

## **Perfilado de pozos con el uso de nuevas tecnologías en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.**

**Adriana Hernández Pérez, Adalberto Ávila Apolinar, Elvia Nohemí Medina Barajas y F. Alejandro Sandoval Medina**

Campo geotérmico de Los Azufres, Residencia de Estudios, Área de Ingeniería de Yacimientos, Agua Fría, Mich. Correos: [adriana.hernandez@cfe.gob.mx](mailto:adriana.hernandez@cfe.gob.mx), [adalberto.avila@cfe.gob.mx](mailto:adalberto.avila@cfe.gob.mx)

### **Resumen**

Con el paso de los años y de acuerdo a las necesidades específicas que se han presentado con el desarrollo y estudio de la geotermia, se ha buscado la forma de conocer en mayor detalle el comportamiento del yacimiento. Por ello es muy importante contar con herramientas que proporcionen información confiable y tengan una estructura funcional para las distintas maniobras que se realizan en el campo. El perfilado de pozos geotérmicos es indispensable para conocer termodinámicamente los cambios que ocurren tanto en el pozo como en el yacimiento, identificar las zonas que están alimentando a un pozo en producción e inclusive identificar posibles daños mecánicos en el interior del mismo. El perfilado de pozos empezó en 1995 en el campo geotérmico de Los Azufres con la adquisición de un equipo electrónico que proporciona datos de presión, temperatura y velocidad de flujo, el cual dio muy buenos resultados. Sin embargo, todo equipo tiene un tiempo de vida útil y con el avance de la tecnología han aparecido otros equipos que mejoran la información. En este trabajo se presenta una comparación entre la herramienta adquirida inicialmente y la más reciente. Las características de diseño y operación de esta última ofrece nuevas oportunidades de mejoras técnico-operativas. Con la operación y aplicación de nuevas tecnologías en el campo de Los Azufres, este se coloca a la vanguardia en el perfilado de pozos geotérmicos en México.

*Palabras clave:* Ingeniería de yacimientos, zonas productoras, daño mecánico en pozos geotérmicos, presión, temperatura.

### **1. Introducción**

En México se han identificado aproximadamente 1400 focos termales localizados en 27 estados, entre los cuales se encuentra el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Con el paso de los años y de acuerdo con las necesidades específicas en el desarrollo y estudio de la geotermia, se ha buscado la forma de conocer con mayor detalle el comportamiento del yacimiento geotérmico. Por ello, contar con herramientas para optimizar el tiempo en la operación, medición, maniobra y mayor confiabilidad en los datos medidos, es de gran importancia.

La medición de velocidades de flujo dentro del pozo es importante para la determinación de zona de aporte a lo largo del perfil del pozo. Las zonas permeables se identifican primero en los perfiles de presión-temperatura, pero finalmente se confirman con el registro del spinner. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos con el uso de dos herramientas de medición para el perfilado de pozos en el campo geotérmico de Los Azufres, así como los beneficios obtenidos gracias al avance tecnológico en el estudio de los pozos geotérmicos.

### **2. Antecedentes**

Parámetros termodinámicos como la presión y la temperatura han sido de suma importancia para el estudio y conocimiento de un yacimiento geotérmico. A través de su interpretación es posible conocer los procesos termodinámicos que se llevan a cabo dentro de un pozo y aun dentro del yacimiento mismo. Es indispensable conocer esos parámetros en cada una de las etapas de un pozo geotérmico: perforación, calentamiento, producción y evaluación. Para ello se han creado equipos y herramientas que permiten medirlos en el interior de los pozos.

Las herramientas y equipos de medición han evolucionando con el tiempo, ya que todos fueron creados originalmente para utilizarse en ambientes petroleros, es decir, para soportar presiones mayores a 5000 psi y temperaturas menores a 150°C. Conforme se perforaron más pozos geotérmicos, los equipos de medición debieron adecuarse para trabajar a temperaturas de alrededor de 300°C.

Desde 1976, fecha en que se perforó el primer pozo en el campo de Los Azufres, se han utilizado equipos de tipo mecánico para la medición de la presión y la temperatura. Estos equipos están especialmente diseñados para operar a temperaturas altas y con un tiempo de exposición tan largo como se requiera. La interpretación de los perfiles de temperatura así obtenidos permite identificar intervalos permeables en el interior de un pozo, así como otros datos relevantes para la terminación de los pozos, como la determinación de algunos intervalos de aporte de manera visual.

Sin embargo, a partir de los perfiles de temperatura no es posible determinar qué zonas de aporte son más importantes o cuáles de ellas son las que aportan más fluido a la producción total del pozo. Por ello, a partir de 1997 se adquirió un equipo electrónico capaz de medir, además de la presión y la temperatura, la velocidad del fluido en el interior del pozo. Se trata de la sonda electrónica PTS Hot Hole, con la cual se han perfilado alrededor de 24 pozos productores e inyectores del campo. La interpretación de esos perfiles hizo posible puntualizar zonas de aporte y su contribución a la producción total del pozo, pero además se pudieron identificar daños mecánicos en el interior de las tuberías en varios pozos.

Ese equipo electrónico se ha empleado en los últimos 15 años, pero en 2012 se adquirió una nueva herramienta electrónica, que es el Registrador Electrónico K10 PTS de la firma Kuster, que también mide presión, temperatura y velocidad de flujo en los pozos. A la fecha se ha probado en dos pozos con buenos resultados. A continuación se describen las características de la sonda Hot Hole y del nuevo registrador, así como los resultados obtenidos.

### **3. Características de la sonda electrónica PTS Hot Hole**

En la Tabla 1 se muestran las características principales de la sonda electrónica PTS Hot Hole. Es una herramienta bastante robusta, con una longitud de 3.66 m y un peso total de 77 kg, lo que hace que su manejo sea especial. Aunque tiene un rango de medición de temperatura de hasta 343°C, está limitada a la temperatura interna de operación de la herramienta que es de un máximo 75°C. La Figura 1 es una imagen de la sonda.

La sonda electrónica Hot Hole está diseñada para la adquisición de datos en tiempo real. Los datos son transmitidos a la superficie a través de un cable conductor. Los datos de presión, temperatura y spinner se miden cada dos segundos y son desplegados en un sistema de adquisición de datos con lectura digital y analógica. Son almacenados y visualizados en una PC y pueden ser exportados a una hoja de cálculo. La sonda electrónica está provista con tablas previas de calibración dadas por el proveedor y no requiere programación previa al registro.

La Figura 2 muestra el equipo electrónico adicional requerido para la correcta operación de la sonda, que incluye un software que muestra de manera visual y en tiempo real la presión, temperatura y spinner.

<b>Diámetro</b>	3 pulgadas
<b>Longitud</b>	12 pies (3.66 m)
<b>Peso</b>	170 lb (77 kg)
<b>Rango de temperatura</b>	0 - 343°C
<b>Rango de temperatura interna</b>	65°C
<b>Exactitud en el sensor de temperatura</b>	0.2% F.S.
<b>Rango de presión</b>	0 – 15000 psi (1054.9 bar)
<b>Exactitud en el sensor de presión</b>	0.2% F.S.
<b>Rango Spinner</b>	0 a 500 rps
<b>Frecuencia de muestreo</b>	1 muestra / 2 segundos

*Tabla 1.- Especificaciones técnicas de la Sonda Electrónica PTS Hot Hole*



*Fig. 2. Equipo adicional de la sonda electrónica.*

*Fia. 1. Fotografía de la sonda electrónica PTS Hot Hole.*

La operación de la sonda electrónica Hot Hole conlleva una serie de actividades, personal y equipo de apoyo. Para introducirla al pozo se requiere la colocación de un sistema de control de presión de 8 m de

largo por 10” de diámetro. Para ello es necesario contar con apoyo de un brazo con suficiente extensión para poder colocar todo el equipo en el árbol de válvulas del pozo a perfilar. Por lo anterior, se requiere un personal mínimo de tres técnicos de campo para su armado y colocación, dos ingenieros para el control del equipo analógico y digital, y un operador del brazo de extensión (Fig. 3).



Fig. 3. Instalación del lubricador para un registro con la sonda PTS.

El tiempo de registro es variable y depende del diseño de la prueba, es decir de cuántas corridas sean necesarias realizar. Así, incluyendo el tiempo de colocación y retiro del equipo, un registro en un pozo se puede extender hasta seis horas, tiempo durante el cual la temperatura interna de la herramienta puede alcanzar hasta 50°C, haciendo necesario sacarla del pozo, apagarla y dejarla enfriar a la intemperie.

Para correr un registro de campo, se requiere el siguiente equipo y herramientas:

- Un lubricador para altas temperaturas, con dimensiones de 10” de diámetro y 8 m de longitud.
- Prensaestopas hidráulico.
- Equipo Pats que permite monitorear los parámetros de manera simultánea.
- Osciloscopio para observar las frecuencias, velocidades de transmisión y señal de los parámetros de medición.
- Cable de transmisión de datos.
- PC.
- Software.
- Planta de energía eléctrica y sistema de respaldo

Se recomienda dar mantenimiento a esta sonda después de cada registro, lo que incluye las partes mecánicas (propela, flecha, lubricación de cuerdas con grasa para altas temperaturas) y la limpieza y lubricación del cable cuando sale la sonda del pozo, para protegerlo de agentes corrosivos. También se recomienda calibrar la sonda cada 12 registros o cada año.

#### 4. Características del registrador electrónico K10 PTS

El año pasado la Residencia de Los Azufres adquirió el nuevo registrador electrónico K10 PTS, cuyas características y componentes principales se muestran en la Tabla 2. La Figura 4 muestra una imagen del equipo. Entre sus características es importante resaltar el rango de temperatura de medición, que es de hasta 300°C durante 6 horas y hasta 350°C durante 4 horas. Su temperatura interna es de hasta 150°C. El peso total de la herramienta es de aproximadamente 14 kg lo que facilita su manejo en campo. El rango de medición de flujo va de 300 hasta 20,000 rpm.

DIMENSIONES	
Diámetro exterior	1.75” (4.45 cm)
Largo	66” (1.67 m)

<b>Carcasa exterior colapso de la presión</b>	5000 psi
<b>PRESIÓN</b>	
<b>Rango</b>	Hasta 5000 psi.
<b>Precisión</b>	0.05% FS
<b>Resolución</b>	0.0003% FS
<b>MEDIDOR DE FLUJO / SPINNER</b>	
<b>OD</b>	2-1/8" y 1-11/16"
<b>Sensores</b>	Interruptor de láminas / magnéticas
<b>Resolución</b>	0.25 RPS 0.8 RPS
<b>Datos</b>	Flujo con detección de dirección
<b>Caudal</b>	300 rpm a 20,000 rpm (máximo)
<b>TEMPERATURA</b>	
<b>Precisión</b>	0.015% FS
<b>Resolución</b>	0.002% FS
<b>El tiempo de fondo de pozo</b>	6 horas a 300°C, o 4 horas a 350°C
<b>ELECTRÓNICA</b>	
<b>Potencia</b>	Batería AA
<b>Número de puntos de datos:</b>	1,400,000
<b>Rango mínimo de la muestra</b>	1 segundo
<b>Interfaz</b>	USB
<b>Software</b>	Windows 98 y superior

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Registrador electrónico K10 PTS.

El registrador electrónico consta físicamente de las partes siguientes:

- Sección electrónica.
- Tarjetas de memoria o almacenamiento de información.
- Sensor de presión piezo-resistivo.
- Sensor de temperatura RTD.
- Caja de profundidad (*encoder* digital).
- Disipador de calor.
- Carcasa del registrador de memoria electrónico.
- Ibox USB y cable USB de comunicación.
- Batería de litio.
- Software.

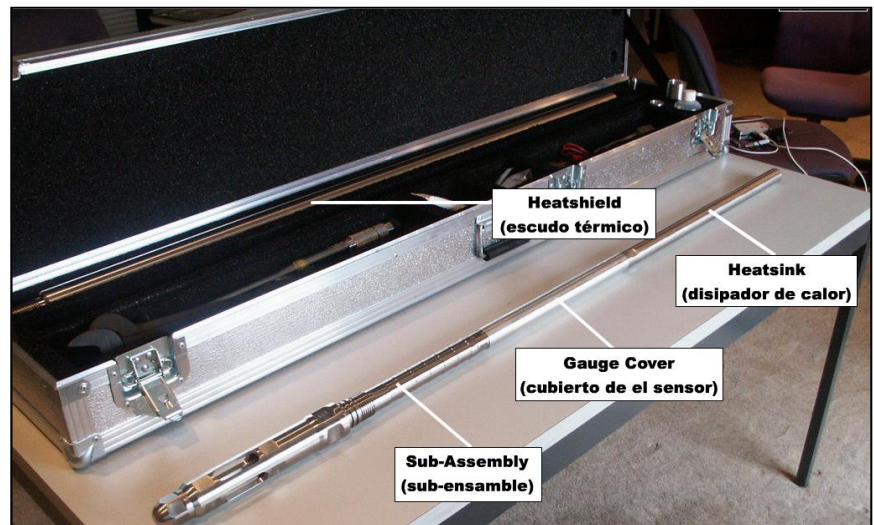


Fig. 4. Equipo registrador K10 PTS.

La sección electrónica y la batería se localizan dentro de una carcasa que los protege y aísla de las altas temperaturas geotérmicas. Los transductores de presión detectan la presión del pozo a través de un tubo

capilar, mientras que el sensor de temperatura RTD permanece expuesto. La Figura 5 muestra el spinner, el cual cuenta con impulsores que se pueden elegir de acuerdo a las condiciones de flujo.



Fig. 5. Sección del spinner del registrador.

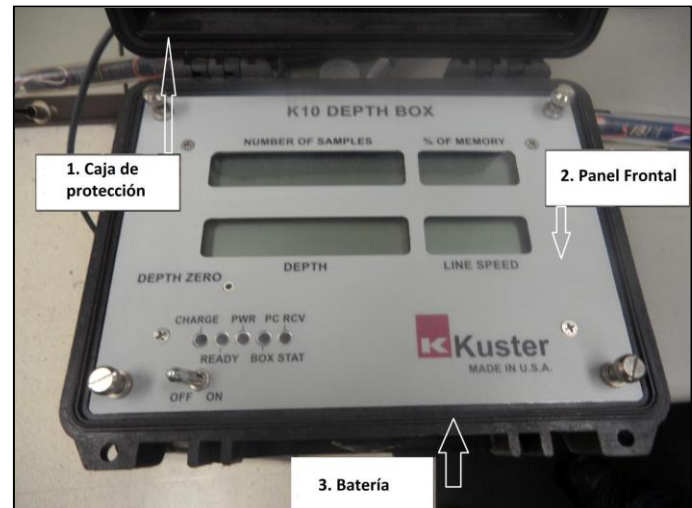


Fig. 6. Caja negra de profundidad (encoder).

## 5. Programación y operación del registrador electrónico K10 PTS

El registrador de memoria electrónico K10 PTS está diseñado para la adquisición y almacenamiento de datos, esto último en un chip memoria con capacidad de hasta 1 millón 400 mil datos, y cuenta con respaldo de 3 chips de memoria adicionales. La información de Presión-Temperatura-Spinner y velocidad de registro pueden ser medidos desde un mínimo de cada dos segundos y variar la frecuencia de medición hasta una cada 30 minutos. Esta velocidad se puede programar en el software y depende del diseño del registro.

Antes de realizar físicamente un registro es necesario programar el registrador y la caja de profundidad (*encoder*) en la computadora de oficina. Una vez programado el equipo, se instala la batería y el equipo empieza a grabar información. Cuando termina el registro se descarga la información a través de su software, se despliega en pantalla y los datos pueden ser exportados a una hoja de cálculo. La Figura 6 muestra el *encoder*, que mide la profundidad y velocidad del registro.

El registrador K10 está provisto con tablas previas de calibración dadas por el proveedor. La Figura 7 presenta una imagen de la pantalla principal del software del registrador.

El registrador K10 se opera de manera más sencilla que la sonda PTS Hot Hole. Para introducirlo al pozo sólo se requiere colocar un sistema de control de presión de 3.70 m de largo por 3" de diámetro, lo que se puede hacer con una grúa tipo Hiab montada en un camión. Por ello, el personal requerido para el perfilado de un pozo con el registrador K10 es de tres técnicos de campo para su armado, colocación y operación del brazo de extensión Hiab, y un ingeniero encargado del perfilado.

Aunque el tiempo de registro es variable y depende del diseño de la prueba, se puede estimar en un promedio de cuatro horas, incluyendo la colocación y retiro del equipo en el pozo. Es recomendable que cuando la temperatura interna de la herramienta llegue a 40°C, se extraiga del pozo y se deje enfriar a la intemperie.

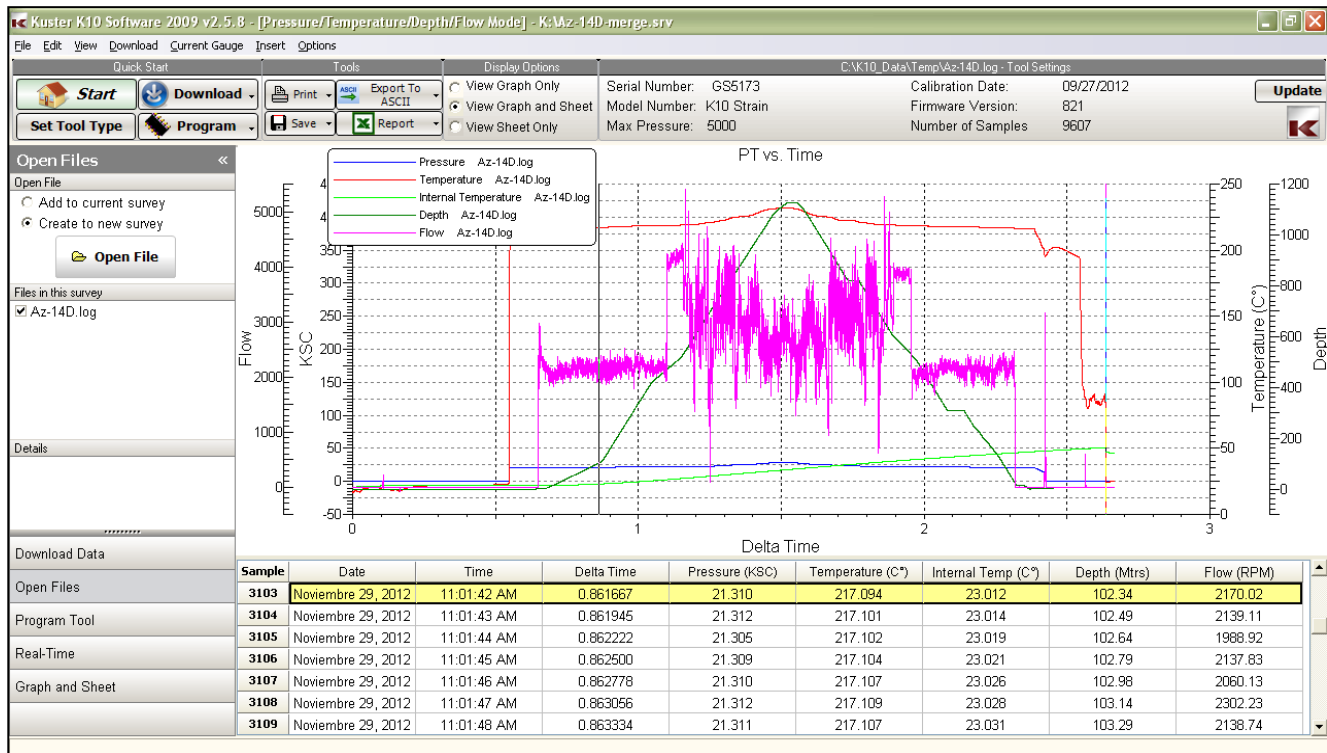


Fig. 7. Imagen de la pantalla principal del software del registrador K10.

El equipo necesario para un registro de campo con el registrador K10 es el siguiente:

- Un lubricador para altas temperaturas con dimensiones de 3” de diámetro y 3.70 m de longitud.
- Prensaestopas mecánico.
- Línea de acero de 0.092” de diámetro.
- Caja de profundidad.

Se recomienda darle mantenimiento al registrador después de cada registro. Este mantenimiento consta de:

- Llenado de aceite para el correcto funcionamiento del sensor de presión.
- Limpieza y lubricación en uniones roscadas.
- Mantenimiento a las partes mecánicas (propela, flecha, baleros, imanes, empaques).
- Limpieza y lubricación de la línea de acero durante la recuperación de la sonda al salir del pozo, para protegerla de agentes corrosivos.

También se recomienda una calibración cada 12 registros o una al año.

## 6. Comparación entre la sonda PTS Hot Hole y el registrador K10 PTS

En la Tabla 3 se muestran algunas ventajas y desventajas desde el punto de vista técnico, encontradas con base en la experiencia obtenida con el uso de los ambos equipos PTS en el campo geotérmico de Los Azufres. Se puede ver que el registrador de memoria electrónica K10 tiene más ventajas técnicas sobre un equipo más robusto, como lo es la sonda electrónica PTS Hot Hole.

Sonda Electrónica PTS Hot Hole		Registrador electrónico PTS K10	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Medición en tiempo real.	Temperatura interna de la herramienta de 65°C.	Temperatura interna de la herramienta de 150°C.	La medición no es en tiempo real.
Rango de presión hasta de 15,000 psi.			Rango de presión hasta de 5000 psi.
Temperatura máxima de 343°C.		Temperatura máxima de 350°C por 4 horas.	
	No hay respaldo de información.	Respaldo de 3 Chips de memoria.	
	No se obtienen datos electrónicos de velocidades de registro, solo visual.	Obtención de datos electrónicos de velocidades de registro.	

Tabla 3. Ventajas-desventajas técnicas

En la Tabla 4 se comparan algunas ventajas y desventajas entre ambos equipos, desde el punto de vista operativo de campo. El registrador de memoria electrónico K10 parece presentar más ventajas que la sonda electrónica Hot Hole.

Sonda Electrónica PTS Hot Hole		Registrador electrónico PTS K10	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Adquisición de datos en tiempo real.	Utilización de equipo pesado de apoyo para su instalación.	No es necesario equipo pesado para las maniobras.	Debe asegurarse la batería, de lo contrario no se obtiene información.
	Sonda demasiado pesada y complicada operación.	Equipo ligero, de fácil manejo y operación en campo.	
	Apoyo de personal adicional de campo para operación y transporte de grúa.		Debe asegurarse de colocar correctamente el C-ring para evitar la intrusión de fluidos calientes a la parte electrónica.
	Tiempos de registro largos.	Tiempos de registro más cortos.	
	No se puede controlar totalmente la velocidad del registro.	Se despliegan con la caja de profundidad las velocidades del registro para un mejor control en campo de cada corrida.	

Tabla 4. Ventajas-desventajas operativas de ambos equipos.



Por otro lado, la Figura 8 compara los resultados de un perfilado del pozo Az-48 realizado en el año 2000 con la sonda electrónica PTS Hot Hole (izquierda), con los de otro perfilado, realizado en 2012 en el pozo Az-14D con el Registrador Electrónico PTS K10 (derecha). El perfilado del pozo Az-48 incluye los registros de presión, temperatura y flujo (spinner), mientras que el del pozo Az-14D se incluye sólo el registro de flujo con el spinner.

Aunque tomados con equipos distintos, los dos perfiles mostrados en la Figura 8 permiten identificar claramente zonas de aporte y comparar con los intervalos interpretados a partir de los perfiles de temperatura tomados previamente.

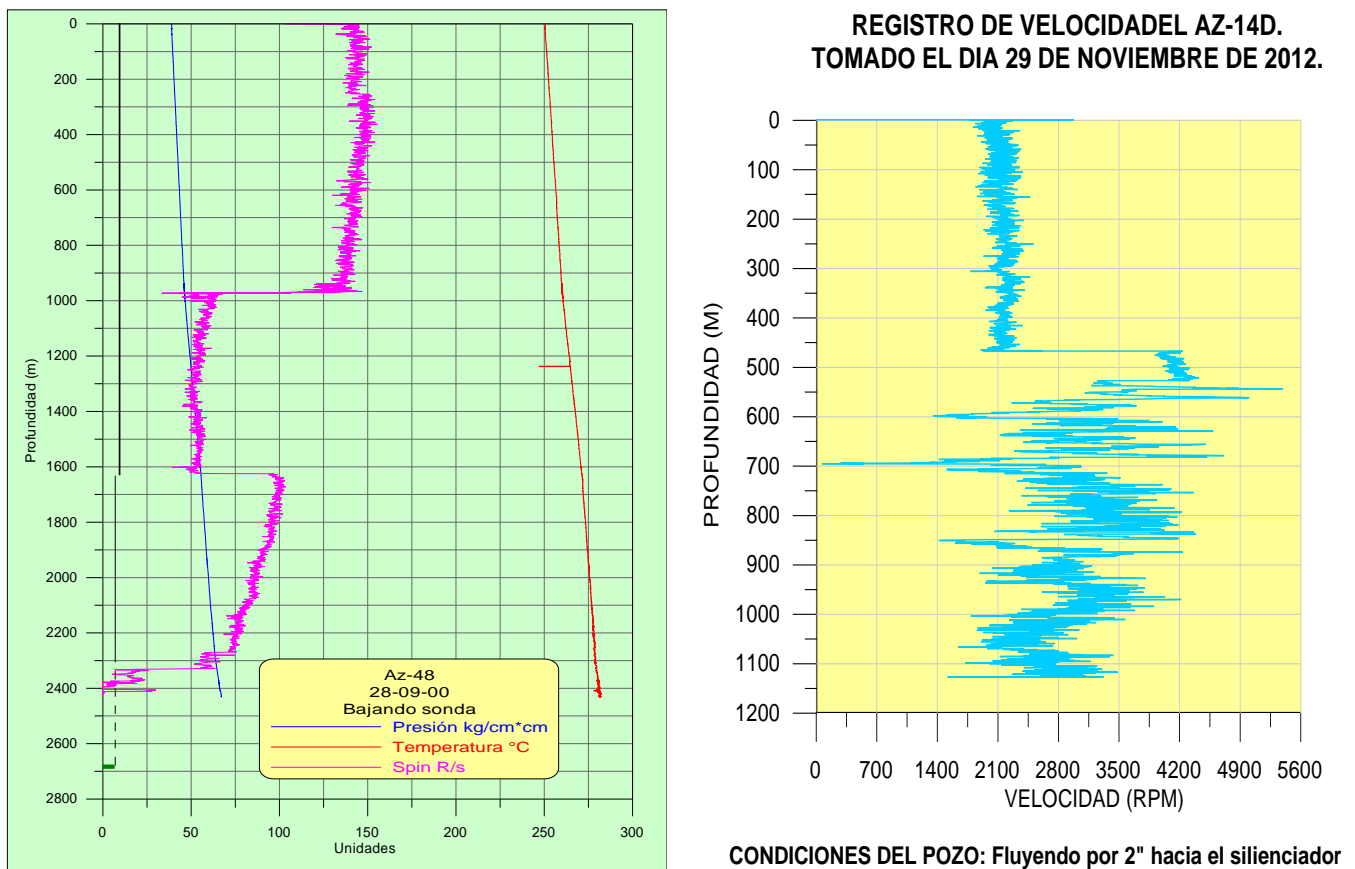


Fig. 8. Perfilado del pozo Az-48 con la sonda PTS Hot Hole (izquierda), y del pozo Az-14D con el registrador PTS K10 (derecha).

## 7. Conclusiones

De acuerdo con la experiencia obtenida en el perfilado de pozos del campo de Los Azufres, empleando los dos equipos descritos, se concluye lo siguiente:

El registrador electrónico K10 PTS permite optimizar tiempos en la operación, medición, maniobra y mayor confiabilidad en los datos medidos, además de que es un equipo de nueva tecnología en cuanto a materiales, fabricación y software.

El registrador electrónico K10 PTS cuenta con rangos mayores en la temperatura interna o temperatura de operación que la sonda electrónica Hot Hole, lo que permite su utilización en campo con mayor seguridad y con un menor riesgo de daño a las partes electrónicas del equipo.

Una de las ventajas de que los datos sean observados en tiempo real es que es posible detectar una falta de respuesta en los sensores o en el equipo en general y de esta manera terminar con el registro. Esta es una desventaja del K10 PTS, ya que las anomalías de medición sólo pueden detectarse hasta el término del registro.

El avance de la tecnología en las herramientas utilizadas en la geotermia no sólo permite un conocimiento más detallado de los pozos, sino que también permite obtener información necesaria para la toma de decisiones.

### **Bibliografía consultada**

Kuster, 2012. *K10 HT EMR Geothermal Instrument Operation & Service Manual*. Kuster Company, Long Beach, California.

Kuster 2011. *Subsurface instruments manual*. Kuster Company, Long Beach, California.

Hot Hole, 1997. *Hot Hole Instruments User's Manual*. Hot Hole, Los Alamos, New Mexico.