

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL HIDRÁULICO Y EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA EN UN SECTOR DEL CAMPO ARAÑUELO

R. VICENTE LAPUENTE * y A. SASTRE MERLIN *

RESUMEN

Se ha realizado un perfil hidrogeológico a fin de estudiar la distribución del potencial hidráulico y la evolución geoquímica del acuífero del Campo Arañuelo. Dicho perfil pone de manifiesto el estrecho control que la superficie topográfica y las irregularidades del fondo ejercen sobre el sistema de flujo. La evolución hidrogeoquímica se ha estudiado en función de las relaciones $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$, $\text{Na}^{+}/\text{Ca}^{++}$ y de los índices catiónico, aniónico y de cambio de bases, relacionándolos con la variación del índice de saturación de la calcita.

PALABRAS CLAVE

Acuífero detrítico. Perfil hidrogeológico. Potencial hidráulico. Sistema de flujo. Hidrogeoquímica.

ABSTRACT

A hydrogeological profile was made in order to study the distribution of hydraulic potential and the hydrochemical evolution of the Campo Arañuelo aquifer. This profile show the strong control that the topography and the irregularities of the basin exert on the flow system. The hydrochemical evolution is based on ratios Ca/Mg , Na/Ca and cationic, anionic and base exchange indices, related to calcite saturation index variation.

KEY WORDS

Detritical aquifer. Hydrogeological profile. Hydraulic potential. Flow system. Hydrogeochemistry.

* Departamento de Geología. Universidad de Alcalá.

INTRODUCCIÓN

El Campo Arañuelo es la comarca natural que constituye el extremo occidental de la Fosa del Tajo, estando limitada por el Este con la Cuenca de Madrid. Se encuentra comprendida entre la Sierra de Gredos y el río Tiétar, al Norte, y los Montes de Toledo y el río Tajo, al Sur (fig. 1). Esta depresión fue colmatada durante el Cenozoico, por materiales arcósicos depositados en régimen de abanicos aluviales, y abarca una extensión aproximada de 2.000 Km², siendo su profundidad máxima de 650 m.

La red hidrográfica mejor definida en esta comarca es la que corresponde a la superficie vertiente al Tiétar. El basculamiento de la depresión hacia el NO ha condicionado que los talweg se dispongan según la dirección SE-NO, adoptando la divisoria hidrográfica Tajo-Tiétar una posición notablemente asimétrica, por su marcada aproximación al primero de los ríos. Por ello, los arroyos que drenan el Campo Arañuelo hacia el Tajo realizan un corto recorrido y adquieren un exiguo caudal, mientras que los arroyos que se dirigen hacia el Tiétar alcanzan un mayor significado paisajístico e hidrológico. En cualquier caso, los principales arroyos que disectan la región labran valles de escasa magnitud, por lo que los interfluvios tienen poca entidad, pudiendo considerarse la comarca como una amplia llanura suavemente ondulada, lo que va a ejercer un importante control sobre las características del sistema de flujo.

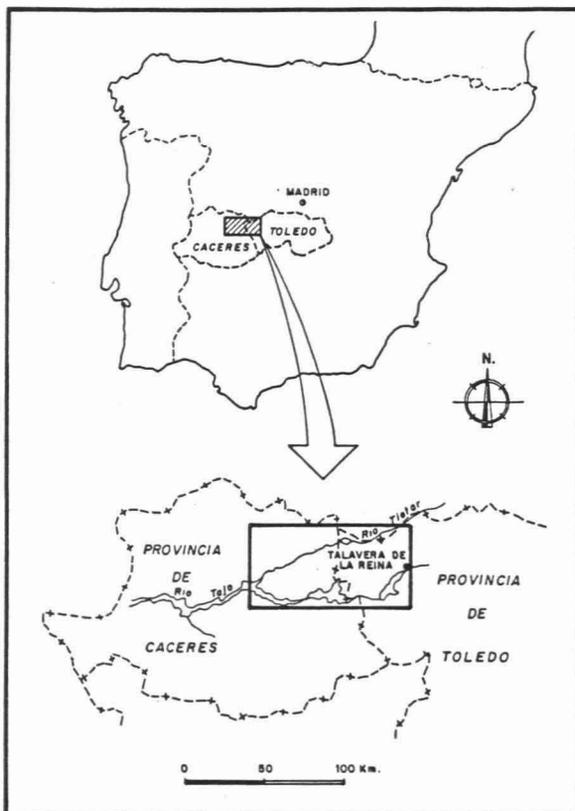


Fig. 1 Situación del Campo Arañuelo.
Geographic position of Campo Arañuelo.

El estudio del límite superior de la zona saturada [VICENTE (1986)] (fig. 2) pone de manifiesto la asimetría, ya comentada, de la divisoria hidrográfica Tajo-Tiétar. Esta divisoria coincide «grosso modo» con la divisoria de aguas subterráneas, poniendo de manifiesto que la componente de flujo subterráneo hacia el Tiétar es más importante que la del Tajo. La consideración de la divisoria hidrográfica, los ríos Tajo y Tiétar, y el contacto con los macizos de Gredos y Montes de Toledo (tanto en superficie como en profundidad) como límites impermeables, permiten distinguir —de acuerdo con la configuración de la topografía del límite superior de la zona saturada y la propia trayectoria de las líneas de flujo— cinco subdominios en la región de estudio [VICENTE (1986) y VICENTE et al. (1987 a)]: tres en la superficie que drena sus aguas hacia el Tajo y dos en la que drena sus aguas al Tiétar de ellos, el de mayor extensión es el subdominio que abarca desde el extremo nororiental del área hasta aproximadamente la línea imaginaria que uniría Naval Moral de la Mata con Talayuela (sector Velada-Talayuela). En este sector, la dirección de flujo proviene fundamentalmente del Este, y la descarga principal tiene lugar en el tramo del río Tiétar comprendido entre el afloramiento granítico del Rosarito y la desembocadura del arroyo Santa María, manifestándose en esta zona los flujos subterráneos de mayor recorrido. Por ello, hemos elegido un perfil hidrogeológico realizado en este sector para estudiar la distribución espacial del potencial hidráulico y la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL HIDRÁULICO

Para estudiar la distribución espacial del potencial hidráulico se realizaron cinco perfiles hidrogeológicos [VICENTE (1986)]; de ellos se ha elegido el perfil río Tiétar-Velada (fig. 3) como más representativo, ya que abarca el itinerario más amplio del Campo Arañuelo.

El perfil se encuentra dispuesto entre límites de flujo subterráneo y su trazado se ha procurado que fuese lo más perpendicular posible al de las isopiezas. Por otra parte se haya ubicado sobre uno de los manantiales salobres existentes en la región [VICENTE et al. (1987 b)], a fin de observar la relación de los enclaves salobres con el sistema de flujo del acuífero detrítico. Puesto que el acuífero es un medio fundamentalmente anisótropo, se ha construido el perfil exagerando diez veces la escala vertical, a fin de simular las condiciones de isotropía. Para ello, se utilizó una escala horizontal de 1:50.000 frente a una escala vertical de 1:5.000, lo que equivale a considerar la permeabilidad horizontal 100 veces superior a la permeabilidad vertical. Sobre este perfil se dibujaron las líneas de flujo y las equipotenciales de acuerdo con las reglas usuales para la construcción de flujos en medios homogéneos e isotrópicos. Para la representación del zócalo se utilizaron los datos del mapa de isopacas realizado por la Junta de Energía Nuclear (J.E.N., 1980).

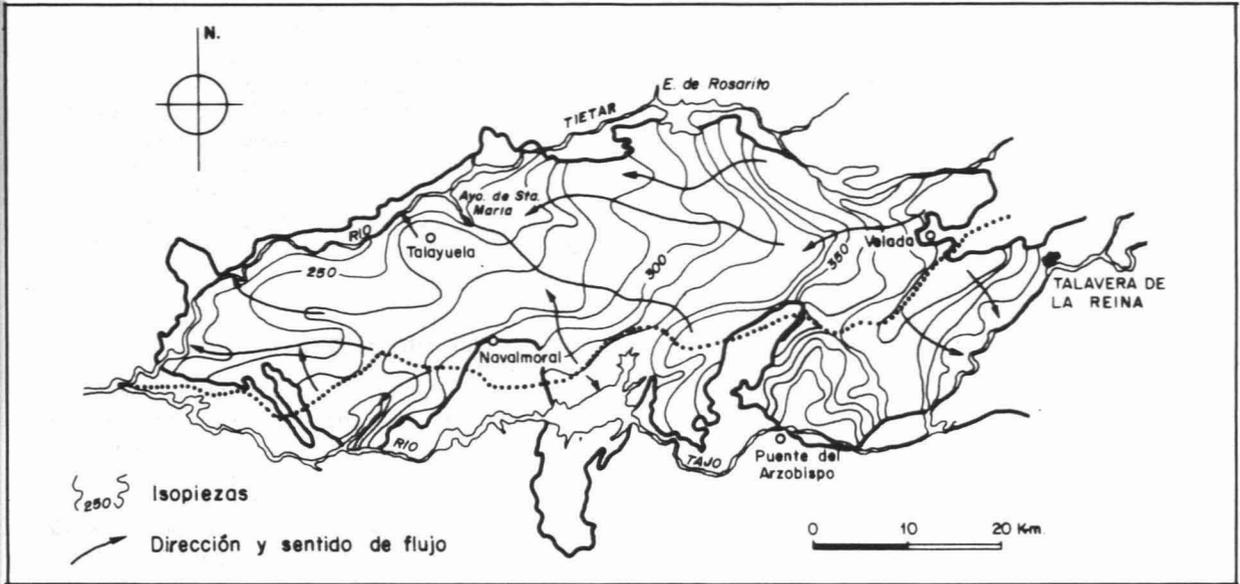


Fig. 2a Límite superior de la zona saturada.
Saturated surface upper limit.

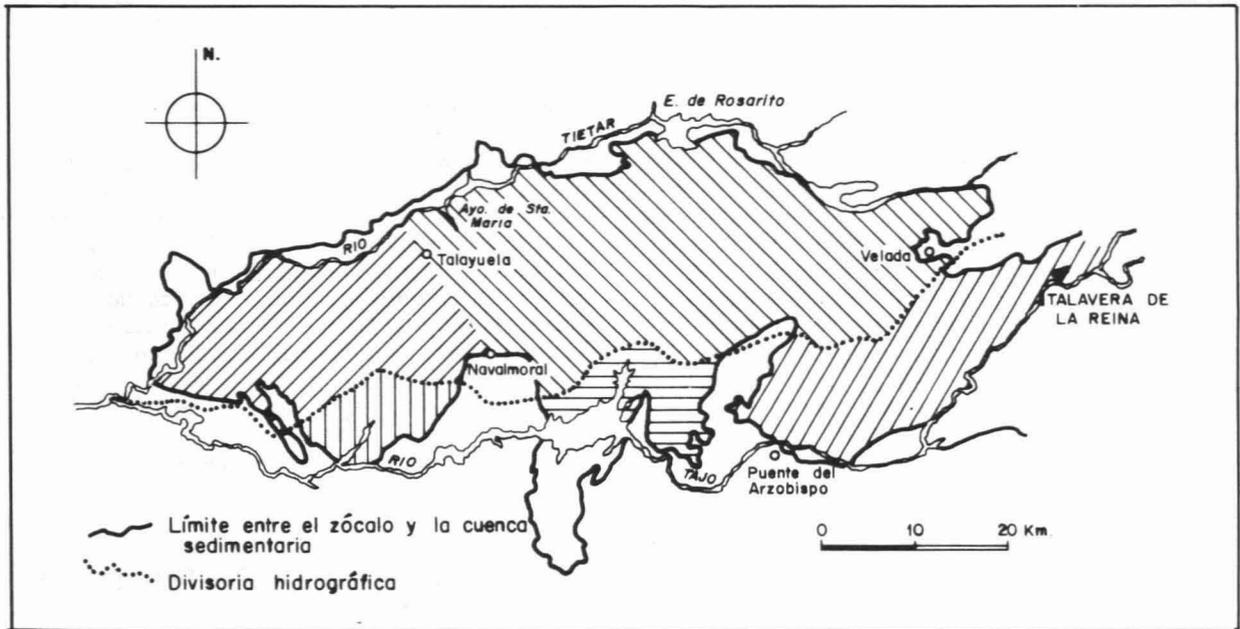


Fig. 2b Subdominios del Campo Arañuelo desde el punto de vista geohidrológico.
Subdomains of Campo Arañuelo from the geohydrological point of view.

Este perfil abarca desde la divisoria hidrográfica, a su paso por el afloramiento del zócalo en Velada, al este, y termina, al noroeste, pasado el arroyo Santa María (en las proximidades de su desembocadura) y pasado el río Tiétar.

Se observa el bajo valor de la pendiente del límite superior de la zona saturada, congruente con la acusada planicie de la región, lo que supone que las líneas de flujo adopten rápidamente la dirección horizontal y la mantengan a lo largo de un espacio considerable, determinando un sistema de flujo bas-

tante sencillo en el que apenas existen flujos locales, pudiendo considerarse la casi totalidad de la región, cualitativamente, un área de recarga.

La recarga principal se sitúa en las proximidades del contacto con el afloramiento del zócalo en Velada, manifestándose en la disposición vertical, en sentido descendente, de las líneas de flujo. La descarga general se localiza en el entorno del río Tiétar, zona de menor potencial, donde la componente principal de las líneas de flujo pasa a ser vertical, en sentido ascendente.

La marcada tendencia horizontal de las trayectorias de las líneas de flujo queda alterada, por la existencia en el fondo de la depresión de numerosas cubetas y umbrales irregulares [VICENTE (1986)] que obligan a las líneas de corriente más profundas a realizar un itinerario sinuoso, adaptándose al zócalo y variando continuamente la importancia de la componente horizontal de flujo respecto a la vertical y el sentido ascendente o descendente de esta última.

A ambos lados del arroyo Santa María, uno de los de mayor entidad de la región, existen dos áreas de recarga locales coincidentes con umbrales en el zócalo, que dan lugar a los únicos flujos locales del perfil; de ellos, los de mayor entidad son los originados en el interfluvio Arroyo Santa María-río Tiétar. Es muy probable que bajo estas áreas de recarga local se originen zonas de estancamiento allí donde se encuentre el flujo procedente de la zona de recarga principal con las líneas originadas en estas pequeñas áreas de recarga.

Este perfil recoge la situación de un manantial salobre, el manantial de «La Charca de la Guarra» (599-7-1), localizado en los granitos de la margen derecha del Tiétar, en las proximidades del contacto con los materiales detríticos. Los distintos enclaves salobres citados en la región se encuentran situados en los bordes de la depresión y ligados a los afloramientos del zócalo. Esto nos hizo pensar, en un principio, en su posible relación con flujos profundos del Campo Arañuelo que irían a descargar a estas zonas de borde, y que debido a su largo recorrido se habrían mineralizado intensamente. La observación de las redes de flujo y su relación con las aguas mineralizadas, unido a otras consideraciones [VICENTE (1986); VICENTE et al. (1987 b)] hizo descartar este planteamiento. Los posibles flujos causantes de la mineralización serían captados por el río Tiétar (fig. 3), ya que este río es colector principal de la depresión y por tanto debería actuar como límite del acuífero; además, la proximidad del zócalo y el escaso espesor de sedimentos impide que ningún flujo supere esta barrera. Por otra par-

te, el manantial salobre se encuentra en las cercanías del borde de la depresión, pero en una zona en la que la componente principal del flujo es vertical descendente, es decir, en el entorno de un área de recarga; por tanto, las aguas procedentes del acuífero arcóxico en contacto con el zócalo son, o deberían ser, en buena lógica, aguas poco mineralizadas. Así pues, el origen de este enclave no parece estar relacionado con la mineralización del agua al aumentar el tiempo de permanencia en el acuífero detrítico.

EVOLUCIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Las relaciones químicas y los datos más relevantes de las muestras de agua del perfil río Tiétar-Velada se encuentran en la tabla I y pueden observarse en el dibujo del perfil (fig. 3).

En dicha figura los diagramas de Stiff muestran cómo el agua aumenta su mineralización desde el área de recarga principal, situada en las proximidades de Velada hasta la zona de descarga general situada en el río Tiétar. Asimismo se observa cómo los iones predominantes pasan de ser el bicarbonato y el calcio al bicarbonato y el sodio en el sentido de flujo. La muestra 600-5-3 presenta una composición anómala, tanto por su contenido iónico como por sus iones dominantes (cloro y sodio), ya que ni su posición en la red de flujo, en un área de recarga local, ni la profundidad del pozo del que está tomada (60 m.) parecen explicar tal composición. Al otro lado del Tiétar, y ya en los granitos, se encuentra la muestra 599-7-1, que por su residuo seco se clasifica como salobre y que alcanza contenidos iónicos superiores en más de diez veces a los del resto de las aguas del perfil; los iones más abundantes son el cloro y el sodio, destacando además la elevada cantidad de calcio y la ausencia casi total de sulfatos. La simple visión del diagrama de Stiff ya parece indicar que no existe relación ni gradación entre este agua y las del resto del perfil. El posible origen de estas aguas salobres y sus características químicas se hayan expuestos en trabajos

T A B L A 1

Relaciones químicas y datos más relevantes de las muestras de agua del perfil «Río Tiétar-Velada»

N.º de muestra	Profundidad (m)	Conductividad 25° C s/cm	pH	Ca/Mg	Na/Ca	I.C.	I.A.	I.C.B.	I.S.cal
626-1-10	90	406	7	3,3	0,7	0,6	0,4	-0,13	-0,7
625-4-5	96	671	8,4	1,5	8,2	4,9	0,3	-0,78	0,3
625-4-3	190	584	7,9	3,0	2,2	1,6	0,5	-0,44	0,3
600-5-12	220	651	8,2	4,0	8,7	6,9	0,7	-0,85	0,2
600-5-6	180	537	8,5	5,0	5,8	4,8	0,9	-0,87	0,4
600-5-5	200	445	8,1	1,1	19,8	10,3	0,9	-0,62	-0,2
600-5-4	130	364	8,5	1,0	17,4	8,7	0,5	-0,71	-0,1
600-5-3	60	560	8	1,5	9,2	5,5	1,4	-0,59	-0,2
599-7-1	—	10.072	6,9	2,2	2,4	1,7	155,5	30,6	-0,5

r Ca/Mg y r Na/Ca: meq./l

I.C.: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ en meq./l

I.A.: $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} / \text{HCO}_3^-$ en meq./l

I.S.cal: índice de saturación de la calcita expresado en $\log \text{IAP/KT}$

I.C.B.: $\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^-) / \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^{2-}$ en meq./l

anteriores [VICENTE (1986) y VICENTE et al. (1987 b, ob. citadas)], por lo que no serán discutidas aquí, ya que no es el objeto de este estudio. Unicamente se harán notar los parámetros que parecen diferenciar estas aguas de las del acuífero arcóxico y que se discuten en este artículo.

Respecto a la variación de las relaciones Ca^{++}/Mg^{++} y Na^{+}/Ca^{++} , la primera tiende a aumentar desde el área de recarga principal hasta la descarga local más cercana (equipotencial de 260), lo que parece indicar que, o bien existe disolución de calcita, o bien el magnesio está disminuyendo en la solución. Por otra parte, la tendencia general de la segunda relación, Na^{+}/Ca^{++} , en este mismo trayecto es ascendente, señalando el posible intercambio de calcio por sodio. Ahora bien, el índice de saturación de la calcita muestra que el agua está subsaturada en este mineral en el área de recarga principal, pero está ligeramente sobresaturada en el resto de las muestras hasta la citada área de descarga local. El cambio $Ca^{++} \rightarrow Na^{+}$ tendría que producir subsaturación en calcita, pero si el agua está sobresaturada significa que si hay cambio catiónico, el calcio está entrando en la solución prácticamente en la proporción en la que sale; por tanto, el aumento del índice Ca^{++}/Mg^{++} no se puede explicar por disolución de calcita, sino por pérdida de magnesio, por lo que es muy probable que exista también cambio del magnesio por sodio. Las muestras situadas a continuación en el sistema de flujo (600-5-5 y 600-5-4) captan líneas de corriente profundas, pero también flujos de corto recorrido, procedentes de la recarga local situada en sus proximidades. En estas dos muestras la relación Ca^{++}/Mg^{++} ha disminuido drásticamente, pasando de valores de 5 a 1, mientras que la Na^{+}/Ca^{++} aumenta a valores superiores al doble (pasa de valores entre 9 y 6 a valores de 17 y 20). Podría pensarse que en esta zona se está efectuando un intensísimo intercambio catiónico

co $Ca \rightarrow Mg$ y $Ca \rightarrow Na$, pero parece un cambio excesivamente brusco; más lógico parece considerar que el fenómeno que ha tenido lugar es la precipitación de calcita, ya que ambas muestras se encuentran subsaturadas en este mineral, y el I.C.B. no manifiesta este cambio de bases, sino que incluso tiene un valor inferior a los anteriores. La muestra 600-5-3 de nuevo presenta características que no corresponden a su posición en la red de flujo (baja relación Ca^{++}/Mg^{++} , alta relación Na^{+}/Ca^{++}), señalando caracteres más próximos a los de las muestras situadas en su entorno que a los de las aguas de un área de recarga local. La muestra situada en los granitos tiene valores atípicos en lo que a estas relaciones iónicas se refiere —tratándose de un agua con una intensa mineralización—, ya que ambas relaciones son más bien bajas y similares, lo que supone cierto equilibrio entre los tres cationes mayoritarios; hecho que no suele ocurrir en las muestras de agua de un acuífero detrítico, salvo en el caso de aguas poco mineralizadas situadas en áreas de recarga y/o transición.

El índice catiónico tiende a aumentar desde el área de recarga general (con valores inferiores a 1) hacia la principal área de descarga. Los índices de las muestras 600-5-5 y 600-5-4 también están influenciados, como es lógico, por la posible precipitación de la calcita, dando valores superiores en un margen amplio (8,7-10,3) a los de las muestras 600-5-12 y 600-5-6 (4,8-6,9), situadas en pozos muy próximos a aquéllos y con profundidades iguales o mayores, es decir, captando flujos muy similares.

La variación del índice aniónico es muy pequeña en las muestras situadas en la primera parte de la trayectoria de las líneas de flujo, es decir, entre la zona comprendida entre el área de recarga principal y la carretera Calzada-Madrugal (equipotencial de 300) y empieza a aumentar en el entorno del área de descarga local, de la que ya se ha hablado, don-

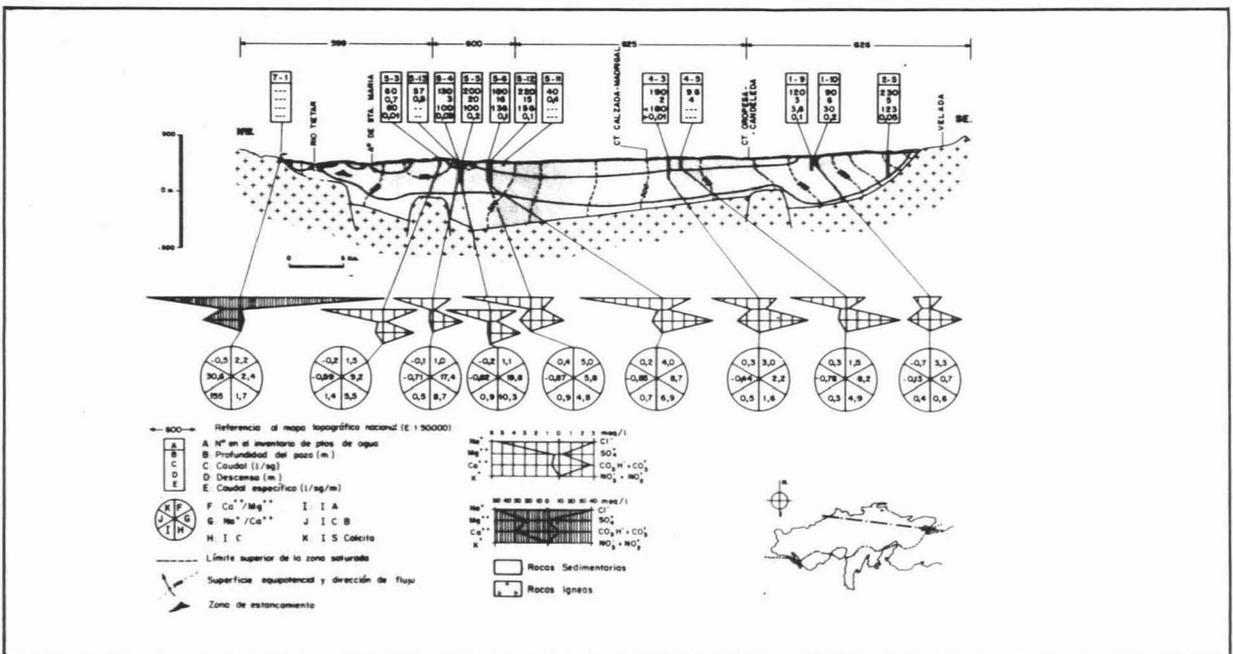


Fig. 3 Perfil hidrogeológico Río Tietar-Velada. Tietar-Velada river. Hydrogeologic side view.

de las líneas de corriente han realizado un recorrido mucho mayor. De nuevo el agua del pozo 600-5-3 presenta un valor anómalo muy superior al resto de las muestras (1,43), que sólo podría justificarse si el pozo tuviese una profundidad mucho mayor (similar a la del pozo 600-5-5), en cuyo caso el fondo del pozo se encontraría próximo al zócalo, ya que el umbral existente en el fondo de la depresión hace disminuir el espesor de los sedimentos y podrían ser captadas aguas muy próximas a los granitos, donde los autores han supuesto la existencia de una zona de agua clorurado-sódica en contacto con los materiales que forman la fosa tectónica [VICENTE (1986) y VICENTE et al. (1987 b, ob. citadas)]. El índice aniónico de la muestra salobre (155,5) prácticamente indica la relación cloruros-bicarbonatos, ya que los sulfatos sólo existen en ella en cantidades de 2,7 mg./l. Este valor del índice aniónico es claramente desproporcionado, y si correspondiese a aguas procedentes del acuífero detrítico indicaría que había alcanzado los últimos estadios de la evolución geoquímica de Chebotarev, contrastando con el valor del índice catiónico de este agua (1,72), que correspondería a aguas poco evolucionadas de un acuífero detrítico, como se ha indicado anteriormente.

El índice de cambio de bases (I.C.B.) viene a corroborar lo dicho hasta ahora. El valor del índice tiende a disminuir a partir del área de recarga, donde su valor es negativo y próximo a cero (-0,13), haciéndose ya tangible el intercambio catiónico en las muestras 600-4-5 y 600-4-3, que captan flujos con un recorrido importante en el conjunto del acuífero. La variación del índice parece ser muy rápida al principio para estabilizarse después todos los valores en un intervalo muy estrecho. De nuevo el agua salobre tiene un valor ajeno a un acuífero de este tipo, ya que su I.C.B. = 30,6 indica la existencia de un contenido en cloruros muy superior al resto de los iones considerados en dicho índice.

CONCLUSIONES

La acusada planicie de la comarca da lugar a que la pendiente de la zona saturada sea muy baja, por lo que el sistema de flujo es muy sencillo, predominando la componente horizontal del mismo y sin que apenas existan flujos locales, lo que permite considerar a la casi totalidad de la región como un área de recarga, a nivel cualitativo.

La existencia de diversos umbrales y surcos en el fondo de la depresión determina un acusado control

sobre las líneas de corriente más profundas, que deben realizar un itinerario sinuoso, a fin de adaptarse a las irregularidades del zócalo.

El manantial salobre situado en los granitos del zócalo junto al borde de la depresión no guarda relación con los flujos profundos del acuífero detrítico, ya que el río Tiétar actúa como colector del acuífero, impidiendo que dichos flujos lleguen al límite aflorante de los granitos.

El agua evoluciona en el sentido de flujo de bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica, aumentando su mineralización desde el área de recarga general a la descarga principal. Los cambios de base tienen lugar rápidamente en el acuífero, mientras que la evolución aniónica es más lenta y tarda más en producirse.

El agua llega a la zona saturada, subsaturada en calcita, alcanzando el equilibrio en las primeras etapas de circulación e incluso manteniéndose sobresaturada en dicho mineral durante buena parte de su recorrido en el acuífero. En fases avanzadas del sistema se produce la precipitación de calcita, permaneciendo el sistema subsaturado y sin que vuelva a alcanzarse el equilibrio.

Existe una muestra (600-5-3) de composición clorurado-sódica con un comportamiento químico anómalo. Esta muestra está situada en un área de recarga local y pertenece a un pozo de 60 m. de profundidad; sin embargo, sus características químicas son similares a las de las muestras de su entorno y corresponden a pozos con profundidades de 130 a 200 m.

La muestra salobre de composición clorurado-sódica tiene contenidos iónicos más de diez veces superiores al resto de las muestras. Algunos de sus índices (índice aniónico) podría corresponder a aguas muy evolucionadas de acuíferos detríticos, mientras que otras relaciones (Ca/Mg, Na/Ca e índice catiónico) son propias de aguas poco evolucionadas de estos acuíferos. Por otra parte el índice de cambio de bases no guarda ninguna relación con los característicos de los acuíferos detríticos. Aparte de la intensa mineralización global, los elementos que condicionan su comportamiento son: contenido en cloruros superior a cualquier otro ión, alto contenido en sodio, pero también en calcio, aunque inferior, y prácticamente nulo contenido en sulfatos. Por lo tanto, los caracteres químicos de este agua corroboran los datos físicos que indican un origen y evolución distinta para las aguas salobres relacionadas con el zócalo.

BIBLIOGRAFÍA

- CUSTODIO, E., y LLAMAS, M. R. (1983): *Hidrogeología Subterránea*, vol. 1. Ed. Omega. Barcelona, pp. 177-213 y 1008-1063.
- CHEBOTAREV, I. I. (1955): "Metamorphism of natural waters in the crust of weathering", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 8 pp. 22-48, 137-170, 198-212.
- FREEZE, R. A., y CHERRY, J. A. (1979): *Groundwater*. Ed. Prentice Hall. New Jersey.
- J.E.N. (1980): Proyecto 0116. Cuenca del Tiétar. J.E.N. M.I.E. Madrid.
- PLUMMER, L. N.; JONES, B. F., y TRUESDELL, A. M. (1976): *Wateq: a Fortran IV Version of Wateq, a Computer Program for Calculating Chemical Equilibrium of Natural Waters*. U.S.G.S. Water Resour. Reston, Virginia.
- VICENTE, R. (1986): "Hidrogeología Regional de la Depresión del Campo Arañuelo". Tesis doctoral. Departamento de Geología. Univ. de Alcalá de Henares. Madrid.
- VICENTE, R., y SASTRE, A. (1987 a): "Contribución al conocimiento hidroquímico del acuífero del Campo Arañuelo". Simp. Intern. de Recursos Hidráulicos "Canarias 2000". Tenerife.
- VICENTE, R., y SASTRE, A. (1987 b): "Manifestaciones salinas producidas por la descarga de flujos procedentes de rocas graníticas en el Campo Arañuelo". VII Conferencia sobre "Hidrología general y aplicada", pp. 393-399. SMAGUA. Zaragoza.