación del PC dejaron de medir a los 4240 min.
- La temperatura no perturbada $T_{(t=0)}$, queda reflejada por la $T_{fría}$ y $T_{caliente}$ en el gráfico, siendo su valor la media de estas.

3.3.2 ENSAYOS DE CALENTAMIENTO.

Posteriormente se realizaron los diversos ensayos de calentamiento. Estos ensayos se efectuaron con distintas potencias de calentamiento comprendidas entre 500 W y 1500 W, progresivamente crecientes para que no fuera necesario esperar hasta que la temperatura del terreno volviera a su estado inicial.

La duración de cada ensayo osciló entre 50 y 200 horas, hasta alcanzar un total de casi 400 horas de permanencia.

Todos ellos se efectuaron hasta alcanzar el régimen permanente. Las potencias térmicas aportadas, así como la duración del ensayo, fue variable de acuerdo con las siguientes características, Tabla I.

Tabla I. Características ensayos TRT.

ENSAYO	POTENCIA(W)	DURACIÓN(Min)
1	500	2800
2	750	4400
3	1000	10000
4	1500	2900

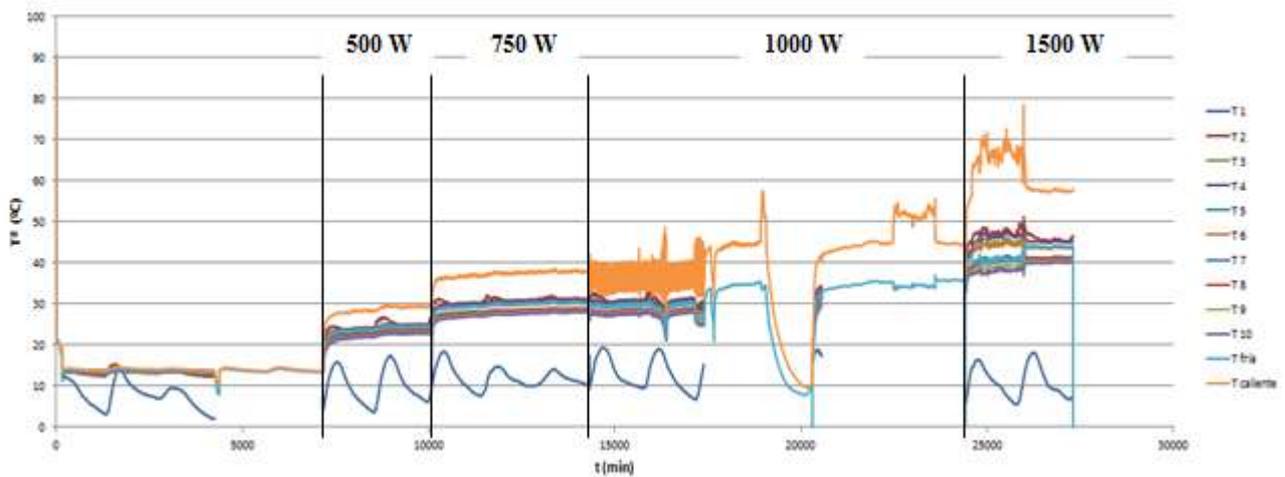


Figura 4. Evolución de las Temperaturas con el tiempo.

Se muestran en la Figura 4, las temperaturas del fluido a la entrada $T_{caliente}$, (que se corresponde con lo que llamaremos a partir de ahora $T_{(fl,in)}$) y salida $T_{fría}$ (correspondiendo a $T_{(fl,out)}$) del sondeo cada minuto, y las temperaturas medidas en los sensores, todo ello a continuación descrito:

- En el primer ensayo el tiempo total de registro ha sido de 49 horas aproximadamente, con una potencia térmica de 500 W. El TRT se ha realizado sin incidencias hasta alcanzar el régimen permanente. Figura 5.

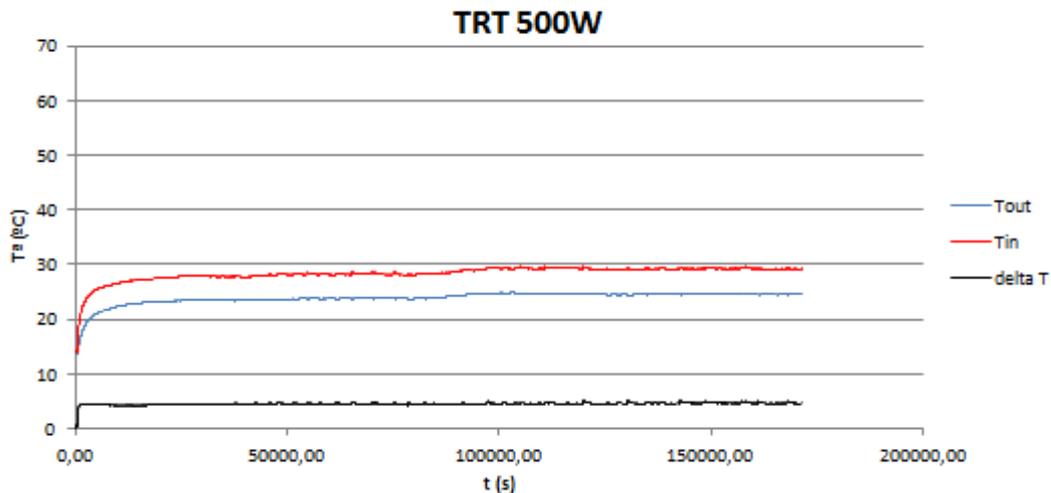


Figura 5. Evolución $T_{(fl,in)}$, $T_{(fl,out)}$ y $\Delta T = T_{(fl,in)} - T_{(fl,out)}$ en los ensayos TRT.

- En el segundo ensayo el tiempo total de registro ha sido de unas 70 horas, con una potencia térmica del sondeo de 750 W. El TRT se ha realizado sin incidencias, aunque es dudoso que se haya alcanzado el régimen permanente, pues parece seguir incrementándose las temperaturas gradualmente, Figura 6.

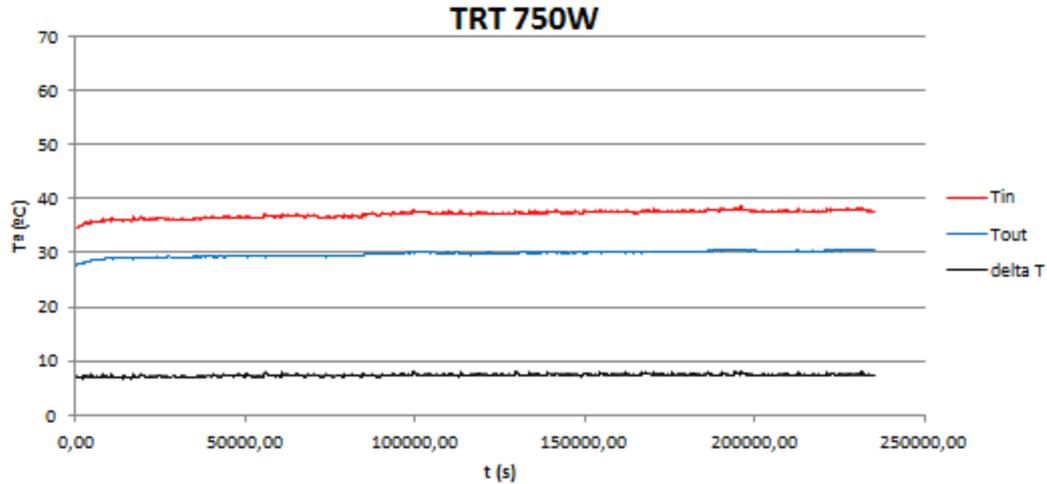


Figura 6. Evolución $T_{(fl,in)}$, $T_{(fl,out)}$ y $\Delta T = T_{(fl,in)} - T_{(fl,out)}$ en los ensayos TRT.

- En el tercer ensayo el tiempo total de registro ha sido de unas 200 horas, con una potencia térmica del sondeo de 1000 W. Como se puede observar en la Figura 7, en este TRT se han dado varias incidencias, en primer lugar se ha producido un error en el contacto del sensor de temperatura con el registrador HOBO; una vez recuperado y estabilizado el calentamiento a los 1000W se producen dos cortes de tensión. Por lo tanto este test se ha descartado para la interpretación.

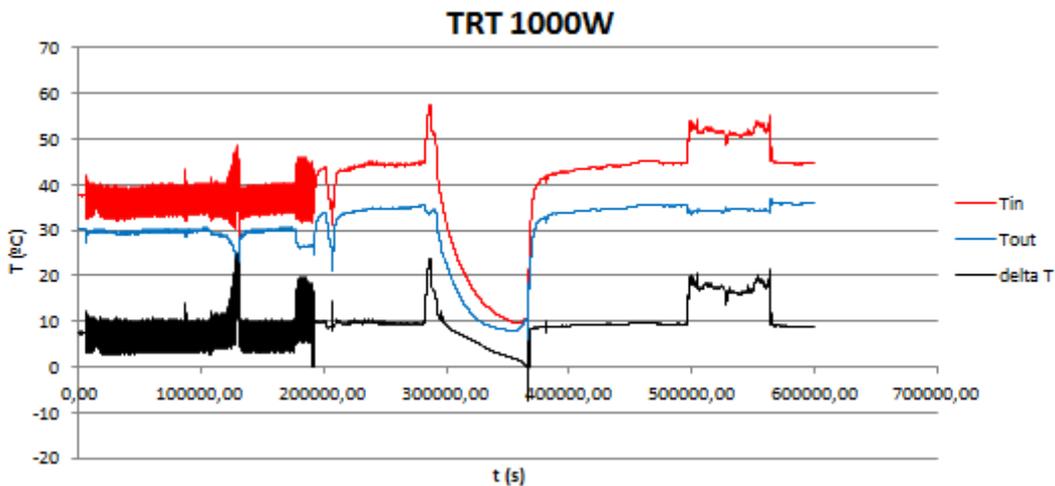


Figura 7. Evolución $T_{(fl,in)}$, $T_{(fl,out)}$ y $\Delta T = T_{(fl,in)} - T_{(fl,out)}$ en los ensayos TRT.

- En el cuarto ensayo el tiempo total de registro ha sido de unas 52 horas, con una potencia térmica del sondeo de 1500 W. En este caso el TRT analizado es también descartado ya que se produjo un fallo en el calentamiento debido posiblemente a un problema de cavitación de la bomba del fluido caloportador del TRT, Figura 8.

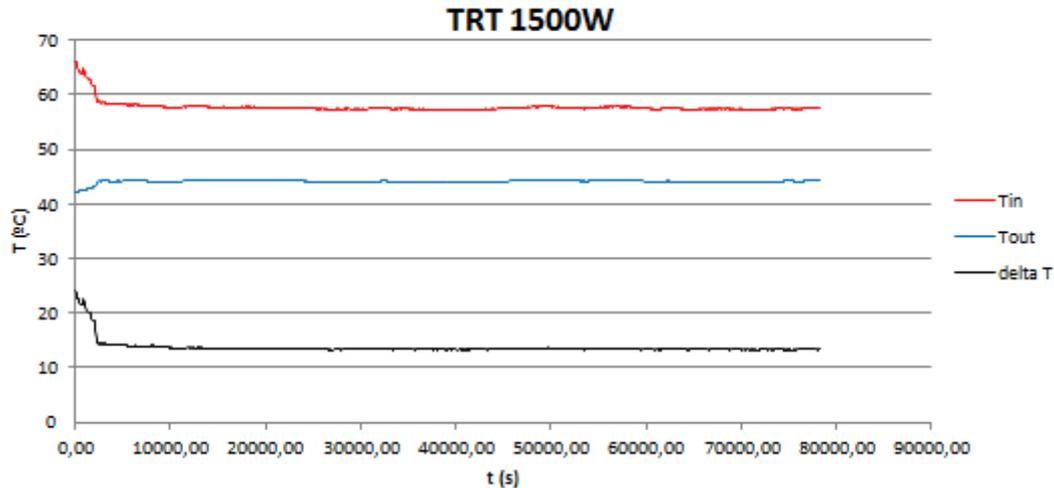


Figura 8. Evolución $T_{(fl,in)}$, $T_{(fl,out)}$ y $\Delta T = T_{(fl,in)} - T_{(fl,out)}$ en los ensayos TRT.

3.4 ANÁLISIS DE LOS DETRITOS Y DE LOS TESTIGOS.

Se ha dispuesto de testigos en este sondeo. Tanto de la interpretación de los testigos como de la interpretación del registro de Rayos Gamma, se deduce, como se expone más adelante, que los materiales atravesados son areniscas y arcillas.

Sin embargo, a la hora de elaborar este trabajo, no ha sido posible finalizar con los experimentos térmicos necesarios para determinar la conductividad térmica de estos testigos.

Por esta razón, en este trabajo, se han utilizado los resultados de los análisis térmicos de detritus de otro sondeo que atravesó:

- por una parte arcillas, que tiene unos parámetros térmicos semejante a las lutitas (shale), y
- por otro lado, calizas (limestone) que, según la bibliografía tienen una conductividad térmica similar a la de las areniscas.

A continuación, se muestra la realización experimental llevada a cabo con estos detritus. Se han recogido unos 0.07 m^3 de detritus de lutita o de caliza, según el caso, procedentes de la perforación de un sondeo. La muestra se ha homogeneizado y secado. Se ha introducido la muestra en un recipiente cilíndrico, en cuyo centro se ha colocado una fuente de calor puntual de potencia controlada y conocida y materializada por una bombilla de incandescencia. Se han colocado 6 sensores de temperatura LM35 interiores a la muestra a distancias conocidas desde el centro de la fuente de calor, un sensor en la superficie externa del contenedor de la muestra, más un sensor de ambiente. Estos sensores tienen una precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Se han registrado las temperaturas capturadas por todos los sensores a intervalos de un minuto por medio del registrador PicoLOG ADC-16, y se ha medido la potencia térmica aportada por la fuente de calor. Se ha prolongado el experimento hasta alcanzar el régimen permanente, lo cual ha supuesto un tiempo de alrededor de 50 horas. Se ha repetido el experimento tres veces.

Las dimensiones y la geometría del experimento se han escogido de manera que se adapten a las hipótesis de medio homogéneo, isótropo e infinito con una fuente puntual central de calor. El diámetro del cilindro es de 500 mm, el de la bombilla 40 mm, y los sensores se colocan a 45, 55, 65,

85, 110 y 150 mm del centro. La lectura de los sensores más próximos a la fuente de calor está afectada de un pequeño error. La hipótesis de fuente puntual no es válida en las proximidades de la misma. Por otra parte, los sensores cercanos a las paredes del recipiente estén afectados por las pérdidas de calor en la superficie, es decir, por el tamaño no infinito de la muestra. Sin embargo las hipótesis de partida son válidas para la mayor parte de los sensores y se pretende comprobar si estos errores son lo significativamente pequeños para hacer que los resultados sean utilizables para el fin propuesto.

Se aplica el modelo de fuente de calor puntual y flujo radial en un medio homogéneo, isótropo e infinito. El perfil de temperaturas en este modelo ha sido definido por INGERSOLL, L.R. et al. (1948) y su expresión es:

$$T(r, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot k} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde,

- $T(r, t)$ es el incremento de temperatura en un sensor respecto al instante inicial (°C),
- \dot{Q} es la potencia térmica (W) suministrada por el foco térmico puntual,
- r es distancia (m) entre el centro del foco y un punto del medio,
- k es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) de la muestra,
- $\eta = 1/(2\sqrt{\alpha t})$ donde,
 - α es la difusividad del medio ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e igual a $\alpha = k/\rho C_p$ y
 - t es el tiempo (s).
- $\operatorname{erfc}\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$ es “la función error complementaria”

Como se indicó anteriormente, se hicieron 3 experimentos en la muestra de caliza y otros 3 en la muestra de lutita, llevando el calentamiento hasta alcanzar el régimen permanente. Del experimento se registran directamente los valores de tiempo, voltaje de cada sensor y distancia de los sensores a la fuente de calor, que son guardados a través del registrador PicoLOG ADC-16. El número de datos para cada sensor en cada ensayo asciende a 4000 aproximadamente, obteniendo finalmente 9 archivos de ensayos. La señal en voltios se transforma en valores de temperatura en °C. En la Figura 9 se muestra una de las gráficas de la evolución del incremento de la temperatura en una muestra de caliza para cada uno de los sensores.

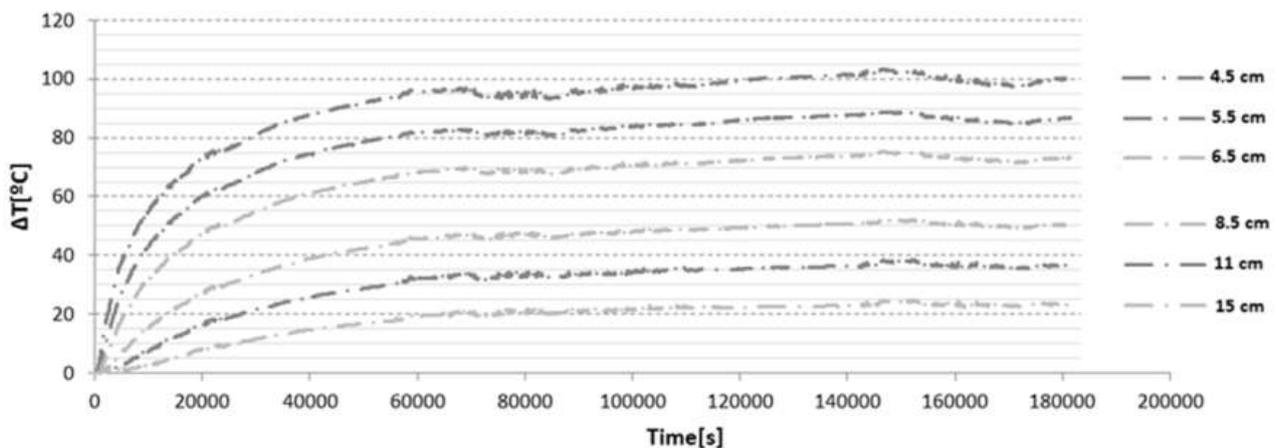


Figura 9. Evolución del incremento de temperatura en una muestra de caliza para cada uno de los sensores.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS A TRAVÉS DE LOS DETRITOS DE PERFORACIÓN Y DE LAS DIAGRAFÍAS

4.1.1 ANÁLISIS LITOLÓGICO DEL SONDEO

El registro de Rayos Gamma muestra que las formaciones atravesadas en el sondeo son muy monótonas, si bien podemos decir que hay tramos de menor radiactividad natural, que se corresponden con niveles más arenosos, y tramos de mayor radiactividad natural que se asocian a niveles más arcillosos. La separación entre las líneas gruesas horizontales es 1m. En la Figura 10 se muestran los tramos considerados para la agrupación de detritus según las diagrafas.

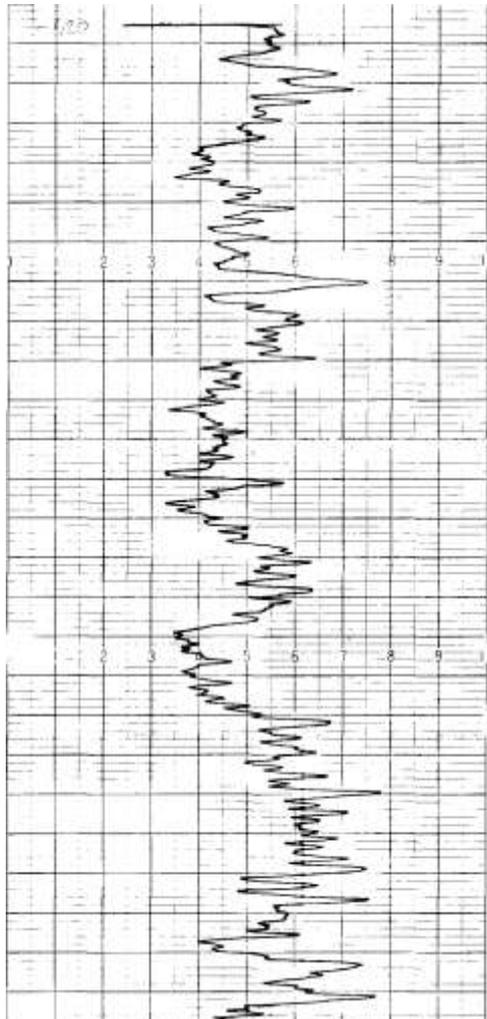


Figura 10. *Diagrafa Gamma Natural obtenida con el equipo de testificación Mount Sopris 3000.*

La longitud total de los tramos de areniscas y de arcillas respecto a la longitud total del sondeo es de 11 y 17 m respectivamente. Los porcentajes son $(x)_{sandstone} = 0,4$ y el valor de $(x)_{shale} = 0,6$.

4.1.2 ANÁLISIS TÉRMICO DE LOS DETRITUS

Con los datos de temperatura recogidos por los diferentes sensores del experimento con los detritus, se ha realizado una regresión de dos variables r , t con respecto a T por medio del programa Matlab para ajustarlos a la ecuación 12. Se ha escogido el programa Matlab porque tiene implementada la función error complementaria y permite hacer regresiones de dos variables. La potencia en los distintos casos es 38 W. De la regresión se obtiene la conductividad térmica k y la difusividad α .

En las Tablas I y II se muestran los resultados de Matlab de k y de α . En la última columna se muestra el coeficiente de correlación.

Tabla II. Resultados de la regresión para la determinación de los parámetros térmicos de los detritus de caliza.

TEST	k [$Wm^{-1}K^{-1}$]	α [m^2s^{-1}]	ρC_p [$J m^{-3}K^{-1}$]	R^2
1limestone	0.4430	2.282e-07	1.94e06	0.9817
2limestone	0.4395	2.806e-07	1.57e06	0.9830
3limestone	0.4376	2.335e-07	1.87e06	0.9910

Tabla III. Resultados de la regresión para la determinación de los parámetros térmicos de los detritus de lutita.

TEST	k [$Wm^{-1}K^{-1}$]	α [m^2s^{-1}]	ρC_p [$J m^{-3}K^{-1}$]	R^2
1shale	0.5019	2.409e-07	2.08e06	0.9635
2shale	0.4975	2.939e-07	1.69e06	0.9668
3shale	0.4954	2.489e-07	1.99e06	0.9710

4.1.3 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LAS FORMACIONES

Se calcula la conductividad térmica de la lutita (*shale*) y de la caliza (*limestone*), para una porosidad estimada de la muestra del orden de 35%, según la ecuación 2 que,

$$k_{cutt_shale} = k_{air}^{\emptyset} \cdot k_{form_shale}^{(1-\emptyset)}; k_{cutt_lims} = k_{air}^{\emptyset} \cdot k_{form_lims}^{(1-\emptyset)} \quad \text{Ecuación 13}$$

y despejando,

$$k_{form_shale} = \left(\frac{k_{cutt_shale}}{k_{air}^{\emptyset}} \right)^{1/1-\emptyset} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$k_{form_lims} = \left(\frac{k_{cutt_lims}}{k_{air}^{\emptyset}} \right)^{1/1-\emptyset}$$

Suponiendo $k_{air} = 0,03[Wm^{-1}K^{-1}]$ se tiene:

Tabla IV. Resultado conductividad térmica de las formaciones.

k_{form_shale} [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	k_{form_lms} [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
2,27	1,87

Estos son los valores de la conductividad térmica para la formación de lutita y de caliza a partir de los resultados del análisis térmico de los detritus, según la relación de la Ecuación 2. En nuestro sondeo se considera, como se ha dicho anteriormente, que:

$$k_{form_shale} = k_{form_arcillas}$$

$$k_{form_lms} = k_{form_sandstone}$$

Con las proporciones de cada componente en el sondeo podemos obtener un valor de la conductividad media del sondeo:

$$k_b = (k_{form_sands} \cdot (x)_{sandstone}) + (k_{form_arcilla} \cdot (x)_{arcilla}) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$k_b = 2,11 [Wm^{-1}K^{-1}]$$

4.1.4 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA VOLUMÉTRICA DE LAS FORMACIONES

En este sondeo la Ecuación 4 se convierte, en:

$$(\rho C_p)_b = ((\rho C_p)_{limestone} \cdot (x)_{limestone}) + ((\rho C_p)_{shale} \cdot (x)_{shale}) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$(\rho C_p)_b = 1,87e^6 [Jm^{-3}K^{-1}]$$

A través de las diagráfias se ha comprobado también, que el sondeo se encuentra seco.

4.2 ANÁLISIS A PARTIR DEL TRT

4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA INALTERADA DEL SUELO

La temperatura no perturbada del terreno $T_{(t=0)}$ se obtiene en primer lugar, como se ha explicado en la realización experimental, obteniendo un resultado de 13,882 °C.

4.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA k_b A PARTIR DEL TRT

La evolución de las temperaturas del fluido a la entrada $T_{(fl,in)}$ y salida $T_{(fl,out)}$ del sondeo en cada ensayo, así como el incremento de temperatura entre la entrada y la salida del sondeo:

$$\Delta T = T_{(fl,in)} - T_{(fl,out)}$$

Se muestran en las Figuras 5 a 8. Como el equipo de TRT está conectado directamente a la red eléctrica, el valor de $T_{(fl,in)}$ oscila debido a las variaciones de la tensión de alimentación. Estas oscilaciones repercuten a lo largo de los análisis como se han indicado.

La recta de la ecuación 11, se representa en la Figura 11. Se ha colocado en el eje de abscisas $\ln(t[s])$, y en el eje de ordenadas $\bar{T}_f(t) - T_{(t=0)}$. Haciendo una regresión lineal entre la ecuación y los datos de los diferentes ensayos, obtendremos los parámetros de la ecuación, es decir, la pendiente y el corte en el origen.

La pendiente permite determinar el valor de la conductividad térmica. En este caso se representan las gráficas pertenecientes al primer ensayo el de 500 W ya que es el que se ha realizado sin incidencias y ha llegado al régimen permanente.

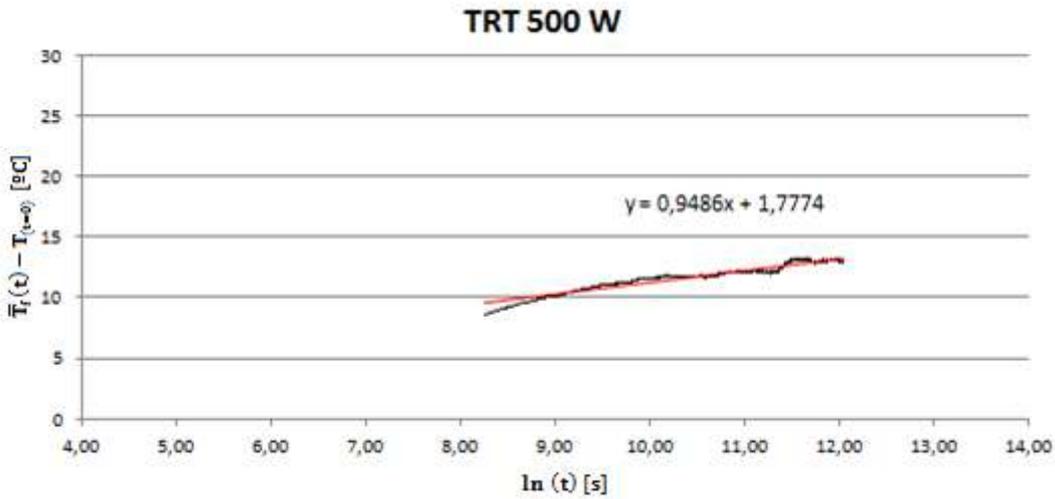


Figura 11. $\bar{T}_f(t) - T_{(t=0)}$ vs. $\ln(t)$ en los ensayos TRT.

La pendiente de la recta m viene reflejada en el gráficos y es 0.9486. A partir de la determinación de la pendiente de la recta, se calcula la conductividad térmica k_b por medio de la expresión:

$$k_b = \frac{q_c}{4 \cdot \pi \cdot m} \quad \text{Ecuación 17}$$

Siendo, la potencia por metro lineal, $q_c = Q / L$, para las potencias aportadas de 500 W, con una profundidad del sondeo de 28 m.

Se obtiene una conductividad térmica aparente de:

$$k_b = 1,498 [Wm^{-1}K^{-1}]$$

Los resultados obtenidos en el ensayo son los reflejados en la Tabla V.

Tabla V. Resultado conductividad térmica de las formaciones

\dot{Q} [W]	q_c [Wm ⁻¹]	m	k_b [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
500	17,8571	0,9486	1,4980

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se obtienen los valores de los parámetros térmicos por dos vías diferentes y complementarias: la primera vía es a través de los detritus de perforación y el registro geofísico de Rayos Gamma, y la segunda vía el convencional ensayo TRT.

Las diagráfias realizadas sobre el sondeo antes de introducir los tubos geotérmicos, han permitido determinar las distintas litologías cortadas por el sondeo y ha permitido cuantificar la proporción de arcillas y arenas cortadas en el sondeo. Si el sondeo hubiera tenido agua, se podría haber determinado el nivel del agua en el sondeo y los posibles acuíferos.

Se han mostrado los resultados del estudio de los detritus de lutitas y de calizas, que tienen un comportamiento térmico similar a los materiales cortados en este sondeo. A partir de estos datos de los detritus se ha calculado los parámetros térmicos aproximados correspondientes a las formaciones. Posteriormente, se ha determinado la conductividad térmica aparente del sondeo como una media ponderada de la conductividad de la formación aproximada al considerar los materiales similares a los realmente cortados en el sondeo. Igualmente se ha procedido en la determinación de la capacidad calorífica volumétrica.

Como resultado del análisis de los detritus y de las diagráfias, se ha determinado que la conductividad media aproximada del sondeo es $k_b = 2,11$ [Wm⁻¹K⁻¹] e igualmente, que la capacidad calorífica volumétrica del sondeo es $(\rho C_p)_b = 1.87e6$ [Jm⁻³K⁻¹]. Del análisis del TRT se ha obtenido un nuevo valor de $k_b = 1,5$ [Wm⁻¹K⁻¹].

La diferencia entre los resultados de la conductividad térmica aparente del sondeo, y la obtenida del análisis de los detritus se debe precisamente a que los materiales realmente cortados en el sondeo no son los mismos con los que se ha hecho el análisis térmico en laboratorio. Sin embargo, el grado de acuerdo encontrado anima a continuar con esta línea y determinar en los propios testigos la conductividad térmica.

6 REFERENCIAS

- ALONSO-SÁNCHEZ T., REY-RONCO M.A., CARNERO-RODRÍGUEZ F.J., CASTRO-GARCÍA M.P. "Determining ground thermal properties using logs and thermal drill cutting analysis. First relationship with thermal response test in principality of Asturias, Spain". Applied Thermal Engineering **37** (2012). 226-234.
- AUSTIN, W.A. (1995): "Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties". Thesis.
- BEIER, R.A. (2011): "Vertical temperature profile in ground heat exchanger during in-situ test". Renewable Energy, **36**, 5 (May): 1578-1587.
- ESEN, H. y INALLI, M. (2009): "In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey". Energy and Buildings, Abr;**41**(4):395-401.
- FLORIDES, G. y KALOGIROU S. (2008): "First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger, in Cyprus". Applied Thermal Engineering, Feb;**28**(2-3):157-163.
- SHARQAWY, M.H. et al. (2009): "First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger applications in Saudi Arabia". Renewable Energy, Oct;**34**(10):2218-2223.
- VASSEUR, G. et al. (1995): "Thermal conductivity estimation in sedimentary basins". Tectonophysics, Abr **15**;244(1-3):167-174.
- WAGNER, R. y CLAUSER C. (2005): "Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity". J. Geophys. Eng. 2(4):349-356.
- INGERSOLL, L.R., ZOBEL O.J, AND INGERSOLL A.C. (1954): "Heat conduction with engineering and geological application". McGraw-Hill, New York.