

## **TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA EN SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA**

**Alfonso MALDONADO ZAMORA\***

(\*) Dr. Ingeniero de Minas. Catedrático del Departamento de Ingeniería Geológica.  
Universidad Politécnica de Madrid.

### **RESUMEN**

La testificación geofísica para sondeos de agua es una técnica que se viene utilizando en España desde la década de los setenta. Aunque hoy en día, se siguen empleando algunos de los parámetros que se utilizaban en esa década (gamma natural y potencial espontáneo), la incorporación de otros, ya de forma sistemática o especial, hacen que actualmente lleguen a utilizarse más de 12 parámetros, según la problemática planteada.

En el presente trabajo se sintetizan las aplicaciones más importantes de las diagráfías en Hidrogeología, y se plantean ejemplos de aplicación de las diagráfías convencionales, de las especiales (neutrón-neutrón, sónicas y de temperatura) y de las utilizadas para reconocimiento y mantenimiento de sondeos de agua (ROVT, RF y RQ-F).

### **DIAGRAFÍAS GEOFÍSICAS QUE SE UTILIZAN EN HIDROGEOLOGÍA**

Las diagráfías que se utilizan en Hidrogeología pueden clasificarse en tres grupos: testificación convencional, testificación especial y testificaciones para reconocimiento y mantenimiento de los sondeos. Las principales aplicaciones de cada grupo pueden verse en los *cuadros 1, 2 y 3*.

#### **Testificación convencional**

Las técnicas más importantes son:

- \* Gamma natural (GR).
- \* Potencial espontáneo (PE).

- \* Resistividad normal, corta y larga (RNC, RNL).
- \* Resistividad lateral (RL).
- \* Conductividad de fluido (C).
- \* Verticalidad yacimiento del sondeo (V y A).

### Testificación especial

Las técnicas más importantes son:

- \* Sónico (L.S).

REGISTRO		INFORMACIÓN QUE PUEDE OBTENERSE
Conductividad		- Conductividad de los diferentes niveles de un acuífero.
Resistividad	Normal corta y Normal larga	- Límites de capas litológicas. - Resistividades de zona invadida. - Resistividades de zona virgen. - Factor de formación. - Conductividad del agua de la formación
	Resistividad late-	- Resistividad de las formaciones.
Potencial espontá-		- Conductividad del agua de la formación.
Rayos gamma		- Límite de capas litológicas. - Contenido de arcillas. - Control de cementaciones.
Verticalidad y aci-		- Ángulo de capas litológicas.

*Cuadro 1. Aplicaciones de diagrfias convencionales en Hidrogeología.*

REGISTRO	INFORMACIÓN QUE PUEDE OBTENERSE
Neutrón-Neutrón	- Porosidad neutrónica.
Sónico	- Fracturación. - Litologías.
Temperatura	- Identificación de acuíferos. - Aportes de aguas de diferentes temperaturas. - Control de cementaciones. - Gradiente geotérmico.

*Cuadro 2. Aplicaciones de diagrfias especiales en Hidrogeología.*

REGISTRO	INFORMACIÓN QUE PUEDE OBTENERSE
ROVT	- Control de ubicación de filtros. - Valoración del estado de un sondeo. - Control del envejecimiento.
Mediciones de flujo	- Flujos parciales de agua en acuíferos multicapa.
RQ-F	- Registros de pH, Eh, O <sub>2</sub> ... - Valoración y prevención de corrosiones e incrustaciones.

*Cuadro 3. Aplicaciones al reconocimiento y mantenimiento de sondeos.*

- \* Neutrón-Neutrón (N-N).
- \* Temperatura (T).

### **Testificación para el reconocimiento y mantenimiento**

Las técnicas más importantes son:

- \* Registros ópticos de video-televisión (ROVT).
- \* Registros de medida de flujo de agua (RF).
- \* Registros químico-físicos (RQ-F).

### **EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS DIAGRAFÍAS CONVENCIONALES**

Siguiendo los criterios anteriormente mencionados, hemos seleccionado un grupo de diagrafías, algunas de ellas realizadas en el acuífero de Madrid. En la *figura 1* se representa una sección vertical del tránsito de las facies detríticas a evaporíticas del Terciario de Madrid, interpolada mediante tres sondeos mecánicos. La necesidad de testificar para ubicar la situación exacta de los niveles detríticos, así como el quimismo del agua de esos niveles es de vital importancia para establecer el valor potencial del sondeo.

En la *figura 2* se exponen las diagrafías convencionales de un sondeo realizado en el acuífero de Madrid (Majadahonda), con los registros hasta los 450 m de: GN, PE, RNC, RNL, NL. Puede observarse cómo a partir de los 275 m de profundidad, en el Log de PS, las deflexiones de la curva van aumentando hacia la izquierda, como consecuencia del empeoramiento del quimismo del acuífero con la profundidad. El aumento de niveles detríticos viene también señalado por el aumento de la frecuencia del ritmo de los niveles arenosos a partir de los 275 m. El GN no muestra grandes diferencias a lo largo del sondeo, aunque se observa una ligera disminución con la profundidad. La resistividad experimenta un ligero aumento con la profundidad.

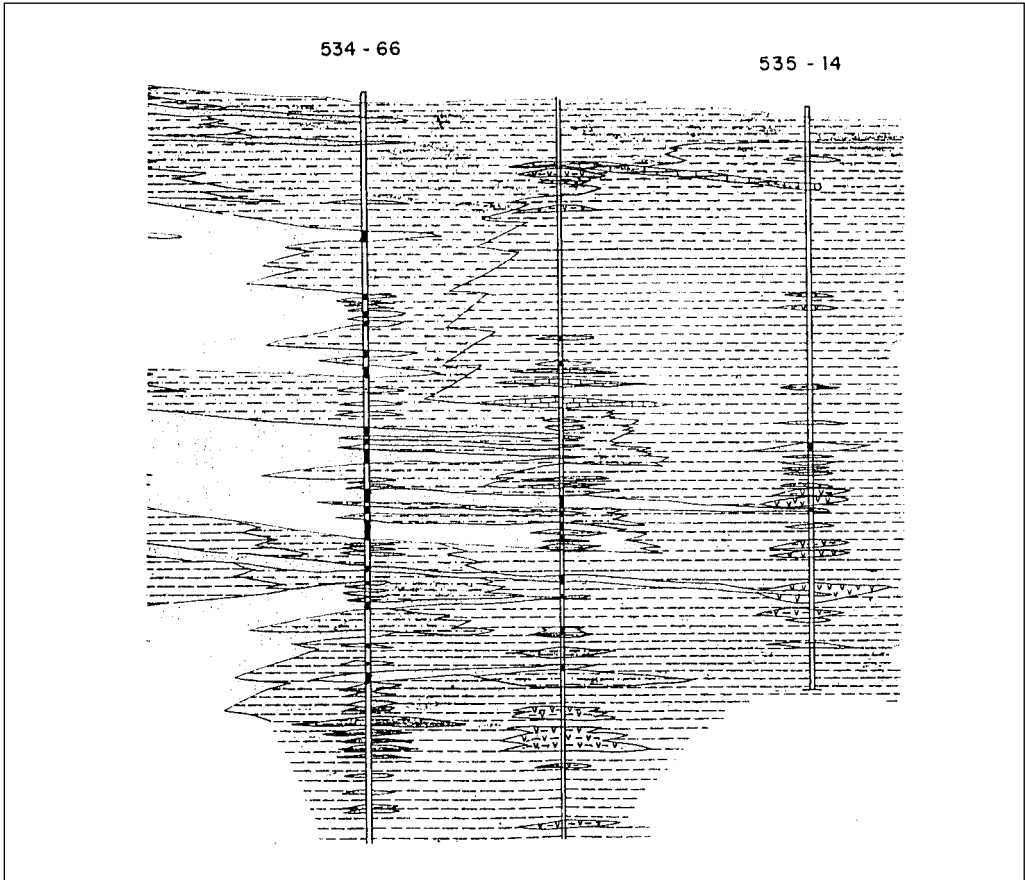


Figura 1. Transición de las facies detríticas a evaporíticas en el acuífero de Madrid (Cortesía de la Cátedra de Geofísica Aplicada de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

En la *figura 3* se representa un Log del acuífero de Madrid, en el cual se han delimitado las principales formaciones detríticas. Obsérvese cómo, a partir de los 80 metros, aumentan los contenidos de materiales detríticos. En este caso, la diagráfia de N-N se utilizó para el cálculo de la porosidad neutrónica.

En la *figura 4* se exponen los 175 m primeros del sondeo Retamares II en Boadilla, dentro del acuífero de Madrid. A la derecha se observa la situación de la ubicación de los diferentes filtros seleccionados entre 50 y 125 m. La situación de los filtros, así como el quimismo del agua son las principales misiones que tiene que resolver la testificación geofísica. Obsérvese como las diagráfias de RL, RNC, RNL, a partir de los 122 m, disminuyen sus valores de resistividad, entrándose en una zona fundamentalmente arcillosa.

Realmente, todo informe de testificación para hidrogeología debe de terminar

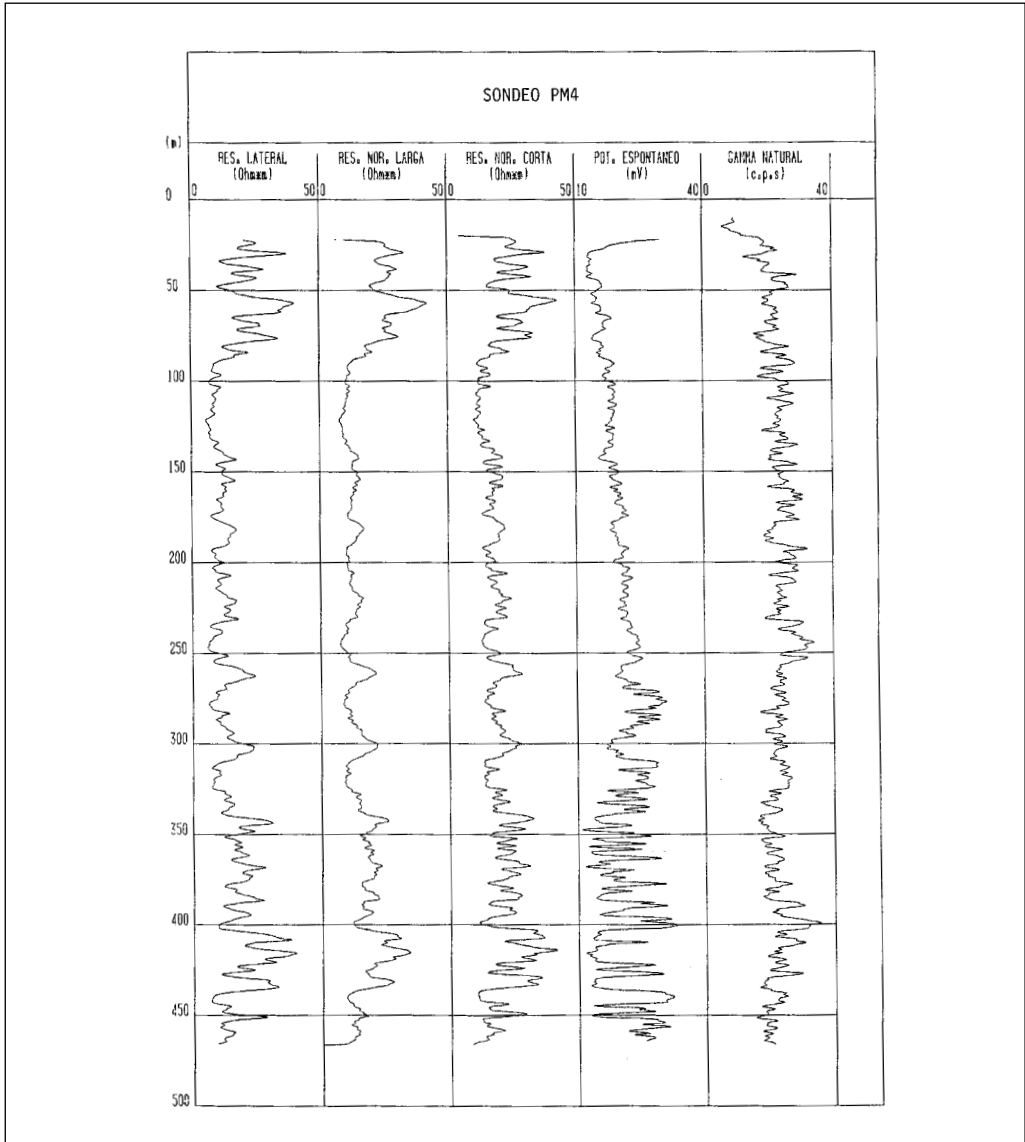


Figura 2. Diagráfias convencionales del sondeo PM4 (Cortesía del Canal de Isabel II).

proporcionando la situación de los intervalos arenosos, espesor, litología y conductividad de agua de formación a 25°C (en este caso en microsiemens por centímetro).

En la figura 5 se exponen los resultados de los principales niveles arenosos del sondeo de S. Teresa, en la zona de Retamares, del acuífero de Madrid. Obsérvese

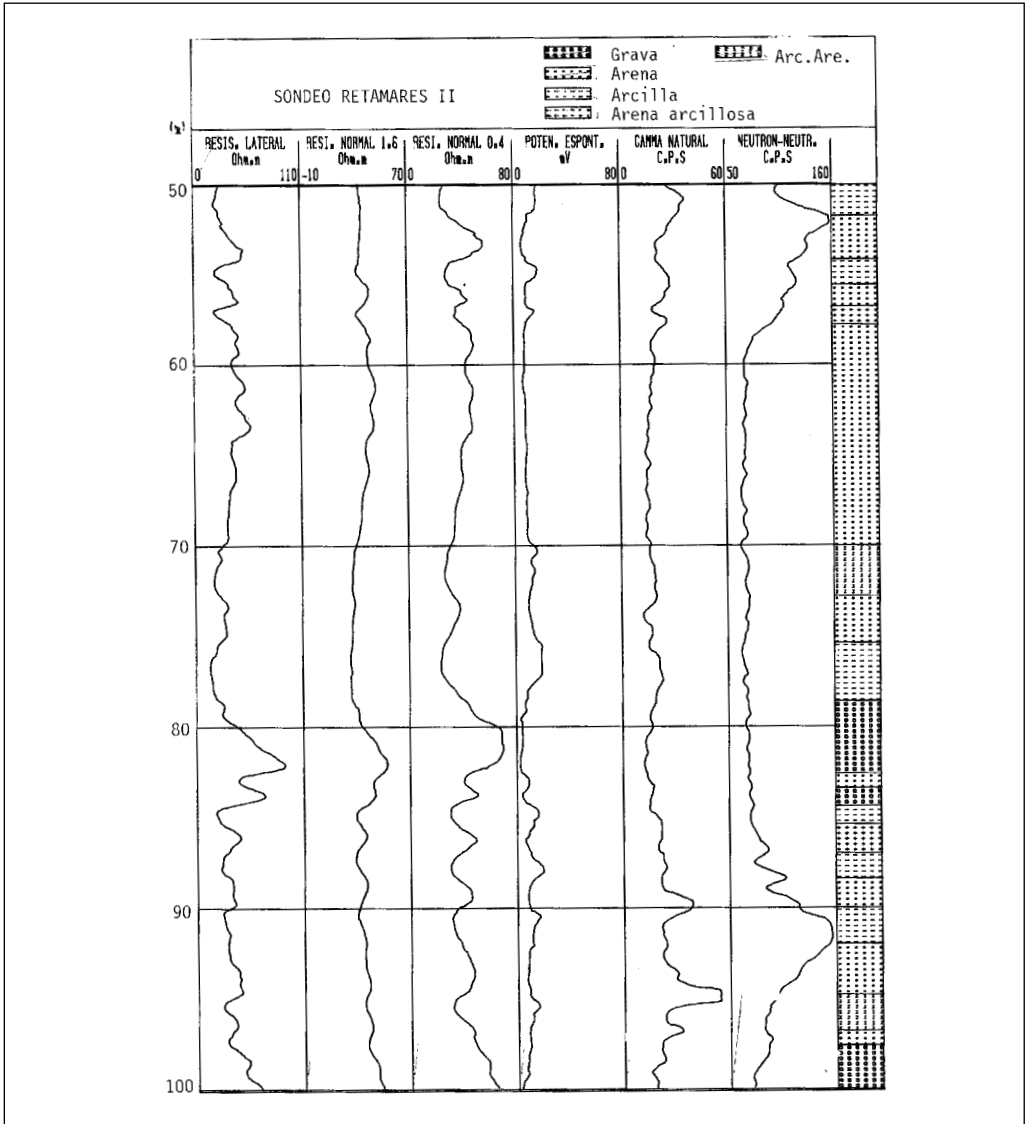


Figura 3. Diagramas del sondeo de Retamares II (Cortesía del Canal de Isabel II).

cómo se ha calculado el T.S.D. (total de sólidos disueltos) para cada intervalo, a partir de la conductividad. También se expresan los valores de la resistividad real de la formación, así como el cálculo de la porosidad, para los mismos intervalos que en el ejemplo anterior.

En sondeos profundos se aconseja realizar diagramas de verticalidad y acimut del pozo. Normalmente, las diagramas de verticalidad se expresan en grados o metros.

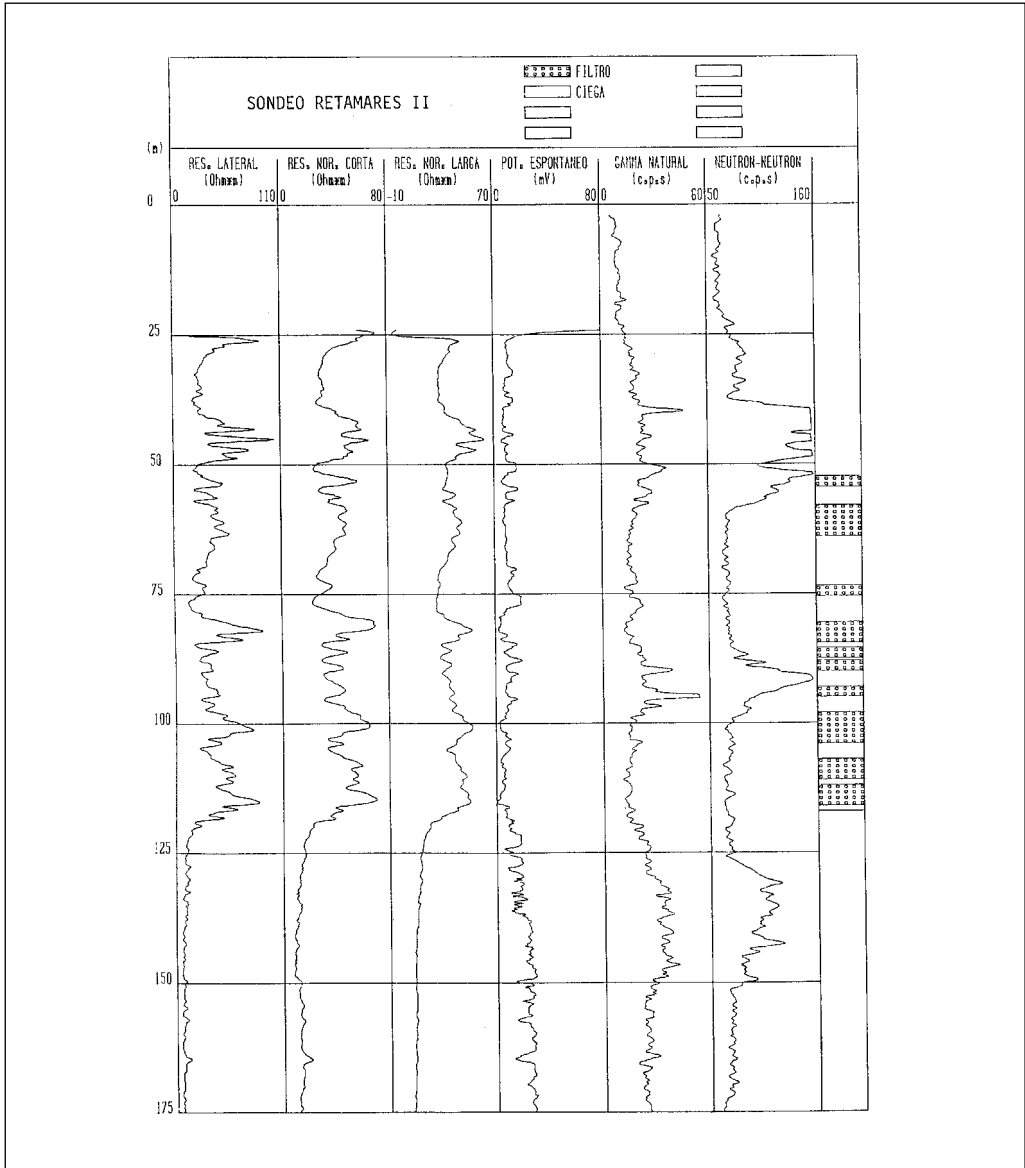


Figura 4. Diagrama de Retamares II (entre 0 y 175 m), con especificación de los filtros principales (Cortesía del Canal de Isabel II).

En la figura 6 puede verse la diagrama de verticalidad para un pozo de 400 m, con una desviación inferior a 1 m.

El acimut de un sondeo es la proyección sobre un plano horizontal de la trayec-

VALORES DE POROSIDAD DE LOS TRAMOS  
RECOMENDADOS PARA LA COLOCACION DE TUBERIA FILTRANTE

Sondeo: STA. TERESA	Fecha: 25/04/92
Localidad: RETAMARES	Provincia: MADRID

Nº	Intervalo (m)	Resistividad de la la formación (ohm.m)	Porosidad %
1	52.5 - 54.5	301.80	37.03
2	58.0 - 64.0	229.63	42.40
3	73.5 - 75.5	195.11	48.49
4	80.5 - 84.5	336.88	33.17
5	85.5 - 87.5	240.76	40.57
6	88.0 - 90.0	234.11	42.65
7	93.0 - 95.0	232.12	42.78
8	98.0 -104.0	288.72	35.17
9	107.0 -111.0	275.38	37.29
10	112.0 -116.0	292.72	33.02
11	117.0 -119.0	168.48	47.62

ZONAS RECOMENDADAS PARA COLOCACION DE TUBERIA FILTRANTE Y  
CARACTERISTICAS DEL AGUA DE FORMACION

SONDEO	STA. TERESA	FECHA	25/04/92		
LOCALIDAD	RETAMARES	PROVINCIA	MADRID		
INTERVALO (m)	ESPESOR (m)	CONDUC-TIVIDAD (umho/cm) (25°C)	TSD (ppm)	LITOLOGIA	
1	52.5- 54.5	2.0	180	139.25	ARENA
2	58.0- 64.0	6.0	180	139.25	ARENA
3	73.5- 75.5	2.0	162	125.35	ARENA
4	80.5- 84.5	4.0	200	155.02	ARENA GRUESA
5	85.5- 87.5	2.0	187	144.40	ARENA ARCILLOSA
6	88.0- 90.0	2.0	174	134.46	ARENA
7	93.0- 95.0	2.0	174	134.46	ARENA
8	98.0-104.0	6.0	207	160.44	ARENA GRUESA
9	107.0-111.0	4.0	193	149.52	ARENA
10	112.0-116.0	4.0	231	178.66	ARENA GRUESA
11	117.0-119.0	2.0	193	149.52	ARENA

OBSERVACIONES :

- Total de sólidos disueltos (TSD), calculado a partir del tipo de iones predominante en la zona
- Profundidades referidas al nivel del suelo en el sondeo
- (\*) Zonas óptimas

Figura 5. Zonas recomendadas para la colocacion de la tubería filtrante, y características del agua de formación en Retamares (Cortesía del Canal de Isabel II).



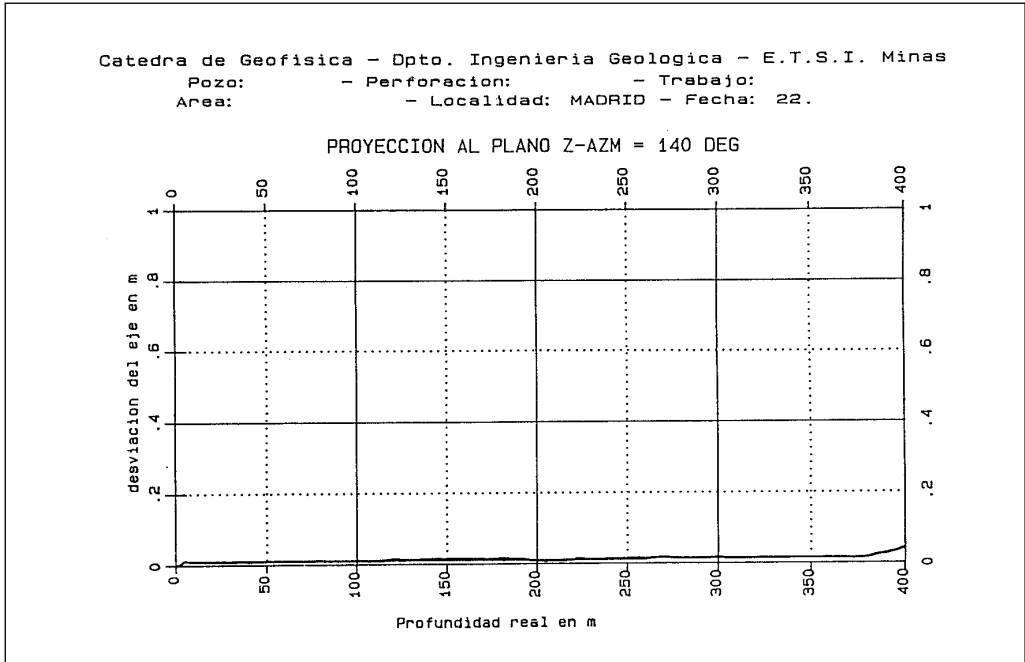


Figura 6. Verticalidad de un pozo de 400 m de profundidad  
 (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

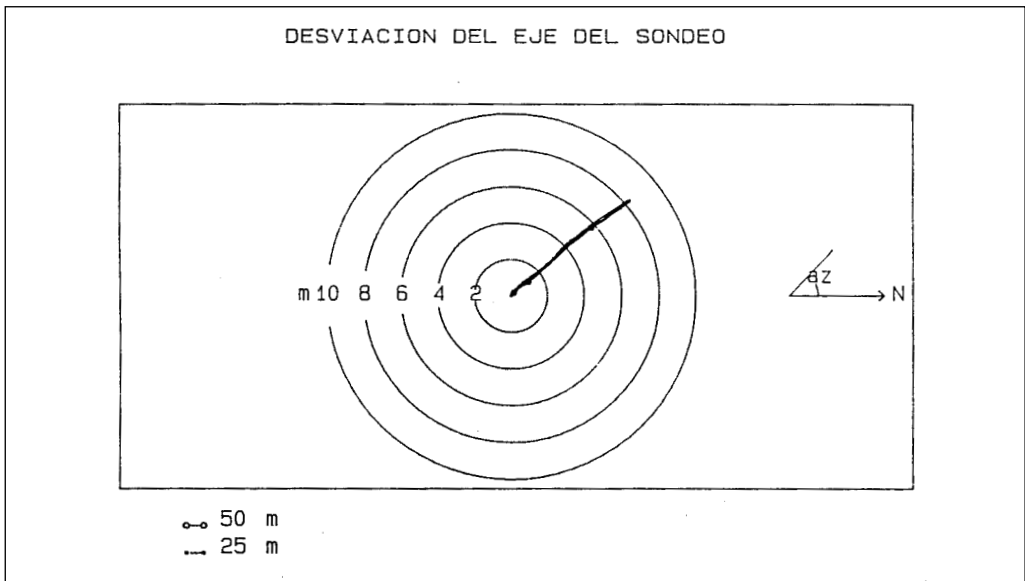


Figura 7. Acimut de un sondeo (Cortesía de la Cátedra  
 de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

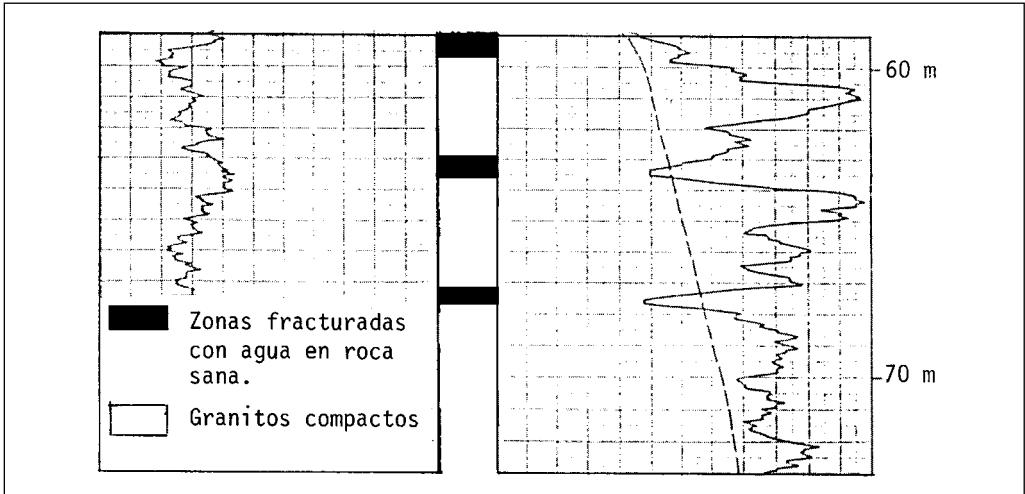


Figura 8. Log de neutrones y térmico (derecha) en granitos compactos y zonas fracturadas graníticas (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

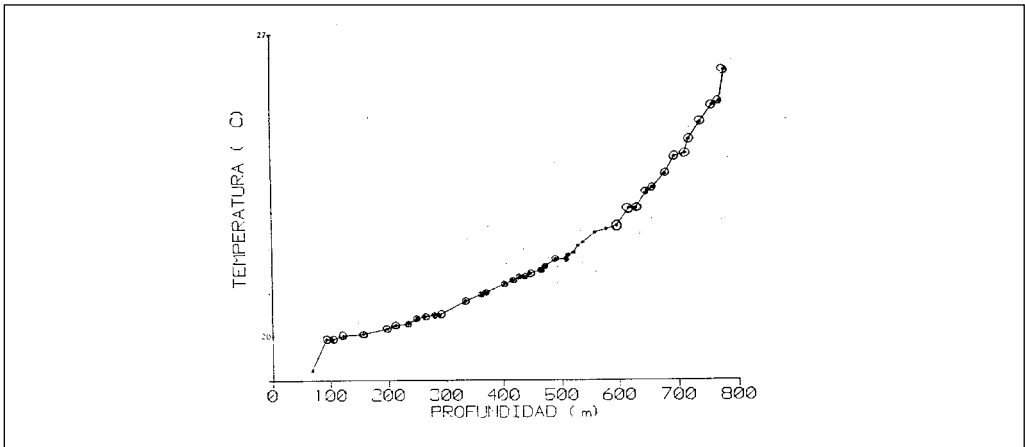


Figura 9. Log térmico realizado en el acuífero de Madrid (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

toria del sondeo. Lógicamente si el sondeo es completamente vertical, su proyección es un punto. En la figura 7, se presenta el acimut de un sondeo donde se puede deducir que la perforación se ha desviado hacia el NE.

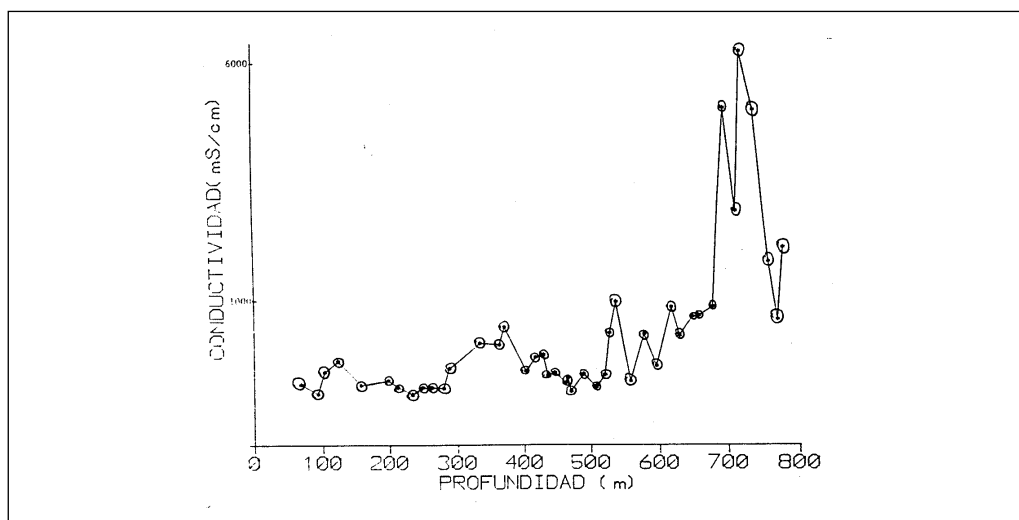
### EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS DIAGRAFÍAS ESPECIALES

Como diagráfias especiales entendemos aquellos registros que no se realizan de forma sistemática en Hidrogeología, solamente cuando se aconseja su utilización.

Las diagrafas sónicas son muy útiles, en acuíferos carbonatados y en rocas ígneas o metamórficas, para la ubicación de zonas de fracturas, siempre como es lógico que sea acompañada de otras diagrafas. En zonas de materiales sueltos, lógicamente, no son útiles.

Las diagrafas neutrónicas se utilizan, principalmente, para diferenciar las fracturas con agua de las fracturas sin agua. Igual que en las diagrafas sónicas, son las formaciones ígneas y metamórficas donde más se utilizan estas diagrafas. En la *figura 8* se exponen los resultados de una diagrafía de neutrones (curva continua de la derecha). Los mínimos de neutrones van asociados a zonas de fracturas ricas en agua. Este sondeo es un sondeo en granito con 100 m de profundidad.

Los Log térmicos son muy útiles en Hidrogeología y no se utilizan de forma sis-



*Figura 10. Valores de conductividad obtenidos a través de los valores de la diagrafía del PS en el mismo sondeo que el Log térmico anterior.*

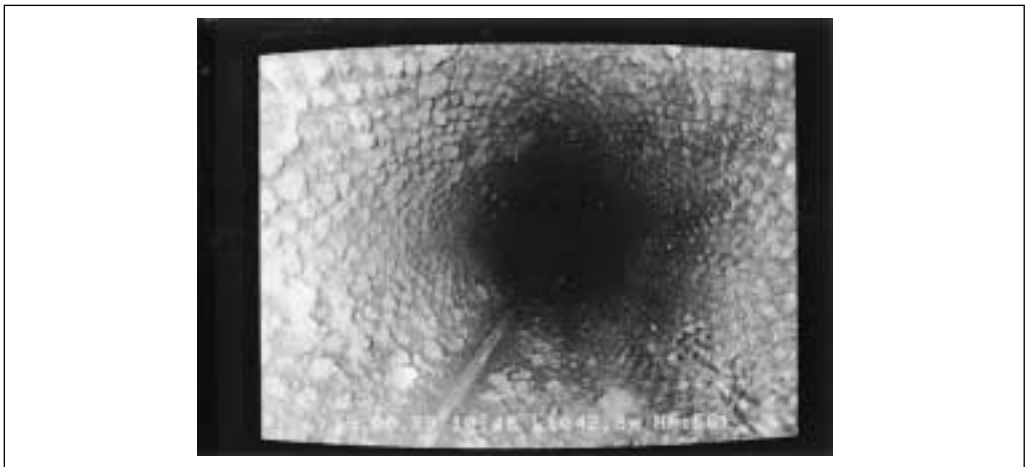
temática, cuando realmente la información que proporcionan es muy importante. El ejemplo de la *figura 9* corresponde a un sondeo realizado en el detrítico de la Cuenca de Madrid hasta 770 m de profundidad. El quimismo del agua que se obtenía en el sondeo era superior a 6000 m/cm. La evolución de la diagrafía térmica pone de manifiesto que hay 2 acuíferos completamente diferentes. La separación de estos acuíferos se produce sobre la profundidad de 600 m, como pone de manifiesto la existencia de dos gradientes térmicos completamente diferentes (de 0 a 600 m aproximadamente y de 600 m en adelante) que se pueden observar en la diagrafía de la *figura 10*.

En la *figura 10* se exponen los valores de la conductividad del agua de los diferentes niveles del sondeo, calculados a través de la diagrafía de PS. Puede obser-

varse cómo a partir de 675 m aumentan los valores de conductividad del agua, lo cual confirma los valores del Log térmico de la figura anterior.

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LAS DIAGRAFÍAS PARA RECONOCIMIENTO Y MANTENIMIENTO DE SONDEOS DE AGUA

Respecto a los ROVT no vamos a detallar la sistemática ni los ejemplos de aplicación, pues en otro trabajo se van a exponer con detalle los resultados de esta tecnología. No obstante, en la *figura 11* se expone una fotografía del interior de un sondeo mediante cámara axial-radial. La fotografía pone de manifiesto el desarrollo de costras en forma de bulbo como consecuencia del sistema de explotación del son-



*Figura 11. Fotografía obtenida con cámara axial radial a 42,8 m de profundidad en la Cuenca del Duero. (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).*

deo.

Respecto a los registros de flujo de agua (RF), tampoco nos extenderemos, pues también a continuación se van a desarrollar otros trabajos expresamente dedicados a este tema. No obstante, la importancia de este registro es básica, no solamente para conocer la hidrodinámica del acuífero, sino también para controlar la evolución del envejecimiento del sondeo. Hoy en día esta diagráfia permite evaluar el proceso de envejecimiento de cada filtro. En la *figura 12* se exponen los resultados de un RF en el acuífero de Madrid, con caudales de bombeo de 70 l/s y nivel estático de 157 m y dinámico de 205 m (la reducción del dibujo resta carácter pedagógico al ejemplo).

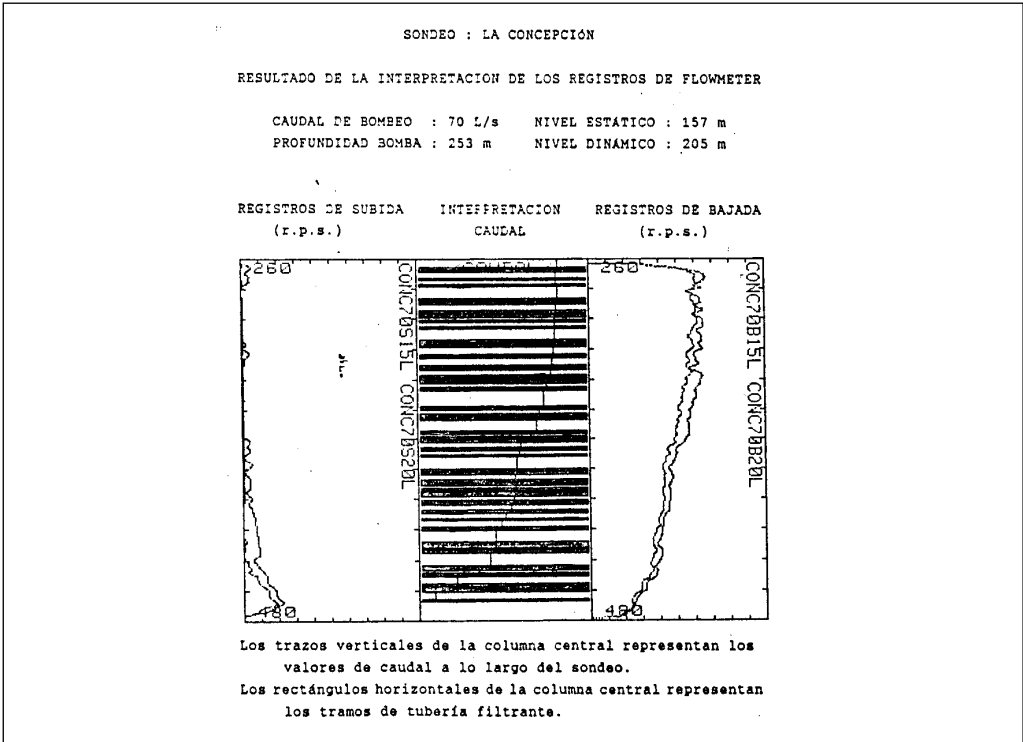


Figura 12. Medidas de una diagráfia de flujo de agua en el acuífero de Madrid (Cortesía del Canal de Isabel II).

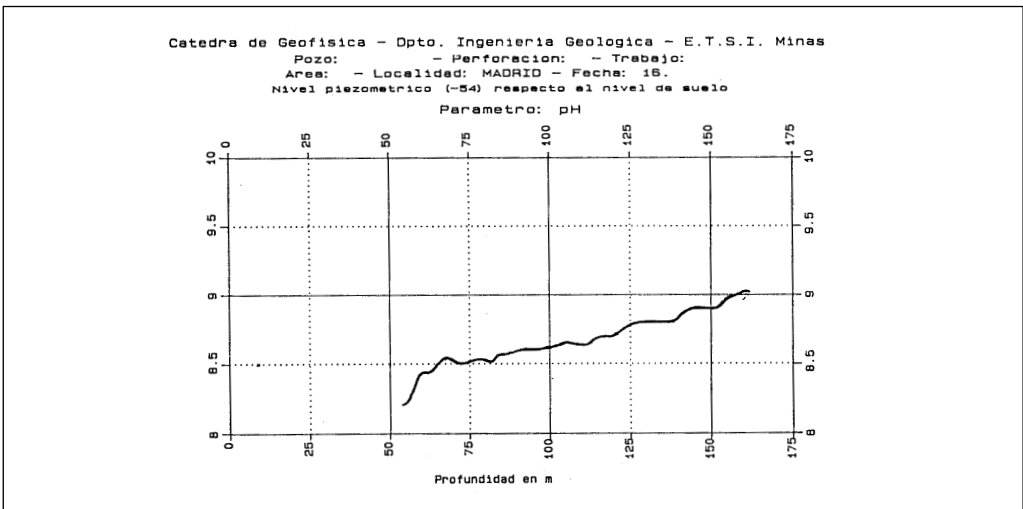


Figura 13. Registro químico-físico de pH en un sondeo del acuífero de Madrid (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. de Minas de Madrid).

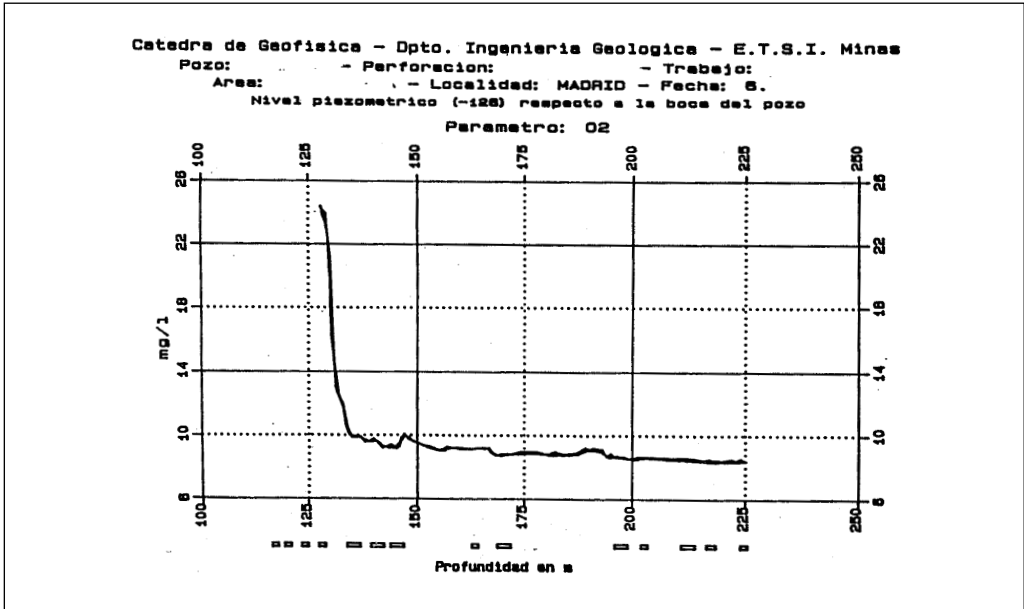


Figura 14. Diagrama del contenido de  $O_2$  en un sondeo del acuífero de Madrid (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de la E.T.S.I. Minas de Madrid).

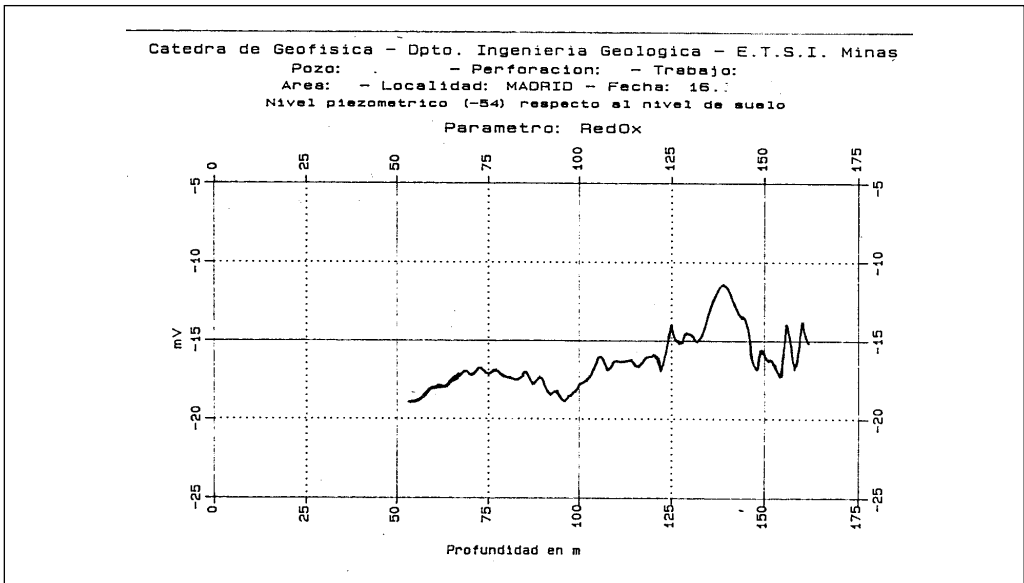


Figura 15. Diagrama de E-H en un sondeo del acuífero de Madrid (Cortesía de la Cátedra de Geofísica de E.T.S.I. de Minas de Madrid).

Los registros químico-físicos todavía no se utilizan industrialmente, pero presentan gran futuro para predecir el comportamiento y evolución del envejecimiento de un sondeo, tanto desde el punto de vista biótico, como por las conclusiones abióticas que pueden obtenerse. La Cátedra de Geofísica ha investigado este tema con detenimiento, y hoy en día podemos predecir y valorar las técnicas de regeneración con carácter científico y tecnológico. En la *figura 13* se expone la evolución de un registro de pH con carácter convencional (el pH tiene que aumentar con la profundidad).

En la *figura 14* tenemos la variación de  $O_2$  con la profundidad en un sondeo. Los altos valores de oxígeno, en los primeros 10 metros del sondeo, son consecuencia de la existencia de un nivel de agua colgado, que al caer bate la superficie del agua, produciendo un enriquecimiento de  $O_2$  en los primeros metros. Observese cómo el contenido de oxígeno va disminuyendo con la profundidad.

En la *figura 15* se exponen los resultados de una diagrafía de E-H (Oxidación reducción) donde puede verse cómo evolucionan los valores en mV del E-H. Esta diagrafía es importante para valorar los fenómenos de corrosión y de la biota que puede desarrollarse en un sondeo.

## CONCLUSIONES

Como conclusiones señalamos, fundamentalmente, dos puntos:

- 1) La testificación convencional es una necesidad tecnológica de vital importancia para poder tener un documento científico objetivo del sondeo, y hay que hacer una llamada a la Administración para que sea una exigencia por parte de ella en el futuro.
- 2) Los registros de mantenimiento: ROVT, RF, RQ-F, que han comenzado en esta década, constituyen los documentos más serios para la realización de la regeneración de los sondeos de captación de agua con criterios tecnológicos.

## BIBLIOGRAFÍA

CÁTEDRA DE GEOFÍSICA. Departamento de Ingeniería Geológica de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid. Informes internos.

CANAL DE ISABEL II. Testificaciones geofísicas.

## MEDICIÓN DE FLUJOS EN SONDEOS DE CAPTACIÓN DE AGUA

**Enrique ARACIL ÁVILA\***

(\*) Compañía General de Sondeos, S.A.

### RESUMEN

Como respuesta al comportamiento de los materiales atravesados por la perforación suelen existir flujos verticales de agua en los sondeos, cuya detección y cuantificación son importantes para conocer ese comportamiento.

En la ponencia se examinan los posibles objetivos de la medición de estos flujos, así como los métodos de medición y principios en que se basan, con especial atención a la sonda *flowmeter* que es la de uso más generalizado, de la que se describen su manejo, campos de aplicación y resultados obtenibles.

### INTRODUCCIÓN

Los sondeos atraviesan materiales muy diversos y con texturas diferentes. En términos generales, puede tratarse de materiales competentes, como sería el caso de las calizas o los granitos, o materiales detríticos no cementados, como, por ejemplo, arenas o gravas.

En los primeros la presencia de agua se restringe, casi exclusivamente, a la existente y circulante por las posibles fracturas, alteraciones o karstificaciones. En los segundos el agua circula por los poros interconectados. Tanto en uno como en otro caso la permeabilidad es variable.

Cuando la permeabilidad es baja, tanto los flujos naturales como los provocados mediante extracción por bombeo son, necesariamente, de escasa importancia por lo que deben medirse con una herramienta y una metodología diferentes a las empleadas en el caso de medir los flujos en materiales de permeabilidad alta.

Es importante saber que hay flujos, entre otros motivos, para conocer cuáles son



las capas productivas de un sondeo, en qué profundidades están y cuantificar su productividad. Para saber, no sólo qué capas de un sondeo son las que aportan agua al mismo, sino también, cuáles son las que toman agua de él. Para establecer una relación entre la productividad y la salinidad de las diferentes capas.

Como resumen de lo expuesto se puede decir, por un lado, que suelen existir flujos en los sondeos, como respuesta al comportamiento hidrogeológico de los materiales atravesados y, por otro lado, que su detección y cuantificación son importantes para conocer este comportamiento.

## **OBJETIVO**

El objetivo de la medición de flujos verticales en los sondeos es, en definitiva, localizar las capas productivas atravesadas y calcular su porcentaje de aporte al sondeo.

Para alcanzar este objetivo se emplea una metodología específica de la permeabilidad de los materiales atravesados por el sondeo: si los caudales esperados son pequeños y/o no se va a provocar un flujo artificial por bombeo, los microflujos naturales requieren del empleo de la sonda *Heat-Pulse Flowmeter* o de otras técnicas de medición, como el empleo de trazadores químicos o radiactivos, para poder detectarse.

Si los flujos naturales (sondeo surgente) son importantes o se provoca un flujo artificial por bombeo, la herramienta que se emplea es la sonda *flowmeter* que, por ser la de uso más generalizado, es de la que se va a describir su metodología con más detalle en este trabajo.

## **PRINCIPIO DE MEDIDA**

Cuando los flujos son pequeños (flujos de 1 a 100 mm/s) se emplea, como ya se ha comentado, la sonda *Heat-Pulse flowmeter* o se sigue el método de trazadores químicos o radiactivos.

### **Heat-pulse Flowmeter**

La sonda de pulso de calor (*Heat-pulse Flowmeter*) se va deteniendo a diferentes cotas del sondeo y, una vez parada, realiza la medición. Dispone de una resistencia eléctrica que calienta el agua y mide el tiempo en que la onda de calor recorre la distancia entre ésta y los sensores (termistores), situados a una distancia determinada (generalmente 5 cm) y localizados por encima y por debajo de la resistencia (*figura 1*).

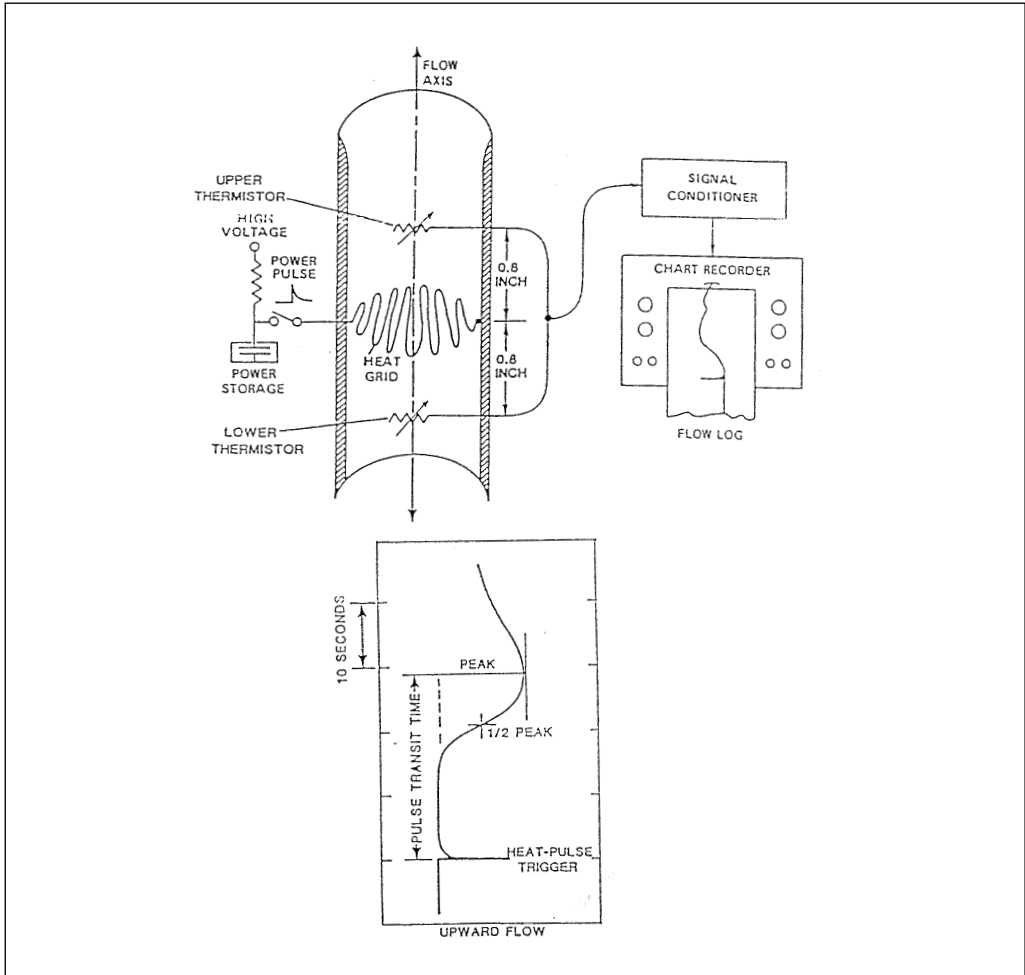


Figura 1. Esquema de una sonda Heat-pulse Flowmeter.

Hay unas aberturas en la sonda que permiten el paso del agua a su través. Una serie de pulsos de corriente calientan la resistencia y, consecuentemente, el agua próxima. El agua calentada fluye hacia los termistores (sensores), donde es detectada. El tiempo transcurrido en alcanzar el detector da una indicación de la tasa de flujo. Dependiendo de la dirección del flujo (ascendente o descendente), será un termistor u otro el que lo detecte primero. Si el flujo es ascendente, el termistor superior será el primero en detectarlo y si, por el contrario, el flujo es descendente, la detección del agua calentada se iniciará en el termistor inferior.

## Empleo de trazadores

El empleo de trazadores es una técnica relativamente sencilla, pero que requiere el seguimiento riguroso de una sistemática. Se basa en introducir un trazador (químico o radiactivo) en un sondeo, y hacer varios registros simultáneos, separados entre sí por períodos concretos de tiempo, y analizar en ellos la evolución de las anomalías que detecten.

El registro que se realice depende de la sustancia introducida. Así, si se emplea un trazador químico (como, por ejemplo, el ClNa, considerado “próximo al trazador ideal” por Custodio y Llamas, 1976), se hacen los registros sucesivos de conductividad del agua. Si, por el contrario, la sustancia introducida como trazador es radiactiva (trazador radiactivo), los registros que se llevan a cabo, para control de la evolución de las anomalías, son de radiactividad natural.

En uno y otro caso la sustancia introducida provoca una anomalía en el primer registro realizado después de su introducción. Los sucesivos registros marcan una evolución de la posición de la anomalía, en función de los flujos (ascendentes, descendentes o inexistentes). Se hace la comparación entre todos estos registros, y con un registro realizado en el sondeo previamente a la introducción de la sustancia.

El análisis de los registros permitirá obtener información de la existencia o no de flujos dentro del sondeo, la identificación de las capas productivas que aportan agua al sondeo y las que reciben agua del mismo, el cálculo de la velocidad de flujo y de la permeabilidad de las capas.

La *figura 2* corresponde a un caso real en el que se pretendió determinar la existencia de flujos en un sondeo, perforado en materiales pérmicos discordantes sobre filitas del Carbonífero. Dada la baja permeabilidad, se empleó el método de trazadores salinos, para lo cual se introdujo una solución saturada en ClNa en el sondeo, tras registrar al sondeo en equilibrio (registro HL5-1).

Una vez introducida la solución salina se hicieron registros sucesivos (HL5-3, HL5-5, HL5-7, etc.), separados intervalos controlados de tiempo (más próximos al principio, 1 hora, y más distantes al final, 10 horas), y se compararon entre sí. Las anomalías producidas por la solución de ClNa experimentaron unos desplazamientos, consecuencia de la existencia de flujos verticales (flechas). La relación entre el desplazamiento en los registros y el tiempo entre ellos informó sobre la velocidad de los flujos. Al conocer el diámetro del sondeo (sección) se pudo estimar también el caudal.

## Flowmeter

Cuando se trata de medir flujos grandes, bien naturales (como sucede en son-

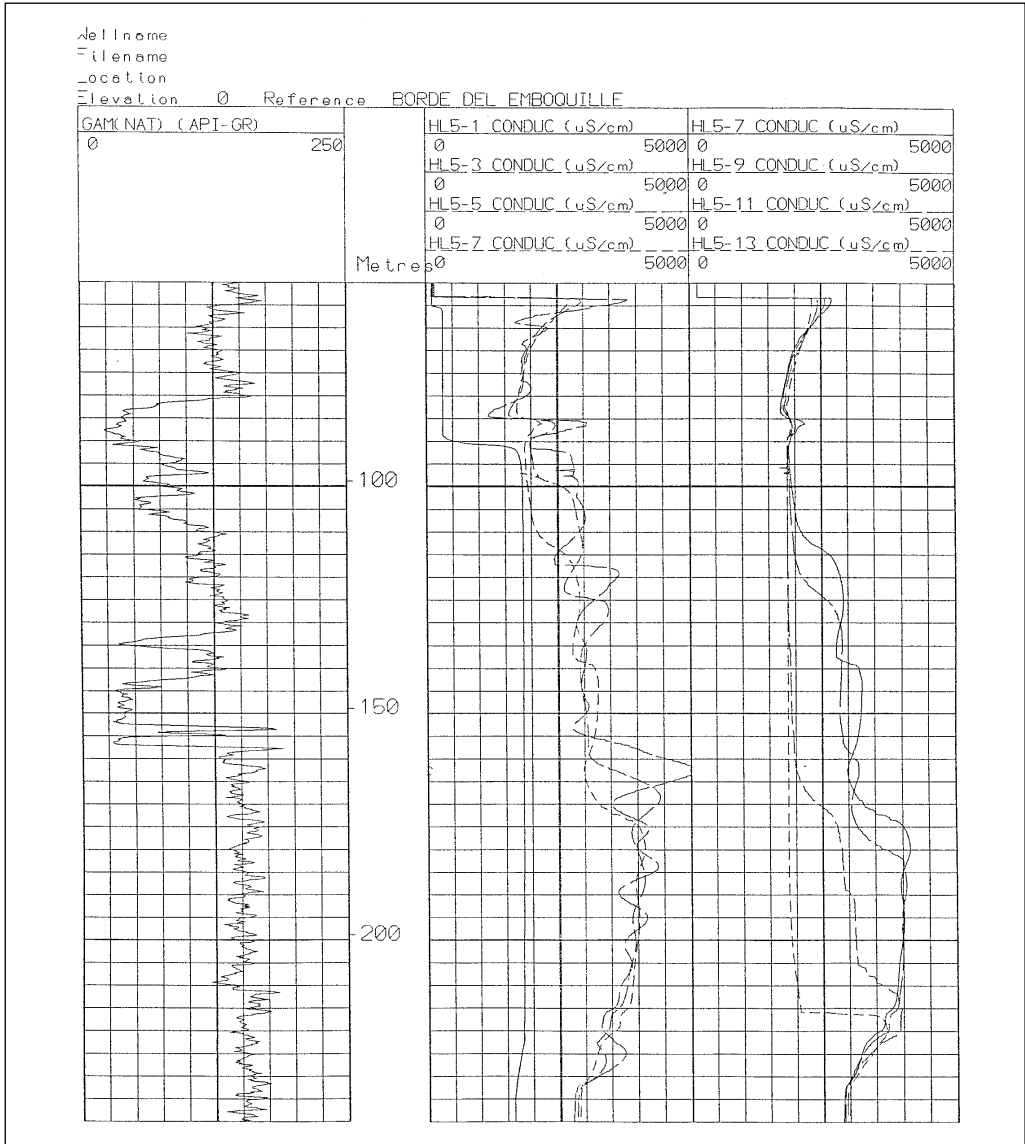


Figura 2. Determinación de flujos con trazador salino

deos surgentes de gran caudal) o bien artificiales (mediante bombeo con extracción de un caudal significativo), la herramienta que se emplea es la sonda *Flowmeter*.

El principio de medida, de esta sonda, es similar al de los molinetes empleados en los ríos, es decir, consta de una hélice muy sensible, que gira a una velocidad variable en función de la velocidad del flujo y del descenso o ascenso de la sonda

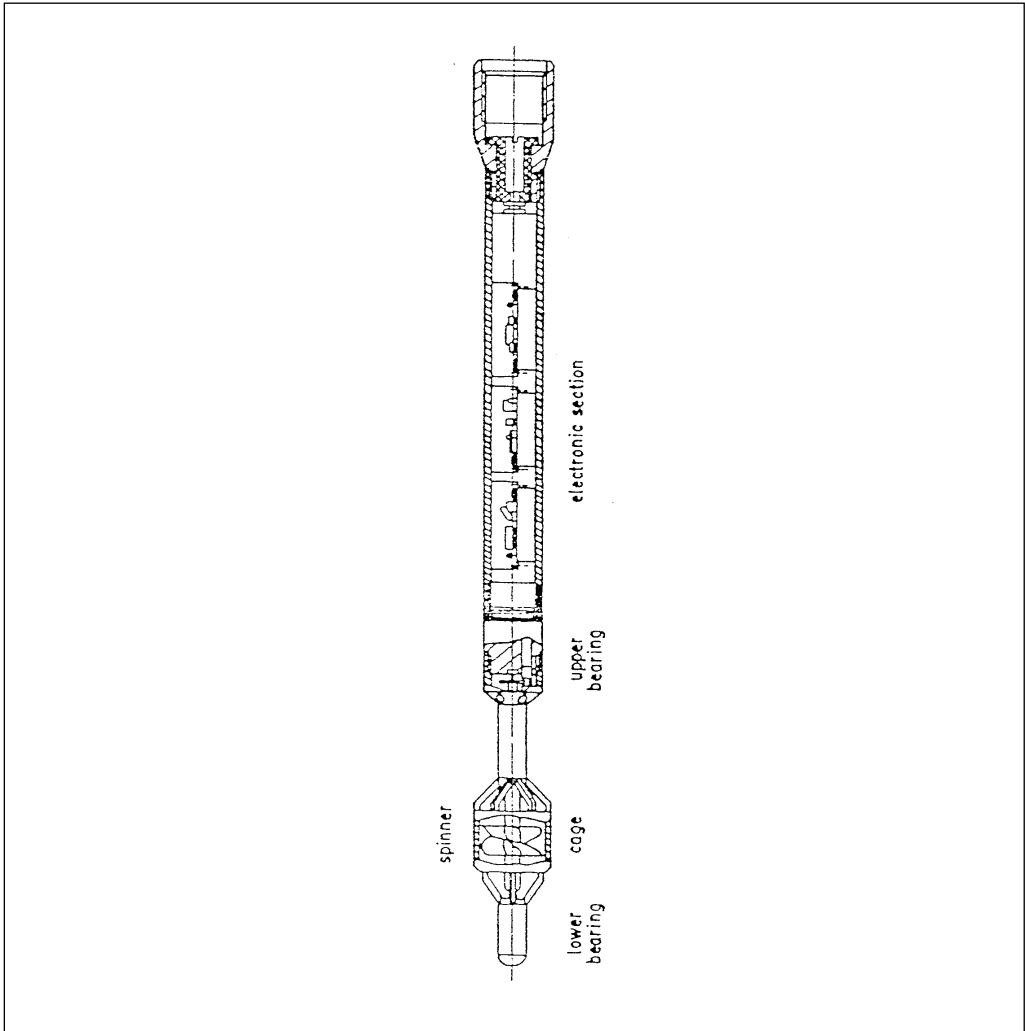


Figura 3. Esquema de una sonda Flowmeter.

por el sondeo (figura 3).

La sonda, al descender, provoca un movimiento en la hélice, al que hay que añadir otro movimiento: el originado por el bombeo al provocar un flujo vertical en el interior del sondeo. Los aportes laterales de las capas productivas, y las entradas de agua del sondeo a la formación, van a dar variaciones en el flujo vertical lo que, consecuentemente, se reflejará en el registro de flujo. Estas variaciones en el registro indicarán los aportes de agua de la formación al sondeo y del sondeo a la formación.

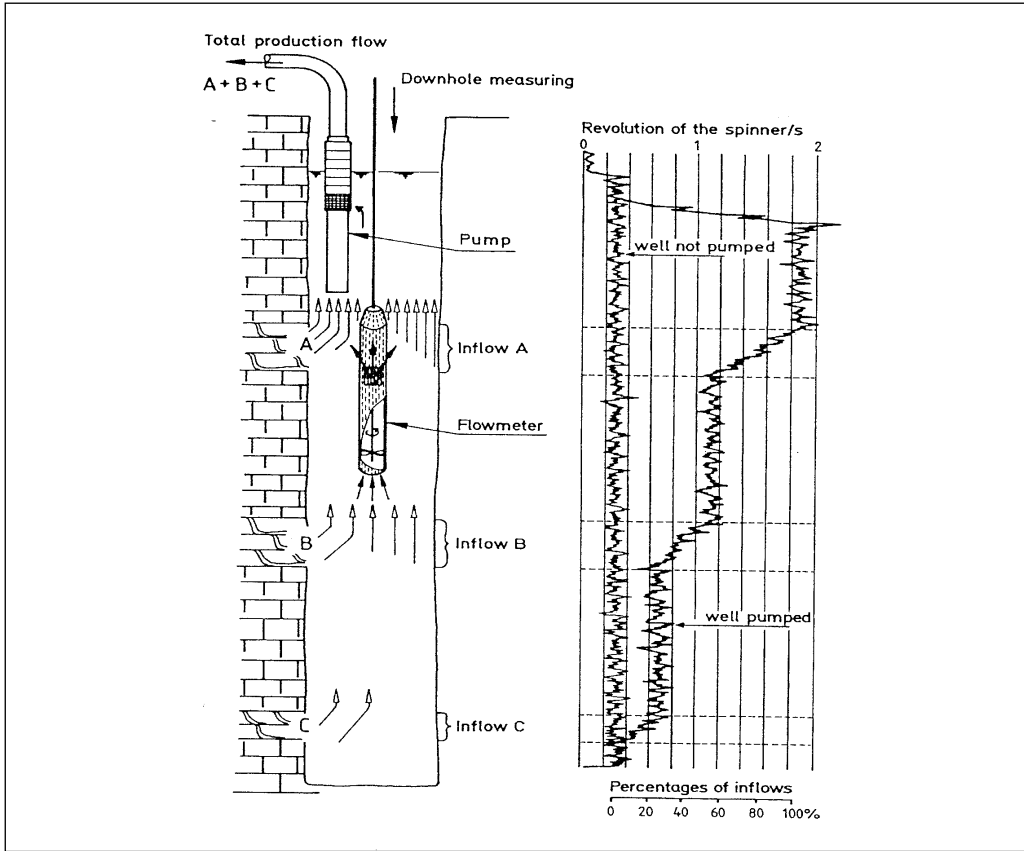


Figura 4. Registro de flujo (según Repsold, 1989).

En definitiva, cuando la sonda, en su descenso, deja atrás una capa productiva (figura 4), el número de revoluciones de la hélice disminuirá, debido a que el flujo de esta capa ya no se registra (Repsold, 1989).

## VENTAJAS E INCONVENIENTES DE CADA TIPO DE Sonda

La utilización de una sonda u otra tiene sus ventajas e inconvenientes (Plata *et al.*, 1996), que deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar un trabajo, para que el objetivo se vea cumplido, siempre con la menor relación coste/resultados.

El empleo de la sonda *Heat-Pulse Flowmeter* tiene una ventaja importante, respecto a la sonda *Flowmeter*: no requiere de la existencia de flujos importantes ni del empleo de un equipamiento de bombeo para provocar esos flujos, aspectos éstos necesarios en la testificación geofísica con la sonda *Flowmeter*.

Por contra, mediante la comparación de sus registros en bombeo y en estática, la sonda *Flowmeter* sí permite saber, aparte de la existencia de flujos, si éstos van de la formación al sondeo o del sondeo a la formación.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO CON SONDA FLOWMETER

Se va a exponer, a continuación, la metodología de trabajo con la sonda *Flowmeter* para conocer mejor su funcionamiento, y valorar en su medida los resultados que de su manipulación se obtienen.

### Dónde y cómo puede ser empleada esta sonda

En sondeos que atraviesen materiales con una mínima permeabilidad, que permita el bombeo continuado de un caudal suficiente para que la relación de éste con el diámetro de la sonda esté por encima del umbral de medida de la herramienta.

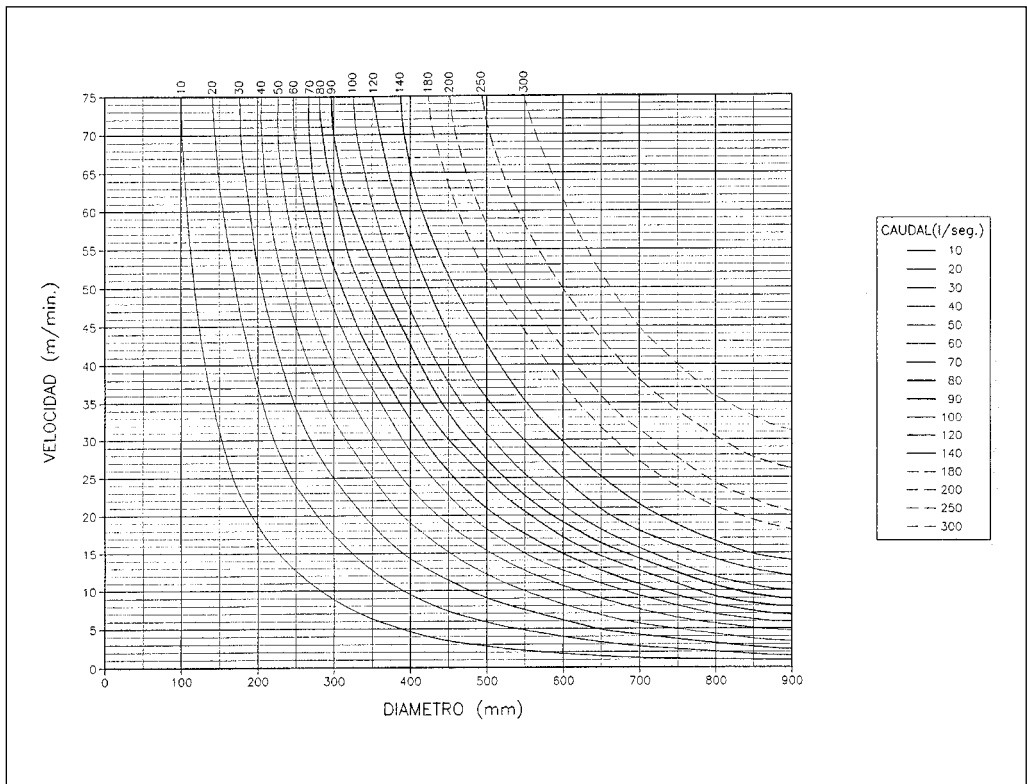


Figura 5. Relación caudal-velocidad-diámetro.

La sonda, como ya se ha comentado, es muy sensible. No obstante, tiene un umbral de medida, específico de cada fabricante, por debajo del cual la hélice no detecta el flujo vertical. Superado este umbral, la sonda puede registrar el flujo vertical y las variaciones producidas por los aportes y, por consiguiente, permitirá detectar los tramos productivos y los receptores de agua.

Debido a que, para un mismo caudal, la velocidad de flujo es inversamente proporcional a la sección que atraviesa ( $V = Q/\rho r^2$ ), el caudal de bombeo requerido, para provocar una velocidad de flujo suficiente como para ser detectada por la sonda dependerá, por tanto, del diámetro de entubación del sondeo. En la *figura 5* se pre-

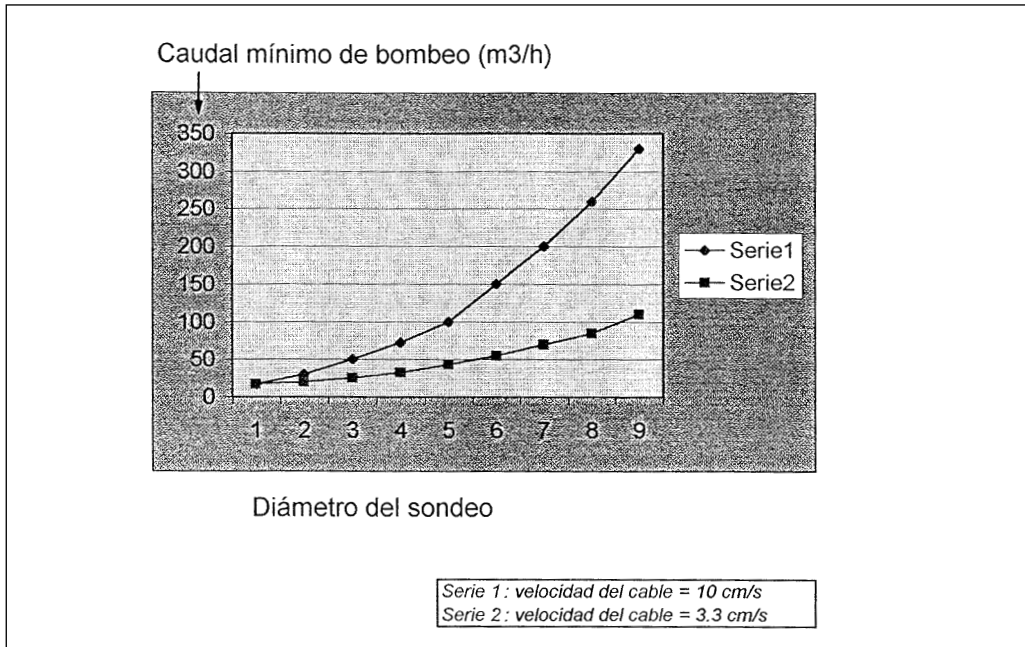


Figura 6. Caudal de bombeo en función de la velocidad de la sonda.

senta un gráfico que relaciona caudal de bombeo, velocidad mínima de descenso de la sonda y diámetro del sondeo: para un caudal de bombeo y un diámetro determinados se podrá determinar la velocidad mínima de descenso de la sonda.

Esta relación entre diámetro de sondeo y caudal de extracción está también en correspondencia con la velocidad de descenso de la sonda (*travel effect*). Así, si la sonda desciende rápido por el sondeo, el caudal de bombeo requerido será mayor que si baja a velocidad lenta. En la *figura 6* se observa un gráfico que relaciona diámetro del sondeo (en decímetros) y caudal de bombeo mínimo requerido, en fun-



ción de la velocidad de descenso de la sonda. Para ello se presentan dos curvas: la superior, referida a una velocidad de 10 cm/s, y la inferior, referida a una velocidad de 3,3 cm/s.

### **En qué materiales se puede utilizar**

El método de testificación con la sonda *flowmeter* se puede utilizar tanto en materiales detríticos como en calizas y granitos, siempre y cuando, como ya se decía en el punto anterior, haya una mínima permeabilidad que permita el bombeo. Teóricamente se puede hacer en sondeos sin entubar, pero es recomendable que estén entubados y engravillados (Plata *et al.*, 1996). Lo que sí es absolutamente necesario es que el sondeo esté desarrollado (Plata *et al.*, 1996; CGS, 1995) pues la presencia de materiales en suspensión ensucia el mecanismo de la hélice, provocando desajustes en la medida.

En el caso de los materiales detríticos, como sucede en la Cuenca de Madrid, se disponen, en numerosas ocasiones, alternantes con materiales detríticos de grano fino (limos, arcillas) que independizan los cuerpos arenosos en unidades con diferente comportamiento como acuífero.

Los distintos cuerpos arenosos, localizados por debajo del nivel freático, tienen diferente aporte de agua de éstos al sondeo, según sea su permeabilidad, confinamiento, dimensión (extensión y espesor), etc. Para conocer la importancia de las diferentes capas, en función de su productividad, se emplea esta sonda.

Lo mismo sucede con los sondeos perforados en materiales carbonáticos, en los que es igualmente importante conocer la productividad de las capas.

### **Metodología de campo**

Como ya se ha indicado, anteriormente, la medición del flujo vertical en el sondeo se realiza, salvo que se trate de un sondeo surgente, provocando un desplazamiento del agua al exterior lo suficientemente importante como para que la velocidad de flujo sea tal que dé un movimiento en la hélice mayor que el propio movimiento que produce el descenso de la sonda.

La testificación geofísica con esta sonda requiere, para la obtención de datos fiables, actuar con pulcritud y siguiendo una sistemática. Se debe conocer el diámetro de la tubería y si existen tramos con diferente diámetro para, a la hora de hacer la calibración, llevarla a cabo en cada uno de esos tramos.

La calibración se realiza con el sondeo en estática y descendiendo la sonda a una velocidad constante, por cada tramo de diámetro diferente. Así se tendrá el registro de velocidad de la hélice en estática (*travel effect*). La velocidad deberá ser igual a la que se va a emplear en el descenso de la sonda durante el bombeo pues, de esta manera, se puede eliminar del registro en bombeo el registro de calibración.

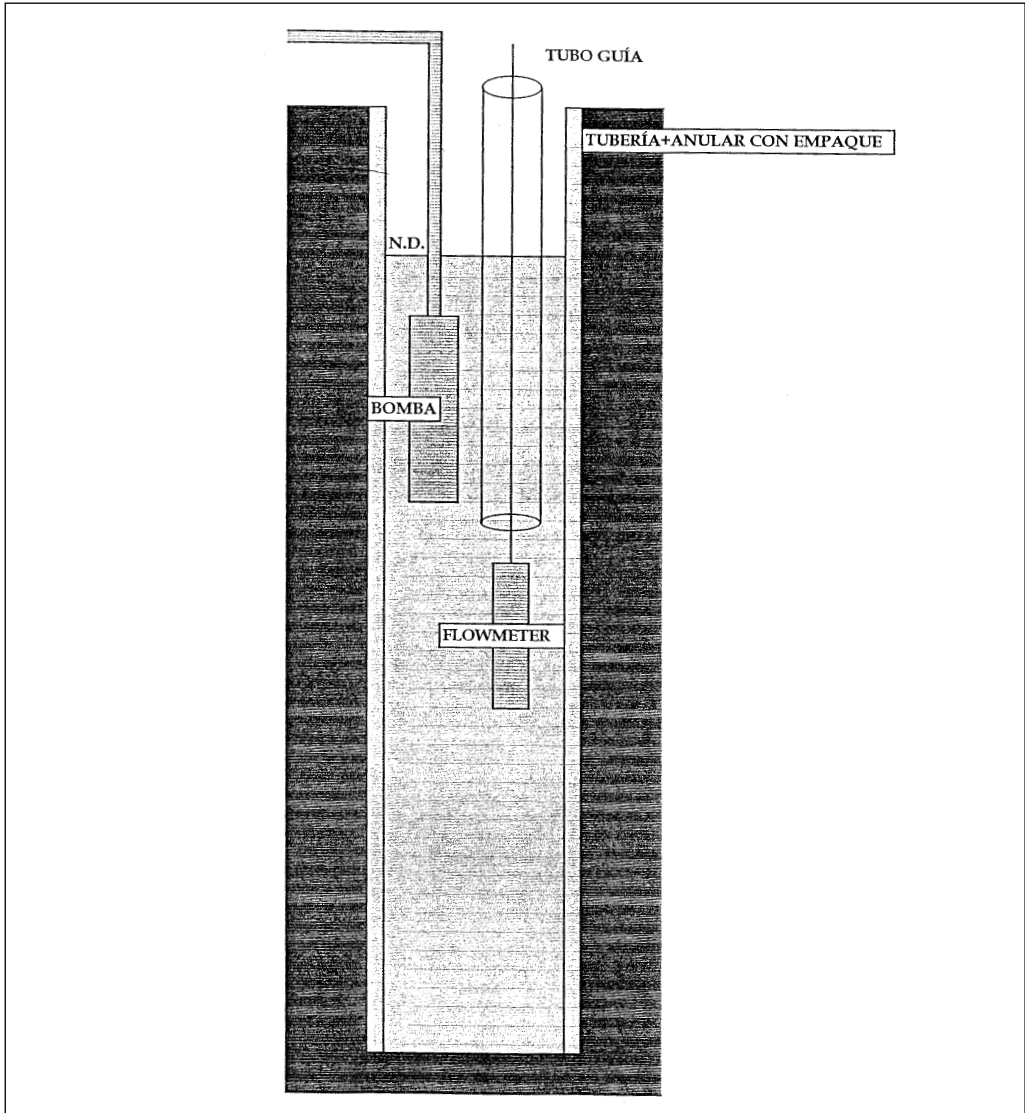


Figura 7. Esquema de equipamiento de un sondeo.

Por lo que respecta a la bomba de impulsión, es necesario conocer las siguientes premisas, a la hora de trabajar:

- Se equipará el sondeo con bomba y tubería de impulsión de forma descentrada. Este equipamiento del sondeo debería realizarse lo más próximo a una pared de la tubería, con el fin de dejar la mayor holgura para la bajada de la

sonda o el paso del tubo guía (figura 7).

- Se situará justo por debajo de la cota del nivel dinámico. Es importante conocer la posible posición del nivel del agua con el sondeo en producción, para aproximar la bomba a esa cota y aprovechar, de esta manera, la mayor parte de la columna por debajo de la bomba.

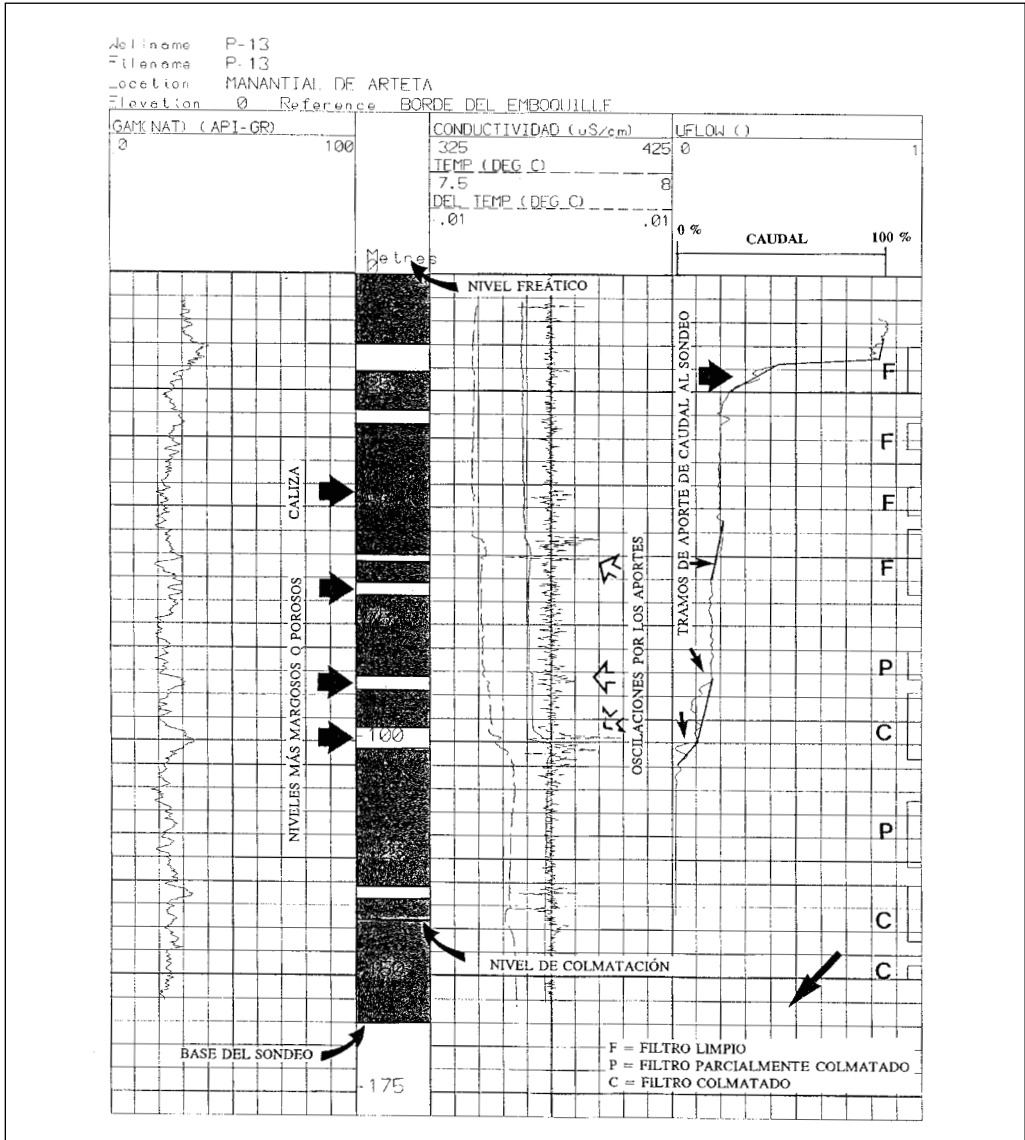


Figura 8. Suavizado de una curva de flujo en un sondeo en calizas.

- El tubo guía se colocará en el espacio comprendido entre la bomba y la pared opuesta de la tubería. Es muy recomendable a fin de evitar problemas como:
  - \* posibles enredos entre el cable de la sonda y la tubería de impulsión,
  - \* incertidumbre, si la bomba está muy profunda, de pasar por el hueco entre la bomba y la tubería, y
  - \* posible absorción del cable, por parte de la bomba, en cuanto ésta entre en funcionamiento.

Una vez realizados los trabajos, de equipamiento y calibración, puede comenzar el bombeo y la testificación en sentido descendente. Puede hacerse en los dos sentidos (ascendente y descendente), pero es más recomendable en sentido descendente, debido a que la sensibilidad a las variaciones de flujo es mayor por el propio esquema de distribución de velocidades de flujo y de la hélice de la sonda.

### **Metodología de gabinete**

Ya con los registros, en gabinete se procede al suavizado de la curva. Los registros se obtienen con ruido, por lo que hay que filtrar los “picos”, que dan ese aspecto poco recomendable para la interpretación. En la *figura 8* se ha representado un caso real, con el registro de flujo en la pista de la derecha. Sobre la propia curva de flujo se ha pintado, con líneas rectas, la curva suavizada, para hacer las medidas.

Una vez suavizadas las curvas obtenidas en la calibración, en estática y durante el bombeo, se realiza la sustracción del *travel effect* a la curva de flujo, para determinar la posición y las cotas de las capas productivas, mediante la identificación de los tramos inclinados en la curva suavizada. El registro resultante podrá dar, incluso, producción negativa, lo que reflejará zonas de entrada de agua del sondeo a la formación (Repsold, 1989), más común en rocas consolidadas y fracturadas.

La productividad de cada capa, punto final del objetivo de la testificación con sonda *flowmeter*, se cuantificará mediante cálculo del tanto por ciento de aporte de cada capa respecto a la producción total (100 %). Otro caso real se ha representado en la *figura 9*. En base a los porcentajes de aporte de cada capa productiva y al caudal de bombeo de 24 l/s, se ha calculado el caudal de cada capa.

## **RESULTADOS**

La importancia del registro de flujo radica en numerosos aspectos, entre los cuales destacan los siguientes resultados, que pueden obtenerse:

- Obtención de información de las capas productivas y no productivas atravesadas.

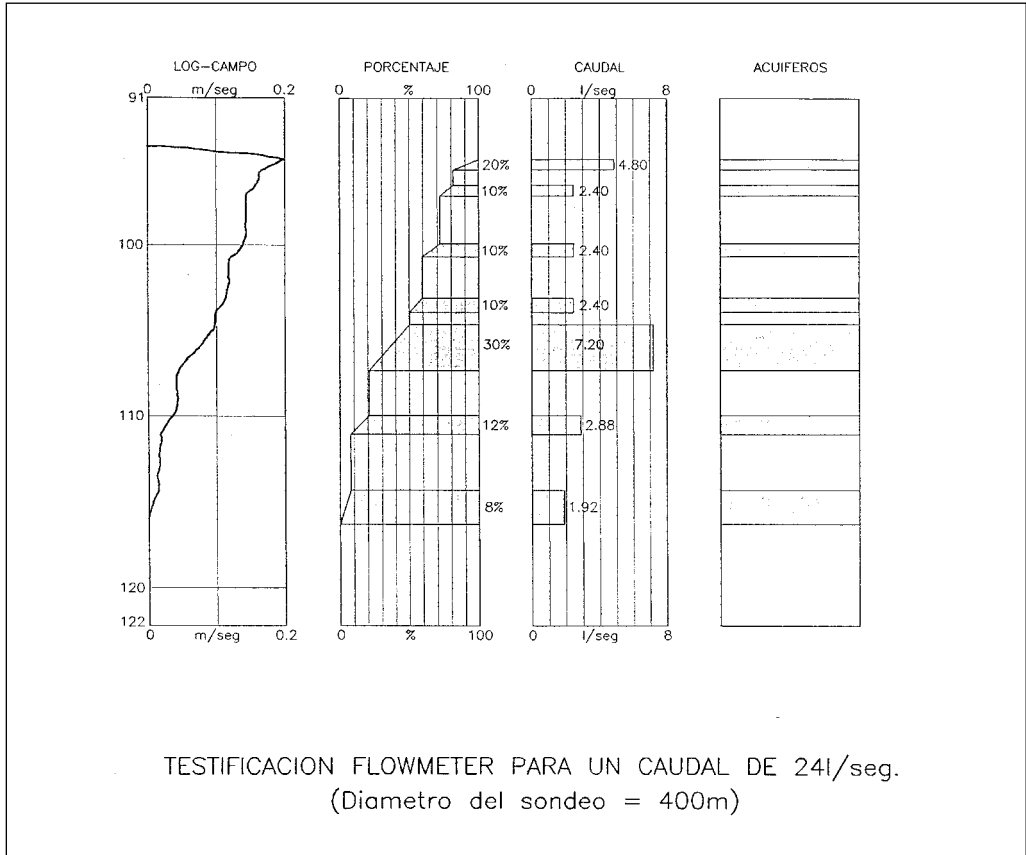


Figura 9. Cálculo de caudales en un sondeo en una serie detrítica.

das por el sondeo. La forma de la curva registrada con esta sonda permite determinar si hay o no capas productivas según haya o no, respectivamente, tramos de la curva que presenten o no inclinación.

- Determinación de la profundidad de los tramos productivos y las capas receptoras. La localización de los tramos inclinados del registro de flujo permite fijar las cotas de comienzo y final de dichos tramos.
- Cuantificación de la productividad de las mismas. Una vez delimitados los tramos productivos, se puede determinar el porcentaje de aporte de agua al sondeo, de cada uno de ellos, en función de la combinación entre espesor e inclinación que presenten.
- Combinación de productividad con calidad del agua. Si se registra conjuntamente la conductividad del agua (y la temperatura para corregirla) se puede

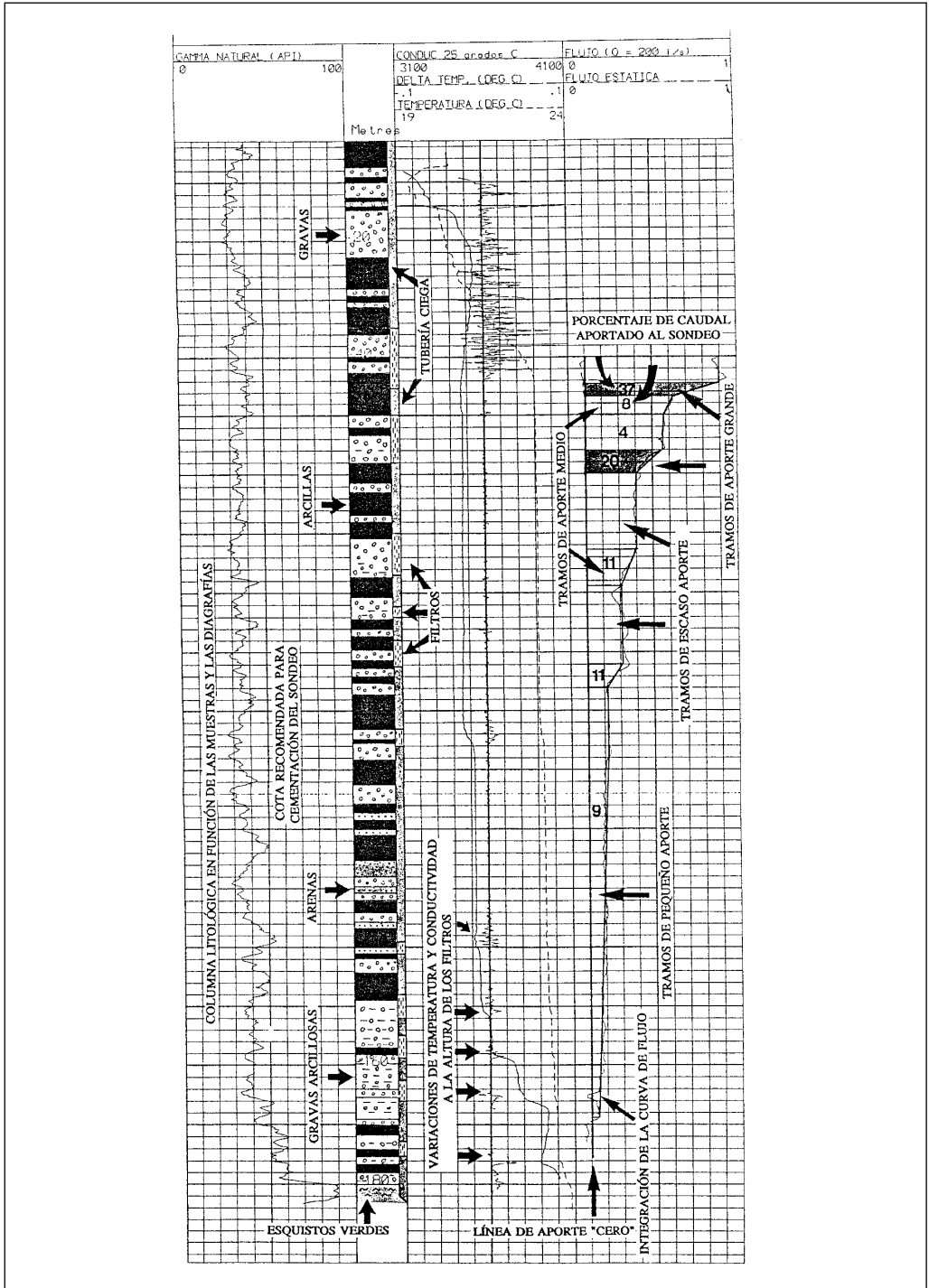


Figura 10. Registros de flujo y conductividad-temperatura.

establecer la correlación entre la productividad y la calidad del agua. Es muy útil, entre otras razones, para tomar decisiones a la hora de sellar parcialmente un sondeo. En la *figura 10* se presenta un sondeo en el que se midieron los registros de flujo (pista de la derecha) y de conductividad y temperatura (pista central) con el fin de determinar, por un lado, la productividad de los tramos de filtro y, por otro lado, la calidad del agua. Combinados ambos tipos de registro se observó que la mitad inferior del sondeo sólo aportaba un 20% del caudal total y que esa agua que aportaba era, casualmente, la de mayor salinidad, lo que sirvió para recomendar el sellado del sondeo, por debajo del metro 100.

- Modelización. Si se mide el registro de *flowmeter* en varios sondeos y se correlacionan éstos, se puede modelizar la zona estudiada, desde el punto de vista de las capacidades productivas, tanto en profundidad como en el espacio.
- Periodicidad. Si estos registros se obtienen de forma periódica (una vez al año, por ejemplo), podría saberse si la productividad de los filtros disminuye, lo que implicaría un taponamiento de los mismos. Con el vídeo se ve si los filtros están o no taponados pero no si son o no productivos y cuánto. Hay filtros que, aun estando parcialmente colapsados, dan más aporte que filtros totalmente limpios. Son los productivos los que hay que “cuidar” con más interés.

## BIBLIOGRAFÍA

- CGS. (1995). Inspección geofísica y óptica de los sondeos de explotación de Subijana-Nanclares (Álava). Sondeo Subijana-D. Informe Técnico (inédito).
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, R. (1976). Hidrología subterránea. Ed. Omega. Barcelona.
- PLATA, J.L.; ALONSO, T.; ALBERDI, R.; ARACIL, E. (1996). Testificación geofísica de sondeos mecánicos. ITGE: 62 pp.
- REPSOLD, H. (1989). Well logging in groundwater development. International contributions to Hydrogeology; vol. 9. International Association of Hydrogeologists. Ed. Heinz Heise. Hannover, Alemania.