

ESTUDIO DE TRASFERENCIA DE HUMEDAD EN LA ZONA NO SATURADA MEDIANTE ISÓTOPOS ESTABLES. PRIMEROS RESULTADOS EN EL ACUÍFERO DETRÍTICO DE MADRID

ARAGUAS, L. ⁽¹⁾ y LÓPEZ-VERA, F. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Depto de Hidrología Isotópica. A.I.E.A. (Viena).

⁽²⁾ Laboratorio de Isótopos Ambientales. (SIDI).

Universidad Autónoma de Madrid.

Resumen

Se han realizado cinco perfiles de hasta tres metros con una barrena manual, en la zona de interfluvio entre los ríos Jarama-Manzanares y extraído la humedad del suelo cada diez centímetros, en una línea de vacío ente 90-100 °C. Estudiándose la variación con la profundidad del contenido en humedad, $\delta^{18}\text{O}$, δD y exceso de deuterio " Δ ". Los resultados sugieren, a pesar de los efectos isotópicos durante la extracción del agua de la ZNS que la humedad de estos perfiles no contribuyen a la recarga. Por lo que esta debe realizarse por vías preferentes, bien en los interfluvios o en los bordes del acuífero.

Abstract

Five profiles of up to three meters were carried out with a manual drill, in the interfluvial zone between the rivers Jarama and Manzanares. The moisture of the soil was extracted every 10 centimeters in a vacuum line between 90 and 100 °C. The variation with depth of moisture content, $\delta^{18}\text{O}$, δD and excess of deuterium " Δ " was studied. The results suggest, despite the isotopic effects during the extraction of the water from the non saturated zone (NSZ), that the moisture from these profiles does not contribute to the recharge. Therefore, the recharge must be carried out by preferential ways either in the interfluvials or the border of aquifer.

Introducción

Desde épocas muy tempranas de la investigación del acuífero de Terciario detrítico de Madrid, se estimó que los interfluvios de los ríos eran zonas de recarga (Llamas y López-Vera. 1975 y López-Vera y Saiz García-Cuenca. 1977). Este acuífero por su complejidad, ser el principal de la región y contribuir significativamente al abastecimiento de Madrid, ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación (López-Vera 1977b y 1984), principalmente en los aspectos que conciernen a su flujo y variaciones hidroquímicas. Sin embargo, los mecanismos de infiltración en las zonas de recarga y en general el flujo en la Zona No Saturada, apenas ha sido objeto de estudio hasta épocas más recientes. Este objetivo fue incorporado por el primero de los autores en su tesis doctoral (Araguas, 1991).

Al objeto de caracterizar la transferencia de la humedad en la Z.N.S, utilizando isótopos estables de Oxígeno e Hidrógeno como trazadores (Allison, 1987), se realizaron cinco perfiles entre 1 y 3 m, utilizando una

sonda de mano, en la zona de interfluvio entre los ríos Manzanares y Jarama, en el campus de la U.A.M., según el método descrito por Araguás, (1991 y 1993). La zona no saturada, en el lugar muestreado puede alcanzar un desarrollo de hasta 20m, de acuerdo con los datos de los pozos excavados próximos.

Medio físico

Este acuífero que tiene unos 6000 Km² es, desde el punto de vista litológico complejo, estando formado por depósitos detríticos de abanicos aluviales (López-Vera, 1977a).

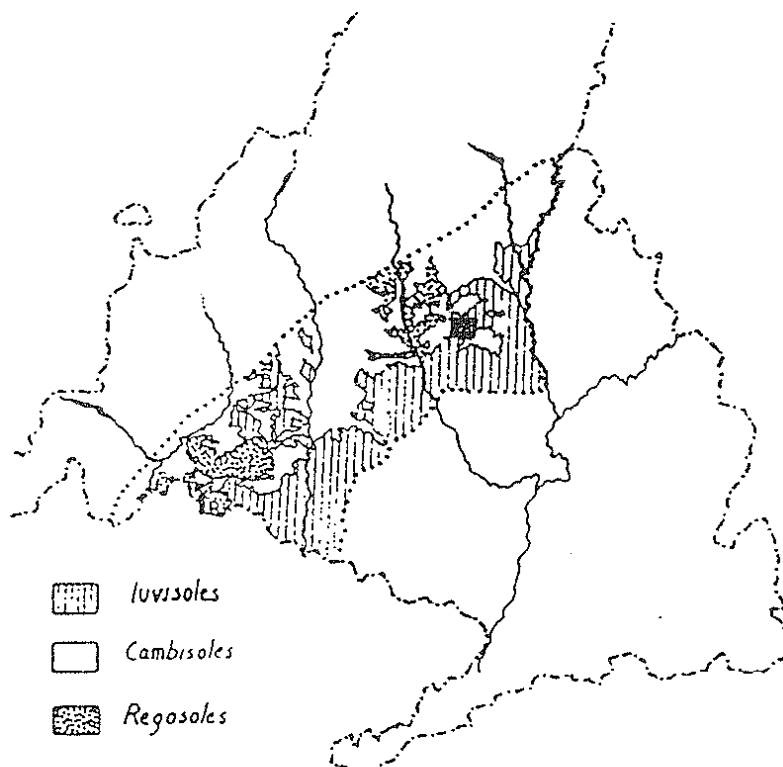


Figura 1. - Zona de experimentación y ordenes de suelos.

La gran diversidad de valores que puede presentar la infiltración eficaz queda expuesta con la dispersión de valores que presentan la capacidad de retención de los diversos tipos de suelos. La distribución de ordenes de suelos se sintetiza en la figura 1. En ella se observa que los Regosoles dominan la cabecera del Manzanares y en ambas márgenes del arroyo Grande, los Luvisoles ocupan toda la franja al sur de la zona estudiada en el borde de los afloramientos detríticos y el resto lo ocupan los Cambisoles. Esta disposición se ajusta bastante bien al modelo de distribución de los sedimentos detríticos.

En general, los horizontes del suelo más superficiales tienen una

aparición muy similar en los tres ordenes. Se distingue un horizonte A o Ap cuando esta cultivado, con un espesor en torno a los 20 cm. y con un contenido en arcilla del orden del 15-30%. La tabla I recoge los valores medios de interés hidrológico para estos ordenes de suelos; la permeabilidad fue medida con infiltrómetro de hincas con nivel de lamina variable y se expresa en l/h; la retención de humedad se obtuvo por drenaje por gravedad y posterior desecación en estufa; y el porcentaje de arcilla, por análisis mecánico .

			PERMEABILIDAD (l/h)	RETENCION (%)	ARCILLA (%)
		A	95	33	15
CAMBISOLES		B	55	33	25
		C	25	30	23
		A	45	31	29
LUVISOLES		B	25	35	43
		C	20	34	32
		A	85	37	15
REGOSOLES					
		C	10	31	9

Tabla I. - Valores medios de los horizontes de los diversos ordenes del suelo

Los valores de retención mas altos se relacionan con suelos que presentan mayor contenido en arcillas, en nuestro caso los Luvisoles y Cambisoles. Considerando solo los 50 cm primeros, se calcula el porcentaje de retención y la densidad real y aparente; la mayor retención corresponde a los Luvisoles y la menor a los Regosoles. En conjunto la retención en los suelos puede suponer entre un 85 y un 50 % de la precipitación media anual.

La distribución estacional de las precipitaciones va a condicionar el estado de humedad en el terreno y va a definir un régimen de funcionamiento hídrico tipo xérico. A su vez, dentro del período estacional húmedo (período eficaz), la distribución temporal de las precipitaciones va a influir en el modo de respuesta del sistema, de tal modo que, para un mismo volumen de precipitación y una capacidad de retención fija, una distribución óptima de la precipitación se traduce en un estado de humedad óptimo en el terreno de tal manera que la retención sea mínima.

La distribución geográfica de las precipitaciones en la zona de estudio hace que la consideración de un valor medio no sea representativo. Las estaciones situadas al sur de la zona, muestran valores de precipitación anual que son inferiores al máximo valor de retención obtenido (López-Vera 1984). Esta zona coincide con las de

mayor desarrollo de los Luvisoles; en estas condiciones la infiltración eficaz parece imposible y el valor de 454 mm. puede marcar un valor crítico de precipitación.

Método experimental

Se realizaron cinco perfiles en los que se alcanzó una profundidad de hasta tres metros, mediante una barrena manual. La zona elegida está próxima a la estación experimental Hidro-climatológica de la U.A.M. situada en el interfluvio entre los ríos Jarama y Manzanares y no se encuentra antropizada, por lo que el perfil conserva sus características naturales. Se realizaron dos campañas, una en período húmedo (Abril), perfiles UAM 1 y 2, y otra en período seco Julio, perfiles UAM 3, 4 y 5. En todos los casos se obtuvieron muestras de suelo cada diez centímetros y se conservaron en envases herméticos.

La humedad fue extraída en una línea de destilación en vacío a una temperatura de 90-100 °C, durante un período de tiempo de 7-8 horas, haciéndose una estimación del contenido volumétrico de humedad. La variabilidad observada en el procesamiento de muestras duplicadas es inferior al 2% en el contenido de humedad.

Las determinaciones de ^{18}O y D fueron realizadas en el laboratorio del OIEA en Viena y las concentraciones son expresadas como desviaciones en tanto por mil respecto al patrón V-SMOW (Vienna Standard Mean Oceanic Water). El error analítico es de $\pm 0,1$ y ± 1 por mil para ^{18}O y D respectivamente. El error estimado (incluyendo las extracciones) a partir de las muestras procesadas por duplicación es $\pm 0,3$ y ± 3 por mil respectivamente para el ^{18}O y D.

Los contenidos isotópicos del agua extraída de suelos y sedimentos arcillosos en la mayoría de las muestras procesadas durante la realización de este trabajo se caracterizan por su separación de la LMAM, en general hacia valores de exceso de Deuterio " Δ " inferiores a +10 por mil, valor típico para las aguas meteóricas de la región (López-Vera *et al*, 1981).

Estos valores, que indican cierto grado de evaporación, no sólo se observan en las muestras tomadas cerca de la superficie sino también en profundidad, donde se espera que el agua de infiltración sea similar al agua presente en la zona saturada. En el área estudiada se espera encontrar concentraciones similares a las de las aguas subterráneas locales, tanto en el valor absoluto de ^{18}O y D como en el valor de " Δ " muy próximo al +10 por mil. Por otra parte, estas características son observadas en aquellas zonas donde dominan los materiales arenosos en la ZNS.

Discusión de resultados

Los resultados se presentan en las figuras 2 a 5 y en las tablas II a VI. El rango de ^{18}O es de $-8,98$ a $-2,38$ $\delta\text{‰}$. Los valores mas enriquecidos en términos absolutos se encuentran en las muestras tomadas cerca de la superficie tras un período seco, como se muestra en los perfiles UAM 3 a s. (fig. 4 y 5), mientras que en otros casos donde las muestras se tomaron después del período de lluvias, la composición isotópica no difiere de los otros valores observados en el perfil, como muestran los perfiles UAM 1 y 2.

Intervalo Muestra	Contenido Agua %	Deuterio ‰	Oxígeno-18 ‰	Exceso de Deuterio
0.00 - 0.10	9.44	-59.7	-8.43	7.74
0.10 - 0.25	11.98	-59.6	-8.12	5.36
0.25 - 0.35	15.39	-57.0	-7.50	2.96
0.35 - 0.45	14.39	-57.4	-7.43	2.04
0.45 - 0.55	10.99	-58.4	-7.36	0.48
0.55 - 0.65	12.07	-58.9	-7.51	1.18
0.65 - 0.75	10.91	-56.4	-7.01	-0.32
0.85 - 1.00	9.71	-60.9	-7.45	-1.30
1.00 - 1.15	10.13	-61.2	-7.44	-1.72
1.15 - 1.30	9.97	-59.0	-7.43	0.44
1.30 - 1.50	9.47	-58.3	-7.88	4.74
1.50 - 1.70	9.45	-56.6	-7.24	1.28
1.70 - 2.00	9.44	-57.9	-7.35	0.90
2.00 - 2.25	10.04	-57.9	-7.51	2.10
2.25 - 2.50	10.22	-58.3	-7.35	0.50

Tabla II.- Contenido en agua e isotópico de las muestras del perfil UAM-1.

Los resultados obtenidos en las muestras cercanas a la superficie poco tiempo después de la precipitación, indican que todavía el agua mantiene su carácter meteórico, puesto que su exceso de Deuterio se aproxima a $+10$ por mil (UAM-I). Sin embargo a mayores profundidades el valor de " Δ " es inferior, aunque los valores absolutos de ^{18}O son aproximadamente los mismos.

La observación de una diferencia sistemática entre perfiles de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD (figuras 3, 4 y 5) respecto a las aguas subterráneas locales en los perfiles estudiados sugiere la existencia de un fraccionamiento isotópico del agua durante la extracción del agua de los suelos mediante destilación en vacío. La serie de experimentos con suelos arcillosos en columnas revela la existencia de enlaces débiles, fácilmente intercambiables por el agua móvil que es diferente isotópicamente.

Experimentos en columnas con extractos de agua del suelo realizados por Araguás *et al.*, (1995), muestran como está empobrecida en D y ^{18}O en un 5-10 ‰ y en un 0,3-0,5 ‰ respectivamente, cuando se compara con el agua percolada (agua móvil), siendo la reproductibilidad en réplicas de extractos del agua del suelo alrededor de ± 3 ‰ y 0,3 ‰ para el δD y para el $\delta^{18}\text{O}$ respectivamente.

Intervalo Muestra	Contenido Agua %	Deuterio ‰	Oxígeno-18 ‰	Exceso de Deuterio
0.00 - 0.10	5.83	-49.00	-6.07	-0.44
0.10 - 0.20	4.63	-52.30	-6.21	-2.62
0.20 - 0.30	6.29	-57.60	-6.57	-5.04
0.30 - 0.45	15.22	-58.60	-7.22	-0.84
0.45 - 0.60	15.03	-59.40	-7.75	2.60
0.60 - 0.70	14.05	-59.80	-7.75	2.20
0.70 - 0.80	13.77	-60.00	-8.02	4.16
0.80 - 0.90	11.14	-61.70	-7.90	1.50
0.90 - 1.00	9.48	-59.40	-7.39	-0.28
1.00 - 1.15	9.46	-59.40	-7.37	-0.44
1.15 - 1.30	8.55	-58.80	-7.20	-1.20
1.30 - 1.45	7.87	-61.00	-7.28	-2.76
1.45 - 1.60	8.83	-63.10	-7.70	-1.50
1.60 - 1.75 *	9.43	-62.40	-7.75	-0.40
1.75 - 1.90 *	9.44	-62.70	-7.63	-1.66
1.90 - 2.05	9.15	-62.10	-7.78	0.14

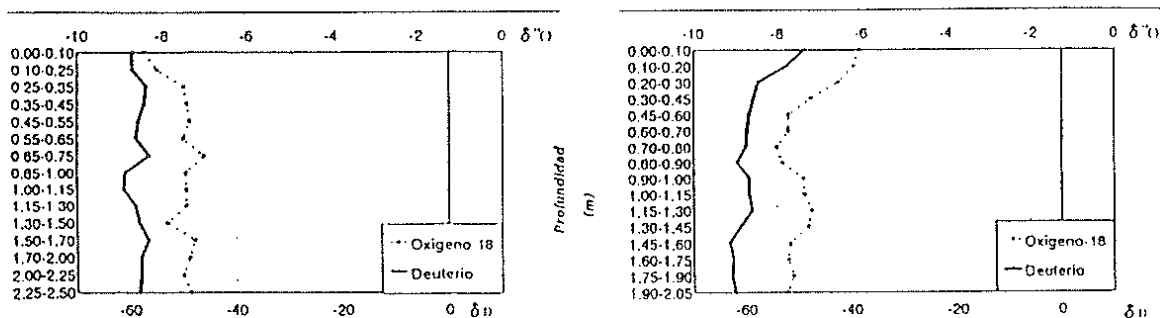
Tabla III.- Contenido en agua e isotópico de las muestras del perfil UAM-2.

Las figuras 3, 4 y 5 muestran gráficamente los datos de variación de $\delta^{18}\text{O}$, δD , humedad de suelo y exceso en Deuterio " Δ ". Los datos se recogen en las tablas II, III, IV y V. Los perfiles tomados en verano muestran un enriquecimiento significativo en los 50 cm primeros, frente a los perfiles extraídos en Abril, donde no se observa esta tendencia.

Estos hechos nos indican que el agua presente en los niveles y los lugares muestreados no debe contribuir, de un modo significativo, a la recarga, sino que daría lugar a un dominio relativamente aislado, sometido a sucesivos procesos de evaporación, datos que coinciden con los obtenidos en otras regiones por Gat (1988, 1991).

Representando los resultados obtenidos para los perfiles en un diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs δD , la posición de los puntos respecto a la línea de aguas meteóricas locales, define un amplio dominio debido a la gran dispersión que presentan los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , tal como muestra la figura 6.

Oxígeno 18, D



Exceso de Deuterio "d" y contenido en agua

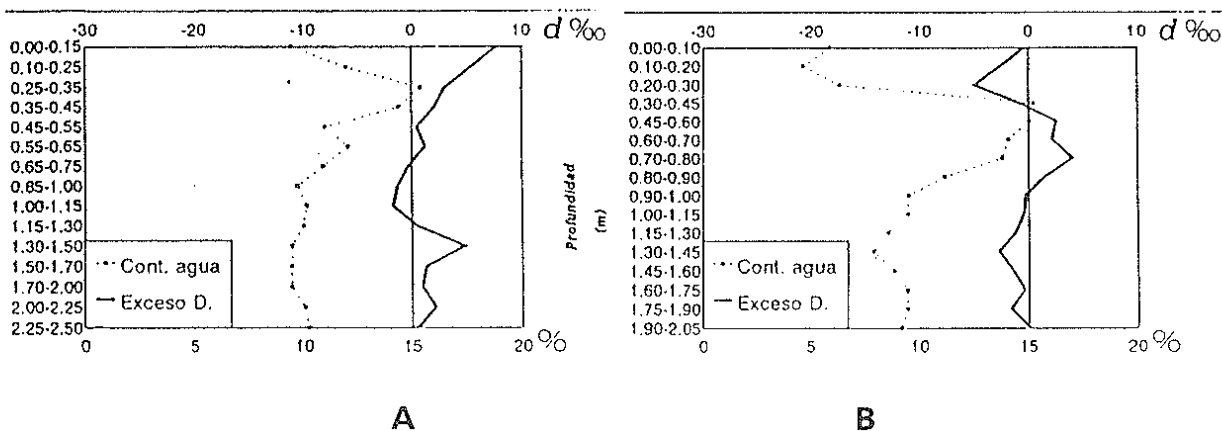


Figura 2.- Variación del contenido de $\delta^{18}O$, δD , Δ y humedad con la profundidad. A) Perfil UAM-1. B) Perfil UAM-2. (Redibujado por Eduardo Fabian, 1995).

Intervalo Muestra	Contenido Agua %	Deuterio ‰	Oxígeno-18 ‰	Exceso de Deuterio
0.00 - 0.20	14.34	-32.4	-2.38	-13.36
0.20 - 0.30	15.07	-43.4	-4.92	-4.04
0.30 - 0.40	14.19	-54.0	-7.25	4.00
0.40 - 0.50	13.82	-56.3	-7.32	2.26
0.50 - 0.60	13.72	-58.0	-7.59	2.72
0.60 - 0.70	10.79	-59.6	-7.55	0.80
0.70 - 0.80	6.96	-60.2	-7.71	1.48
0.80 - 0.90	6.46	-64.4	-8.08	0.24
0.90 - 1.00	6.03	-62.1	-7.96	1.58
1.00 - 1.15	5.94	-64.3	-7.85	-1.50

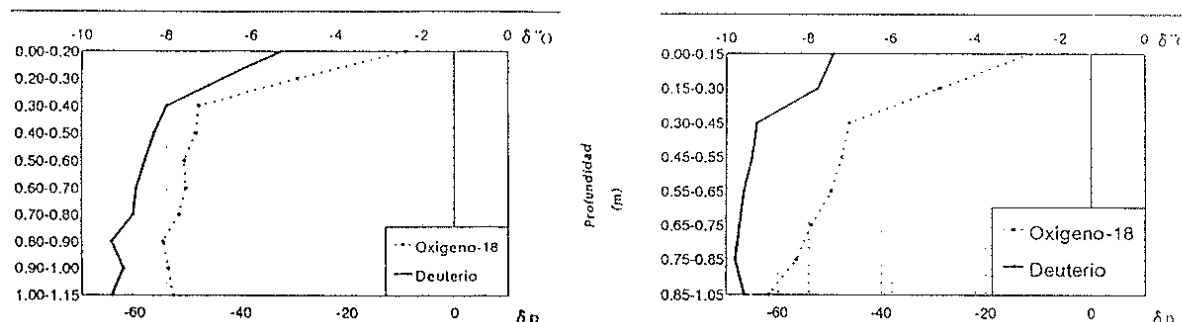
Tabla IV.- Contenido en agua e isotópico de las muestras del perfil UAM-3.

Intervalo Muestra	Contenido Agua %	Deuterio ‰	Oxígeno-18 ‰	Exceso de Deuterio
0.00 - 0.15	4.32	-49.20	-2.70	-27.60
0.15 - 0.30	5.31	-52.20	-4.85	-13.40
0.30 - 0.45	5.41	-64.10	-7.02	-7.94
0.45 - 0.55	6.04	-65.00	-7.19	-7.48
0.55 - 0.65	6.04	-66.60	-7.46	-6.92
0.65 - 0.75	6.62	-67.40	-7.93	-3.96
0.75 - 0.85	7.55	-68.30	-8.29	-1.98
0.85 - 1.05	11.21	-66.50	-8.98	5.34

Tabla V.- Contenido en agua e isotópico de las muestras del perfil UAM-4.

El ajuste de las rectas de regresión identifica distintas trayectorias de evaporación, que corta a la Línea Meteorológica Local (MWL) (López-Vera *et al.*, 1995) muy por debajo del valor medio de referencia para el período eficaz. El motivo por el cual corta a la MWL en un valor tan negativo puede deberse a los sucesivos procesos de evaporación-infiltración cuyo resultado es un balance entre los dos procesos. Por este motivo, no se puede decir que las trayectorias de evaporación parten de una composición isotópica a partir del punto de corte con la MWL.

Perfil Oxígeno-18, D



Exceso de Deuterio "d" y contenido en agua

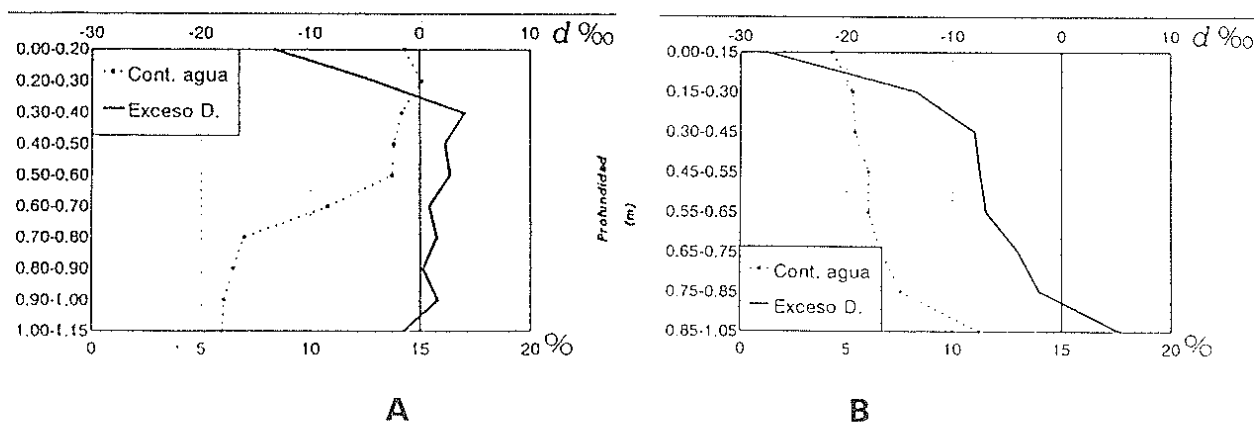


Figura 3.- Variación del contenido de $\delta^{18}O$, δD , Δ y humedad con la profundidad. A) Perfil UAM-3. B) Perfil UAM-4. (Redibujado por Eduardo Fabian, 1995).

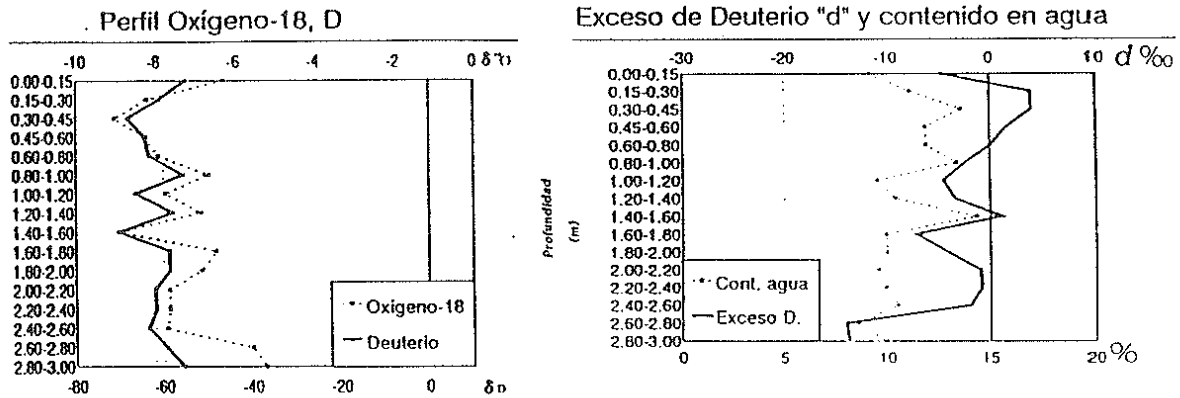


Figura 4.- Variación del contenido de $\delta^{18}O$, δD , Δ y humedad con la profundidad. Perfil UAM-5. (Redibujado por Eduardo Fabian, 1995).

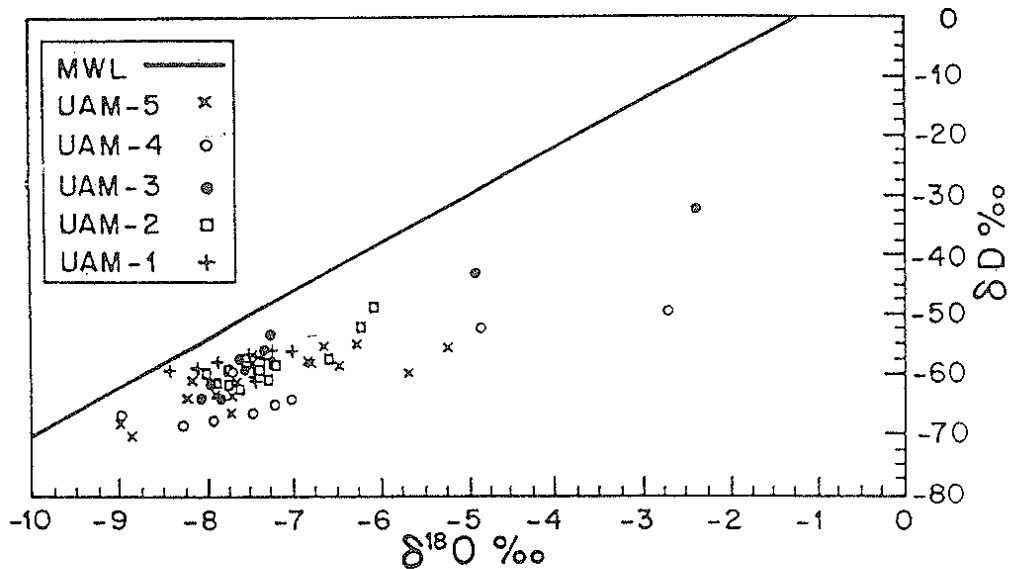


Figura 5.- Proyección en un diagrama $\delta^{18}O$ vs δD de las muestras de agua de los cinco perfiles en relación con la Línea de las aguas meteóricas local (MWL).

Conclusiones

Isotópicamente puede concluirse que este agua de la humedad del suelo no contribuye a la recarga del acuífero. Sin embargo, es posible que un frente de humedad excepcional arrastre y diluya isotópicamente este agua hasta el punto de no poder ser identificada en el agua del acuífero. Por lo que la recarga debe realizarse por otras vías preferentes, bien en los mismos intefluvios, bien en los bordes del acuífero.

Intervalo Muestra	Contenido Agua %	Deuterio ‰	Oxígeno-18 ‰	Exceso de Deuterio
0.00 - 0.15	9.19	-55.0	-6.27	-4.8
0.15 - 0.30	11.15	-61.0	-8.19	3.9
0.30 - 0.45	13.61	-68.2	-9.02	4.0
0.45 - 0.60	11.89	-64.3	-8.24	1.6
0.60 - 0.80	11.93	-63.3	-7.92	0.1
0.80 - 1.00	13.37	-55.5	-6.64	-2.4
1.00 - 1.20	9.55	-66.3	-7.73	-4.5
1.20 - 1.40	10.41	-58.0	-6.82	-3.4
1.40 - 1.60	14.35	-70.1	-8.90	1.1
1.60 - 1.80	9.95	-58.7	-6.45	-7.1
1.80 - 2.00	10.00	-58.5	-6.80	-4.1
2.00 - 2.20	9.57	-62.0	-7.63	-1.0
2.20 - 2.40	9.93	-61.8	-7.62	-0.8
2.40 - 2.60	10.50	-63.4	-7.69	-1.9
2.60 - 2.80	8.58	-59.4	-5.67	-14.0
2.80 - 3.00	9.55	-55.5	-5.23	-13.7

Tabla VI.- Contenido en agua e istópico de las muestras del perfil UAM 5.

Referencias

- ALLISON, G.B. (1987). "A review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge". Proc. NATO. Workshop *Estimating. Nat. Recharge of Groundwater*. Antalya.Turkey. 43-66.
- ARAGUAS, L. (1991). "Adquisición de los contenidos isotópicos (^{18}O y D) de las Aguas Subterráneas: Variaciones en la Atmósfera y en la Zona No Saturada del Suelo". Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. U.A.M. (Madrid).
- ARAGUAS, L. (1993). "Técnicas isotópicas en el estudio del transporte del agua y los contaminantes". In: *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: teoría, medición y modelos*. Edit. CIMNE. 161-181. Barcelona.
- ARAGUAS, L., ROZANSKI, K., GONFIANTINI, R. y LOUVAT, D. (1995). "Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses". *Journal of Hydrology*, 168. 159-171.
- GAT, J. R. (1988). "Groundwater recharge under arid conditions". *Infiltration Principles and Practices* (Post conference proceeding ICIDA, Yu-Fok editor) WRRU-U of Hawaii. 245-257.
- GAT, J.R. (1991). "Monitoring the response of arid zone hydrology to environmental change by means of stable isotope composition of groundwaters". International Symposium on the use of isotope techniques in water resources development. IAEA-SM-319/20. Viena.
- LOPEZ-VERA, F. y SAIZ GARCIA-CUENCA, J. (1977). "Capacidad de regulación del Terciario y Cuaternario del río Jarama en los alrededores de Madrid". *Boletín*

Geológico y Minero, t. 88-II. 116-130.

LOPEZ-VERA, F. (1977a). "Modelo de sedimentación de los materiales detríticos de la Fosa de Madrid". *Las Ciencias*. t. 42 (4). 257-266.

LOPEZ-VERA, F. (1977b). "Hidrología regional de la cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid". *Men. Inst. Geol. Min. Esp.* 91. 227 pag + planos.

LOPEZ-VERA, F., LERMAN, J.C. y MULLER, A.B. (1981). "The Madrid Basin Aquifer: Preliminary Isotopic Reconnaissance". *J. Hydrol*, 54. 151-166.

LOPEZ-VERA, F. (1984). "Las aguas subterráneas en la Comunidad de Madrid". Comunidad de Madrid. PIAM 7. 198 pag. Madrid.

LOPEZ-VERA, F. y ARAGUAS, L. (1995). "Caracterización mediante isótopos estables de la precipitación sobre la Península Ibérica y el mediterráneo occidental." *Rev. de Geofísica*. C.S.I.C. Madrid.

LLAMAS, MR. y LOPEZ-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". *Rev. Agua*. 88. 36-55.

