

NUEVOS DATOS EXPERIMENTALES SOBRE PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS DE LA CUENCA DE MADRID OBTENIDOS A PARTIR DE MUESTRAS DE SONDEOS *

J. M. Fornés Azcoiti ** y F. I. Villarroya Gil **

RESUMEN

Se hace una revisión crítica de los principales parámetros hidrogeológicos (porosidad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento específico), del Terciario detrítico de la cuenca de Madrid. Para este estudio además de los datos existentes en la bibliografía, se han realizado una serie de análisis de laboratorio desarrollados en las instalaciones del SGOP obteniendo, de esta manera, nuevos valores experimentales de los citados parámetros, mediante ensayos granulométricos (26), de densidad seca (26), de peso específico (26), de permeabilidad (20) y ensayos edométricos (6). Las muestras proceden de tres sondeos realizados en el casco urbano de Madrid por el SGOP (MOPU).

Los resultados obtenidos coinciden, en gran medida, con los existentes en la bibliografía, si bien, los valores de porosidad total son marcadamente más altos.

Palabras clave: Porosidad total, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento específico, cuenca de Madrid.

ABSTRACT

A critical review of main hydrogeological parameters (porosity, permeability and specific storage coefficient) of Madrid Basin Detrital Aquifer is done. For this study, data from the bibliography and new laboratory analysis of grain size distribution (26), dry density (26), specific weight (26), permeability (20) and consolidation test (6) samples from three boreholes are used.

The results are quite similar to those than already exist in the literature, although the porosity obtained is higher.

Key words: Total porosity, permeability, specific storage coefficient, Madrid Basin.

Introducción

Como es sabido desde hace mucho tiempo, el Terciario de la Cuenca del Tajo es de origen continental y en él se encuentran representados el Oligoceno, el Mioceno y el Plioceno. El Mioceno ocupa la mayor parte del Terciario detrítico de la cuenca de Madrid; en él podemos distinguir tres facies distintas: a) facies detrítica; b) facies de transición, y c) facies evaporítica (fig. 1). Desde el punto de vista hidrogeológico, la facies detrítica es la que presenta mayor interés. La importancia del acuífero del Terciario detrítico de Madrid, no sólo radica en su extensión (5.500 km²) sino también en su gran espesor, alcanzando en algunas zonas potencias superiores a los 3.000 m (montes de El Pardo).

Se han analizado 26 muestras procedentes de tres sondeos realizados en el casco urbano de Madrid (Avenida de Portugal, barrio de San Blas y Vallecas) y que pertenecen a la facies detrítica. Estas muestras se recogieron de los respectivos sondeos, mediante testigo continuo (Calvo *et al.*, 1985).

Estudios previos

Son abundantes los estudios realizados en el Terciario detrítico de la cuenca de Madrid con vistas a definir sus características hidrogeológicas y evaluar los recursos hidráulicos. Sin embargo, no se puede afirmar lo mismo sobre el estudio específico de los parámetros hidrogeológicos, ya que en lo que se re-

* Este trabajo corresponde a la tesis de Licenciatura del primer autor.

** Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas UC. 28040 Madrid.

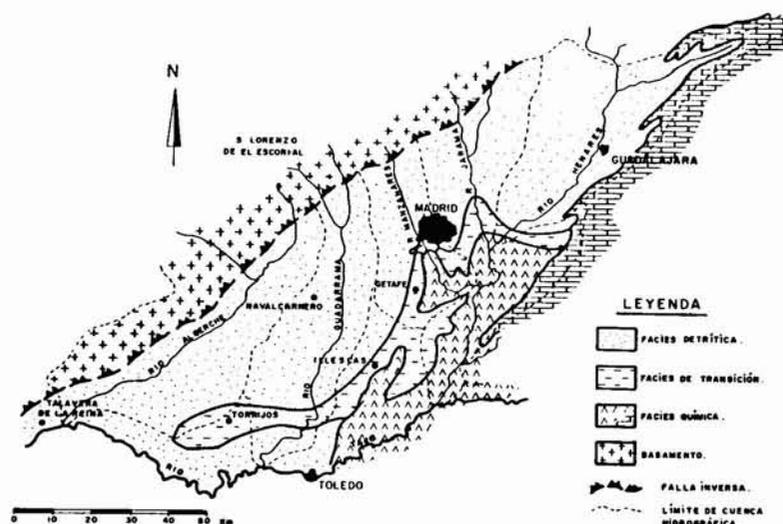


Fig. 1.—Esquema de la distribución de facies (López-Camacho, 1980).

fiere a porosidad y al coeficiente de almacenamiento, la penuria de datos fiables es notable (Llamas, 1986). En la tabla 1 se recogen los valores obtenidos por diferentes autores para diversos parámetros hidrogeológicos.

Localización de sondeos y muestras

Lo que motivó la planificación y realización de estos tres sondeos profundos fue conseguir una interpretación más ajustada de la distribución de las facies en el área municipal de Madrid. De ahí que la ubicación de los sondeos no sea la óptima para nuestro estudio, aunque las muestras empleadas pertenezcan a las facies detrítica.

La figura 2 representa un esquema geológico del área de Madrid, con la situación de los sondeos realizados. Las columnas litológicas de dichos sondeos aparecen en la figura 3.

El sondeo SGOP-1 se ubica en la Avenida de Portugal, con una profundidad total de 256 m. La columna obtenida, consta esencialmente de depósitos arcósicos finos con términos arcillosos y algunos niveles evaporíticos en su parte inferior. El sondeo SGOP-2 está emplazado en el barrio de San Blas, con profundidad de 203 m y atraviesa tres unidades litoestratigráficas bien definidas. El sondeo SGOP-3 está situado en el término municipal de Vallecas y alcanza una profundidad de 180 m.

Tabla 1.—Estudios previos sobre los parámetros hidrogeológicos del terciario detrítico de Madrid

Autores	Año	Parámetros hidrogeológicos				Coeficiente de almacenamiento
		Porosidad (%)		Permeabilidad (m/día)		
		Total	Eficaz	Horizontal	Vertical	
Llamas y López Vera (xx)	1975	5-15				0,0001-0,001
López Vera (xx)	1977			0,053-1,28		0,001
Martínez Alfaro (xx)	1977			0,04 -4,63		0,0005-0,0028
Rebollo (xx)	1977			2,5		0,15
Villarroya (xx)	1977					0,00003-0,00017
López Palancar y Mtz. Alfaro (x)	1980	1-10		0,1-16	0,00001-0,9	0,001-0,01
Miguel Marín (xxx)	1982			0,02 -0,3		
Virgos Soriano et al. (x)	1983			0,0025		0,0005

VALORES DETERMINADOS MEDIANTE:

(x) Calibración de modelos.

(xx) Ensayos de bombeo.

(xxx) Ensayos de laboratorio.

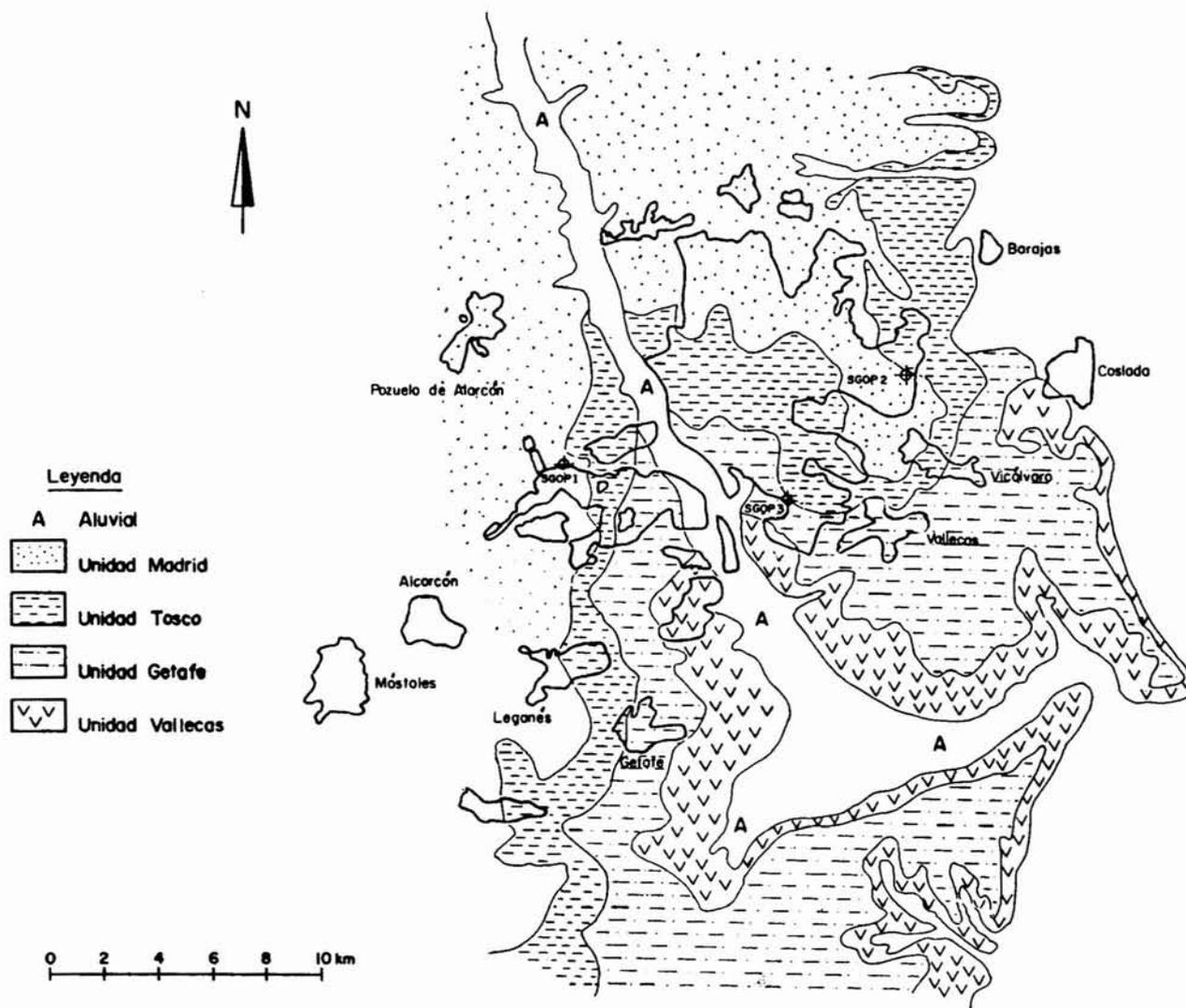


Fig. 2.—Esquema geológico del área de Madrid (a partir de Aguiló, 1983), con situación de los sondeos realizados.

De cada uno de los sondeos se han tomado las siguientes muestras:

- SGOP-1: 13 muestras.
- SGOP-2: 8 muestras.
- SGOP-3: 5 muestras.

Clasificación de sondeos y muestras

La clasificación de cada muestra, se ha realizado atendiendo a su análisis granulométrico. El mayor número de muestras se ha tomado del SGOP-1 ya que es el que presenta una mayor potencia de la facies detrítica (180 m aproximadamente). Los sondeos SGOP-2, SGOP-3 presentan un espesor de facies de-

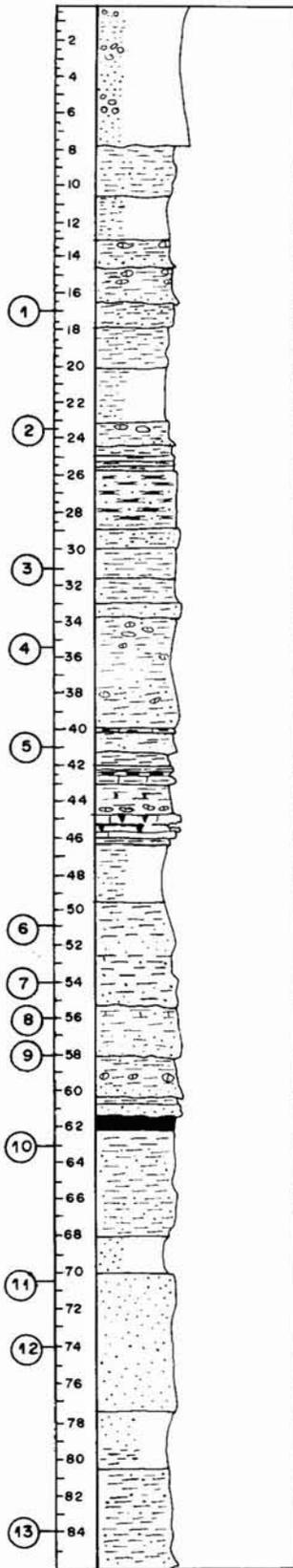
trítica en torno a 35 m. En la tabla 2 vienen representados estos datos.

Obtención de parámetros hidrogeológicos

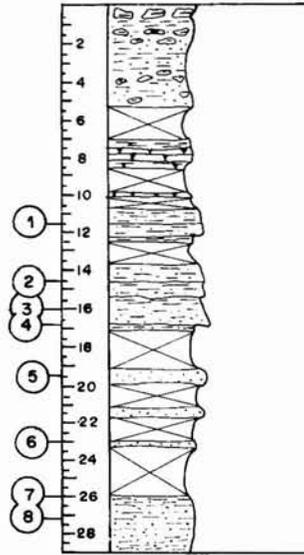
A continuación se explican brevemente las técnicas empleadas para la obtención de la porosidad total, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento específico.

a) *Porosidad total*

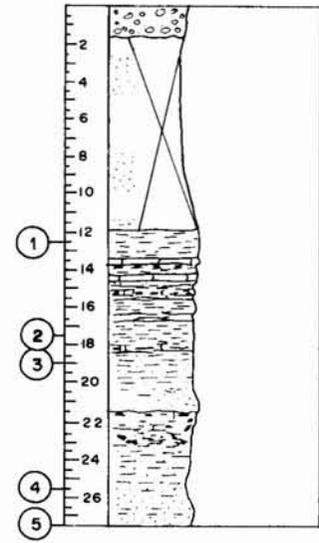
Se ha empleado el método gravimétrico y, por consiguiente, es necesario calcular la densidad seca y el



B. - COLUMNA LITOLÓGICA DEL SONDEO DE SAN BLAS (SGOP-2)



C. - COLUMNA LITOLÓGICA DEL SONDEO DE VALLECAS (SGOP-3)



LEYENDA

- GRAVAS
- ARCILLAS ARENOSAS, LIMOS
- ARCILLAS CON NODULOS CARBONATICOS
- ARENAS (LOCALMENTE CON CEMENTO YESIFERO)
- LUTITAS
- MARGAS CALCAREAS, CALIZAS Y NIVELES DE SILEX
- CARBONATOS Y ARCILLAS SEPIOLITICAS
- YESOS MASIVOS, NODULARES Y FIBROSOS ENTRE ARCILLAS
- NIVELES DE SALES SODICAS ENTRE ARCILLAS

A. COLUMNA LITOLÓGICA DEL SONDEO DE LA AVDA. DE PORTUGAL (SGOP-1)

Fig. 3.—Columnas litológicas de los sondeos del SGOP (en Calvo Sorando *et al.*, 1985).

peso específico de cada muestra (Custodio y Llamas, 1983, pág. 469).

$$m = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}$$

m = porosidad total.

γ_s = peso específico.

γ_d = densidad seca.

La densidad seca es el cociente entre el peso de la muestra seca (obtenido al someter la muestra a temperaturas del orden de 105, 110° C) y el volumen de la misma.

El peso específico o densidad real de las partículas inferiores a 4,75 mm (tamiz n.º 4 ASTM) se obtiene por medio del picnómetro. Este parámetro se determina calculando el cociente entre el peso de las partículas secas y el volumen de dichas partículas [peso partículas secas/(tara + agua a 20° C) + partículas secas - (tara + partículas + agua)].

De esta manera se han obtenido los valores de porosidad total que aparecen en la tabla 3.

Interpretación: Los valores dados por diferentes autores de este parámetro, para el Terciario detrítico de la cuenca de Madrid o para materiales simila-

res, no sobrepasan el 45 %. La porosidad total media determinada en este trabajo es de un 49,5 %, siendo el intervalo que presenta mayor frecuencia el de 46-50 %. Según una tabla de porosidades totales confeccionada por varios autores (Johnson, Davis, Schoeller..., en Custodio y Llamas, 1983, pág. 468), los valores obtenidos son muy similares a los que tienen las «arcillas sin compactar» (máximo 60 %; mínimo 40 %; media 45 %), puesto que las muestras estudiadas no estaban en las condiciones «in situ» originales.

Casi la mitad de las muestras analizadas, las hemos clasificado como arcosas arcillosas; es precisamente esta fracción arcillosa, la que confiere el considerable aumento de la porosidad total. Aunque todas las muestras pertenecen a la facies detrítica, no son muy representativas, no sólo por el alto contenido arcilloso, sino también, por el escaso desarrollo de dicha facies en las zonas donde se ubican los tres sondeos estudiados.

b) Permeabilidad

El sistema más directo de medir la permeabilidad vertical en el laboratorio es aplicando la ley de Darcy a un cilindro del material en ensayo. Se ha utilizado

Tabla 2.—Clasificación de las muestras

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	% Finos	Clasificación
SGOP-1	1,1	17,0	96,3	Arcilla arenosa
	1,2	23,5	98,1	Arcilla arenosa con algunos carbonatos
	1,3	31,0	55,7	Arenas arcosas muy arcillosas
	1,4	35,5	90,4	Arcilla arenosa algo margosa
	1,5	41,0	53,3	Arcilla arenosa con nódulos de carbonato
	1,6	51,0	77,9	Arcilla arenosa con carbonatos
	1,7	54,0	51,7	Arcosa arcillosa con nódulos de carbonato
	1,8	56,0	71,1	Arcilla arenosa con carbonatos
	1,9	58,0	96,5	Arcilla arenosa
	1,10	63,0	96,6	Arcilla
	1,11	70,5	47,8	Arcosa con niveles arcillosos
	1,12	74,0	58,1	Arcosa con niveles arcillosos
	1,13	84,0	68,1	Arcilla arenosa
SGOP-2	2,1	11,5	49,5	Arcosa arcillosa
	2,2	14,5	66,1	Arcilla arenosa micácea
	2,3	16,0	45,5	Arcosa arcillosa
	2,4	16,5	9,0	Arcosa limpia
	2,5	19,5	5,0	Arcosa limpia
	2,6	23,0	19,5	Arcosa limosa
	2,7	26,0	93,8	Arcilla
	2,8	27,0	98,8	Arcilla micácea
SGOP-3	3,1	12,5	99,2	Arcilla con nódulos de carbonatos y óxidos
	3,2	17,5	70,0	Arcilla arenosa
	3,3	19,0	38,5	Arcosa arcillosa con óxidos
	3,4	25,5	20,7	Arcosa arcillosa
	3,5	27,5	19,8	Arcosa arcillosa

el permeámetro de carga variable debido al alto contenido arcilloso de las muestras, ya que sólo se emplea en muestras relativamente impermeables. En seis muestras (señaladas con asterisco en la tabla 3), este parámetro ha sido calculado a través de ensayos edométricos.

La fórmula empleada ha sido la siguiente (Custodio y Llamas, 1983 pág. 475):

$$K = \frac{a}{A} \frac{l}{t_1} \ln \frac{h_0}{h_1}$$

siendo:

- K = permeabilidad vertical (cm/s).
- a = sección del tubo manométrico (11,34 cm²).
- A = sección del cilindro (15,9 cm²).
- l = altura del cilindro (7,2 cm).
- t₁ = tiempo transcurrido (s), cuando h = h₁.
- h₀ = altura del nivel de agua (119 cm), cuando t = 0.
- h₁ = altura del nivel de agua, cuando t = t₁.

Los valores obtenidos pueden verse en la tabla 3.

Interpretación: Los valores de permeabilidad obtenidos mediante ensayos edométricos (muestras 1.3, 1.8, 1.9, 2.2, 3.1, 3.3) son dos o tres órdenes de magnitud inferiores a los del resto de las muestras. Seaber y Vecchioli (1965), después de realizar numerosos ensayos por ambos métodos, concluyen que los valores de permeabilidad hallados mediante un permeámetro de carga variable pueden ser hasta 10.000 veces mayores a los obtenidos mediante un edómetro.

Los resultados obtenidos mediante ensayos edométricos son más fiables para muestras situadas a una considerable profundidad (Seaber y Vecchioli, 1965) puesto que reproducen más fielmente el estado «in situ» de la muestra.

Teniendo en cuenta los valores de K calculados mediante el permeámetro de carga variable, la permeabilidad media es de 1,1 m/día. Este valor está fuertemente influenciado por dos muestras de arcasas limpias del sondeo SGOP-2. Como no son representativas de la población estudiada, podemos considerar que la K media desciende a 0,11 m/día.

Este valor medio de la permeabilidad es propio de

Tabla 3.—Nuevos datos obtenidos de porosidad total, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento específico

Muestra	Profundidad (m)	Porosidad total (%)	Permeabilidad vertical (m/día)	Coficiente de almacenamiento específico (m ⁻¹)
1,1	17,0	53,6	2 × 10 ⁻³	
1,2	23,5	56,0	5,3 × 10 ⁻⁴	
1,3	31,0	38,7	1,5 × 10 ⁻⁶ (x)	4,4 × 10 ⁻⁴
1,4	35,5	56,4	9,9 × 10 ⁻⁴	
1,5	41,0	48,1	8,8 × 10 ⁻⁴	
1,6	51,0	51,5	1,5 × 10 ⁻³	
1,7	54,0	48,9	3,5 × 10 ⁻³	
1,8	56,0	35,1	1,4 × 10 ⁻⁶ (x)	5,6 × 10 ⁻⁴
1,9	58,0	35,6	3,5 × 10 ⁻⁶ (x)	2,5 × 10 ⁻⁴
1,10	63,0	53,1	1,5 × 10 ⁻⁴	
1,11	70,5	49,2	6,2 × 10 ⁻⁴	
1,12	74,0	46,4	3,3 × 10 ⁻³	
1,13	84,0	51,3	4 × 10 ⁻³	
2,1	11,5	49,8	1,2 × 10 ⁻²	
2,2	14,5	39,5	1,2 × 10 ⁻⁶ (x)	3,4 × 10 ⁻⁴
2,3	16,0	39,1	1 × 10 ⁻²	
2,4	16,5	41,1	3	
2,5	19,5	39,7	17	
2,6	23,0	50,0	1,3 × 10 ⁻¹	
2,7	26,0	52,3	1,3 × 10 ⁻³	
2,8	27,0	59,1	1 × 10 ⁻¹	
3,1	12,5	62,4	7,6 × 10 ⁻⁶ (x)	4,1 × 10 ⁻⁴
3,2	17,5	64,9	1,2 × 10 ⁻²	
3,3	19,0	62,2	1,2 × 10 ⁻⁶ (x)	3,4 × 10 ⁻⁴
3,4	25,5	45,1	1,04	
3,5	27,5	57,1	0,75	

(x) Valores determinados mediante ensayos de consolidación.

arenas limosas y limos (Silin-Bekchurin, en Custodio y Llamas, 1983, pág. 471).

c) *Coficiente de almacenamiento específico*

Para calcular el valor de este parámetro hemos empleado los ensayos edométricos. Las muestras utilizadas han sido las 1.3, 1.8, 1.9, 2.2, 3.1, 3.3.

El edómetro consiste en un anillo cortador, en el que se encuentra comprimida la muestra entre dos placas porosas, cuyo desplazamiento relativo puede medirse con gran exactitud, mediante un dial o cuadrante de medida. Esta compresión de muestra se lleva a cabo mediante la aplicación de sucesivas cargas de 1, 2, 4, 8, 16, 32 kg de tal manera que una carga de 1 kg va a generar sobre la muestra una presión de 0,5 kg/cm² (Jiménez Salas y De Justo Alpañés, 1975). El edómetro utilizado ha sido de la marca SOILTEST.

Los resultados del ensayo edométrico se representan de la siguiente forma (Fornés, 1988):

1. Hoja de lecturas: se representan ocho tablas, de las cuales seis pertenecen al período de compresión y dos al período de descompresión. Se anota el tiempo transcurrido y la lectura que marca la aguja del cuadrante de medida correspondiente, por cada una de las cargas aplicadas. Con estos datos podemos calcular el cambio de altura experimentado por la muestra en cada escalón de carga.

2. Hoja de resultados: obtenemos la humedad de la muestra al principio y al final del ensayo. Los valores más importantes recogidos en esta hoja son los referentes al índice de poros (e) ya que posteriormente nos servirán para representar la curva edométrica.

3. Curva edométrica (fig. 4): es la representación del ensayo edométrico. Se elabora colocando en abscisas las presiones (kg/cm²) en escala logarítmica, y en ordenadas el índice de poros alcanzado al final del período de consolidación correspondiente a cada presión. En la curva edométrica podemos distinguir diferentes ramas:

- a) Rama de recompresión: corresponde a las presiones que son inferiores a las que tenía la muestra en el terreno.
- b) Rama de compresión noval: corresponde a las presiones que son mayores a las que tenía la muestra en el terreno.
- c) Rama de descarga: es el resultado de disminuir la carga a la que está sometida la muestra.

La rama de compresión noval y la rama de descarga confluyen en un punto que corresponde al índice de poros alcanzado por la muestra al final del período de consolidación correspondiente a una presión

de 16 kg/cm². La rama de compresión noval se puede representar por medio de una ecuación del tipo:

$$e_1 - e = Cc \log \frac{\sigma}{\sigma_1}$$

De esta manera hemos obtenido el índice de compresión (Cc).

Hemos considerado $\sigma = 16 \text{ kg/cm}^2$ y $\sigma_1 = 8 \text{ kg/cm}^2$; e_1 y e son los respectivos índices de poros.

Conocido Cc para cada uno de los ensayos edométricos, calculamos el coeficiente de compresibilidad (Av), (Lambe, 1951):

$$A_v = 0,435 Cc/P$$

siendo P la presión media de cada escalón de carga.

4. Curva de deformación-tiempo: La representación de esta curva nos va a permitir hallar el coeficiente de consolidación (Cv). A partir de esta curva, hay que separar los efectos de la consolidación primaria (debida a la expulsión del agua) y de la consolidación secundaria (debida a la fricción entre partículas del esqueleto sólido). Para esto se ha utilizado el método de Taylor o de la raíz cuadrada del tiempo.

$$C_v = \frac{0,848 H^2}{t_{90}}$$

2H = altura de la muestra correspondiente a la lectura del dial del 90 % de la consolidación primaria.

t₉₀ = tiempo correspondiente al 90 % de la consolidación primaria.

Conocido el coeficiente de consolidación (Cv) determinamos la permeabilidad mediante la fórmula (Lambe, 1951):

$$K = \frac{C_v A_v \gamma_w}{1 + e}$$

K = permeabilidad.

C_v = coeficiente de consolidación.

A_v = coeficiente de compresibilidad.

γ_w = peso específico del agua.

e = valor medio del índice de poros en cada escalón de carga.

Hemos hallado la K para el intervalo de presión de 8-16 kg/cm². Av y Cv no presentan variaciones importantes a lo largo del ensayo edométrico. Por este motivo consideramos el valor de K como representativo de la muestra.

Para calcular el coeficiente de almacenamiento específico partimos de la siguiente fórmula (Custodio y Llamas, 1983, pág. 486):

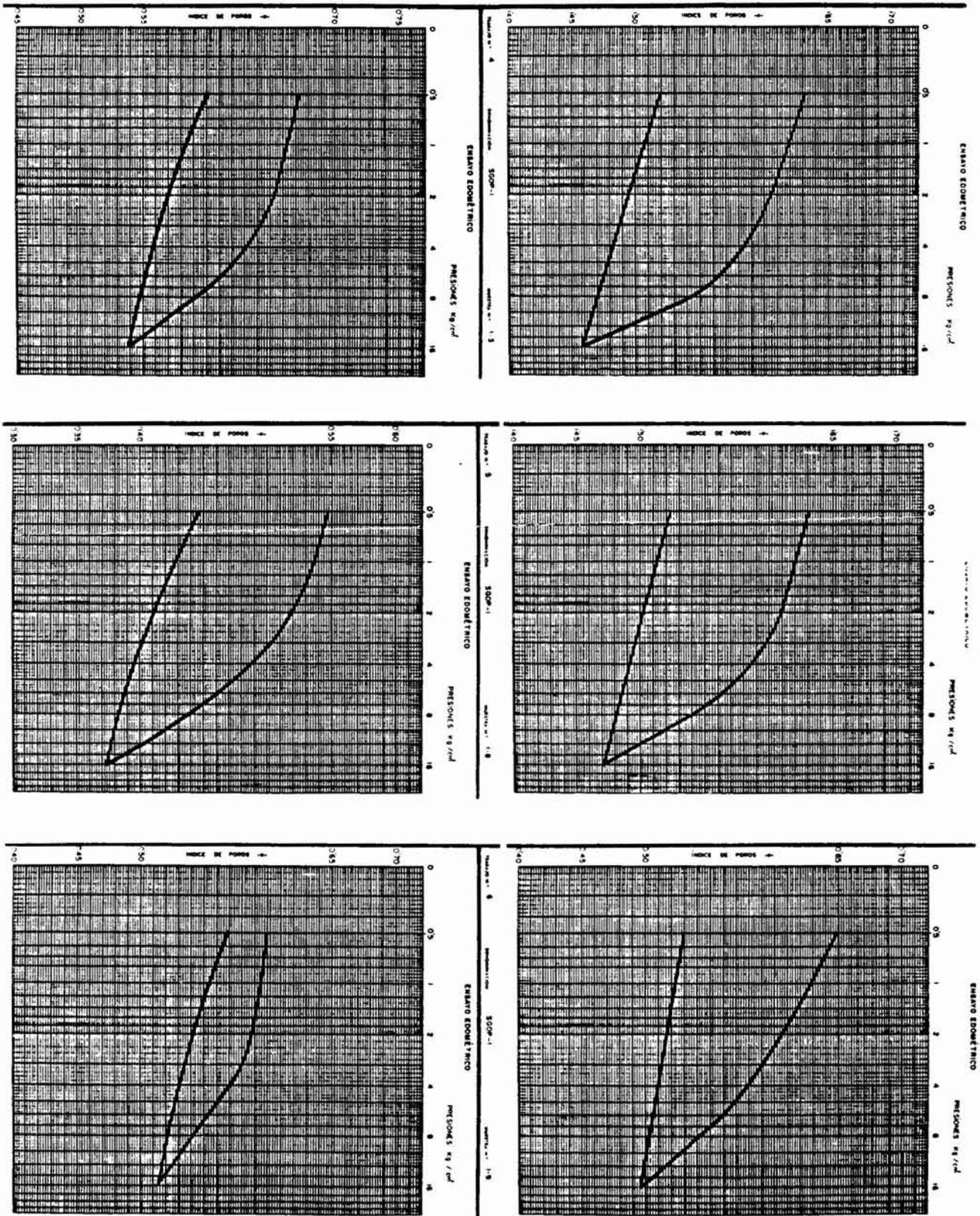


Fig. 4.—Curvas edométricas.

$$S' = \gamma_w (m\beta + \alpha)$$

- S' = coeficiente de almacenamiento específico.
- γ_w = peso específico del agua.
- m = porosidad total del acuífero.
- β = coeficiente de compresibilidad dinámica del agua ($= 4,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{kg}$).
- α = coeficiente de compresibilidad dinámica vertical del armazón del acuífero.

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta P} \frac{1}{V}$$

- V = volumen inicial.
- ΔV = incremento de volumen.
- ΔP = incremento de presión.

En la tabla 3 aparecen los nuevos datos obtenidos. Estos valores corresponden a un intervalo de presión de 8-16 kg/cm².

El valor medio del coeficiente de compresibilidad dinámica vertical del armazón del acuífero (α) es de $3,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{kg}$, característico de arenas arcillosas (Freeze y Cherry, 1979, pág. 55). Por otra parte, los resultados obtenidos del coeficiente de almacenamiento específico (S') son propios del mismo tipo de material (Domenico, 1972, pág. 231). En este caso, el volumen de agua que liberará el armazón del acuífero es 100 veces superior al liberado por dilatación del agua. Esto indica una cierta elasticidad del acuífero debido a su contenido en arcillas y limos.

Conclusiones

Es importante manifestar que los datos obtenidos son puntuales y escasos para extrapolar a todo el Terciario detrítico de la cuenca de Madrid, sin embargo, tienen validez para el área de Madrid y para zonas poco profundas del Terciario detrítico de la cuenca mencionada.

Las conclusiones extraídas han sido las siguientes:

1. Los valores de la porosidad total de la zona estudiada, son marcadamente más altos que los establecidos por diferentes autores para el Terciario detrítico de la cuenca de Madrid. La porosidad total media es de 50 % aproximadamente, típica de materiales arcillosos. Hay que tener en cuenta que se trata de muestras que se han descomprimido y, por tanto, los valores de la porosidad total hallados serán mayores que los reales.

2. Referente a la permeabilidad, hay diferencias considerables de resultados dependiendo del método empleado. Los valores de permeabilidad alcanzados mediante ensayos edométricos llegan a ser 100 ó

1.000 veces inferiores a los obtenidos mediante el permeámetro de carga variable.

3. La permeabilidad vertical media hallada ha sido de 1,1 m/día, siendo más representativo de las muestras analizadas, un valor medio de 0,11 m/día. Ambos valores son característicos de arenas limosas y limos, tratándose de un acuífero poco permeable.

4. Los valores del coeficiente de almacenamiento específico parecen indicar que se trata de un acuífero relativamente elástico, con un importante contenido en arcillas y limos. El volumen de agua liberado por el armazón del acuífero es superior al liberado por dilatación del agua en dos órdenes de magnitud.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo formó parte de un proyecto más amplio (Proyecto n.º CCA 8309/007), subvencionado por el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano y cuyos investigadores principales fueron el Dr. Llamas (Universidad Complutense) y el Dr. Back (US Geological Survey).

Quedamos agradecidos a las sugerencias e ideas aportadas por el Dr. Llamas.

Los autores agradecen la colaboración de María José Serna en la mecanografía de este trabajo y de Agustín Blanco en la delimitación de los distintos mapas y tablas. Asimismo, agradecen los ensayos de laboratorio realizados por el Ldo. en Ciencias Geológicas, Javier Esperón.

Referencias

- Aguiló, M. (1983). Mapa de Recursos e Infraestructura Hidráulica de Madrid, escala 1:200.000. En: *El Agua en Madrid*, Diputación de Madrid, 250 págs.
- Bustamante, G. I., y Martínez Alfaro, P. E. (1982). Estudio del drenaje por manantiales del Terciario Detrítico del SW de la Fosa del Tajo. *III Simposio de Hidrogeología*, Madrid, 440-446.
- Calvo Sorando, J. P., y García Yagüe, A. (1985). Nuevos sondeos de investigación geológica en el área de Madrid. *Estudios Geol.*, 41, 25-31.
- Custodio, E., y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, 2.ª ed., Barcelona, capítulos 5 y 8.
- Domenico, P. A. (1972). *Concepts and models in Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 405 págs.
- Fornés Azcoiti, J. M. (1988). *Revisión crítica de los parámetros hidrogeológicos del terciario detrítico de la cuenca de Madrid*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid, 75 págs. más anexos (inédita).
- Freeze R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. New Jersey, 604 págs.
- Jiménez Salas, J. A., y De Justo Alpañés, J. L. (1975). *Geotecnia y Cimientos I*. Ed. Rueda, 2.ª ed., Madrid, 126-130, 153-198.
- Lambe, T. W. (1951). *Soil testing for engineers*. John Wiley & Sons, Nueva York, 74-87.
- López Camacho, B. (1980). Geohidrología de las grandes cuencas sedimentarias continentales. *Cuadernos de Ingeniería*, 2, 315-346.

- López Vera, F. (1977). Hidrología regional de la cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid. *Memoria del IGME*, n.º 91, 226 págs.
- Llamas, M. R. (1986). Las aguas subterráneas de Madrid: esperanzas y preocupaciones, datos e incertidumbres, posibles líneas de acción. *Plan Integral del agua en Madrid*, n.º 12, Canal de Isabel II, 11-36.
- Llamas, M. R., y López Vera, F. (1975). Estudio sobre los recursos hidráulicos subterráneos del área metropolitana de Madrid y su zona de influencia: Avance de las características hidrogeológicas del Terciario detrítico de la cuenca del Jarama. *Agua*, 88, 36-54.
- Martínez Alfaro, P. E. (1977). *Hidrogeología de los materiales terciarios y cuaternarios de la cuenca del río Manzanares*. Tesis Doctoral n.º 116/82. Ed. Univ. Complutense de Madrid, 257 págs.
- Martínez Alfaro, P. E. (1980). Un primer análisis de la permeabilidad y grado de anisotropía de los materiales detríticos de la Fosa del Tajo. *Bol. Geol. y Min.*, 91, 33-36.
- Míguez Marín, I. (1982). *Aplicación de algunos métodos geológicos para el cálculo de la permeabilidad en el Terciario detrítico de la Fosa del Tajo*. Tesis de Licenciatura. Univ. Complutense de Madrid (inédita).
- Rebollo Ferreiro, L. F. (1977). *Estudio hidrogeológico regional de la cuenca media y baja del río Guadarrama*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid (inédita).
- Seaber, P. R., y Vecchioli, J. (1965). Use of soil-consolidation test data to determine permeability of clays. *Techniques water resources investigation*, 105-113.
- Villarroya, F. I. (1977). *Hidrogeología regional del Neógeno detrítico y Cuaternario de la cuenca del río Henares*. Tesis Doctoral n.º 141/83. Edit. Univ. Complutense de Madrid, 745 págs.
- Virgós Soriano, L.; López Vilchez, L., y Ruiz Celaa, C. (1983). Análisis del comportamiento hidrogeológico del Terciario Detrítico del Tajo mediante un modelo digital tridimensional. Madrid. *III Simposio de Hidrogeología*, 51-59.

Recibido el 9 de julio de 1990

Aceptado el 29 de octubre de 1990