

Seguimiento de la variación temporal de la permeabilidad de un acuífero mediante testificación geofísica.

R. Rodríguez Díez⁽¹⁾ y J. Torano Álvarez⁽¹⁾

(1) Dpto. Explotación y prospección de Minas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Con la introducción de nuevos métodos de explotación por hundimiento en una cuenca carbonífera del Norte de España, se puso en marcha un proyecto para determinar la influencia de dichas explotaciones mineras sobre su entorno, en concreto, la afección que se podía producir sobre un acuífero situado por encima del yacimiento. Durante varios años se realizaron periódicamente ensayos hidráulicos para medir las variaciones de permeabilidad en el acuífero y campañas de testificación geofísica para la determinación de cambios generales en el macizo rocoso. Esto permitió que después de un tiempo, durante el que se fueron produciendo cambios, se dispusiera de datos suficientes para establecer una relación empírica entre la permeabilidad en el acuífero con su respuesta a la sonda neutrón-neutrón y consecuentemente utilizar la testificación geofísica directamente en la determinación de dicho parámetro hidráulico.

Palabras clave: Testificación geofísica en sondeos, Registro neutrón-neutrón, Permeabilidad, Acuíferos.

Monitoring of the time related changes of aquifer permeability by geophysical logging.

ABSTRACT

With the introduction of new caving mining methods in a North Spain coal basin, it started a project to investigate the influence of this kind of mining on the environment, specially, it influence in aquifer over the mine. For several years, permeability changes in water bearing strata were measured trough a hydraulic test while general changes in the rock mass were determined by geophysical logging at the same boreholes. The study of this field data allowed to determinate a empirical relationship between aquifer permeability and the neutron log with the objective of using in the future this geophysical tool for determining directly hydraulic conductivity.

Key words: Geophysical well logging, Neutron logging, Permeability, Aquifer.

INTRODUCCIÓN

Al comenzar las explotaciones con hundimiento en una cuenca carbonífera del Norte de España, se puso en marcha un proyecto para determinar la influencia de dichas explotaciones mineras sobre su entorno.

Así pues, durante varios años se realizaron periódicamente campañas de adquisición de datos consistentes, entre otros, en ensayos hidráulicos para determinar los cambios de permeabilidad en el acuífero y testificación geofísica para la influencia sobre él podía ser origen de un aumento del caudal de agua que entraba a la mina lo que siempre lleva consigo una dificultad añadida en el laboreo y un aumento de costos debido al bombeo de dicho caudal al exterior.

En este contexto era de la mayor importancia el control y seguimiento de un acuífero existente por encima de las explotaciones ya que la

Así pues, durante varios años se realizaron periódicamente campañas de adquisición de datos consistentes, entre otros, en ensayos hidráulicos para determinar los cambios de permeabilidad en el acuífero y testificación geofísica para la

determinación de cambios generales en el macizo rocoso consecuencia de las explotaciones mineras.

Esto permitió que después de un tiempo, durante el que se fueron produciendo cambios, se dispusiera de datos suficientes para correlacionar empíricamente la permeabilidad medida con la señal de la sonda neutrón-neutrón de manera que, a posteriori, se pudiera utilizar la testificación geofísica con dicha sonda para determinar directamente la permeabilidad en dicho acuífero sin necesidad de recurrir a nuevos ensayos hidráulicos con las siguientes ventajas respecto a éstos:

- mayor facilidad y mayor rapidez en su realización
- es posible obtener otros datos de interés del macizo rocoso además de la permeabilidad
- se obtiene información en toda la profundidad y no sólo en un nivel

DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO

Situación geográfica y geológica general

El área donde se asienta el acuífero en estudio (Arecas et al., 1994a) se encuentra en la Zona Cantábrica, al Este del antiforme del Narcea, en el extremo Norte de la denominada "Región de Pliegues y Mantos". El yacimiento carbonífero actualmente en explotación (se representa en la figura 1 la traza de las capas correspondientes a 5ª planta), se asienta en un *horst* limitado por dos fallas normales, Granda al Noreste con un desplazamiento en la componente vertical de 180 m y Llantones al Suroeste, con 340 m, mientras que por el Norte lo limita la falla inversa de La Matona.

Sobre un Carbonífero fallado, plegado y relativamente poco accidentado se depositaron en clara discordancia angular los materiales Pérmicos que constituyen la actual cobertura de unos 150

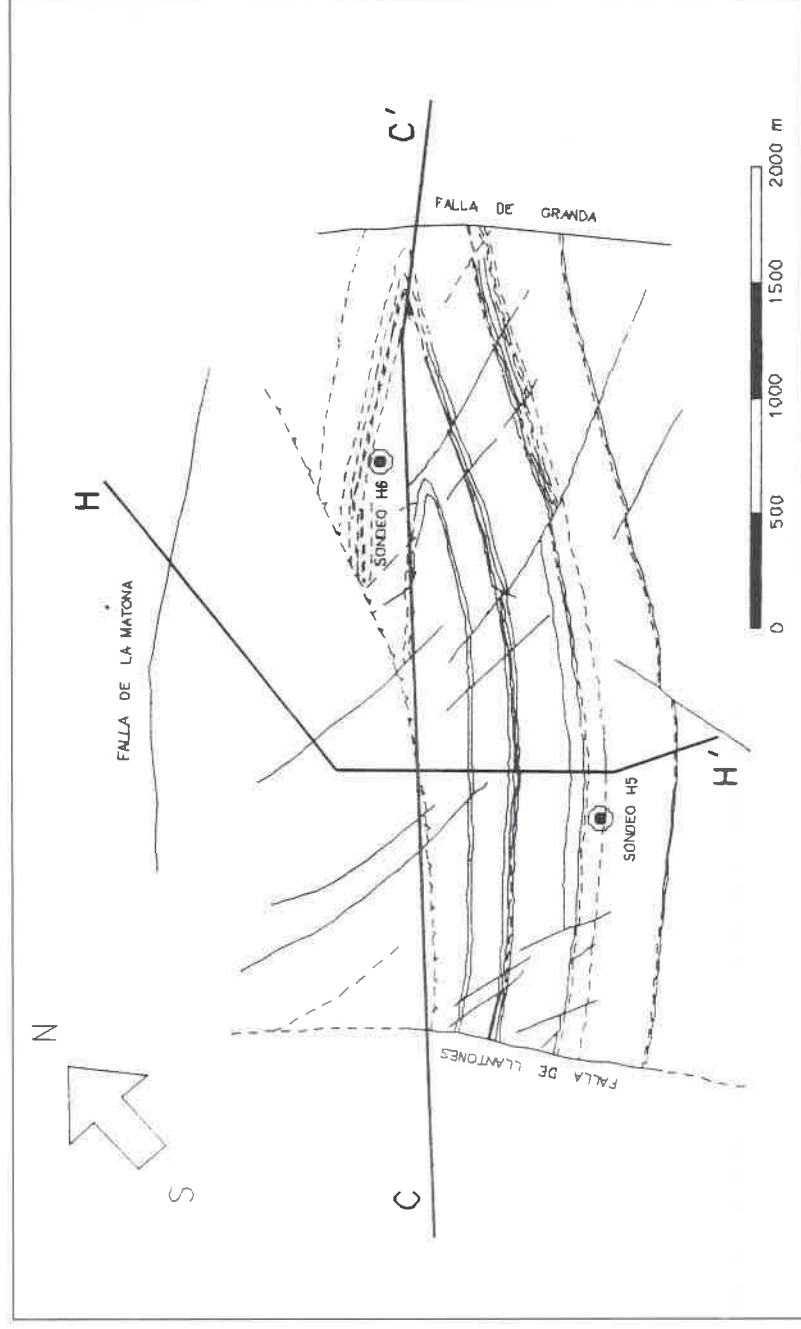


Figura 1: Yacimiento carbonífero sobre el que se encuentra el acuífero.

m de potencia (figuras 2 y 3) y cuyas unidades estratigráficas dentro del *horst* son, de muro a techo, las siguientes:

- Conglomerados basales (3 - 16 m)
- Limos inferiores (8 - 25 m)
- Caliche (28 - 32 m)
- Calizas o brecha caliza (8 - 16 m)
- Margas rojas oquerosas (12 - 24 m)
- Limos superiores (38 - 42 m)
- Margas y arcillas superiores (> 20 m)

De ellas, las dos unidades que pueden ser consideradas acuíferos desde el punto de vista de su repercusión en la mina (Areces et al., 1994b) son los conglomerados basales y las margas rojas oquerosas. Ahora bien, a partir de observaciones del nivel piezométrico del primero de ellos se llegó a la conclusión de que ya había sido muy afectado por las explotaciones mineras, dada su proximidad a ellas, por lo que no era de esperar que representara un mayor riesgo en el futuro.

No ocurre así con las margas oquerosas las cuales constituyen el principal acuífero de la cobertura Pérmica sobre el cual se centraron los estudios que se describen en el presente artículo. Se trata de una litología de margas arenosas homogéneas de color rojo, con abundantes huecos previsiblemente originados por la disolución de yesos y carbonatos, fenómeno éste que no se ha apreciado fuera de los límites del *horst*. Esto es la causa de que, atípicamente, la permeabilidad de estas margas sea mayor que la de las calizas con las que presenta un contacto inferior neto (10^5 m/s frente a 10^3 m/s).

Geometría del acuífero de las margas

Dentro del *horst* se ha observado una constancia de las potencias de las unidades pérmicas, por lo que la geometría del acuífero de las margas se adapta a la estructura general posttectónica y poserosiva de la covertera, tal y como queda refle-

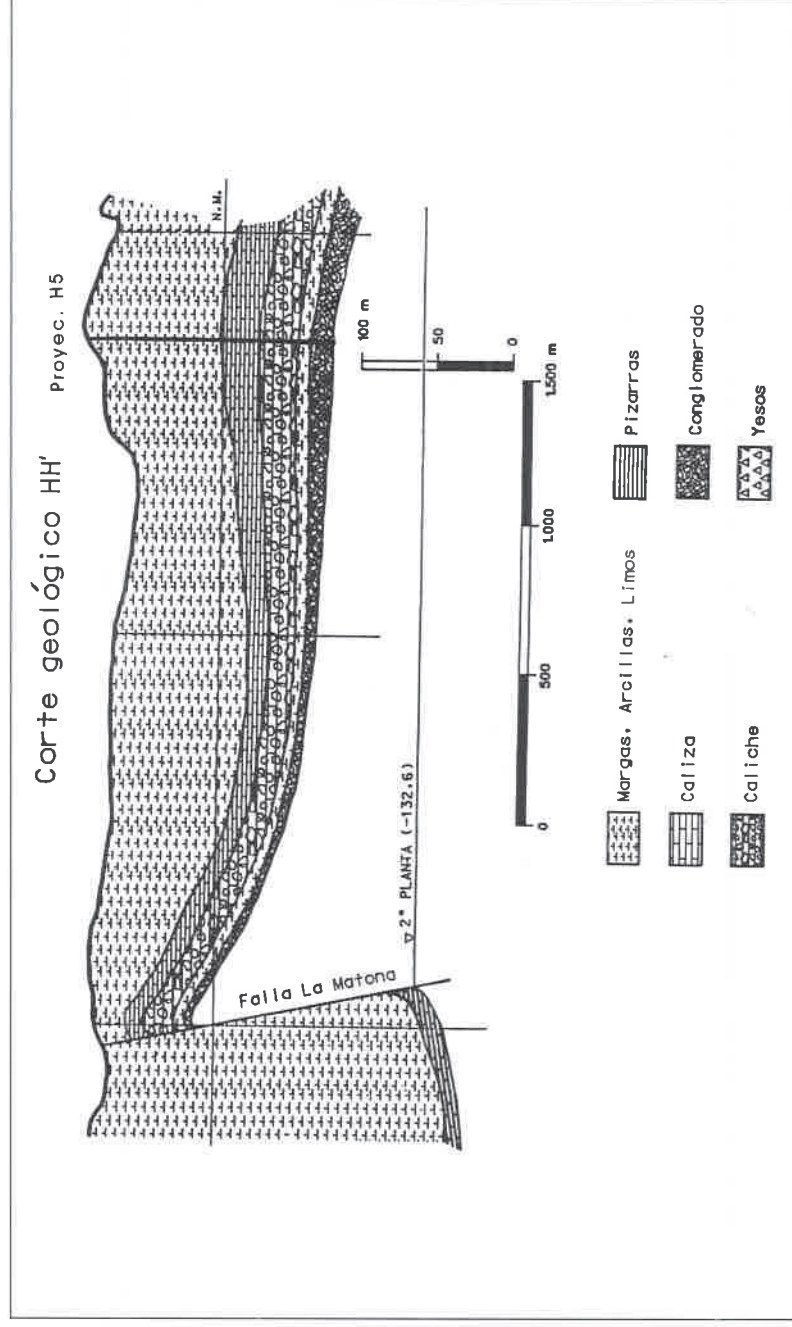


Figura 2: Corte geológico HH' según dirección predominante NO-SE.

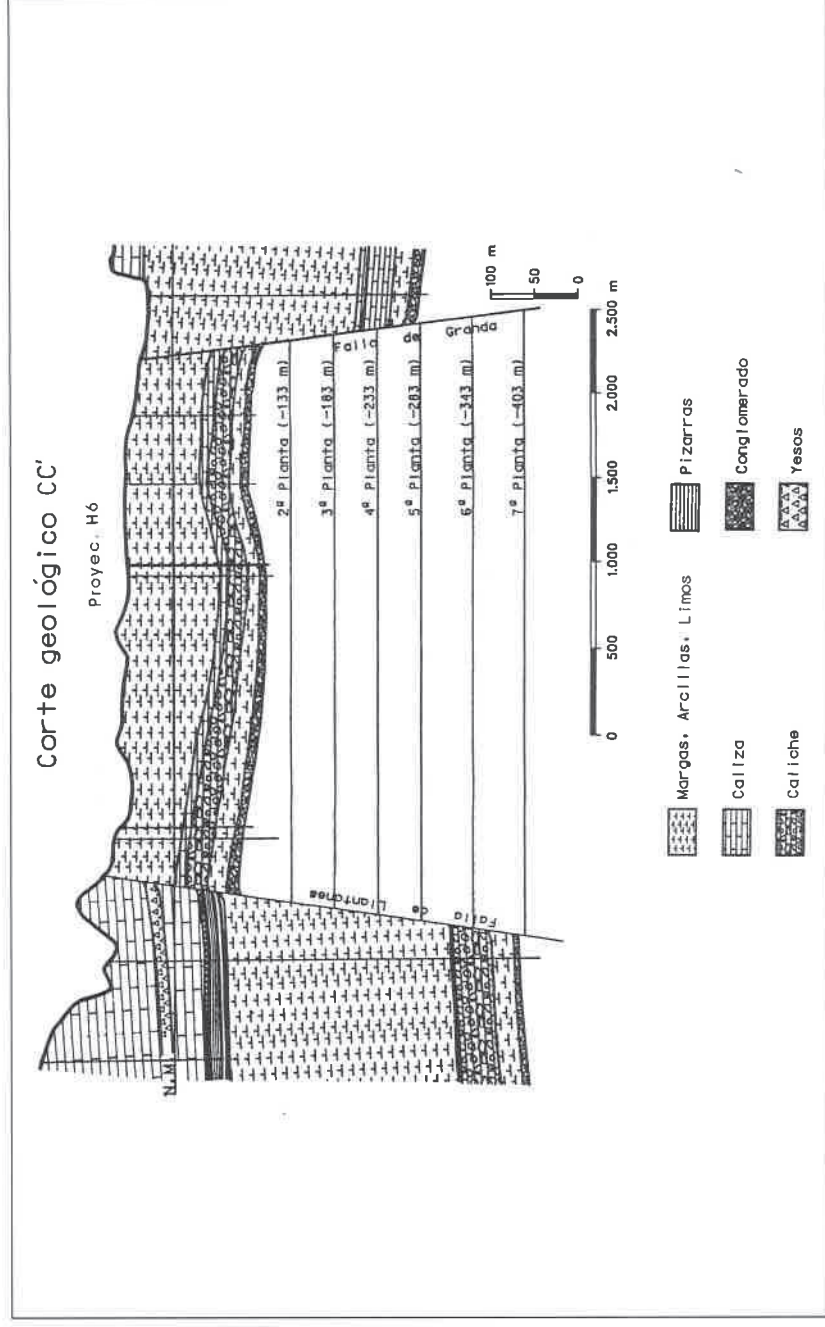


Figura 3: Corte geológico CC' según dirección NO-SE.

jado en los cortes geológicos realizados. Los elementos característicos de dicha geometría serían:

- ligero buzamiento hacia el Noreste
- abombamiento en la zona Norte, coincidente con la falla inversa de La Matona, que podría justificar la existencia de una barrera que aísla el sistema por este borde.

Funcionamiento hidráulico del acuífero de las margas

De una forma simplificada, se puede afirmar que la recarga del acuífero se realiza a través de las precipitaciones y de las posibles aportaciones laterales procedentes de los acuíferos del Jurásico tanto el situado al Este como al Oeste (aunque éstas son de menor importancia como se demostró posteriormente mediante modelos

hidrogeológicos). El agua de lluvia se infiltra y se transmite verticalmente hasta el acuífero de las margas el cual tarda un tiempo en manifestar los efectos de las precipitaciones.

La descarga se realiza fundamentalmente por la evapotranspiración, infiltración a la mina (sobre todo en una zona en la que antiguamente se explotó hasta el mismo contacto carbonífero-conglomerados), y drenaje a ríos y pequeñas fuentes o manantiales repartidos por toda la zona. Los datos de piezometría disponibles en el área ocupada por el *horst*, ponen de manifiesto la evidencia de un flujo de las aguas subterráneas con una componente vertical como consecuencia de la existencia de varios niveles piezométricos en profundidad (el de las margas oquerosas y de los conglomerados), así como unas componentes horizontales de flujo que responden a la disposición de la propia estructura, con un gradiente general de dirección SO-NE.

PUNTOS DE CONTROL

Para control y estudio de los acuíferos existían un total de 6 parejas de sondeos hidrogeológicos adaptados para realizar testificación geofísica y llevar a cabo ensayos de bombeo e inyección, tanto en el acuífero principal de las margas como en el acuífero de los conglomerados basales ya que en principio se tenía interés en ambos. Ahora bien, por las razones ya mencionadas, la investigación se centró finalmente en el acuífero superior.

De todos ellos, los que aportaron información fueron las parejas de sondeos H5 y H6, situados respectivamente en el centro y en la parte Este del yacimiento (figura 1), porque se ubicaban sobre las zonas donde se comenzaron las explotaciones con hundimiento y donde realmente se observaron cambios significativos en los parámetros hidrogeológicos.

En cada emplazamiento, H5 y H6, existían dos sondeos separados unos 10 m entre sí. Uno de ellos, el más largo, penetraba unos 100 m en el carbonífero y en él se llevaba a cabo la testificación geofísica (en la figura 4 se representa esquemáticamente los diámetros tanto de perforación como de entubado dentro de dicho sondeo).

El otro sondeo, más corto, llegaba hasta el carbonífero y se encontraba cementado hasta el contacto entre calizas y margas y en él se realizaban

los ensayos hidráulicos sobre dicho acuífero de las margas. El esquema de entubado en este sondeo era similar al largo, si bien sólo llegaba al Carbonífero a unos 130 m de profundidad. En los tramos correspondientes al acuífero, la tubería era ranurada.

En la figura 5 se representan las columnas litológicas de tales sondeos en la parte correspondiente al Pérmico.

TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA CON LA SONDA N-N

Desde el punto de vista de la hidrogeología, y de una manera resumida (Plata et al., 1996), diremos que la sonda neutrón-neutrón (N-N) se utiliza principalmente para determinar la porosidad de las rocas. El fenómeno físico en el que se basa es la pérdida de velocidad que sufren los neutrones llamados "rápidos" (energía superior a 100 eV) cuando chocan elásticamente con los núcleos de los átomos que se encuentran en su recorrido, convirtiéndose en neutrones "térmicos", de energía inferior. Esta pérdida de energía será directamente proporcional al número de choques que se produzcan con átomos de una masa similar a la del neutrón. Dado que no existen neutrones libres en el terreno, se puede deducir que todos los neutrones presentes durante la testificación provienen únicamente de la fuente de neutrones que se utilice. En el terreno, el elemento que más probabilidad tiene de hacer que el neutrón pierda

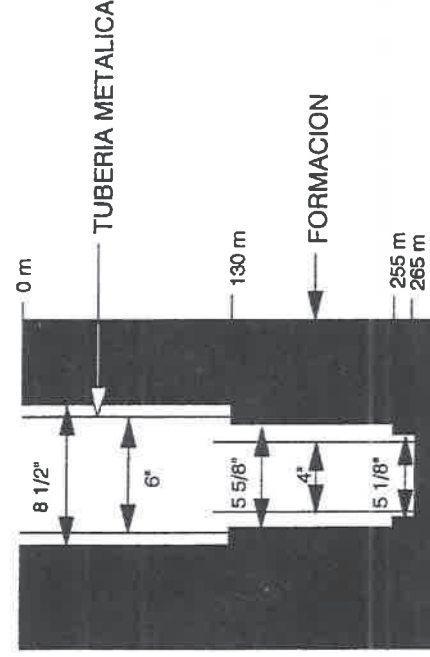


Figura 4: Esquema de perforación y entubado del sondeo largo.

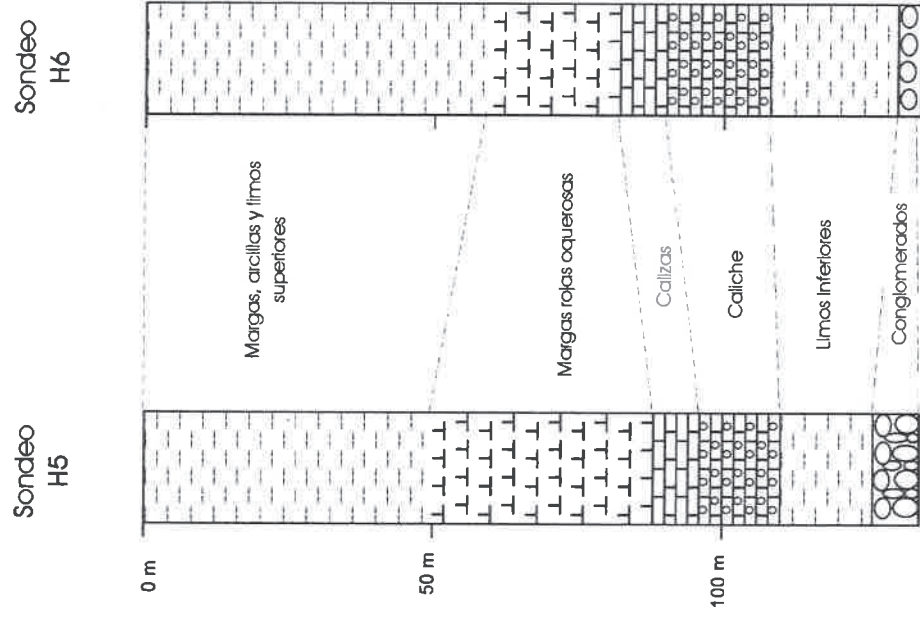


Figura 5: Columnas litológicas simplificadas de los sondeos H5 y H6.

energía es el Hidrógeno, de ahí que se pueda deducir la proporción de Hidrógeno en una formación a partir de la medida de los neutrones que son capaces de traspasarla.

Puesto que la mayor parte del Hidrógeno se encuentra en los fluidos existentes en los poros de la formación, el sistema mide indirectamente el contenido de fluidos y la porosidad de dicha formación. Existen, por supuesto, excepciones a este principio como es el caso del agua de formación contenida en las arcillas, el Hidrógeno de la estructura de algunas evaporitas (carnalita, yeso) y óxidos (goetita, limonita) y los carbones por su contenido en hidrocarburos, que hacen que tenga una respuesta neutrónica anormalmente baja dando una falsa idea de porosidad

cuando en realidad se pueden considerar prácticamente impermeables. En este último caso, es interesante utilizar este registro junto con otros como por ejemplo el de rayos gamma, ya que la densidad que se mide, mucho menor que la de la roca encajante, pone de manifiesto que se trata de una capa de carbón y no de una roca porosa.

Todas las sondas neutrónicas constan de una fuente de neutrones y un detector (figura 6). Un tipo de fuente es la llamada alfa-Berilio que mediante el bombardeo de partículas alfa sobre el Berilio dan como resultado Carbono y neutrones. Estos son enviados a la formación donde, tras múltiples colisiones, van perdiendo energía hasta que se convierten en neutrones "termales" y pueden ser absorbidos por determinados átomos que emiten rayos gamma denominados de captura. Por tanto, los detectores de las sondas neutrónicas pueden ser de rayos gamma o de neutrones termales. Los neutrones recibidos en el detector producen unos pulsos que se van contabilizando en cuentas por segundo (c.p.s.) siendo el conteo recibido una función inversamente proporcional a la porosidad.

Cuando las sondas están calibradas pueden dar directamente la porosidad. Ahora bien, aunque la sonda neutrónica se puede utilizar en pozos entubados y sin entubar con o sin fluidos, para poder cuantificar la respuesta y calibrarla en porcentaje de porosidad es necesario que la testificación se realice en pozo descubierto y lleno de fluidos. Así mismo para normalizar la señal, se ha de corregir en función del diámetro del sondeo. En general, la presencia de fluidos, la existencia de tubería o el mayor diámetro del sondeo atenúan la señal de respuesta en c.p.s. Este efecto se representa de manera gráfica en la figura 7, en la que se comienza para el registro correspondiente a un pozo (primero comenzando por la izquierda) con a) el registro que se obtendría en el mismo pozo con diferente entubado (casos segundo y tercero), b) el registro que se obtendría si el diámetro del pozo fuera mayor (cuarto caso) y c) el registro resultante de la testificación con el pozo lleno de agua (caso quinto).

El equipo utilizado en el proyecto (figura 8) fue el CENTURY COMPUTLOG III, equipo que incorpora tecnología digital, el cual de forma automática

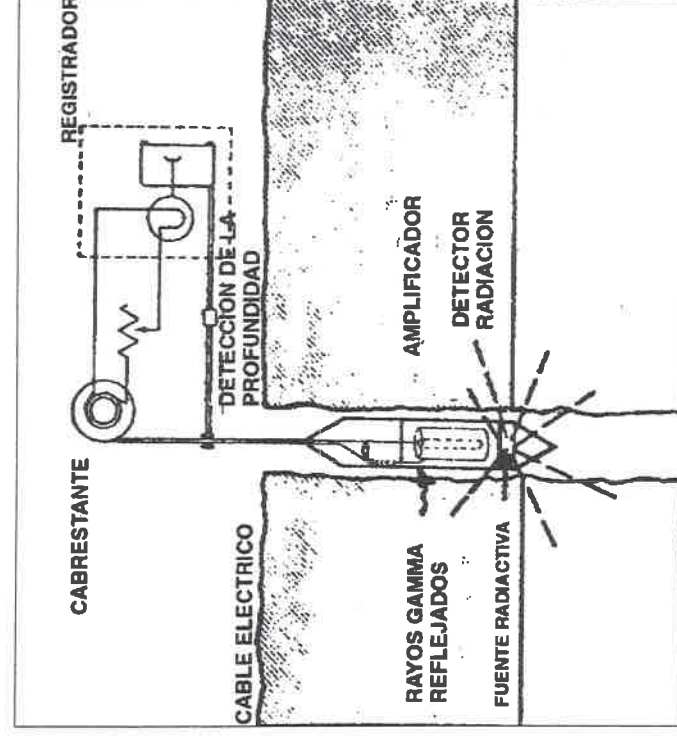


Figura 6: Esquema de la sonda N-N.

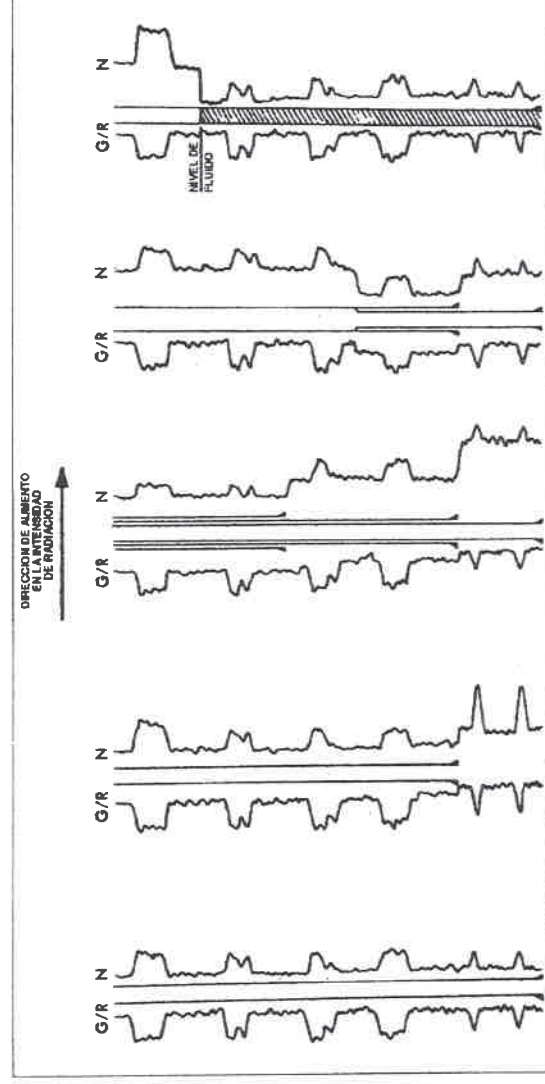


Figura 7: Influencia de la tubería y el agua en el registro N-N.

registra, filtra y almacena la señal en ordenador. El tratamiento de la señal, tanto en el equipo como posteriormente en gabinete, se lleva a cabo con el *software* adecuado. La sonda utilizada es la 9055, dotada de una fuente radiactiva

de $^{241}\text{Am-Be}$, que puede registrar otros parámetros además de la respuesta N-N.

La relación entre la señal N-N y la porosidad es del tipo:

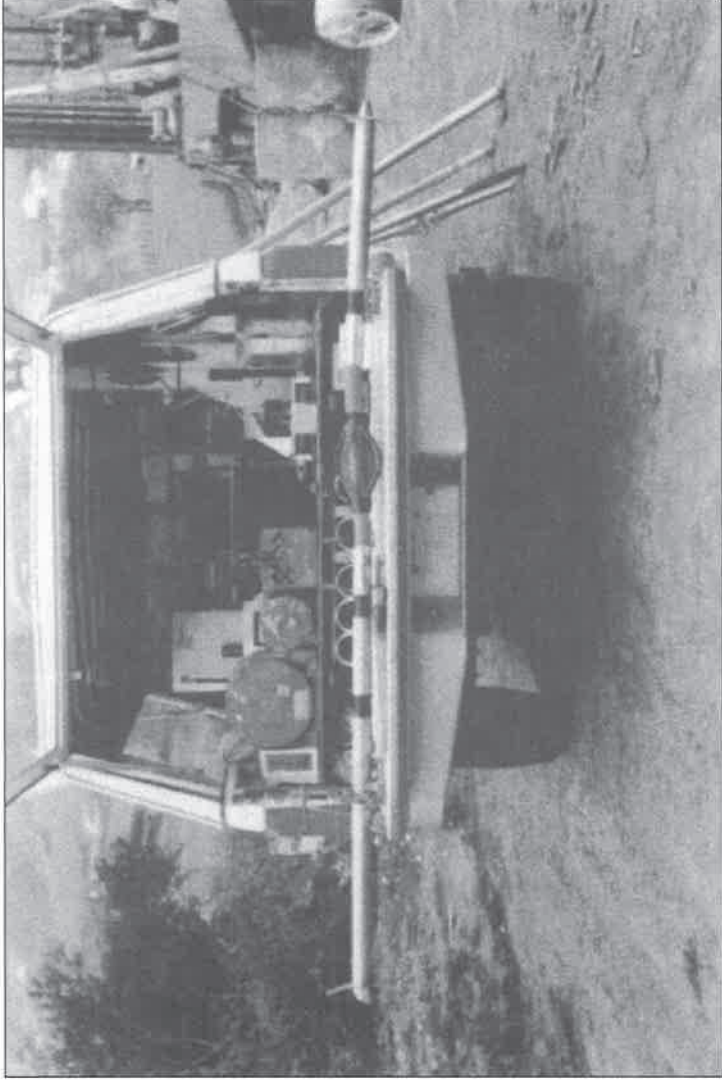


Figura 8: Equipo de testificación geofísica.

$$\phi = A e^{B nn}$$

donde:

ϕ : porosidad en %

nn: señal N-N normalizada en c.p.s.

A, B: parámetros empíricos dependientes del diámetro del sondeo y determinados por el fabricante en un proceso de calibración de su propia sonda

La misma relación se puede expresar:

$$\text{Ln}(\phi) = \text{Ln}(A) + B nn$$

donde se pone de manifiesto la relación lineal entre la señal N-N y el logaritmo de la porosidad.

VARIACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN EL TIEMPO

A partir de la bibliografía (Whitworth, 1982) se conocía que la afluencia de agua a la mina desde acuíferos superiores originada por explotaciones

con hundimiento está relacionada principalmente con las deformaciones a tracción que provocan un aumento de la permeabilidad en el macizo rocoso. Se decidió por este motivo llevar a cabo un seguimiento de la evolución de la permeabilidad en el acuífero de las margas oquerosas mediante la realización periódica de ensayos hidráulicos de inyección y/o bombeo (figuras 9 y 10). De esta manera, cualquier aumento anómalo en la permeabilidad sería un indicio de cambios en el macizo rocoso a tener en cuenta en el futuro diseño de las explotaciones a corto y medio plazo.

Era de esperar que a medida que avanzaran las explotaciones y su influencia llegara a la cobertura pérmica la permeabilidad en dicho acuífero variara, bien aumentando como consecuencia de que las deformaciones a tracción originaban la apertura de las juntas existentes en el macizo rocoso, o bien disminuyendo si, en caso contrario, dichas deformaciones eran a compresión.

Se utilizaron diversos modelos para la mejor



Figura 9: Instrumentación empleada en los ensayos hidráulicos.

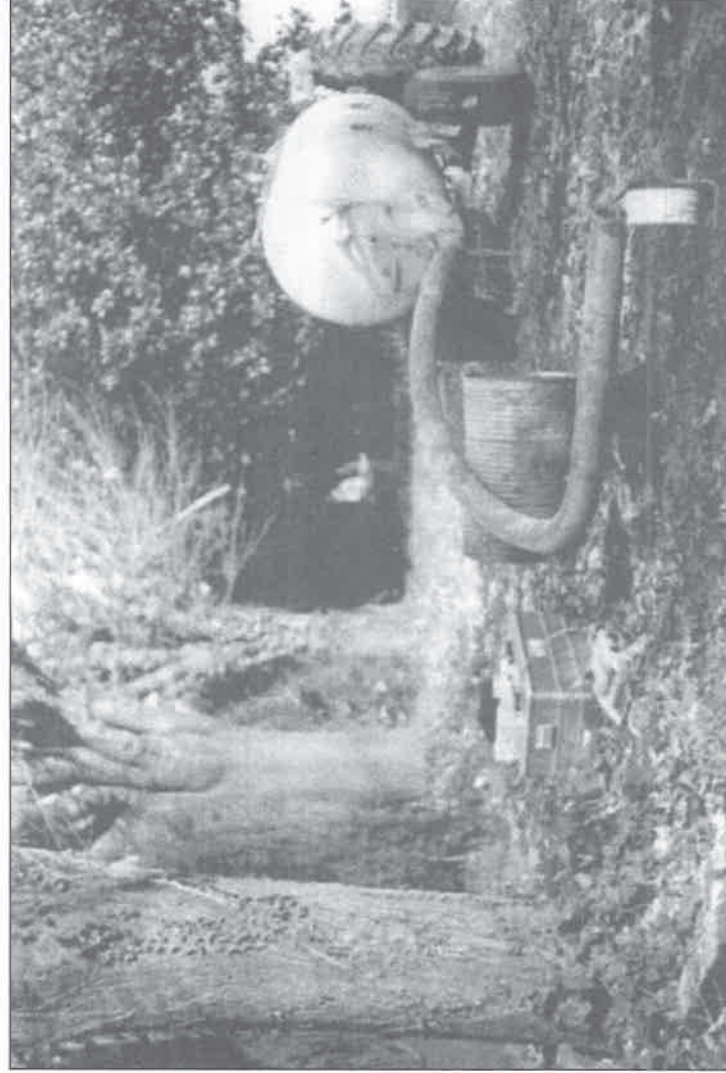


Figura 10: Realización de un ensayo de inyección en un sondeo.

interpretación de los datos (Custodio y Llamas, 1976), y cuando había una cierta disparidad entre los resultados, se tomaba como representativo una media de los valores de permeabilidad obtenidos. Los modelos utilizados fueron los clásicos como el de Thiem, Theis, Jacob, Gilg-Gavard, Hvorslev y, cuando en los ensayos de inyección los descensos eran muy rápidos y asimilables a un *slug-test*, se utilizaron los modelos de Cooper y Bower y Rice.

En la tabla 1 se recoge el rango de variación de la permeabilidad en los diversos ensayos comprobándose que los resultados, diferentes según el modelo utilizado, son siempre del mismo orden de magnitud.

Así mismo, y a modo de ejemplo, en las figuras 11 y 12 se presentan los gráficos con las curvas de descensos correspondiente a un ensayo de inyección en cada uno de los sondeos los cuales fueron interpretados como *slug-test*.

Como se dijo, los ensayos eran normalmente de inyección, aunque en alguna campaña se hicieron ensayos de inyección y de bombeo en un mismo sondeo. En estos casos (tabla 2) se comprobó que la permeabilidad calculada a partir de un bombeo era algo mayor que la obtenida a partir del ensayo de inyección, hasta un orden de magnitud, pudiendo estar la causa de ello en el mayor radio de acción de los bombeos frente a las pruebas de inyección que afectan a una zona más limitada del acuífero.

En el sondeo H5 se hicieron un total de 8 campañas de ensayos de inyección a lo largo de 2 años, es decir, aproximadamente una al trimestre. En el mismo periodo en el sondeo H6 se llevaron a cabo un total de 5 campañas (durante un periodo inicial se hicieron menos ensayos debido a que no había aún suficiente actividad minera en esta zona).

Si se supone que la relación entre la permeabili-

Pozo	Tiempo (días)	Ensayo	Permeabilidad (m/s)	Valor medio
H5	0	Inyección	$1.27 \cdot 10^{-7}$	$1.27 \cdot 10^{-7}$
	180	Inyección	$7.7 \cdot 10^{-8}$ - $5.1 \cdot 10^{-8}$	$6.4 \cdot 10^{-8}$
	270	Inyección	$5.2 \cdot 10^{-7}$	$5.2 \cdot 10^{-7}$
	420	Inyección	$9.8 \cdot 10^{-7}$ - $5.2 \cdot 10^{-7}$	$7.5 \cdot 10^{-7}$
	510	Inyección	$1.5 \cdot 10^{-6}$ - $1.1 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
	600	Inyección	$1.0 \cdot 10^{-6}$ - $2.8 \cdot 10^{-7}$	$6.6 \cdot 10^{-7}$
	690	Inyección	$1.4 \cdot 10^{-6}$ - $9.2 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$
H6	720	Inyección	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-5}$
	0	Inyección	$4.47 \cdot 10^{-7}$	$4.47 \cdot 10^{-7}$
	150	Inyección	$1.65 \cdot 10^{-7}$	$1.65 \cdot 10^{-7}$
	570	Inyección	$1.2 \cdot 10^{-6}$ - $1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$
	600	Inyección	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$
	690	Inyección	$3.1 \cdot 10^{-6}$ - $1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{-6}$

Tabla 1: Rango de variación de la permeabilidad en los ensayos.

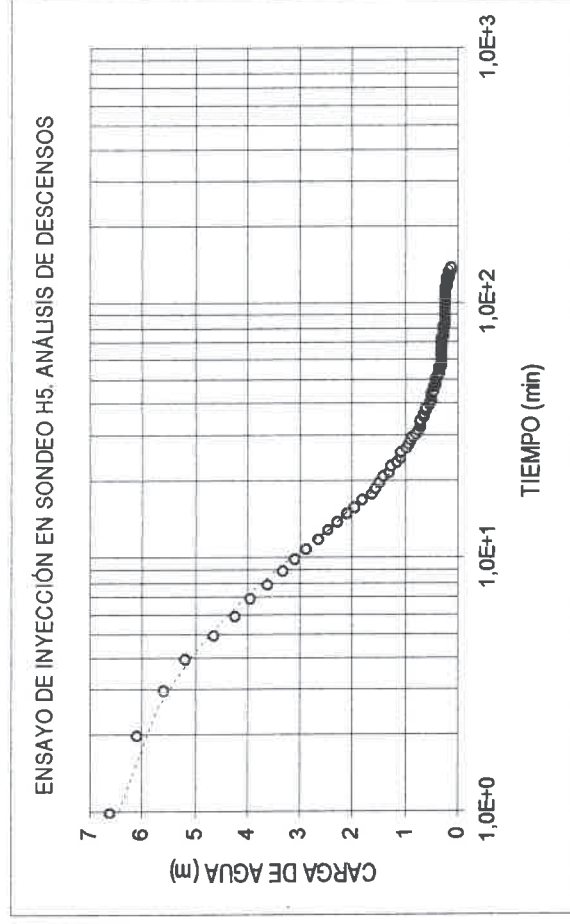


Figura 11: Curva de descenso e interpretación sondeo H5.

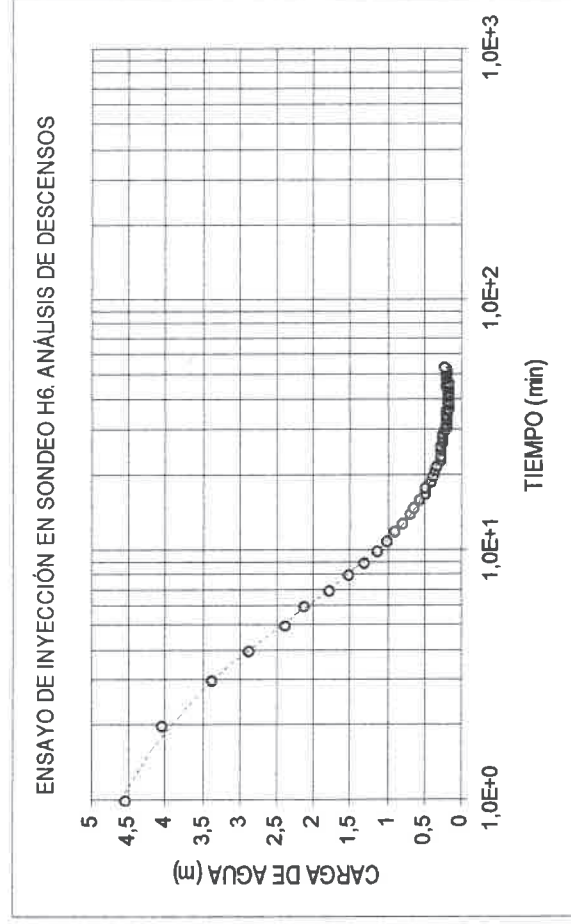


Figura 12: Curva de descenso e interpretación sondeo H6.

Pozo	Permeabilidad (m/s)	
	Inyección	Bombeo
H5	$1.27 \cdot 10^{-7}$	$1.11 \cdot 10^{-6}$
H5	$6.6 \cdot 10^{-7}$	$5.3 \cdot 10^{-6}$
H6	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$8.8 \cdot 10^{-6}$

Tabla 2: Valores de permeabilidad según el tipo de ensayo.

dad, k , y la señal N-N es similar a la que existe con la porosidad, entonces se podrá encontrar una relación lineal entre $\text{Ln}(k)$ y dicha señal. En el gráfico de la figura 13 se representa la magnitud $-\text{Ln}(k)$, siendo k la permeabilidad en el acuífero de las margas en m/s en el sondeo H5, en función del tiempo en días transcurrido desde el primer ensayo realizado previo al comienzo de las explotaciones. Como se ve, la tendencia de variación de $-\text{Ln}(k)$ es lineal en el tiempo (se representa también la recta de regresión con un r^2 de 0.75).

En dicho gráfico también se ponen de manifiesto cambios en la tendencia, como el que ocurre a partir de los 500 días con una disminución de la

permeabilidad seguida de un aumento en la misma, los cuales se explican perfectamente como cambios en las deformaciones en el terreno, pasando primero de tracción a compresión por efecto de una explotación y posteriormente de compresión a tracción cuando llega la influencia de una segunda explotación. Puesto que los cambios en el macizo rocoso pueden ser bruscos en el plazo de unos meses, no es fácil interpolar entre dos medidas de ahí que se haya optado ajustar la función más simple, una recta, al conjunto de los datos que sí manifiestan esa tendencia.

En el gráfico de la figura 14 se representa $-\text{Ln}(k)$

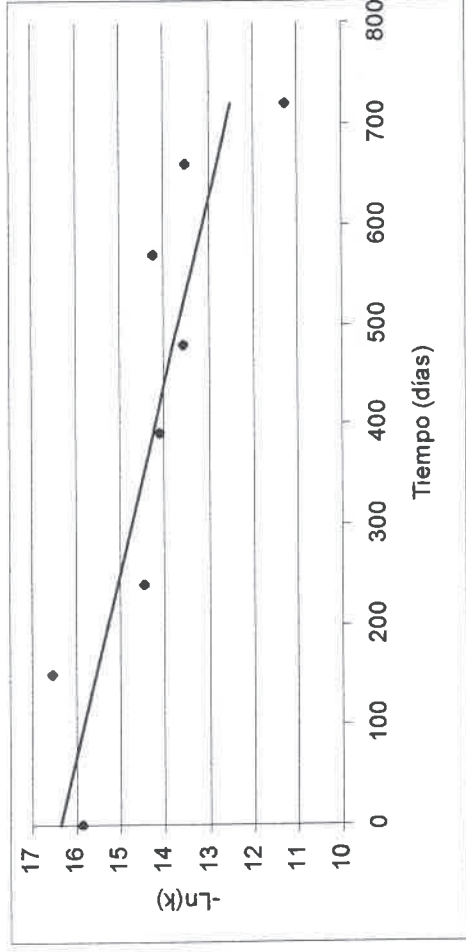


Figura 13: Permeabilidad medida en el sondeo H5.

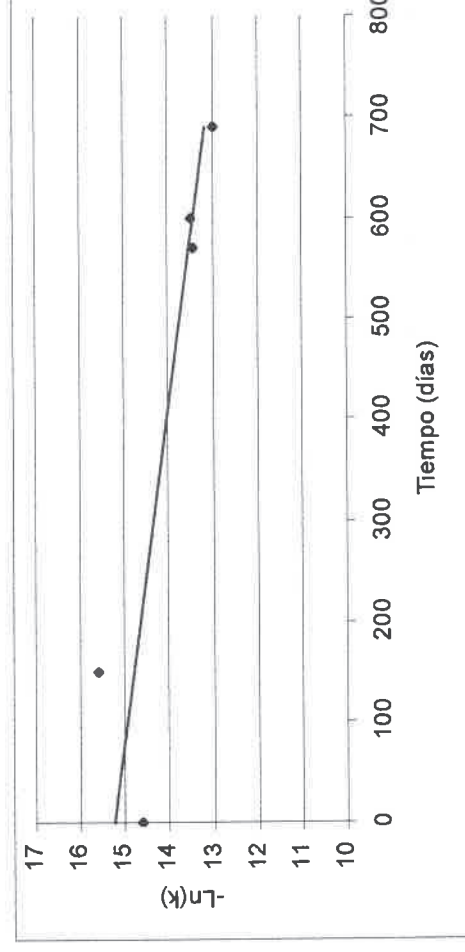


Figura 14: Permeabilidad medida en el sondeo H6.

para el caso del sondeo H6, comprobándose también en este caso la tendencia lineal en la evolución de dicho parámetro (valor de r^2 de 0.76).

CAMPAÑAS DE TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA

Simultáneamente al control de la permeabilidad se llevaron a cabo durante los dos años un total de 5 campañas de testificación geofísica en los sondeos H5 y H6.

Aunque el acero no influye demasiado en la señal N-N, era interesante encontrar ese factor de reducción a fin de poder utilizar correlaciones normalizadas que siempre se refieren a pozo sin tubería. Para eso se realizaron durante la fase de ejecución de los sondeos una testificación antes y después de entubar encontrándose que la atenuación que introduce dicho revestimiento es del orden de un 72% para los sondeos H5 y H6 (gráfico de la figura 15).

En la figura 16 se muestran los registros realizados por la sonda N-N en el sondeo H5 en el tramo correspondiente al acuífero de las margas. Se ha tomado como representativa la señal en la parte central de dicho tramo a fin de eliminar posibles influencias de la zona superior de arcillas y limos o de la zona inferior de las calizas. La señal N-N viene en unidades *API-neutron* (unidad del

American Petroleum Institute proporcional a la unidad c.p.s.) y la profundidad en m. Todos los registros fueron hechos con el sondeo una vez entubado y lleno de agua. Alguno de ellos aparece algo más suavizado debido a un filtrado de la señal al utilizar diferente intervalo de muestreo.

Si se toma como representativo para una fecha el valor medio de la señal para todo el tramo y se representa éste en función de los días transcurridos desde que se comenzaron las campañas se obtiene el gráfico de la figura 17. En él se ha tomado como origen el mismo que para el caso de los ensayos hidráulicos. Se observa cómo la señal media N-N del acuífero tiene una evolución en el tiempo prácticamente lineal ($r^2=0.95$) similar a la de la permeabilidad.

De la misma manera se puede proceder con los registros de testificación obtenidos en el sondeo H6. Ahora bien, en este caso los registros en principio no resultaban comparables ya que a partir de la segunda testificación había bajado el nivel freático por debajo de las margas realizándose las testificaciones 2^a, 3^a y 4^a con el pozo sin agua.

Durante la quinta campaña, después de resolver algunos problemas técnicos, se logró aportar agua al pozo realizándose entonces en las mismas condiciones que la primera.

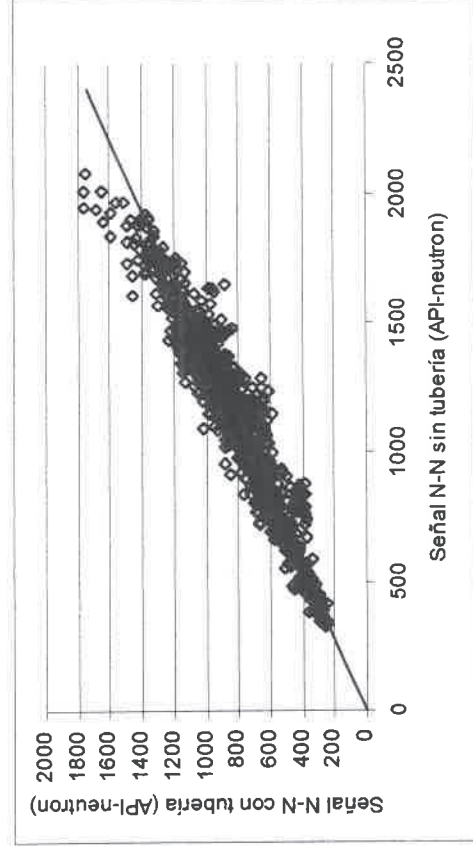


Figura 15: Atenuación de la señal N-N debido a la tubería.

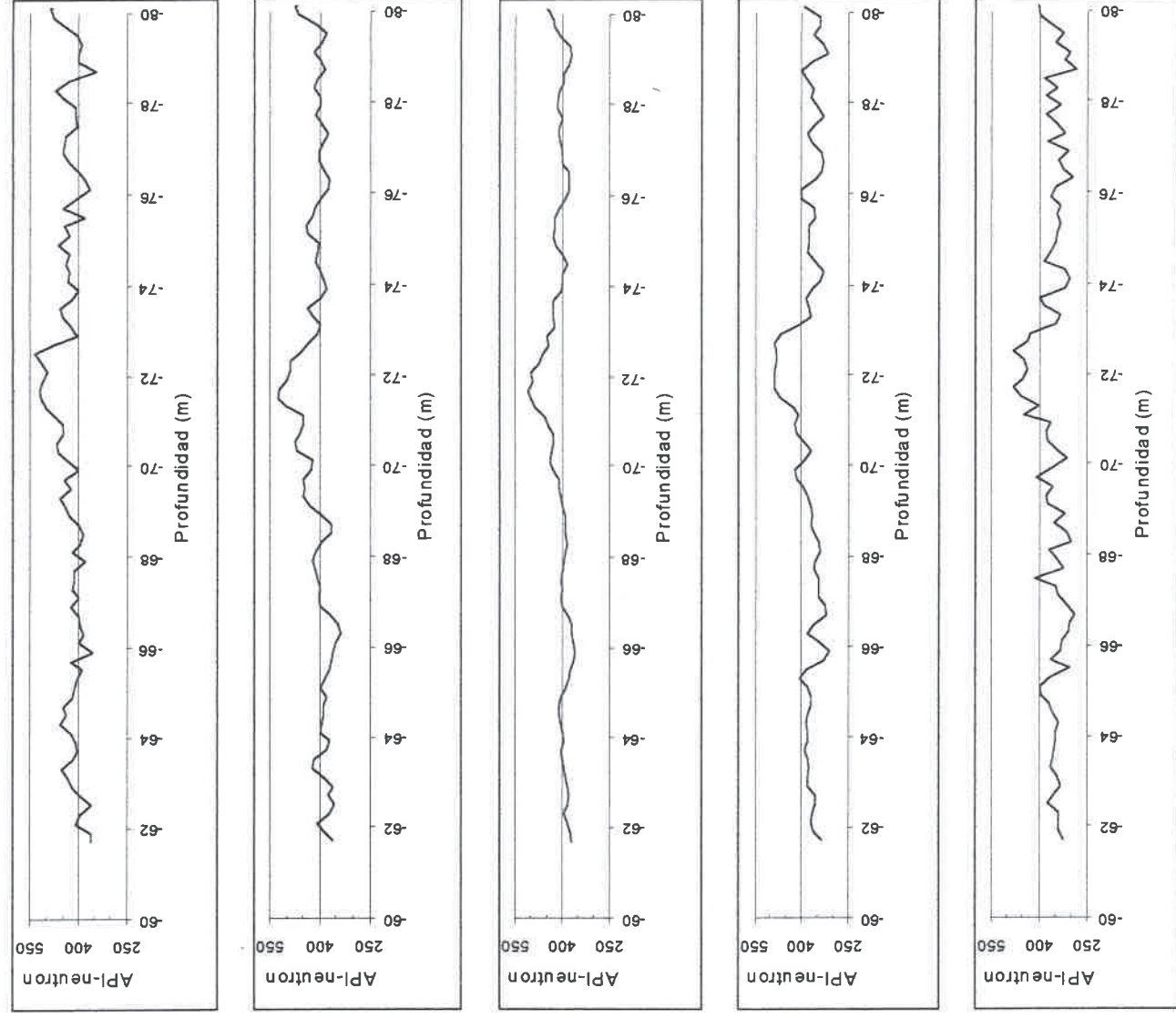


Figura 16: Evolución del registro N-N en las margas atravesadas en el sondeo H5.

Para corregir los registros realizados sin agua se procedió al análisis de los escalones que se producían en la señal al alcanzar la sonda el nivel freático (ver ejemplos en figura 18) encontrándose la relación:

$$nn_a = 0.397 \cdot nn - 544.6$$

donde nn_a y nn son las señales obtenidas con agua y sin ella.

A continuación se reproducen los registros de las cinco campañas después de corregir la 2ª, 3ª y 4ª según la relación anterior (figura 19) tomándose como representativa también en este caso la

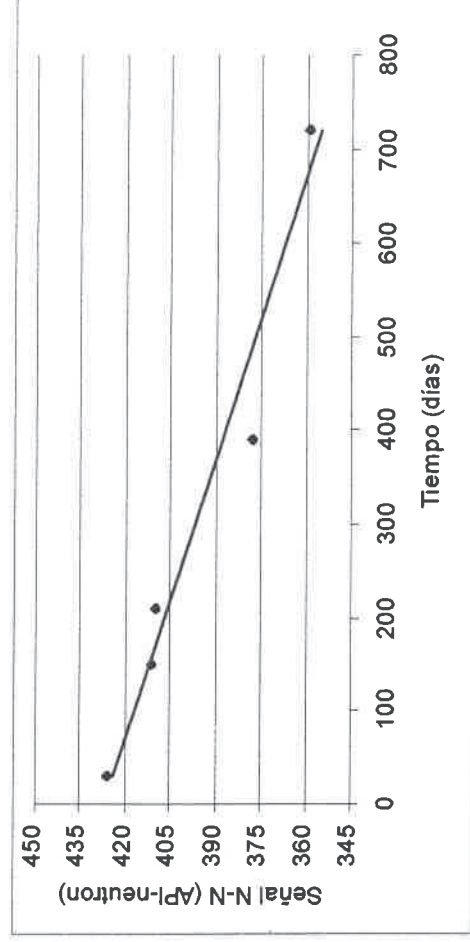


Figura 17: Evolución de la señal N-N en las margas atravesadas en el sondeo H5.

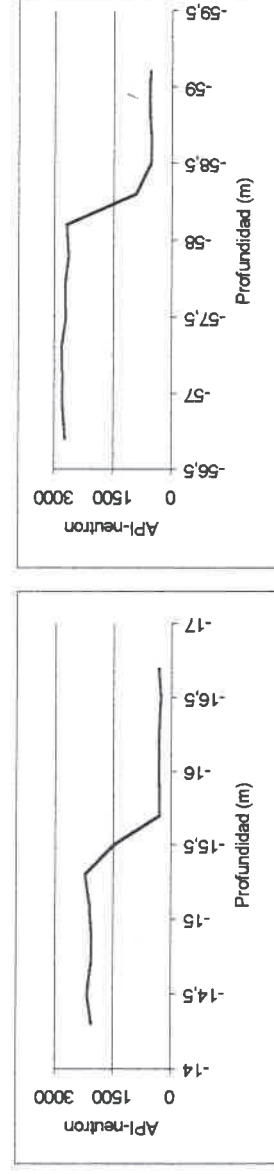


Figura 18: Escalones producidos al llegar al nivel freático.

parte central fuera de la influencia de las otras litologías.

De la misma manera que se hizo en el caso anterior, se puede representar el valor medio de la respuesta N-N en el acuífero frente al tiempo (gráfico de la figura 20), llegándose también en este caso a una relación lineal ($r^2= 0.95$).

CORRELACIÓN ENTRE PERMEABILIDAD Y RESPUESTA N-N PARA EL ACUÍFERO DE LAS MARGAS

A partir de las rectas de ajuste obtenidas con los datos de H5 y H6 de la evolución de la permeabilidad, $-\ln(k)$, y de la señal N-N en el tiempo se llega a una relación entre estas dos variables,

también lineal, prácticamente igual para los dos casos estudiados que es la siguiente:

$$-\ln(k) = 0.0552 \cdot nn - 7.2085 \Rightarrow k = 1351 \cdot e^{-0.0552nn}$$

en la que k es la permeabilidad del acuífero en m/s y nn es la señal N-N en unidades *API-neutron*.

Dicha relación era la que se buscaba en principio y permitiría estimar con precisión suficiente la permeabilidad del acuífero a partir del registro geofísico obtenido en el sondeo sin necesidad de recurrir a ensayos hidráulicos. Con esto se conseguía ampliar el campo de aplicación de la testificación geofísica con la sonda N-N, cuya utilización para la caracterización del macizo rocoso en terrenos carboníferos ya había sido demostrada

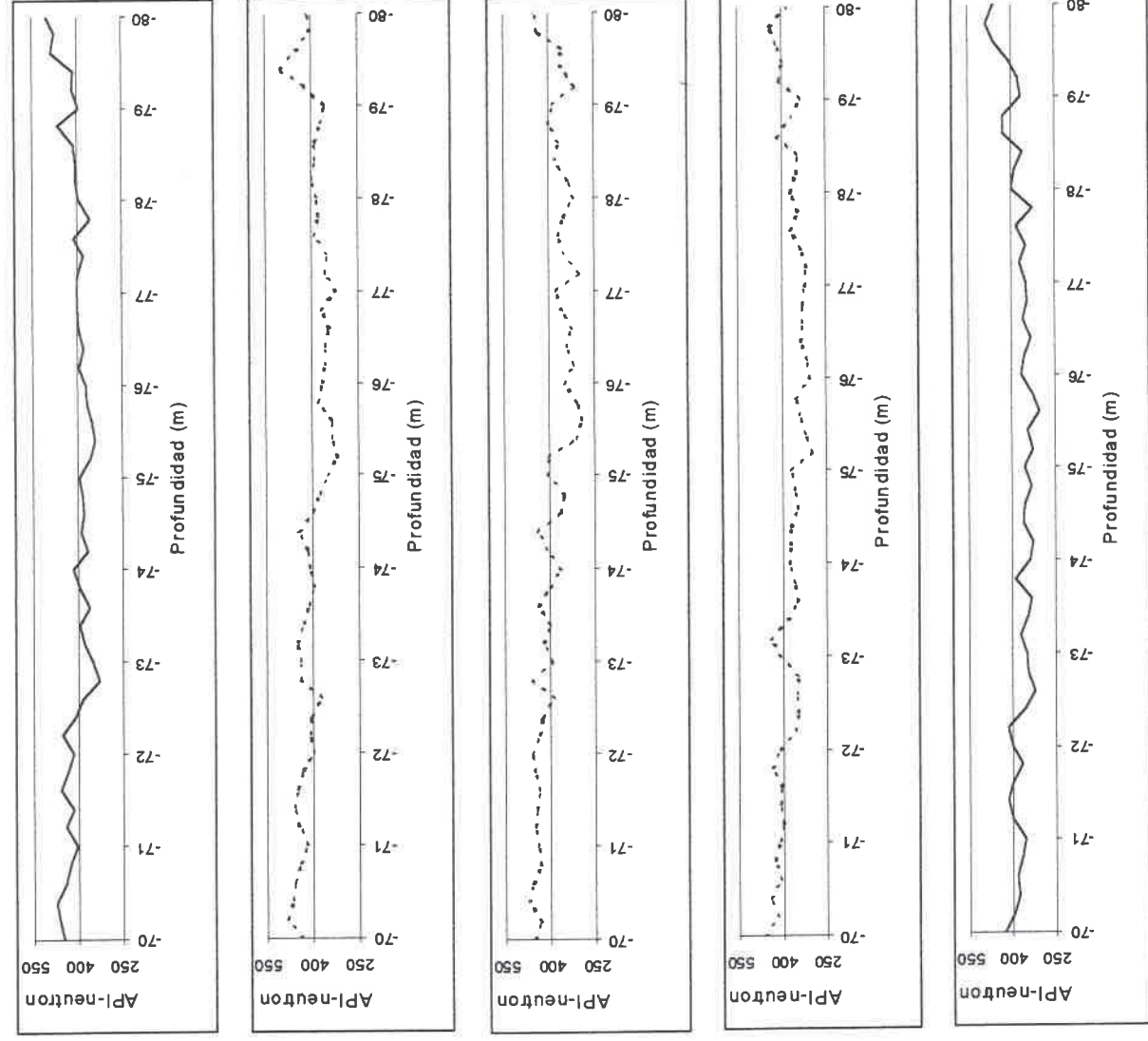


Figura 19: Evolución del registro N-N en las margas atravesadas en el sondeo H6.

en investigaciones en el Reino Unido (Whitworth y Dison, 1985) y en España (Hevia et al., 1994).

La relación establecida es válida para las testificaciones realizadas en sondeos de aproximadamente 6" (152 mm), con tubería de acero y con el sondeo lleno de agua. Para poder aplicar dicha

relación en todos los sondeos de la zona que llegaban al acuífero de las margas, con diámetros entre 2" y 8" (51 y 203 mm), se recurrió a la información sobre la variación de la señal N-N con el diámetro del sondeo que suministra el fabricante de la sonda:

$$nn_{a'} = c_1 \cdot nn_b + c_0$$

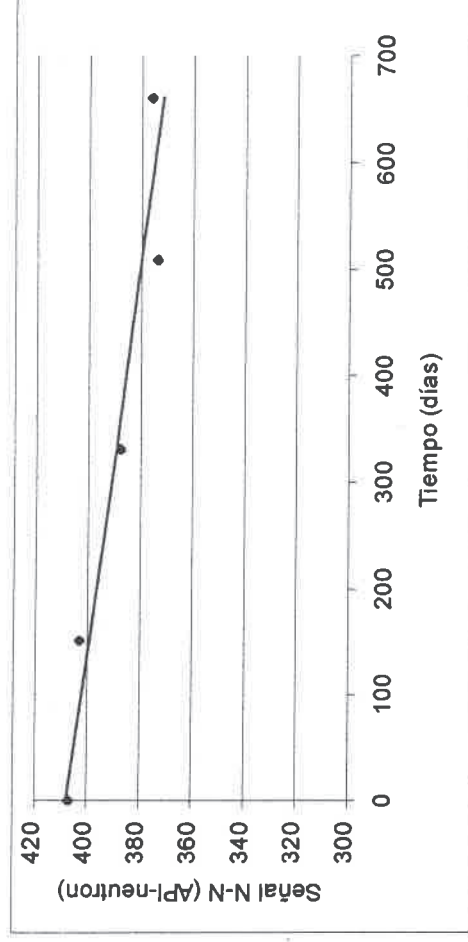


Figura 20: Evolución de la señal N-N en las margas atravesadas en el sondeo H6.

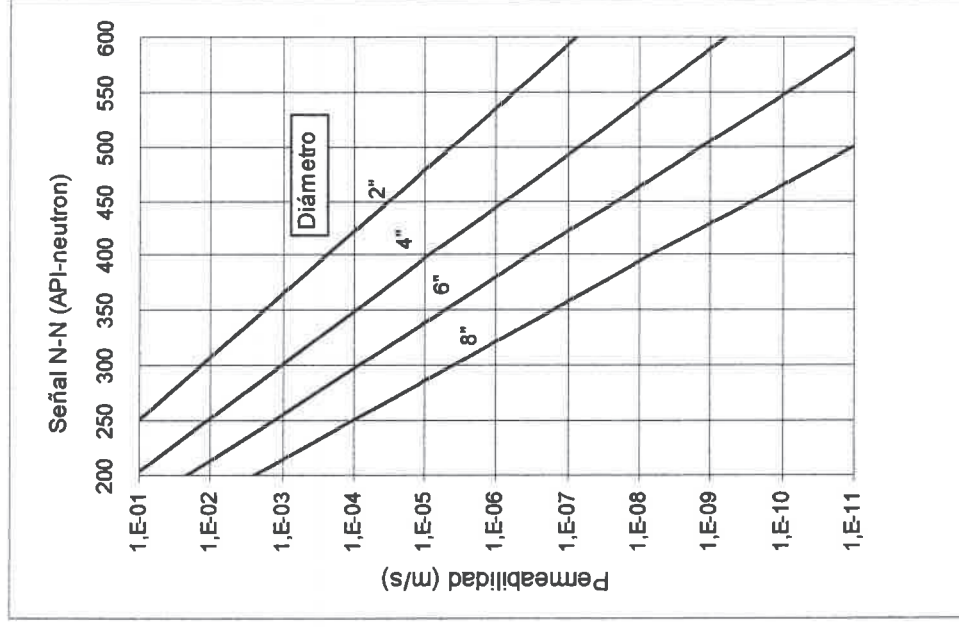


Figura 21: Relación permeabilidad-senal N-N para varios diámetros.

donde nn_a y nn_b son las señales obtenidas en pozos de diámetros a'' y b'' respectivamente (medidos en pulgadas) y c_v , c_l coeficientes empíricos.

A partir de la relación se pudo elaborar el ábaco de la figura 21. Entrando por abscisas con la magnitud de la señal N-N en unidades *API-neutron* se lleva una paralela al eje vertical hasta la recta correspondiente al diámetro del sondeo y se traza una horizontal hasta el eje de ordenadas que nos da directamente la permeabilidad en m/s.

REFERENCIAS

- Areces, J.L.; Pieren, A.; Torano, J.; Rodríguez, R. (1994a). *Nuevos datos sobre la estructura general del Carbonífero en el Horst de la Camocha (Gijón, Asturias)*. Boletín Geológico y Minero (ITGE). Vol. 105-2, Marzo-Abril 1994; pp 167-177.
- Areces, J.L.; Tenajas, J.L.; Torano, J.; Pieren, A.; Pendás, F.; Rodríguez, R. (1994b). *Caracterización de los Parámetros Hidráulicos de la Cobertera pérmica en el Horst de La Camocha*. Boletín Geológico y Minero (ITGE). Vol. 105, Marzo-Abril 1994; pp 72-85.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1976). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega. 2359 páginas.
- Hevia, A.; Torano, J.; Areces, J.; Rodríguez, R.; Ramos, F. (1994). *Uso de la testificación geofísica para la determinación de parámetros geomecánicos*. Simposio internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción, Cuba, Universidad Central de Las Villas.

Plata, J.L.; Alonso, T.; Alberdi, R.; Aracil, E. (1996). *Testificación geofísica de sondeos mecánicos*. ITGE, Dirección de Geología y Técnicas Básicas. 62 páginas.

Whitworth, K.R. (1982). *Induced changes in permeability of coal measure strata as an indicator of the mechanics of rock deformation above longwall coal face*. Proc. Symp. on Strata

Mechanics, Univ. of New Castle-upon-Tyne, England. (ed. I.W. Farmer). Devs. in Geotechnical Engineering. v. 32, pp. 18-24.

Whitworth, K.R.; Dison, I. (1985). *Downhole logging: extracting information from boreholes*. Corporate Source: BPB Instruments Ltd, Loughborough, Engl.. Colliery Guardian v 233 n 8, 5p 400-408.

Original recibido: Julio de 1999.

Original aceptado: Diciembre de 1999.