

Desarrollo experimental para el estudio del movimiento de agua in situ

R. ROMÁN ALBA (*)

RESUMEN Se describe los estudios previos para el desarrollo de un diseño experimental para la determinación del flujo de agua lateral en condiciones de campo. El procedimiento se basa en la determinación de la heterogeneidad del terreno y en el análisis de la variabilidad espacial de la carga hidráulica, medida mediante baterías de 10 tensiómetros hasta 2 m de profundidad. La calibración de la sonda de neutrones y el error inherente en la determinación de la humedad para una calibración por capas dan unos coeficientes de variación comprendidos entre el 6 y 14%.

FIELD METHODOLOGY FOR WATER FLUX STUDY

ABSTRACT This paper shows previous studies for implementation of a field methodology to assess horizontal water flux. The methodology is based in the evaluation of the heterogeneity of soil (textural variation) and the spatial variability of hydraulic head measured by means of 10 set of the ten tensiometers placed until a soil depth of 2 m. The neutron probe for moisture content was calibrated by layers. The error of the determination was 6-14% (given by the coefficient of variation).

Palabras clave: Flujo; Agua in situ; Calibración; Colapso; Hinchamiento.

INTRODUCCIÓN

El flujo del agua en el suelo tiene especial incidencia en la ingeniería civil, (problemas de colapso, hinchamiento y capacidad resistente, Nodal 1982), en la agricultura (riegos), y en temas de medio ambiente (polución de aguas subterráneas).

El movimiento del agua en el suelo viene dado por la fórmula de Darcy generalizada por Richards:

$$q = -k(\theta) \text{ grad } H$$

q es la cantidad de agua que se mueve por unidad de superficie y tiempo.

H es la carga hidráulica o la energía potencial por unidad de volumen del agua en el suelo a una cota z de profundidad. Tomando como referencia 0 la superficie del suelo y z (cm) positivo $H_z = h_z - z$; $H_s = h_s$; $H_b = h_b$ estando H y h (succión) expresadas en centímetros de agua.

K es la permeabilidad hidráulica que depende de la humedad (θ) del terreno y que tiene dimensiones de velocidad.

Las curvas $k = k(\theta)$ y $h = h(\theta)$ se denominan curvas hidráulicas características pues a partir de ellas quedan definidas las relaciones agua-suelo.

En el presente trabajo se describe un procedimiento experimental para evaluar el flujo de agua lateral en suelos naturales bajo capas impermeables, a distintas profundidades.

METODOLOGÍA

La heterogeneidad del terreno es un factor que ha de tenerse en cuenta para el estudio del flujo de agua ya que la humedad natural tiene un coeficiente de variación del 6 al 63% y para la permeabilidad se recomienda utilizar el 3.000% (Jiménez Salas 1985). Un primer indicio de la variabilidad natural de estos datos es la correspondiente a la granulometría.

En la finca experimental La Poveda (Arganda del Rey), del CSIC, próxima al río Jarama, y con niveles freáticos entre los 5-7 metros se hizo una prospección mediante sondeos para evaluar el tipo de terreno. En general se encuentra una primera capa bastante homogénea hasta los 30-50 cm en la que la textura es franca. A partir de 1-3 metros (según la zona) gravas; entre ambas una zona de transición que puede pasar rápidamente a arena o con texturas progresivamente más gruesas.

Seleccionada una parcela de unas 2 Has dentro de la cual se iba a plantear la experiencia, se hizo un primer muestreo con 10 sondeos determinando la granulometría y materia orgánica. Posteriormente y dentro de la zona seleccionada, se hizo una calicata de 5 x 1 y 2.8 m de profundidad en la que se tomaron muestras inalteradas en anillos de 7 x 4 cm para determinar la densidad seca, humedad, materia orgánica y granulometría.

Para determinar la carga hidráulica se han utilizado tensiómetros. Un tensiómetro es una bujía de cerámica porosa que va unida a un tubo de plástico que se llena de agua y se mantiene cerrado por un extremo superior. Puesta la cerámica en contacto con el suelo y en el interior de la bujía. El valor máximo de medida posible depende de la profundidad a la que se encuentra colocado y está en torno a -850 mb, ya

(*) Doctor en Física. Laboratorio del Servicio de Tecnología de Construcción, DGC, en la actualidad en el CSIC Centro de Ciencias Medioambientales en Madrid.

que a partir de este valor, el vacío en el tensiómetro se pierde por los poros de la bujía. La medida de la presión se hace mediante un traductor de presión que lleva acoplada una aguja hipodérmica con la que se perfora el tapón del extremo superior del tensiómetro. La presión atmosférica se toma como referencia cero de la medida.

Si A es la longitud del tubo y L la lectura de la presión en el extremo superior, la presión en la bujía situada en el extremo inferior será: $A + L$ (ambos datos en cm de agua). La presión efectiva (matriz de succión, o energía necesaria para llevar a la unidad de volumen del suelo en ausencia de gravedad y gradiente térmico, a una humedad determinada) es igual a la de la bujía.

Si z es la profundidad a la que se encuentra la bujía, tomando como referencia la superficie del suelo, la carga hidráulica H (energía potencial por unidad de volumen) = $A + L - z$ (siempre en centímetros de agua).

En consecuencia la instalación de los tensiómetros requiere un buen contacto suelo-bujía. Para ello se hace una perforación ligeramente superior al diámetro del tubo y hasta la profundidad deseada. Con la fracción más fina del suelo que se extrae y con agua se hace una pasta que se introduce en la perforación clavando el tensiómetro en ella. El hecho de que el suelo que rodea la bujía este alterado no afecta a la presión efectiva del agua en el suelo que será la misma que la del entorno.

Las profundidades a las que se colocan son: 10-20-30-45-60-80-100-120-150-200 cm de tal forma que pueda conocerse con cierta precisión la variación de la carga hidráulica con la profundidad.

La determinación de la humedad se hace mediante una fuente de Am-Be que emite neutrones con energía cinética de aproximadamente 11 Mev ("rápidos"). Los neutrones pierden su energía cinética por choques con hidrógenos. Midiendo los neutrones "lentos" (aproximadamente de 1 eV) se tiene una determinación de los hidrógenos en el suelo, o lo que es lo mismo la humedad.

La materia orgánica también tiene hidrógenos, pero son contenidos muy bajos (inferiores al 2%) y que fluctúa poco, por lo que las diferencias de lecturas de neutrones lentos están ligadas a las variaciones de humedad.

Otros elementos que pueden afectar a la lectura son aquellos que tienen una gran superficie específica para los neutrones lentos (Cadmio y Boro principalmente) pero su presencia en suelos naturales es prácticamente nula.

La fuente de neutrones se desliza por un tubo de acero clavado en el suelo de 3 m de profundidad que se instala entre los tensiómetros para determinar la humedad cada 10 cm. El tubo debe estar en contacto perfecto con el suelo que le rodea y sin alterar las condiciones naturales ya que las humedades que se utilizan son volumétricas. Su instalación se hace perforando los 50 cm primeros con un diámetro inferior en 5-7 mm al diámetro exterior del tubo. Posteriormente se centra y por presión penetra en el suelo. El bisel exterior en la pared del tubo comprime el terreno y evita las posibles grietas o fisuras que puedan producirse. Además se pone arena seca fina junto al tubo de tal forma que al penetrar tape las holguras superficiales que puedan producirse. Previa limpieza del interior del tubo se vuelve a perforar 50 cm por el interior y se clava por presión hasta que se alcanza la profundidad deseada.

A unos 3 cm de la superficie se coloca un anillo circular de goma, de unos 5 cm de corona que impide la circulación preferencial del agua por la pared del tubo. En el extremo inferior, se coloca un tapón de goma para evitar que las hu-

medades de las capas profundas penetren y falseen las medidas.

El método de medida con la sonda tiene como objeto minimizar los errores. El equipo permanece encendido 15 minutos antes de comenzar a medir para estabilizar la electrónica y a continuación se efectúa una primera lectura con tiempo largo (4 minutos), en condiciones de seguridad de la fuente. Esta lectura permite evaluar el correcto funcionamiento del equipo y obtener una referencia para las siguientes determinaciones. Las lecturas para la determinación de la humedad del suelo se dividen por esta referencia (cuentas reducidas), minimizando los posibles errores de comparación entre fechas (Vauclin y al. 1983).

La calibración de la sonda de neutrones se efectúa "in situ" y puede ser por tubos (individual o única) o por capas, según las características del terreno y la precisión deseada. Los 10 primeros centímetros han de hacerse independientes en todo caso. (Greacen et al. 1981, Vachaud et al. 1983).

En nuestro caso la calibración individual alteraría excesivamente las condiciones naturales del terreno y hacer una sola para todos los tubos reduce la precisión. Por ello hemos optado por la calibración por capas.

Para la calibración se toman muestras de suelo, mediante sonda manual, en 2 puntos separados 1 m entre sí y del tubo que se va a calibrar. Por esta razón se seleccionaron los 3 tubos de los extremos (1 por cada repetición) ya que en ellos se pueden hacer estas tomas de muestra sin que se altere las condiciones de los restantes tubos. Para obtener una secuencia de humedades amplia, la toma de muestras para la calibración se prolongó desde finales del invierno a finales del verano.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

1. TEXTURA Y VARIABILIDAD DEL TERRENO

El análisis de los datos de textura, y materia orgánica obtenidos en los sondeos de la parcela se hace por comparación a una misma profundidad. Además de los correspondientes valores medios y desviaciones, se analizan las posibles tendencias especiales utilizando el programa SURFER que permite obtener en 2 y 3 dimensiones las curvas de nivel.

De este estudio se desprende que la dispersión de los primeros 20-40 cm es muy baja (apenas un 15%), y crece con la profundidad, manteniéndose dentro de los límites normales dados por J. Salas (1985). Hay una capa de grava a profundidades que oscilan entre los 2-4 metros; la profundidad a la que aparecen, sigue una línea de tendencia Este-Oeste. El contenido en materia orgánica es máximo en los 30 primeros centímetros y decrece rápidamente.

En base a estos resultados la experiencia se monta en la zona Oeste en la que las gravas son más profundas, con tres repeticiones y separadas entre sí unos 25 metros para garantizar la independencia de resultados. Cada repetición consta de 4 series de tensiómetros y 4 tubos para la sonda de neutrones, separados entre sí 1,1 y 2 m. Los tubos se numeran por orden creciente. Los tubos 1 a 4 corresponden con la instalación al norte y los 9 a 12 con la del sur.

La calicata C(5-8) se hace paralela a una de las repeticiones, la correspondiente a los tubos 5 a 8, tomando 8 muestras por profundidad en 4 puntos alineados con cada uno de los tubos cada 10-20 cm.

Después de 6 meses de toma de datos y comprobado que para la instalación 9-12 existen irregularidades en las curvas succión-profundidad, se hacen 4 calicatas C(9-12), una por cada tubo, al objeto de verificar la calibración de la sonda de neutrones y tomar 2 muestras inalteradas, me-

prof	% material entre 0,43-0,075 mm						% material entre 0,075-0,037 mm						% material inferior a 0,037 mm					
	C (9-12)			C (5-8)			C (9-12)			C (5-8)			C (9-12)			C (5-8)		
	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.
10	30,0	0,7	2,5				18,1	0,4	2,3				49,8	0,6	1,2			
20	29,3	1,5	5,2	25,1	2,1	8,3	18,9	1,0	5,4	19,3	1,9	10,0	50,2	5,9	11,8	54,3	4,7	8,6
30	21,4	10,5	49,1	45,3	3,6	7,9	15,6	3,5	22,5	19,0	0,6	3,2	62,1	13,8	22,3	35,7	4,0	11,3
40	16,6	8,4	50,4	26,9	4,3	16,0	15,8	4,1	26,2	23,1	0,6	2,6	67,1	11,5	17,2	50,2	5,2	10,4
50	17,9	6,3	35,3	39,5	9,7	24,6	16,7	2,7	16,1	19,3	3,3	16,9	65,0	7,7	11,9	41,1	7,1	17,3
60	17,7	5,7	32,4				23,1	2,8	12,0				58,8	6,0	10,1			
70	15,2	16,6	109,6	54,9	5,8	10,6	22,5	4,7	20,8	16,4	2,2	13,7	62,7	17,4	27,8	28,3	6,1	21,6
80	15,5	6,9	44,4				22,5	5,0	22,3				61,8	10,0	16,1			
90	16,7	16,9	101,3	54,1	5,6	10,4	14,9	1,8	12,1	15,9	1,7	10,6	68,1	16,7	24,6	29,8	4,4	14,8
100	14,2	9,7	67,9				16,6	2,5	14,8				68,6	10,4	15,2			
110	18,0	22,9	127,4	57,4	9,4	16,4	20,9	6,3	29,9	15,9	3,8	23,7	60,6	20,0	33,0	25,1	7,5	29,9
120	29,8	13,6	45,6				23,7	7,6	32,3				46,4	13,9	29,9			
130	30,3	16,1	53,2	43,0	14,1	32,8	22,4	4,1	18,2	19,9	6,4	32,0	46,8	13,3	28,3	35,3	8,9	25,3
140	23,6	10,8	45,6				21,7	6,2	28,4				54,1	12,6	23,2			
150	39,2	11,7	30,0	56,3	17,2	30,6	20,2	5,4	26,5	17,1	9,1	52,9	40,1	9,1	22,7	25,4	9,8	38,6
160	29,0	20,6	71,0				16,5	4,0	24,4				53,4	17,7	33,2			
170	28,2	22,4	79,4	53,0	12,8	24,2	16,3	4,7	28,7	17,0	5,5	32,5	54,4	18,0	33,2	29,0	8,3	28,5
180	28,6	25,7	89,7	74,5	1,5	2,0	18,0	5,1	28,6	9,0	1,0	11,1	51,8	20,5	39,7	15,3	2,5	16,1
190	29,5	18,5	62,6	62,8	13,7	21,8	22,2	4,3	19,4	13,0	6,1	47,2	47,0	15,0	31,8	22,5	7,0	31,3
200	34,4	23,7	68,8	64,3	13,2	20,5	18,9	6,5	34,2	10,8	3,2	29,9	44,0	16,6	37,6	23,3	10,0	42,6
210	53,4	23,9	44,7	52,9	18,3	34,6	15,7	8,6	55,2	9,1	5,4	58,6	27,1	16,4	60,5	25,6	17,2	67,2
220	56,9	13,0	22,8	63,0	7,3	11,7	10,1	4,2	41,7	14,0	6,7	47,7	24,8	15,1	60,9	16,0	3,7	23,4
230	64,7	13,5	20,8	68,8	11,7	17,0	10,2	5,0	49,2	7,1	5,2	72,7	22,3	13,6	61,0	13,4	8,6	64,6
240	57,6	4,8	8,3	73,5	1,5	2,0	13,5	2,7	20,3	7,5	0,5	6,7	25,4	1,3	5,2	14,0	2,0	14,3
250	39,1	8,3	21,2	66,2	12,5	18,8	15,7	3,4	21,9	6,0	4,8	79,9	39,3	9,1	23,3	10,0	7,3	73,0
260				57,0	12,0	21,1				10,0	2,0	20,0				28,0	9,0	32,1

TABLA 1. Granulometría.

diente anillos, cada 10 cm de profundidad en cada uno de los tubos.

En las tablas 1 y 2 se dan los datos de los valores medios, desviaciones y coeficiente de variación de distintas fracciones granulométricas para las calicatas.

Se puede observar en la tabla 1 que la textura se hace más gruesa a medida que aumenta la profundidad. A partir de los 30-40 cm, hay más finos en C(9-12) que en C(5-8).

Se comprueba que la dispersión es muy pequeña en los 20 primeros centímetros para ambas calicatas. Crece, en general, con la profundidad dentro de unos valores normales (Salas 1985) y es muy variable en las últimas capas.

El contenido en material superior a 0,43 mm es muy bajo, inferior al 3%, salvo valores excepcionales para cotas superiores a 2 m en los que puede encontrarse lentejones en algún tubo que alcance el 41%.

El la Figura 1 se dan los diámetros correspondientes al tamaño medio de la granulometría (50% de pasa y retiene) para cada punto de muestreo. Se puede apreciar que la dispersión es máxima a partir de los 150-170 cm de profundidad con variaciones altas para puntos próximos. Aún cuando en la gráfica no se han representado se pueden encontrar diferencias importantes entre las dos muestras de anillos contiguos.

El contenido en materia orgánica (tabla II) es bajo (inferior al 3%) y disminuye con la profundidad aunque en la calicata C(9-12) el descenso entre 50-110 cm es más lento que en la calicata C(5-8).

El coeficiente de variabilidad, bajo en las capas más superficiales, se mantiene en niveles normales para el resto de las profundidades.

Las densidades más altas están en las capas superiores y como la materia orgánica, tienden a decrecer o estabilizarse

prof	% materia orgánica						densidad (gr/cm ³)					
	C (9-12)			C (5-8)			C (9-12)			C (5-8)		
	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.	med	d.st.	c.v.
10	2,58	0,19	7,5				1,68	0,08	4,9			
20	2,05	0,20	9,9	1,76	0,53	29,9	1,66	0,06	3,8	1,72	0,07	3,9
30	1,63	0,08	5,1	0,80	0,00	0,0	1,47	0,11	7,6	1,47	0,03	2,1
40	1,23	0,16	13,3	1,65	0,25	15,2	1,37	0,08	5,5	1,36	0,06	4,1
50	1,25	0,05	3,9	0,99	0,32	32,6	1,34	0,03	2,1	1,40	0,04	2,8
60	1,10	0,31	28,0				1,30	0,05	3,6			
70	1,23	0,26	21,3	0,58	0,04	7,5	1,33	0,03	2,0	1,41	0,05	3,9
80	1,05	0,30	28,2				1,32	0,05	3,8			
90	1,13	0,33	29,7	0,55	0,05	9,1	1,37	0,07	5,1	1,43	0,03	2,0
100	1,00	0,37	37,4				1,35	0,05	3,4			
110	0,78	0,23	29,4	0,51	0,06	11,7	1,34	0,06	4,2	1,41	0,05	3,7
120	0,75	0,21	27,5				1,37	0,01	0,9			
130	0,73	0,21	28,4	0,61	0,18	29,9	1,38	0,06	4,1	1,45	0,02	1,4
140	0,80	0,19	23,4				1,43	0,02	1,7			
150	0,48	0,19	40,8	0,63	0,13	20,8	1,42	0,06	3,9	1,38	0,05	3,4
160	0,85	0,27	31,7				1,38	0,09	6,8			
170	0,93	0,17	18,6	0,66	0,14	21,3	1,38	0,04	3,1	1,43	0,04	2,7
180	0,73	0,11	15,1	0,55	0,05	9,1	1,41	0,05	3,8	1,38	0,02	1,2
190	0,70	0,14	20,2	0,67	0,07	11,2	1,41	0,03	2,3	1,40	0,04	2,8
200	0,78	0,31	40,3	0,78	0,23	28,9	1,46	0,04	2,6	1,43	0,05	3,3
210	0,53	0,26	48,8	0,60	0,16	26,7	1,44	0,03	2,3	1,44	0,05	3,5
220	0,45	0,11	24,8	0,37	0,05	12,9	1,44	0,04	2,7	1,43	0,04	2,8
230	0,45	0,20	45,3	0,53	0,19	36,6	1,44	0,04	2,7	1,45	0,03	2,2
240	0,47	0,05	10,1	0,80	0,00	0,0	1,45	0,04	2,8	1,41	0,01	0,9
250	0,70	0,26	37,1	0,42	0,07	16,5	1,49	0,02	1,6	1,46	0,05	3,3
260				0,10	0,00	0,0				1,45	0,02	1,6

TABLA 2. Materia Orgánica y densidad.

con la profundidad. La calicata C(9-12) entre los 50 y 170 cm presenta una densidad inferior a la C(5-8), pero esta tendencia se invierte en las cotas más profundas. Para este parámetro la variabilidad es baja y, a diferencia de las texturas, es independiente de la profundidad.

A la vista de estos resultados la calibración de la sonda de neutrones por capas puede dar menos errores que por tubos, ya que existe mayor uniformidad en la variación de la densidad y materia orgánica con la profundidad que con las texturas, a la vez que el coeficiente de variación es menor.

2. SUCCIONES Y CARGAS HIDRÁULICAS

Al principio de la experiencia se procedió a evaluar la dispersión de los datos de carga hidráulica en condiciones naturales. Estos datos, al ser independientes de la textura, deberían dar curvas de carga hidráulica-profundidad iguales

para cada una de las repeticiones. En los primeros centímetros de suelo pueden aparecer algunas diferencias en succiones y cargas ya que la evaporación e infiltración del agua de lluvia puede variar puntualmente. En profundidad, a cotas constante, las succiones y cargas deben ser prácticamente las mismas para todos los tubos de una misma instalación.

Durante el periodo de abril a setiembre de 1990 se hicieron medidas periódicas de la humedad y de presión efectiva. En las Figuras 2, 3, 4 se dan las variaciones de la carga hidráulica con la profundidad para cada una de las repeticiones en tres fechas. Como se puede observar en la repetición correspondiente a los tubos 9 a 12 las diferencias entre tubos en profundidad son muy notorias, mientras que en las otras repeticiones, los valores obtenidos a cada profundidad son prácticamente los mismos para cada tubo. Esta heterogeneidad de cargas hidráulicas a profundidad constante, observada en los tubos 9 a 12, puede conducir a errores de in-

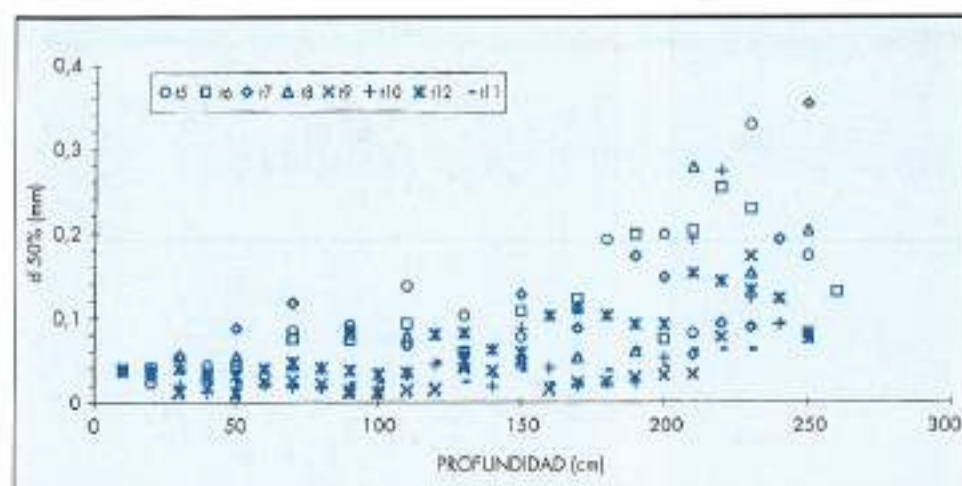


FIGURA 1. Variación del diámetro medio con la profundidad.

interpretación cuando se trate de medir gradientes laterales, por lo que se optó por eliminar esta serie.

Aprovechando esta circunstancia se hicieron las calicatas correspondientes a cada uno de los tubos al objeto de com-

probar la calibración de la sonda de neutrones y que la instalación de los equipos era correcta. El tubo de la sonda de neutrones presenta un contacto perfecto con el suelo, sin fisuras en el terreno y sin circulación preferente de agua por

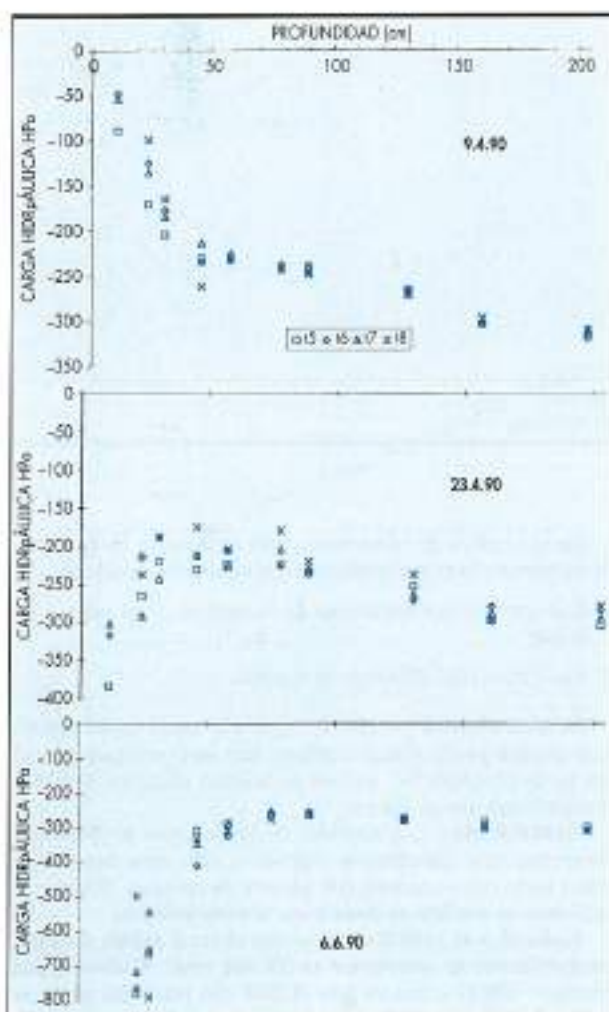


FIGURA 2. Variación de la carga hidráulica con la profundidad en los tubos 5 a 8 en distintas fechas.

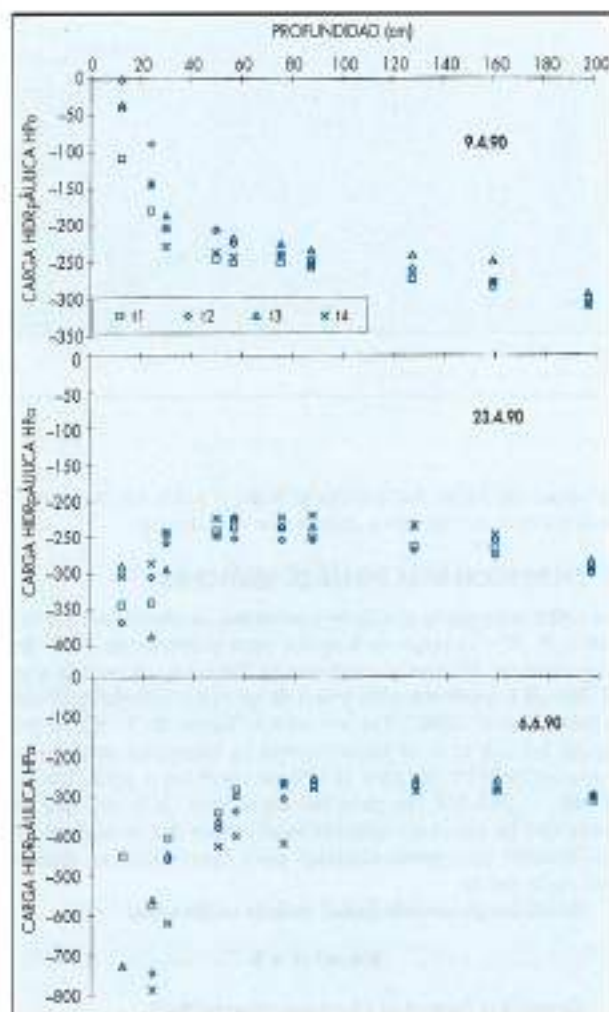


FIGURA 3. Variación de la carga hidráulica con la profundidad en los tubos 1 a 4 en distintas fechas.

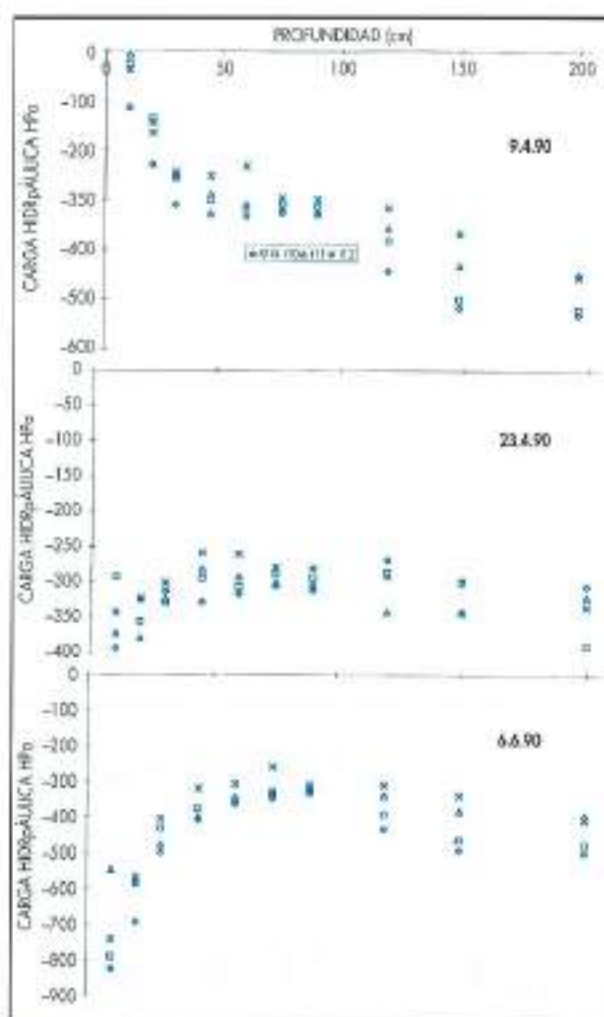


FIGURA 4. Variación de la carga hidráulica con la profundidad en los tubos 9 a 12 en distintas fechas.

la pared del tubo. Así mismo la bujía y todos los tensiómetros están en condiciones óptimas de instalación.

3. CALIBRACIÓN DE LA SONDA DE NEUTRONES

La calibración de la sonda de neutrones, se efectúa en los tubos 4, 8, 12 a lo largo de 6 meses para disponer de datos de humedad en diferentes condiciones. Teniendo en cuenta que el 75% de las cuentas provienen de un radio inferior a 10 cm (Greacen et al. 1981), las lecturas se hacen de 10 en 10 cm hasta los 2,5 m y se toman como la humedad media del suelo entre 0-15 cm para la primera lectura y entre 25-35, 35-45, ..., 245-255 cm para las siguientes. A la vez que se mide con la sonda de neutrones se sacan dos muestras de suelo entre esas profundidades para determinar su humedad en la estufa.

Se utiliza un modelo lineal para la calibración

$$\theta = m^c \cdot cr + b$$

Siendo θ la humedad (% en volumen m^3/m^3).

cr las cuentas reducidas (cociente entre las cuentas en el punto y las cuentas de referencia con tiempo largo).

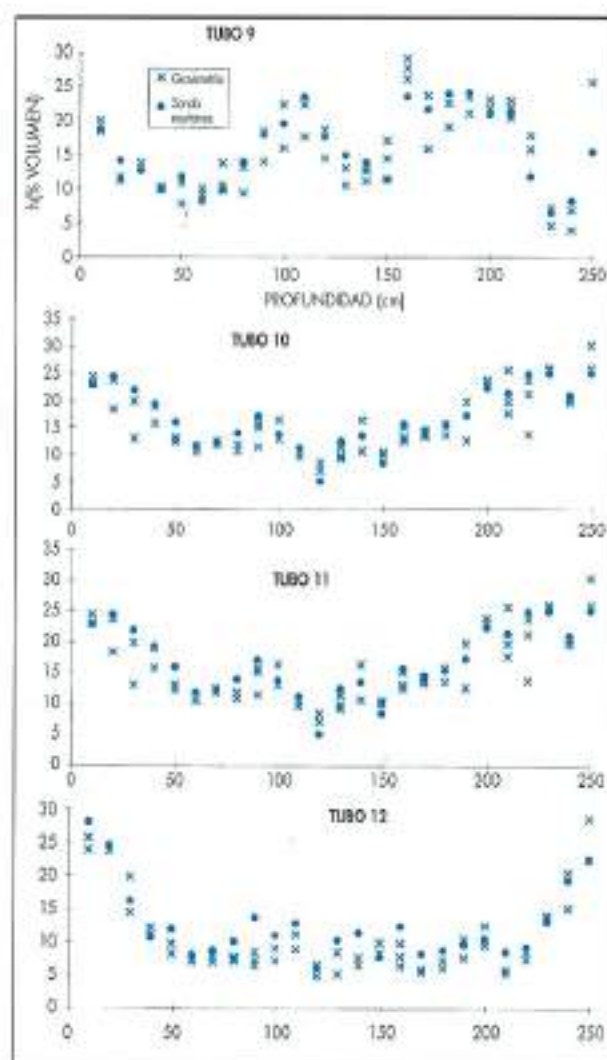


FIGURA 5. Comparación de humedades por gravimetría y sonda de neutrones.

En el análisis de los errores en la calibración de la sonda de neutrones hemos considerado las siguientes fuentes:

1. Las variaciones naturales de humedad en el propio terreno.
2. Las inherentes al equipo de medida.

Incontrolables ya que es imposible medir exactamente a la misma profundidad siempre; hay imprecisiones de ± 1 cm en la profundidad que no se pueden eliminar por más precauciones que se tomen.

Controlables. Las medidas de los equipos de detección presentan una distribución normal ($n > 20$) cuya desviación típica es la raíz cuadrada del número de cuentas. Alargando el tiempo de medida se disminuye el error relativo.

Vachaud y al. (1983) estiman que el error debido a la instrumentación no sobrepasa el 5% del total. Williams and Sinclair (1981) estiman que el 95% del total del error se debe a la heterogeneidad del terreno y concluyen que el valor más adecuado para evaluar la precisión de la determinación de humedad es el error estándar de la regresión. Greacen

Prof. (cm)	C. regres.	Constante	n	error st.c.c.	C. correl.	c.v.
10	87,2	-4,7	32	7,1	0,91	8,1
20	68,6	-3,4	32	5,9	0,90	8,6
30	53,4	1,6	32	4,8	0,90	9,0
40	60,9	-1,8	31	6,3	0,87	10,3
50	62,1	0,4	32	7,5	0,84	12,1
60	65,6	-3,0	26	5,7	0,92	8,7
70	70,9	-2,7	29	4,4	0,95	6,2
80	57,2	0,8	30	6,1	0,87	10,7
90	45,5	5,7	25	6,5	0,83	14,3
100	56,3	0,3	20	3,6	0,97	6,4
110	55,5	1,4	23	4,4	0,94	7,9
120	98,5	-10,3	22	5,8	0,97	5,9
130	63,8	0,9	23	7,9	0,87	12,4
140	57,5	2,1	25	9,9	0,77	17,2
150	59,6	-2,5	31	7,3	0,84	12,2
160	49,1	4,2	32	5,4	0,86	11,0
170	61,7	-0,8	29	3,7	0,93	6,0
180	61,2	-0,5	27	7	0,87	11,4
190	63,2	-3,1	31	9,4	0,78	14,9
200	62,3	-1,2	24	5,4	0,93	8,7
170 a 200	62,6	-1,3	111	6,1	0,90	9,7

c.v. = % error estándar coeficiente regresión / coeficiente regresión.

TABLA 3. Curvas de Calibración obtenidas por profundidades.

con et al (1981) consideran valores normales del coeficiente de variación (error estándar del coeficiente de regresión/coeficiente de regresión en %) los comprendidos entre el 5-15% pudiendo alcanzar valores hasta el 20% para suelos más heterogéneos.

En la tabla III se dan las ecuaciones obtenidas por mínimos cuadrados en este trabajo. Puede observarse que los coeficientes de correlación oscilan entre 0,77-0,95 (nivel de significación superior al 99,5%). Los coeficientes de regresión van desde 49,1 a 70,9, salvo para la ecuación de los 10 primeros centímetros que es más alto y para la profundidad de 120 cm que es próximo a 100. En éste último caso no hemos encontrado ninguna explicación relacionada con texturas, materia orgánica o densidades que lo justifique.

El término independiente varía entre -4,7 y 5,7 con la excepción ya comentada de 120 cm.

El coeficiente de variación está comprendido entre 6,0 y 14,9, salvo un caso que llega hasta 17,2%, en línea con los resultados de otros investigadores ya citados.

Puede observarse que a partir de los 170 cm de profundidad la ecuación de calibración es muy análoga en todos los casos. Este resultado nos ha inducido a utilizar una ecuación única para las profundidades a partir de 170 cm, extrapolando dicha ecuación a las cotas comprendidas entre 210

Tubo	C. regres.	Constante	n	error st.c.c.	C. correl.	c.v.
P12	79,5	-4,0	15	6,7	0,95	8,4
P15	60,5	-0,3	24	4,3	0,95	7,1
P22	87,4	-5,0	25	9,4	0,89	10,8
P25	50,4	1,3	25	3,9	0,94	7,7
P32	63,1	-1,7	39	2,7	0,98	4,3
P35	71,9	-3,3	16	3,9	0,98	5,4
P42	62	2,0	23	7,9	0,87	12,7

TABLA 4. Otras ecuaciones de calibración obtenidas en la misma parcela.

y 250 cm para las que no se ha hecho una calibración directa.

En la tabla IV se adjuntan las ecuaciones de calibración obtenidas para este mismo equipo en otra parcela de la finca, pero en la que ha sido posible hacer la calibración por tubos (Roman y al. 1996). Puede observarse que los tipos de ecuación son parecidos pero que la precisión de la determinación dada por el coeficiente de variación es algo mejor.

En la gráfica 5 se dan los resultados de humedad obtenidos por gravimetría y por la sonda de neutrones para los tubos 9 a 12. Los datos experimentales se obtienen al hacer la calicata y se corresponden, dos de ellos, a los anillos inalterados tomados en la proximidad y a ambos lados del tubo de la sonda de neutrones y el tercero, a una muestra media de suelo, de la capa de 10 cm coincidente con la de la lectura de sonda.

Puede observarse que los valores obtenidos por la sonda señalan perfectamente el perfil hídrico experimental del terreno. Si añadimos la correspondiente desviación los valores encontrados por la sonda se sitúan dentro de los datos experimentales, a excepción del valor de la humedad a 90 cm para el tubo 12.

También puede comprobarse la gran dispersión de la humedad del terreno. Aparecen diferencias de más del 12% entre las dos muestras contiguas (tomadas por los anillos). Si consideramos los datos de los 4 tubos, 12 muestras en total, se obtienen coeficientes de variación de la humedad de hasta el 50%.

Estos resultados confirman los obtenidos por Vachaud y al. (1983) y Williams and Sinclair (1981) a la vez que permiten afirmar que la sonda de neutrones, que incluye un volumen medio de una esfera de 10 cm de diámetro, da unos valores muy representativos de la humedad natural del terreno.

CONCLUSIONES

Como cuestión preliminar al estudio del flujo de agua lateral en el suelo, se ha hecho la instalación de equipos para la determinación de la carga hidráulica y la humedad.

Basados en un estudio previo de la heterogeneidad del terreno determinado a través de los datos de granulometría, materia orgánica y densidad, se diseñó una instalación de 4 series de 10 tensiómetros y 4 tubos de sonda de neutrones separados 1,1 y 2 m, que se repite 3 veces.

El análisis de homogeneidad de presión efectiva (presión matricial) en cada una de las repeticiones nos ha forzado a dejar sólo dos de ellas como válidas.

La calibración de la sonda de neutrones no puede hacerse tubo a tubo, ya que alteraría las condiciones del terreno intermedio sobre las que se va a ensayar posteriormente. Se ha usado la calibración por capas y utilizando como referencia solo 3 de los 12 tubos.

Los resultados obtenidos muestran que la precisión de la calibración es análoga a la obtenida por otros investigadores. La mayor fuente de imprecisión es la debida a la propia heterogeneidad del terreno, que para el caso que nos ocupa alcanza valores extremos del 12% para humedades de muestras contiguas y hasta el 50% cuando las muestras se distancian 4 metros.

BIBLIOGRAFÍA

BELLANGER, J., 1987. Déflexion des chaussées et bilan hydrique. Bull. de Liaison L.P.C. 149: 45-50.
GREACEN, E. L.; COERRELL, R. L.; CUNNINGHAM, R. B.; JOHNS, G. G. and NICOLLS, K. D.; 1981, Calibration, 50-71. En Soil water assessment by the neutron method. Ed. Por E.L. Greacen, Division of Soil, CSIRO, Adelaida, Australia.
NODAL, R. S., 1982, The Bearing Capacity: A Chronic Pro-

blem in Pavement Engineering. Bearing Capacity of Roads and Airfields. Proc. 1; 12.

RATRARAJAH, 1972, 3ª Conferencia Internacional sobre proyectos estructurales de pavimentos asfálticos. Londres 1972.

ROMÁN R.; CABALLERO R.; BUSTOS A.; DÍEZ, J. A.; CARTAGENA, M. C. and VALLEJO, A. 1996. Water and solute movement under conventional corn in central Spain. 1 Water losses. Soil Sci. Soc. Am. J. (en prensa).

JIMÉNEZ SALAS, J. A., 1985, Métodos deterministas versus métodos probabilistas en geotecnia. En Geoestadística aplicada a la mecánica del suelo. Ed. CEDEX.

VACHAUD, G.; CHAABPURI, Z.; EL AMANI, S. and VAUCLIN, M., 1983, Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. 533-549. I.A.E.A. SM-267-21.

VAUCLIN, M.; HAVERKAMP, G. et VACHAUD, G., 1983, Analyse des erreurs liées à l'utilisation de l'humidimètre neutronique. Int Atomic Energy Agency. IAEA-SM-267-21; 533-549.

WILLIAMS, J. and SINCLAIR, D. F., 1981 Accuracy, Bias and precision, 35-49. En Soil water assessment by the neutron method. Ed. Por E.L. Greacen, Division of Soil, CSIRO, Adelaida, Australia.



Con nuestros Asociados trabajamos para mejorar la Calidad de Vida,
la Protección de los Recursos del Agua y el Medio Ambiente.

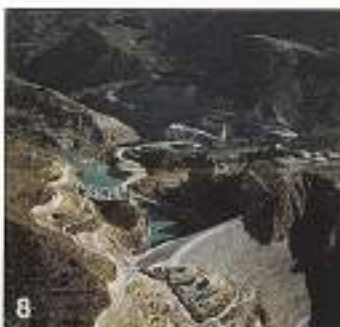
900 Municipios Asociados.
24.000.000 Habitantes Servidos.

Miembro Asociado de las Organizaciones Internacionales:
IWSA • IAWQ • EUREAU • EWPCA

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA Y SANEAMIENTO
Orense, 4 • 28020 MADRID • Telf.: (91) 556 43 00 • Fax: (91) 556 89 98



Calidad y Servicio



1. Ampliación Túnel de Viguera - 2. Parque Marítimo del Mediterráneo, Ceuta.
3. Autovía de Granada. Tramo Jaén (Norte)-La Guardia - 4. Acondicionamiento del Paseo Marítimo y Playa de Luanco.
5. Viviendas en el barrio de Comillas, Madrid - 6. Acceso al Puerto Exterior de Huelva.
7. Encauzamiento del Barranco del Carraixet - 8. Presa de Canales.



Garantía de Calidad y Servicio al Cliente

Desde **Valenciana de Cementos** nos esforzamos, cada día más, en dar el mejor servicio a la mayor parte del territorio español.

Prestigiosos profesionales ya nos han elegido por la calidad y tecnología líder que aplicamos en todo el proceso de selección de materias primas y en la producción de cemento, hormigón, mortero, áridos y cemento blanco, del que somos el mayor fabricante del mundo.

En nuestro compromiso con la calidad, recientemente hemos obtenido el **Registro de Empresa AENOR**, de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 9002 para nuestras nueve fábricas de clinker y cementos grises y blancos.

Valenciana de Cementos.
Más cerca del cliente
por muy lejos que esté.



Cía. Valenciana de Cementos Portland, S.A.

Hernández de Tejada, 1 - 28027 Madrid - Tel.: 377 92 00 - Fax: 377 92 03



Fábrica	Nº Certificado
Alcalá de Guadaira (Sevilla)	ER-235/2/97
Alcanar (Tarragona)	ER-233/2/97
Buñol (Valencia)	ER-221/2/97
Castillejo (Toledo)	ER-219/2/97
Morata de Aljón (Zaragoza)	ER-222/2/97
Lloseta (Mallorca)	ER-234/2/97
San Vicente del Raspeig (Alicante)	ER-220/2/97
Sant Feliu de Llobregat (Barcelona)	ER-224/2/97
Vilanova i la Geltrú (Barcelona)	ER-223/2/97

