

Identificación de flujos subterráneos en un medio hidrogeológicamente discontinuo de alta salinidad

ANTONIO PLATA BEDMAR (*) y JOSÉ LUÍS SALINAS RODRÍGUEZ (**)

RESUMEN El artículo describe la metodología empleada para la identificación de flujos subterráneos con condiciones de gran complejidad hidrogeológica, debido a la existencia de acuíferos o acuitardos multicapa discontinuos en la zona de trabajo. Por otra parte, la presencia en el sustrato de sales muy solubles (yeso, glauberita y halita) lo hace muy proclive a sufrir socavaciones en el caso de ser bruscamente drenado. Como consecuencia, la definición precisa del marco hidrogeológico se desvela primordial para acometer el diseño de obras subterráneas. En la investigación efectuada, el estudio se ha llevado a cabo con el apoyo de tres sondeos, lo que ha permitido muestrear las aguas a distintas profundidades, así como marcar las columnas piezométricas con yodo-131 para analizar flujos subterráneos. Las analíticas han incluido análisis químicos e isotópicos (tritio, deuterio y oxígeno-18).

IDENTIFICATION OF GROUNDWATER FLOWS IN A HYDROLOGICALLY DISCONTINUOUS ENVIRONMENT WITH HIGH SALINITY WATER

ABSTRACT *The present report describes the methodology used for the identification of groundwater flows under conditions of a high hydrogeological complexity derived from the presence of non continuous multilayer aquifers or aquitards. On the other side, the presence of a substrate formed by gypsum, glauberite and halite (very soluble rocks) increases the risk of forming holes and cavities in case a rapid draining of the rock formation takes place. For this reason, the performed hydrogeological investigation is considered very important, from a geotechnical point of view, for any underground work planned in the area. The characterisation of the groundwater flows in the studied area has been made by means of three boreholes, which have allowed the performance of systematic sampling at different depths, as well as the labelling of the water column using iodine-131 as a tracer. Chemical and isotopic analyses (tritium, deuterium and oxygen-18) have also been performed.*

Palabras clave: Hidrogeología, Geotecnia subterránea, Salmuera, Isótopos, Trazadores en sondeos.

Keywords: Hydrogeology, Underground geotechnical methods, Brackishwater, Isotopes, Tracers in boreholes.

1. INTRODUCCIÓN

La medida de flujos en sondeos mediante trazadores es una técnica precisa para acotar niveles de agua en el terreno y, a partir de esta información, para valorar su posible incidencia sobre excavaciones profundas. El marcado de la columna de agua de los sondeos se realiza habitualmente con salmuera, midiéndose la evolución de la conductividad que se produce como consecuencia de los flujos de agua cortados por los taladros. Sin embargo, este trazador no es eficaz cuando el medio hídrico es de elevada salinidad, debiéndose recurrir en este caso a un marcado con isótopos radiactivos. Suele utilizarse un isótopo de vida muy corta, habitualmente yodo-131, que tiene un período de semidesintegración de 8,02 días.

Por otra parte, la presencia de salmueras en la zona investigada, asociada a rocas salinas altamente solubles, puso de manifiesto la necesidad tanto de acotar la profundidad y posible desarrollo de los niveles de agua, como de evaluar la capacidad transmisiva de los acuíferos y sus posibilidades de recarga en el caso de ser drenados por una excavación. Para investigar estos últimos aspectos, además del procedimiento habitual de los ensayos de bombeo, se llevaron a cabo análisis químicos e isotópicos para determinar la interrelación entre los acuíferos y dilucidar la antigüedad de las aguas. En este caso concreto, se analizaron los contenidos de tritio, deuterio y oxígeno-18.

En una zona como la investigada, con acuíferos multicapa discontinuos asociados a una permeabilidad por fractura, es donde las técnicas empleadas adquieren la máxima importancia, ya que son las adecuadas para la identificación de las capas freáticas profundas, acotadas a partir de los flujos a ellas asociados. Por otra parte, el hecho de que se trate de aguas muy cargadas de sales determina una contaminación de los hidroniveles electro-acústicos habitualmente empleados para

(*) CETA, CEDEX, jubilado CEDEX.

(**) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.

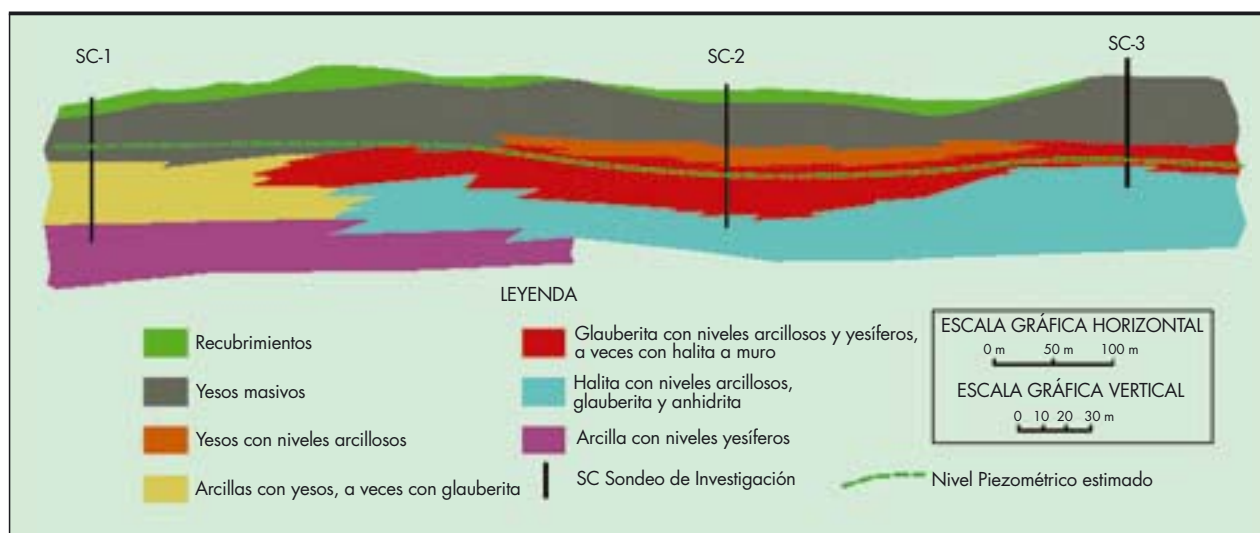


FIGURA 1. Perfil estratigráfico de la zona investigada (modificado del preparado por SENER).

medir la profundidad de los niveles piezométricos, lo que puede llevar a falsas medidas.

También, y de forma geotécnicamente muy trascendente, un drenaje brusco causado por una excavación profunda, puede desencadenar un arrastre y socavación de las unidades salinas. El resultado suele ser la formación de cavidades progresivamente crecientes que perturben tanto la estabilidad de la excavación como la operatividad futura de la obra. Para evitar esta posibilidad, es evidente que hay que adoptar procedimientos que minimicen el impacto de la excavación, en el sentido de preservar en lo posible las condiciones hidrológicas naturales. Para lograrlo, es imprescindible establecer con la mayor precisión posible el marco hidrogeológico, conociendo no sólo dónde es previsible cortar una capa freática, sino el caudal que pudiera ser drenado.

Las herramientas de trabajo utilizadas están descritas con detalle en la monografía *Técnicas Hidrogeológicas en Investigación Geotécnica*, escrita por los autores de este artículo (Monografía del CEDEX, M-78, 158 pp., 2003).

Los autores expresan su agradecimiento al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), tanto por apoyar los trabajos hidrológicos acometidos como por las facilidades dadas para la publicación de este artículo.

2. MARCO GEOLÓGICO

La zona de estudio se ubica en terrenos arcillosos, yesíferos y salinos asociados a las facies evaporíticas miocenas de lo que hoy es la meseta sur peninsular, en la franja meridional de la Comunidad de Madrid. Los perfiles estratigráficos se caracterizan por una variabilidad lateral y vertical que hace compleja su geometría espacial.

En la Figura 1 se interpretan, agrupadas, las unidades geológicas más representativas. Los perfiles estratigráficos del terreno incluyen, en síntesis, potentes paquetes de yesos en la franja superficial (*unidad superior de yesos*), yesos y glauberita con arcillas a mayor profundidad (*unidad inferior de yesos*) y tramos arcillosos y/o halita y glauberita a muro de la franja investigada. Estas formaciones se acunian lateralmente, no ocupando toda la zona de estudio.

Algunas de las unidades yesíferas están carstificadas, y, al tratarse de cuerpos de matriz no permeable, el agua sólo

puede acceder a zonas profundas a través de los canales de disolución desarrollados a partir de litoclasas. En estas condiciones, y puesto que el grado de carstificación disminuye globalmente con la profundidad, puede presumirse que los flujos subterráneos han sido muy lentos.

El drenaje profundo descarga, en último término, en el río Tajo, si bien existen algunas surgencias locales de escasa entidad. Se exceptúan los manantiales de Ontígola, situados a algunos kilómetros al este de la zona de trabajo, que recogen aguas de la unidad superior de yesos del Mioceno, muy desarrollada en extensión en toda la región.

La Figura 1 presenta también la posición del nivel piezométrico, estimada a partir de los sondeos, en el conjunto de la zona investigada. Conviene resaltar que la posición real de la cota de agua en el terreno no tiene por qué coincidir con la que se mide en los sondeos. En el caso de acuíferos multicapa, la profundidad de la columna piezométrica es consecuencia de la interacción de los distintos niveles de agua cortados por los taladros. Sólo en el caso de un medio en el cual la superficie hidrostática se encuentre a la presión atmosférica (acuífero libre) es posible referirse con rigor a un nivel freático.

En la zona de trabajo, esta circunstancia sólo se produce en capas hídras asociadas al acuífero superior. Pero cuando los sondeos cortan estratos más profundos con agua, el nivel que se mide es el resultante del equilibrio que se produce entre el agua que penetra por las paredes del taladro (a veces procedentes de tramos por encima de la columna de agua) y la que es evacuada del sondeo. Si el caudal evacuado es inferior al de aporte, el nivel piezométrico asciende hasta la cota marcada por el acuífero más superficial.

3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Partiendo de la información hidrogeológica existente sobre la zona de estudio, en la cual quedaban claramente definidas las unidades estratigráficas existentes, se consideró que podían ser suficientes tres sondeos para establecer la relación existente entre unidades estratigráficas y flujos.

La situación de los sondeos perforados y las profundidades alcanzadas con los mismos se recogen en la Figura 1.

Los resultados obtenidos con los muestreos, realizados en las semanas inmediatamente posteriores a la conclusión de los

sondeos, mostraron que, en algún caso, no se había producido una renovación completa del agua de perforación, lo que “contaminaba” los contenidos químicos e isotópicos de las aguas muestreadas. Esta circunstancia es indicativa, por sí sola, de la lentitud de desplazamiento de las aguas profundas, y, en consecuencia, la escasa tasa de renovación de las mismas.

Los sondeos se habían dejado equipados con tubería piezométrica, con objeto tanto de hacer un seguimiento de los niveles piezométricos como de tener la posibilidad de tomar muestras de agua. Este tipo de equipamiento permitió un nuevo muestreo de los sondeos algunos meses después.

Puesto que se trataba de cuantificar las magnitudes de los flujos subterráneos, se hicieron, en cada uno de los sondeos, ensayos de bombeo. Este tipo de pruebas permite estimar los caudales que podrían ser drenados por una excavación subterránea que cortase los acuíferos. Dado el carácter de la investigación y el tiempo y coste disponibles, no se realizaron pruebas de bombeo con el apoyo de piezómetros adicionales de control. Por otra parte, es evidente que los caudales que se miden son los totales correspondientes a los acuíferos cortados por cada sondeo, y no caudales individuales.

El desarrollo de las pruebas de bombeo no se describe en este artículo, cuyo objetivo es, como ya se ha señalado, analizar las técnicas empleadas para acotar los acuíferos existentes y la relación existente entre los mismos.

Con este propósito, se plantearon los siguientes trabajos:

- Perforar tres sondeos para investigar las condiciones hidrogeológicas de la zona en estudio, prestando atención preferente a las incidencias relacionadas con el agua producida durante el proceso de ejecución de los sondeos. Aprovechar para algunas de las pruebas un sondeo de gran diámetro existente en el área de trabajo.
- Muestrear las columnas de agua de los sondeos a diferentes profundidades y utilizar los ensayos de bombeo para tomar muestras, evaluar los caudales drenados y estimar, a partir de la curva de recuperación, las profundidades a que se producen aportes de agua. Estos aportes no procederían, necesariamente, de aguas subterráneas, sino que podrían, al menos en parte, tratarse de aguas de perforación retenidas en el entorno de los sondeos (aguas de retorno). De aquí que fuera necesario investigar esta posibilidad.
- Tomar muestras en las surgencias del entorno de la zona de estudio, así como en el lugar de procedencia del agua empleada para las perforaciones. En esta agua se disolvió sal común para tratar de que resultara menos agresiva para el terreno, dada la alta solubilidad de la glauberita y la halita.
- Obtener perfiles de resistividad y temperatura en los sondeos.
- Marcar las columnas de agua de los taladros con yodo-131 y proceder a la obtención de curvas de dispersión del isótopo, para relacionarla con flujos asociados a capas freáticas.
- Realizar analíticas químicas completas, así como valorar los contenidos de tritio (relacionados con la antigüedad de las aguas) y de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18 (vinculados al origen y a las condiciones de infiltración del agua).

Como ya se ha señalado, la toma inicial de muestras de agua se completó con otra posterior, dado que las analíticas pusieron de manifiesto que, en algunos casos, no se había producido una renovación completa del agua utilizada en las perforaciones. Esta circunstancia ya era indicativa de una baja permeabilidad del terreno.

4. MEDIDA DE FLUJOS SUBTERRÁNEOS

4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El procedimiento de marcado se detalla en la referencia bibliográfica anteriormente citada. Se ha utilizado el trazador radiactivo yodo-131, en forma de ión yoduro, y la medida de su concentración se hizo mediante una sonda de gamma natural incorporada a un equipo de testificación de sondeos (*well logging*). La medida se realiza en forma de perfiles de rayos gamma de tipo continuo. Los resultados se expresan en cuentas o impulsos por segundo (cps).

Obviamente, la manipulación del isótopo requiere personal cualificado. En este caso, se contó con el apoyo de especialistas del Centro de Técnicas Aplicadas del CEDEX, en cuyos laboratorios se realizaron asimismo los análisis isotópicos de las aguas muestreadas. Para la obtención de las curvas de dispersión se contó con la empresa AGS (Análisis y Gestión del Subsuelo, SL).

Los cambios de concentración producidos en función del tiempo a lo largo de la columna de agua o en determinado tramo de la misma proporcionan información cualitativa y, en muchas ocasiones, semicuantitativa sobre los flujos existentes dentro del sondeo. En ausencia de flujos verticales, la disminución de la concentración de trazador en función del tiempo tiene lugar según una ley exponencial. La pendiente de la recta obtenida es una medida de la velocidad horizontal (velocidad Darcy) del flujo subterráneo. Esta velocidad (v) se deduce a partir de la ley exponencial de dilución y conduce en último término a la ecuación siguiente:

$$v = \frac{1,81d}{\alpha t_{1/10}}; \quad (1)$$

donde d es el diámetro interno del sondeo, $t_{1/10}$ el tiempo necesario para que la concentración de trazador disminuya a la décima parte y α un coeficiente que es necesario introducir debido a la perturbación hidrodinámica del flujo subterráneo que se produce en las inmediaciones del taladro. Este coeficiente depende de las características constructivas del sondeo, incluyendo la permeabilidad del tubo de revestimiento del sondeo. En nuestro caso se ha utilizado una tubería piezométrica y un relleno de grava con una permeabilidad conjunta muy superior a la del terreno, pudiendo considerarse un valor aproximado de $\alpha = 3$.

Debe indicarse que, además del ensayo descrito para la medida del flujo subterráneo, se midieron también perfiles de radiación gamma natural (obviamente antes de la inyección del yodo-131) y de temperatura.

Además de en los sondeos, se consideró interesante realizar también la medida de flujos en un pozo existente junto al sondeo SC-2, puesto que el tramo hidráulicamente operativo de este sondeo se circunscribía al acuífero configurado por la unidad de yesos superiores, quedando por tanto individualizado de interferencias con posibles acuíferos más profundos.

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS

4.2.1. Sondeo SC-1

Con el objeto de facilitar la interpretación de los resultados, se recoge la columna litológica simplificada de los materiales cortados por el sondeo:

0,0–3,4 m	Arenas limosas.
3,4–12,2 m	Arcillas margosas alternando con arenas yesíferas.
12,2–21,0 m	Yesos masivos con intercalaciones arcillosas. Huecos de disolución.
21,0–47,2 m	Arcillas oscuras con niveles de yeso. Tramos de glauberita.
47,2–50,3 m	Arcillas oscuras, yesos y algo de glauberita.
50,3–59,1 m	Arcillas marrones y grises y tramos de yeso.

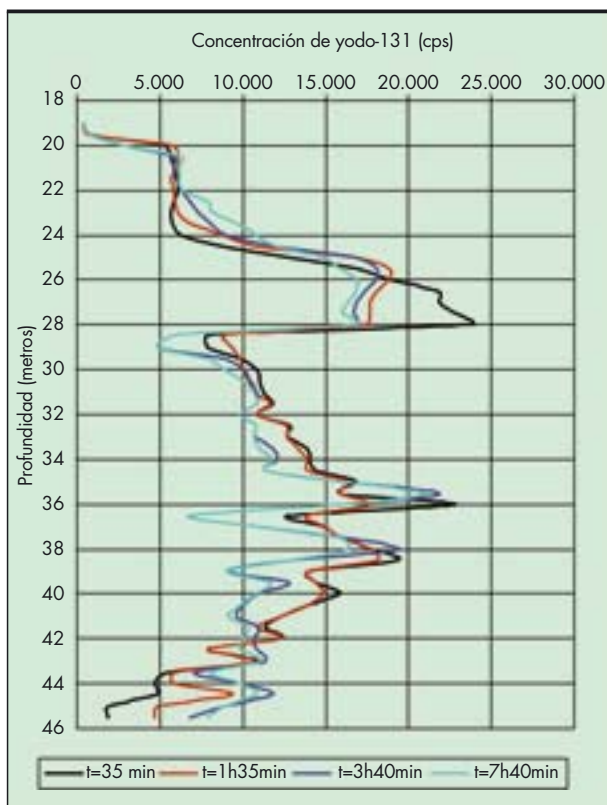


FIGURA 2. Resultados del ensayo para la medida de flujos realizado en el sondeo SC-1.

El ensayo de marcado de la columna de agua proporcionó los perfiles que se muestran en la Figura 2. En la testificación previa con un termo-resistivímetro se constató que la resistividad define de forma nítida el nivel de 21 metros, donde se produce el cambio en la columna litológica de yesos a arcillas. La temperatura del agua se mantiene en torno a 17°C, con un ligero aumento con la profundidad.

Los perfiles reflejan la ausencia de un flujo subterráneo relevante. Sólo se detecta una dilución significativa del trazador a 27 m, asociable a un flujo horizontal en los niveles de yeso-glauberita. La irregularidad inicial de la curva es consecuencia del proceso de marcado. Los picos de carácter negativo que se observan a 29,0 m y 36,5 m pueden ser debidos a la presencia de huecos, pero que no facilitan un flujo significativo.

Además de confirmar la baja permeabilidad de los materiales, el ensayo permite asegurar que no existe aporte de agua por encima de la cota piezométrica. Por otra parte, la prueba también subraya el carácter discontinuo de las capas hídricas (propio de cuerpos hidrogeológicos afectados por fracturas).

4.2.2. Pozo junto al sondeo SC-2

La columna litológica simplificada de este sondeo de gran diámetro, en el tramo provisto de rejilla permeable, es la siguiente (los datos proceden de SENER-ADIF):

- 11,0–14,0 m Arenas finas limosas marrón claro.
- 14,0–21,0 m Yeso blanquecino, con nódulos dispersos de yeso en aumento a partir de 18 metros.
- 21,0–26,0 m Yesos arcillosos grises.
- 26,0–29,0 m Arcillas yesíferas oscuras.

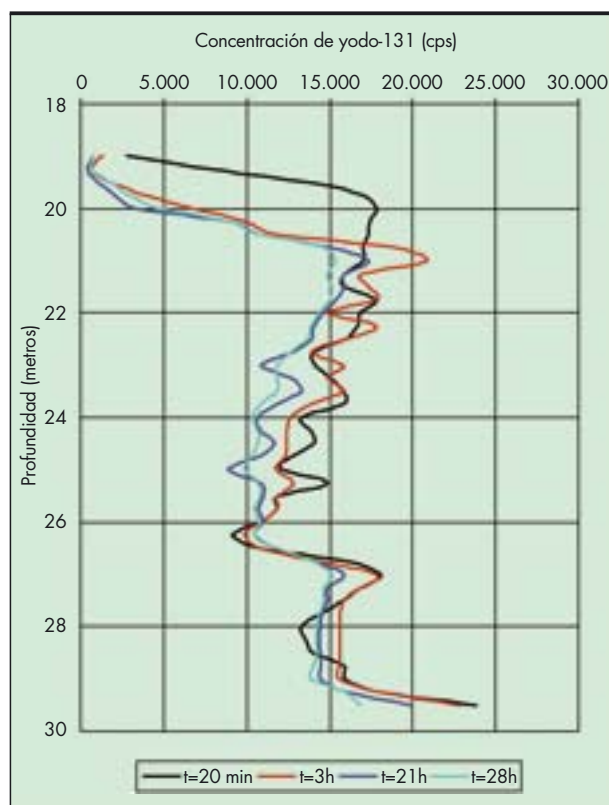


FIGURA 3. Resultados del ensayo para la medida de flujos realizado en el pozo S-103-035, emplazado junto al sondeo SC-2.

El perfil de resistividad del agua muestra una disminución de este parámetro a 26 m, coincidiendo con la profundidad de la formación arcillosa. La temperatura del agua se mantiene constante en un valor próximo a 17,2°C.

Los resultados obtenidos en el ensayo de marcado de toda la columna de agua se muestran en la Figura 3. Las curvas reflejan, con claridad, que los materiales interceptados por el sondeo por debajo de 20 m son, prácticamente, impermeables, localizándose la capa acuífera en el tramo superior de la columna. Este dato reafirma que el acuífero no lo configura una unidad estratigráfica saturada sobre una unidad impermeable, sino que aparece localizada en tramos estrechos. Hay que resaltar que los aportes de agua del pozo serían similares si el sondeo no hubiera profundizado más de 21 m.

4.2.3. Sondeo SC-2

La columna litológica de los materiales cortados por el sondeo es similar a la descrita para el pozo S-103-035:

- 0,0–5,5 m Limos arenosos con bloques de yeso.
- 5,5–20,8 m Yesos masivos con intercalaciones arcillosas.
- 20,8–34,0 m Yesos con niveles de arcilla negra e indicios de glauberita.
- 34,0–52,1 m Glauberita con intercalaciones de yeso.
- 52,1–60,0 m Halita y niveles arcillosos con glauberita.

Los resultados obtenidos en el ensayo de marcado de la columna de agua con yodo-131 se recogen en la Figura 4. Los perfiles de concentración de trazador muestran, de forma inequívoca, la existencia de un tramo superior de la columna de agua con un flujo vertical descendente claramente definido, producido por la entrada de agua procedente de niveles superiores del sondeo.

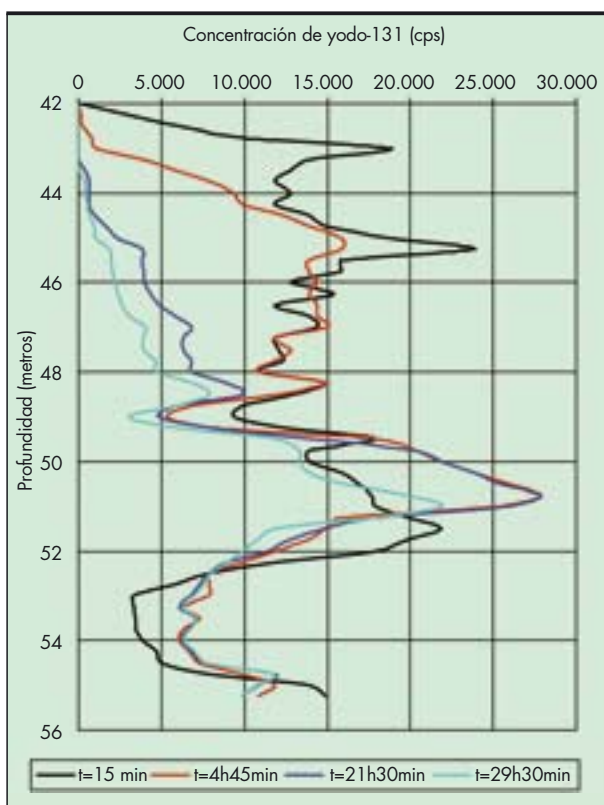


FIGURA 4. Resultados del ensayo para la medida de flujos realizado en el sondeo SC-2.

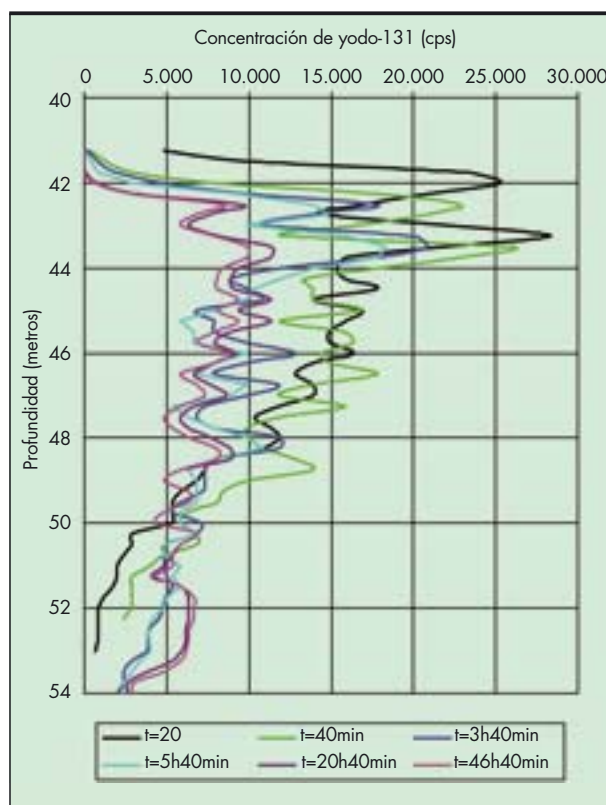


FIGURA 5. Resultados del ensayo para la medida de flujos realizado en el sondeo SC-3.

A partir de la disminución de concentraciones de isótopo en la parte superior de la columna de agua puede estimarse la velocidad del flujo vertical descendente. Estos descensos, medidos sobre la abscisa de 5000 cps, son, aproximadamente, de 0,94 m entre los perfiles primero y segundo, de 3,28 m entre los perfiles segundo y tercero y de 1,44 m entre los perfiles tercero y cuarto.

Por otra parte, los intervalos de tiempo transcurridos entre la medida de cada par de perfiles fueron, respectivamente, de 4 horas y 30 minutos, 16 horas y 45 minutos y 8 horas. Dividiendo las distancias expresadas en centímetros por los tiempos expresados en horas, se tienen, consecutivamente, los siguientes valores para la velocidad del flujo vertical descendente: 20,9 cm/h, 19,9 cm/h y 18,0 cm/h. Es decir, un valor medio próximo a 20 cm/h. Como la sección interna de la tubería de revestimiento (de un diámetro de 5 cm) es de 19,6 cm², el caudal del flujo vertical descendente es igual a 392 cm³/h, o sea, unos 0,4 litros por hora. Este caudal podría ser algo mayor si se toma en consideración el flujo de agua que podría estar circulando entre la tubería piezométrica y el terreno, a través de la gravilla del relleno.

Los perfiles de la Figura 4 indican que la salida del trazador tiene lugar a través de una fractura o zona permeable situada a una profundidad de 49 m. El espesor de este tramo permeable es muy pequeño, sin duda menor de 50 centímetros. Por debajo se tienen materiales impermeables.

La forma irregular de los perfiles en la franja más profunda es consecuencia de una inyección defectuosa del trazador. La ausencia de flujo en este tramo se demuestra porque la concentración de trazador aumenta con el tiempo debido al proceso de homogeneización de la columna.

4.2.4. Sondeo SC-3

La columna litológica de los materiales cortados por el sondeo es la siguiente:

- 0,0–27,00 m Yesos masivos blanquecinos con intercalaciones arcillosas.
- 27,0–32,3 m Yesos con posibles intercalaciones de glauberita y niveles arcillosos.
- 32,3–42,4 m Yesos y glauberita con algunas intercalaciones de arcilla. A muro, cristales dispersos de halita.
- 42,4–55,5 m Halita con yesos y glauberita. Con algunos niveles arcillosos negruzcos.

Como era de esperar, la resistividad del agua se aproxima mucho a cero en el tramo de halita, debido al elevado contenido en ClNa. La temperatura se sitúa en un valor próximo a 17,5°C, es decir, muy parecida a la de los restantes sondeos investigados.

Los resultados obtenidos en el ensayo de marcado de toda la columna piezométrica con yodo-131 se muestran en la Figura 5.

Los perfiles de concentración de este isótopo ponen de manifiesto que las pérdidas de trazador se localizan en la zona de contacto entre la unidad de yesos y la de halita. A favor del contacto estratigráfico entre las dos formaciones se ha podido desarrollar por disolución un nivel permeable por el que circula el agua. La pérdida de isótopo puede producirse por un flujo horizontal a través de esta zona de contacto, aunque también podría contribuir un pequeño aporte de agua procedente de estratos superiores a la superficie piezométrica. No obstante, la elevada salinidad medida en una muestra de agua tomada en este sondeo (500 mS/cm de conductividad

eléctrica) parece descartar que este aporte pudiera ser relevante. El agua de esta muestra se encuentra saturada en halita (ver siguiente apartado), debido a lo cual sólo cabe la posibilidad de que circule en contacto con este tipo de materiales.

En el tramo ocupado por la halita por debajo de 42,4 metros, los perfiles de concentración de trazador muestran que a lo largo del período de 46 horas 40 minutos se ha producido una cierta homogeneización de este parámetro, derivado, presumiblemente, de la agitación producida durante la introducción de la sonda de medida.

La falta de trazador en el tramo más profundo del sondeo se atribuye a un marcado defectuoso de la columna de agua. El aumento de concentración observado a lo largo del tiempo en este tramo es claramente indicativo de la ausencia en el mismo de un flujo subterráneo significativo.

Las pérdidas de trazador en el tramo comprendido entre 43 metros y el fondo (se deja de considerar la zona de contacto entre yesos y halitas) pueden cuantificarse sumando todos los valores que determinan los perfiles. Estas sumas dan un valor proporcional al área de los diferentes perfiles. Los valores obtenidos son, redondeando a mil, 403.000, 430.000, 356.000, 335.000, 315.000 y 296.000 cuentas por segundo. Despreciando los dos primeros valores, que corresponden a los 40 minutos iniciales después de la inyección, cuando el trazador no se encuentra aún distribuido de forma homogénea en la sección transversal del sondeo, la disminución de la concentración en función del tiempo es mínima. El valor del parámetro $t_{1/10}$ de la ecuación 1 ascendería a unas 600 horas. La velocidad del flujo calculada con este valor sería despreciable.

Este resultado confirma que la unidad de halitas en el entorno del sondeo SC-3 es, prácticamente, impermeable.

El nivel piezométrico se mantiene a una profundidad estabilizada próxima a 41,8 m, ligeramente por encima del flujo definido a una profundidad de 42,4 m. Por consiguiente, la posición de la superficie hidrostática en el taladro está acotada por la existencia de ese acuífero profundo.

Concordantemente con esta interpretación, se produjo una pérdida total del agua de perforación al cortar el tramo permeable.

5. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

La composición química del agua, junto con la composición isotópica (isótopos estables del agua deuterio y oxígeno-18) y el tritio son excelentes trazadores naturales del agua que proporcionan valiosa información sobre el origen del agua, relaciones o conexiones hidráulicas existentes entre distintos tipos o familias de aguas de la zona del estudio, interacción entre el agua subterránea y las fases minerales del terreno, etc.

La diferencia principal entre la composición química y la composición isotópica radica en que los componentes disueltos en el agua dependen de las formaciones a través de las cuales circula el agua, mientras que los isótopos mencionados forman parte de la propia molécula de agua y, por tanto, su concentración no se ve influenciada por la composición litológica del medio. El uso conjunto de estas herramientas permite conocer, a través de la caracterización de cada una de las familias o facies hidroquímicas que existen en la zona del estudio, los procesos que condicionan la circulación de las aguas subterráneas y su grado de interconexión con otras aguas subterráneas o superficiales.

Salvo casos excepcionales, los componentes químicos mayoritarios contenidos en las aguas subterráneas son los siguientes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , como cationes y Cl^- , SO_4^{--} , NO_3^- ,

CO_3^{--} y CO_3H^- , como aniones. Asimismo el pH y la conductividad eléctrica del agua se consideran parámetros básicos para los estudios hidroquímicos, por lo que, aunque no se recogen aquí, también fueron medidos.

Puesto que el índice de saturación depende de forma compleja de la composición química completa del agua, así como del pH y de la temperatura, su determinación se hace a través de diversos programas de ordenador desarrollados al efecto, que se basan, generalmente, en la teoría de Debye-Hückel sobre la actividad iónica de los componentes disueltos.

No obstante, cuando se trata de salmueras, como es el caso presente, hay que recurrir a programas específicos para este tipo de aguas, tales como el conocido con las siglas PHRQ-PITZ, que fue creado por L.N. Plummer, D.L. Parkhurst, G.W. Fleming y S.A. Dunkle en el año 1988. Este programa incorpora ecuaciones de Pitzer para el cálculo de reacciones geohidroquímicas que tienen lugar en el caso de salmueras.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Como ya se ha señalado, se realizaron muestreos en los sondeos, a distintas profundidades y en fechas diferentes, así como en puntos superficiales de agua en el entorno de la zona investigada. Los análisis químicos se efectuaron en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

El motivo que indujo a efectuar un segundo muestreo de las aguas de dos de los sondeos en meses posteriores fue la constatación de discrepancias en las concentraciones de tritio y en la composición química del agua, derivadas de la lenta renovación del agua de perforación dentro de estos sondeos. El problema de interpretación afectaba, fundamentalmente, a los datos obtenidos en el sondeo SC-3, distorsionados por la presencia de agua del sondeo, que no había sido todavía renovada cuando se realizó el primer muestreo. También se consideró conveniente realizar un nuevo muestreo del sondeo SC-2, con el propósito de mejorar el conocimiento de la franja saturada, dado que ésta se emplazaba, presumiblemente, en formaciones de glauberita y de halita, que son las más conflictivas desde el punto de vista geotécnico, debido a su elevada solubilidad.

Se tomaron cuatro muestras de agua en los sondeos SC-2 y SC-3. Dos de ellas se extrajeron en el tramo en que se había constatado circulación de agua, en las proximidades del nivel piezométrico, y las otras dos en zonas más profundas. Se perseguía con los muestreos a diferentes profundidades una mejor definición de la columna de agua del taladro a efectos de valorar la posible variación de los contenidos químicos e isotópicos en relación con el entorno.

También se tomó muestra de la surgencia existente en la población de Ontígola, la más importante de la región, así como de la represa alimentada por el propio manantial (el llamado "mar" de Ontígola). De ahí procedía el agua empleada para la perforación de los sondeos (con el añadido de sal común), a pocos kilómetros del emplazamiento de los mismos.

Resultaba de especial interés contrastar los nuevos análisis efectuados con aguas del sondeo SC-3, en lo referente a composición química y contenido de tritio.

Las Tablas 1, 2 y 3 recogen un resumen de la composición química de las aguas muestreadas, con la inclusión de los componentes químicos más significativos. Cuando no se indica la profundidad de toma de muestra, el agua procede de la franja superior de la columna piezométrica del sondeo.

5.2.1. Composición química del sondeo SC-1

En este sondeo se tomaron muestras a profundidades diferentes y en fechas distintas.

Conc. (mg/l)	Agua de perforación (julio 2006)	Agua tomada a 20 m (agosto 2006)	Agua tomada a 40 m (agosto 2006)	Agua tomada a 53 m (agosto 2006)	Agua antes del marcado (octubre 2006)
Na ⁺	1.038	1.451	1.411	1.431	1.336
SO ₄ ²⁻	2.071	3.996	3.939	4.013	4.260
Cl ⁻	1.596	1.429	1.408	1.362	1.595
Mg ⁺⁺	190	442	427	418	431
Ca ⁺⁺	593	547	531	520	472
HCO ₃ ⁻	1,5	220	217	224	231

TABLA 1. Composición química resumida de las aguas del sondeo SC-1.

Conc. (mg/l)	Agua de perforación (agosto 2006)	Agua tomada al final del bombeo (10/08/06)	Agua a 52 m durante fase de recuperación (10/08/06)	Agua tomada a 48 m (23/01/07)	Agua tomada a 52 m (23/01/07)
Na ⁺	2.991	3.859	24.500	6.665	89.370
SO ₄ ²⁻	2.213	8.805	49.468	15.766	30.850
Cl ⁻	4.638	1.604	4.474	986	92.889
Mg ⁺⁺	195	435	429	544	415
Ca ⁺⁺	657	427	527	434	444
HCO ₃ ⁻	2	–	383	273	209

TABLA 2. Composición química resumida de las aguas del sondeo SC-2.

Conc. (mg/l)	Agua de perforación (agosto 06)	Agua de bombeo (28/08/06)	Agua de final del bombeo (28/08/06)	Agua de recuperación a 48 m (28/08/06)	Agua tomada a 45 m (28/10/06)	Agua tomada a 42 m (23/01/07)	Agua tomada a 48 m (23/01/07)
Na ⁺	2.418	63.785	71.386	42.353	112.613	81.983	114.222
SO ₄ ²⁻	2.389	23.387	23.987	20.656	45.880	42.509	46.654
Cl ⁻	4.042	69.636	78.261	40.086	145.197	87.737	145.565
Mg ⁺⁺	214	447	569	307	973	1.028	1.042
Ca ⁺⁺	692	223	268	306	251	388	240
HCO ₃ ⁻	246	318	470	567	227	300	229

TABLA 3. Composición química resumida de las aguas del sondeo SC-3.

Como puede verse en la Tabla 1, los resultados obtenidos difieren muy poco entre sí, lo cual indica que la columna de agua del sondeo es químicamente homogénea.

5.2.2. Composición química del sondeo SC-2

Se analizaron cuatro muestras de agua, con resultados muy dispares entre sí, como refleja la Tabla 2. Los más fiables corresponden a la última de las muestras.

5.2.3. Composición química del sondeo SC-3

En este sondeo se analizaron varias muestras, con analíticas que se resumen en la Tabla 3. Tres de las muestras se tomaron durante el ensayo de bombeo y recuperación posterior del nivel de agua dentro del taladro.

Las muestras extraídas durante el bombeo dieron valores muy similares entre sí. No los dieron la muestra tomada du-

rante la fase de recuperación y el agua muestreada, dos meses después, antes del ensayo con trazador.

La heterogeneidad química sugiere que la restitución del nivel piezométrico se realiza por entrada en el sondeo de aguas con distinta composición química. Más adelante se discutirá la posible aportación de aguas procedentes de la perforación del propio sondeo.

Llama la atención el elevado contenido salino observado en la muestra tomada dos meses después, con una conductividad (500 mS/cm, corregida a 25°C) unas 10 veces superior a la del agua del mar, sin duda consecuencia de la disolución de halita. Por otra parte, los valores más bajos de la concentración de los iones CO₃H⁻ y Ca⁺⁺ se explican por la precipitación de CO₃Ca producida por el aumento de la concentración de Ca⁺⁺ relacionada con la disolución de yesos (efecto del ión común).

5.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Las elevadas salinidades del agua se justifican por la composición litológica de los materiales y por la reducida magnitud de los flujos del agua subterránea. Los balances iónicos reflejan la presencia, entre los componentes disueltos en el agua, de elevadas concentraciones en exceso de los iones SO_4^{2-} , Na^+ y Mg^{++} . Las concentraciones de estos dos cationes no pueden equilibrarse estequiométricamente con la contribución de los iones Cl^- y CO_3H^- . Esto se explica por la presencia en el medio de componentes minerales tales como glauberita ($\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot \text{SO}_4\text{Ca}$) y, tal vez, epsomita ($\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), hexahidrita ($\text{SO}_4\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), mirabilita ($\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), tenardita (SO_4Na_2) y algunos otros. La presencia de estos materiales evaporíticos se justifica por la génesis de los mismos, que está relacionada con la evaporación de aguas almacenadas en régimen lacustre durante el Mioceno.

Las Figuras 6 y 7 muestran, respectivamente, los diagramas de Piper y Schoeller-Berkaloff obtenidos a partir de valores químicos seleccionados de la primera fase de toma de muestras. Corresponden, en el caso de las aguas extraídas en los sondeos, a valores medios de las muestreadas en el SC-1, al agua de bombeo del SC-2 y a la tomada en el SC-3 antes del ensayo con trazador. El segundo diagrama refleja una cierta similitud de composición química entre los sondeos SC-1, SC-2 y el agua de perforación, procedente de los manantiales de Ontígola. Este dato confirma que esta última procede, como era de esperar, de las aguas de renovación relativamente rápida existente en el acuífero conformado por los yesos masivos.

El agua muestreada en el sondeo SC-3 apunta a una procedencia distinta. La representación recoge la analítica realizada dos meses después de concluido el sondeo, y refleja un tipo de agua claramente diferenciable de los anteriores. El alto contenido en sales, mayor que el ya en sí mismo importante de la muestra tomada inmediatamente después de concluir el sondeo, podría reflejar una proporción más elevada de agua con un tiempo superior de residencia en el terreno, en contacto con halita, en esta muestra. Esta interpretación concuerda con la presencia en el terreno de agua procedente de la perforación, de una salinidad inferior, incorporada a las aguas extraídas durante el bombeo, y que habría sido en gran parte desplazada cuando se realizó el segundo muestreo. Esta posibilidad se analizará más adelante.

La Figura 8 presenta, de forma gráfica, los datos recogidos en la Tabla 2, correspondientes al sondeo SC-2.

A la vista de las analíticas, cabe destacar los siguientes aspectos:

- La composición del agua de perforación es similar a las utilizadas en los otros sondeos.
- Las curvas que reflejan el contenido en iones de las aguas tomadas durante las pruebas de bombeo tienen formas semejantes entre sí y con las correspondientes a la mostrada a 48 m en enero de 2007. Sin embargo, el contenido iónico varía. Esta variación se debe a que el agua extraída durante el proceso de recuperación tiene un mayor contenido en sulfato y cloruro sódico. Por el contrario, durante la fase de bombeo (que se efectuó por encima de la unidad de halitas) la proporción de estas sales disminuye. El agua posteriormente tomada a 48 m, en el entorno de la franja con circulación de agua, tiene una composición muy parecida a ésta última, con un incremento del contenido en sulfato sódico, procedente sin duda de la glauberita.
- La elevada concentración salina del agua extraída a 52 m, dentro de la formación de halitas masivas, indica que se trata de un agua que no está siendo renovada, lo que

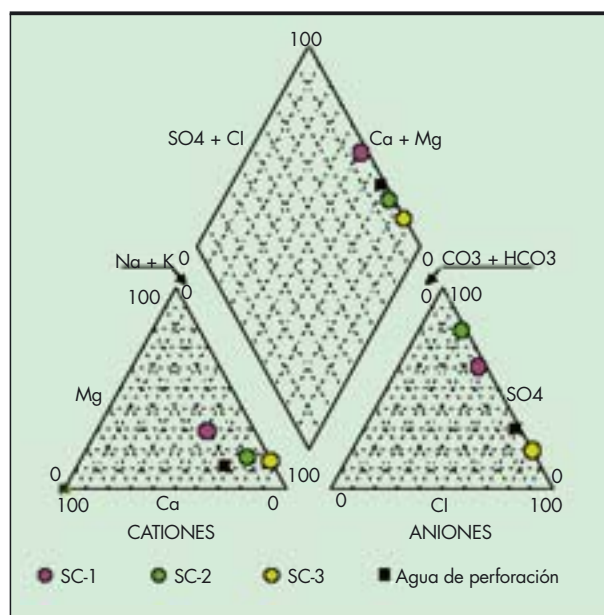


FIGURA 6. Diagrama de Piper.



FIGURA 7. Diagrama de Schoeller-Berkaloff.

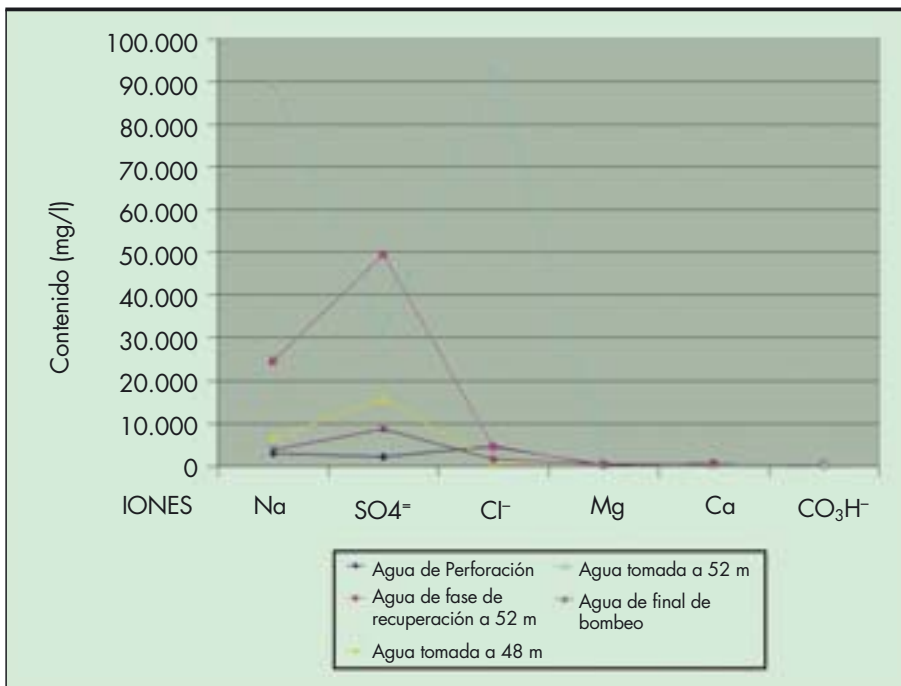


FIGURA 8. Contenidos químicos principales de las aguas del sondeo SC-2.

justifica que se cargue de sales. Es decir, se confirma la estanqueidad, en este punto, de la unidad de halitas.

A su vez, la Figura 9 recoge los datos incluidos en la tabla 3, correspondientes a las aguas extraídas del sondeo SC-3.

El análisis comparativo de los valores permite destacar las siguientes conclusiones:

- El agua de perforación presenta similares características a las empleadas en los sondeos SC-1 y SC-2.

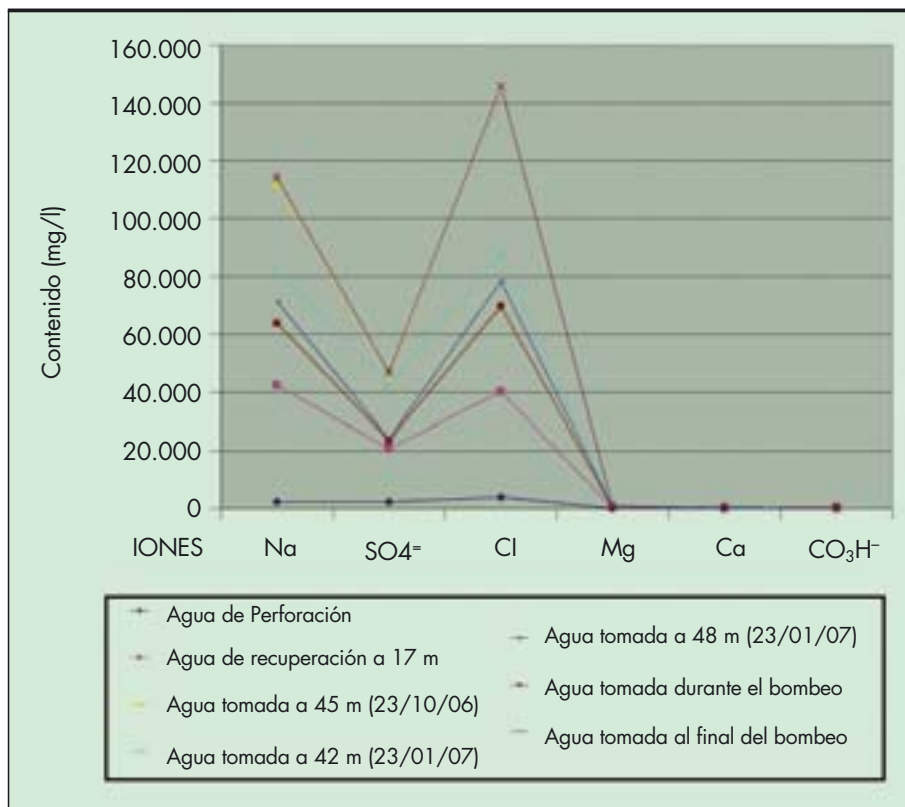


FIGURA 9. Contenidos químicos principales de las aguas del sondeo SC-3.

- Las aguas recogidas por debajo de la franja de flujo tienen un contenido salino muy superior al resto, alcanzando la saturación en halita. Las dos muestras, tomadas con tres meses de diferencia, conservan la misma composición química. Se trata de aguas en reposo en contacto con halitas. Este dato confirma la muy baja permeabilidad o impermeabilidad de la unidad de halitas en el punto muestreado.
- El agua extraída a 42 m, en el entorno del acuitardo profundo, tiene un contenido de sales inferior al agua del fondo del sondeo, justificado por haber sido tomada dentro de la franja de flujo, con agua que se renueva en una zona con un menor contenido en cloruro sódico. Posteriormente se verá que el contenido de tritio muestra que no contiene mezcla de los acuíferos superiores.
- Las aguas tomadas durante el ensayo de bombeo tienen una composición similar. El contenido salino es inferior al del agua freática profunda, ya que incorporan agua de perforación, menos salina, que contaminaba el sondeo en el momento del ensayo. Durante la fase de recuperación el contenido salino todavía descende más, apuntando a una mayor contribución a la misma del agua de perforación; además, posiblemente, de agua procedente de los niveles superiores.
- Contrastando la composición química de las aguas bombeadas con la del acuitardo profundo, se deduce que el caudal neto de agua que circula por el mismo es inferior al establecido a partir de las transmisividades calculadas con los ensayos de bombeo y de recuperación del nivel. La aportación neta de agua freática queda acotada por los contenidos de tritio, contemplados más adelante.

6. ISÓTOPOS ESTABLES DEL AGUA: DEUTERIO Y OXÍGENO-18

Los isótopos estables del agua deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O) proporcionan información sobre el origen del agua y sobre las relaciones de distintos tipos de aguas que puedan existir en un entorno determinado.

La composición isotópica del agua se expresa en la forma de desviaciones isotópicas con respecto a un patrón internacional representativo del agua marina media, que se toma como cero de la escala. Lo más interesante es que, una vez que el agua se infiltra en el terreno, su composición isotópica se mantiene constante, salvo que se produzcan procesos de intercambio isotópico con las rocas del medio, lo cual sólo ocurre por encima de 150°C (aguas termales) y afecta sólo al oxígeno-18, o intercambio con gases del subsuelo, por ejemplo metano. Todos estos factores hacen que, si dos muestras de agua tienen una composición isotópica diferente, puede afirmarse que tienen un origen

distinto o que se alimentan a través de mecanismos de recarga diferentes. También lo inverso suele ser cierto.

La Tabla 4 recoge los resultados obtenidos con algunas de las aguas muestreadas. Los errores de los análisis correspondientes a la desviación estándar son $\pm 0,15\%$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1,5\%$ para δD . La columna cuarta de la tabla muestra los excesos de deuterio calculados a partir de la ecuación que representa a las aguas meteóricas mundiales (línea recta de la Figura 10). Se observa que las cuatro muestras primeras de la tabla tienen valores de ΔD muy inferiores de 10, llegando a ser, incluso, negativos en algunos casos. Como se verá más adelante, esto se explica por la evaporación del agua antes de su infiltración en el terreno. Los valores de ΔD para las muestras del sondeo SC-3 son mucho mayores de 10, valor éste propio de la mayoría de las precipitaciones del globo.

Por otra parte, en la Figura 10 se representa el diagrama que relaciona a las desviaciones δD y $\delta^{18}\text{O}$ de todas las muestras analizadas. A efectos comparativos, se incluyen puntos representativos de las aguas subterráneas de las proximidades de Madrid (pozos del canal de Isabel II) y de la llanura manchega acuífero en formaciones carbonatadas).

Los cinco puntos que corresponden al agua de perforación, pozo de bombeo, sondeo SC-1 y sondeo SC-2 se encuentran muy próximos entre sí, lo cual sugiere que se trata, básicamente, del mismo tipo de agua (en la figura sólo se ven cuatro puntos enmarcados por un círculo, porque dos de ellos se superponen). Esta circunstancia es coherente con el resultado aportado por la composición química, como puede apreciarse en el diagrama de Schoeller-Berkaloff de la Figura 7.

Por otra parte, la posición en el diagrama de estos puntos con respecto a la línea meteórica global indica que se trata de aguas altamente evaporadas. Una evaporación tan elevada requiere que no se produzca una infiltración directa del agua de lluvia, de forma que es necesario admitir que se trata de aguas que han permanecido en superficie durante dilatados periodos de tiempo.

Por lo que se refiere a las dos muestras tomadas en el sondeo SC-3, la composición isotópica es atípica. El hecho de que los puntos se encuentren situados a la izquierda de la línea meteórica mundial obliga a descartar la evaporación previa del agua antes de infiltrarse en el terreno. Por otra parte, aguas subterráneas con la composición isotópica encontrada en estas dos muestras no pueden proceder de la infiltración de aguas pluviales inalteradas. Los puntos se encuentran dentro del diagrama en una posición vertical por encima del punto que sería de esperar para la zona del estudio. Esto plantea problemas para explicar el origen de esta agua a partir de los resultados obtenidos. Para concretar una explicación plausible se requerirían más datos, que confirmaran o no las analíticas y que aportaran información complementaria. En todo caso, esta problemática no resulta trascendente para el estudio planteado.

PROCEDENCIA	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	ΔD (‰)
Agua de perforación	-44,9	-5,76	1,18
Sondeo SC-1 (1)	-47,1	-5,95	-0,46
Sondeo SC-1 (2)	-44,8	-5,75	1,20
Pozo de bombeo	-45,6	-5,51	-1,52
Sondeo SC-2 (3)	-44,9	-5,43	-1,46
Sondeo SC-3 (2)	-35,8	-8,18	29,64
Sondeo SC-3 (3)	-35,1	-7,52	25,06

TABLA 4. Resultados de los análisis de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18.

(1) Muestra tomada unas semanas después de concluir la perforación.

(2) Muestra tomada antes del marcado con yodo-131, de dos a tres meses después de terminar la perforación.

(3) Muestra tomada durante el ensayo de bombeo.

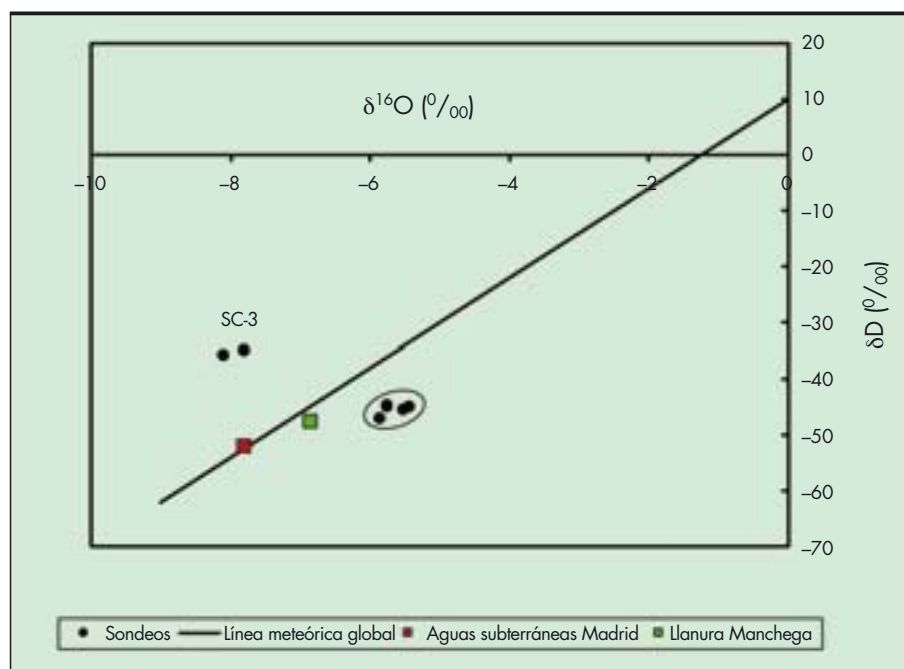


FIGURA 10. Diagrama que relaciona las desviaciones δD y $\delta^{18}O$ de las aguas.

La información aportada por el contenido en tritio de las aguas se ha hecho prevalecer sobre los de oxígeno-18 y deuterio, puesto que resulta más relevante para los objetivos del trabajo planteado (fundamentalmente, acotar la existencia de circulación y valorar las posibilidades de recarga). Por este motivo, no se ha considerado preciso efectuar un nuevo muestreo y una nueva analítica de las aguas de los sondeos SC-1 y SC-2.

7. TRITIO

7.1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

El tritio (3H o T) es el isótopo del hidrógeno de número de masa 3, por tanto, contiene en su núcleo un protón y dos neutrones. Es un isótopo radiactivo que se desintegra por emisión de partículas beta de baja energía (18 kilo-electrón-voltios, keV) con un periodo de semidesintegración de 12,33 años. La mayor parte del tritio actual se ha originado en los años inmediatamente posteriores a 1953, como consecuencia de las pruebas termonucleares realizadas en la atmósfera. Este tritio ha producido el marcado natural de todas las aguas meteoricas del globo y, por tanto, también de los acuíferos donde se produce una renovación rápida del agua. Esa circunstancia, unida al corto periodo de semidesintegración del tritio, hace de este isótopo una importante herramienta para una datación de aguas subterráneas recientes.

Las concentraciones de tritio suelen expresarse en unidades de tritio (UT). Para poderlas interpretar de forma correcta, es necesario conocer los contenidos de tritio de las precipitaciones de las últimas décadas en el área considerada. Estas concentraciones son conocidas en España gracias a las medidas directas realizadas por el CEDEX desde el año 1970.

De acuerdo con los datos contrastados, una concentración comprendida entre 3 y 5 UT puede interpretarse como agua procedente de las precipitaciones de los últimos 23 años. Valores mayores de 5 UT reflejan la presencia de agua de precipitaciones del periodo 1956 a 1982. La ausencia de tritio indica que se trata de aguas anteriores a 1953. Concentraciones intermedias comprendidas entre algo más de 0 y 3 UT indica-

rían que se trata de una mezcla de agua anterior a 1953 con agua posterior a este año.

7.2. CONTENIDOS DE TRITIO DE LAS AGUAS MUESTREADAS

Los análisis de tritio realizados a partir de las aguas tomadas en las dos campañas de muestreo se presentan en las Tablas 5 y 6.

Lo primero que se observa en los datos recogidos en la Tabla 5, correspondiente a un primer muestreo, es la existencia en algunas de las muestras de concentraciones de tritio mucho más elevadas que los valores medios corregidos por desintegración radiactiva en las precipitaciones de los últimos 30 años. Unas concentraciones tan elevadas como la del agua de perforación sólo podrían explicarse admitiendo que se trata de aguas procedentes mayoritariamente de precipitaciones producidas durante la década de los años 60. Otra posibilidad es que una fracción significativa del agua de perforación contuviera aguas procedentes del río Tajo. Las aguas de este río, de acuerdo con los muestreos que sistemáticamente realiza el CEDEX, se encuentra enriquecida en unas 200 UT por vertidos efectuados por la Central Nuclear de Trillo. El tipo de reactor nuclear de este Central (reactor de agua hirviendo) hace

PUNTO DE MUESTREO	UNIDADES DE TRITIO
SC-1 (octubre 2006)	4,06
SC-2 (agosto 2006)	4,00
Pozo próximo a SC-2 (agosto 2006)	4,24
Agua de perforación SC-3 (agosto 2006)	24,94
SC-3A (final de bombeo) (agosto 2006)	18,38
SC-3B (octubre 2006)	9,41

TABLA 5. Contenidos en tritio de las aguas muestreadas en la campaña del año 2006.

PUNTO DE MUESTREO	UNIDADES DE TRITIO
Manantial de Ontígola	50,93
Presa de Ontígola	31,85
Agua de perforación sondeo SC-1 (julio 2006)	32,87
Agua de perforación sondeo SC-2 (agosto 2006)	32,12
Sondeo SC-2 (Prof. 48 m)	0,03
Sondeo SC-2 (Prof. 52 m)	13,12
Sondeo SC-3 (Prof. 42 m)	2,71
Sondeo SC-3 (Prof. 48 m)	9,23

TABLA 6. Contenidos en tritio de las aguas muestreadas en la campaña del año 2007. Fecha: 23 de enero de 2007, excepto las indicadas.

que se produzcan importantes concentraciones de agua tritiada, que son vertidas periódicamente al río. Este hecho es bien conocido y no representa riesgo alguno para la población ni para la fauna y la flora. Por tanto, bastaría con la presencia de una fracción de, aproximadamente, el 10% de agua procedente del río Tajo para explicar el valor de 24,9 UT encontrado en el agua de perforación¹.

Por su parte, los valores próximos a 4 UT encontrados en las muestras SC-1, pozo de bombeo y sondeo SC-2 indican que se trata en estos casos de aguas procedentes de precipitaciones posteriores a 1982.

En el sondeo SC-3, el valor de 18,4 UT en la muestra tomada al final del bombeo indicaría la presencia de, aproximadamente, un 65% de agua de perforación¹.

Ese valor habría disminuido al 24% en la fecha en que se realizó un segundo muestreo, unos dos meses después del primero, cuando se obtuvo un contenido de 9,4 UT (SC-3B). Este hecho refleja, por sí mismo, la existencia de un flujo extremadamente lento dentro del sondeo. En este flujo iría decreciendo la aportación de las aguas de perforación, más tritiadas y menos salinas que las del acuífero, como se vio anteriormente. Hay que señalar que el tomamuestras (de tipo abierto) se bajó hasta casi el fondo del taladro, localizándose el flujo significativo sólo en la parte superior del mismo.

Una primera consideración de las aguas muestradas en la surgencia y en la represa de Ontígola confirma, además de la similitud de su composición química, los inusualmente altos contenidos en tritio de las mismas. Las aguas de perforación, como era de prever al proceder de la presa de Ontígola, comparten estas características (el aumento del contenido en cloruro sódico se explica por la adición de sal antes de inyectarlas en los sondeos).

Las 50,9 U.T. registradas en las fuentes de Ontígola bajan a 31,8 U.T. en las aguas de la represa, emplazada unos 2 km aguas abajo. Es lógico que disminuya el contenido en tritio, puesto que al arroyo deben incorporarse aguas de otra procedencia (en especial, de escorrentía). La composición química experimenta, sin embargo, pocas variaciones. Por otra parte, si se considera que el agua muestreada en el pozo próximo al sondeo SC-2 es representativa de la del acuífero en la unidad yesífera superior, hay que significar el mayor contenido en

sulfato sódico de esta última y un contenido en tritio muy inferior. Estos indicios apuntan a que las aguas no están genéticamente vinculadas, aunque discurren por terrenos geológicamente parecidos.

El agua tomada en el entorno de la franja permeable del sondeo SC-2 es anterior al año 1953 (Para determinar la edad con mayor precisión habría que medir el contenido de carbono-14, análisis complejo que no se requiere para el objetivo de este trabajo.) Por otra parte, la concentración de tritio encontrada a 52 metros (13,1 UT) se debe a la persistencia de agua de perforación dentro de la unidad de halitas. Este dato ratifica la práctica impermeabilidad de la unidad geológica en esta zona.

Las conclusiones a que llega con el sondeo SC-3 son parecidas. La evacuación del agua de perforación se produce también a través del flujo existente entre las unidades de glauberitas y yesos y de halitas masivas. El flujo que discurre por los conductos de disolución desarrollados en ese contacto es muy bajo y, debido a ello, el descenso de la concentración de tritio se produce de forma lenta. Al igual que sucede en el sondeo SC-2, es muy probable que las concentraciones de tritio del agua profunda se harían casi cero con un tiempo suficientemente largo. Aunque, como se desprende de los análisis efectuados, en seis meses ha bajado de 18,38 U.T. (contenido isotópico del agua de bombeo) a 2,71 U.T.

La proporción de tritio de la muestra extraída dentro de la unidad de halita denota que se mantiene, todavía, el agua de perforación. Este dato concuerda con la interpretación de los análisis químicos, en el sentido de reflejar la significativa estanqueidad de la unidad estratigráfica.

Finalmente, hay que resaltar que el contenido en tritio de las aguas del acuífero superior, emplazado en la unidad de yesos, es sensiblemente superior al del acuitardo profundo. Este dato indica que las aguas de recarga, procedentes de los niveles más altos del sustrato, requieren mucho tiempo para descargarse hasta los tramos inferiores. Es decir, una recarga rápida sólo puede estar asociada a un drenaje relacionado con taladros o excavaciones, que pongan en comunicación hidráulica las distintas capas freáticas.

8. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- El artículo describe los procedimientos empleados para acotar flujos subterráneos en un marco de gran complejidad hidrogeológica. La abundancia de sales solubles confiere alta trascendencia geotécnica a las aguas subterráneas, ya que parte del sustrato se manifiesta sensible a degradarse como consecuencia de drenajes indeseados eventualmente producidos por excavaciones.
- La zona de estudio está configurada por una secuencia estratigráfica miocena de génesis lacustre caracterizada por frecuentes cambios de facies. En su conjunto, el sustrato lo integra una unidad de yesos masivos superiores, yesos y glauberita con arcillas a niveles inferiores y tramos arcillosos y/o halita y glauberita a niveles más profundos. Estas últimas formaciones son muy evolutivas en presencia de agua.
- La investigación hidrológica se llevó básicamente a cabo mediante tres sondeos, que fueron sistemáticamente muestreados a diversas profundidades, realizándose tanto análisis químicos como isotópicos de las aguas (tritio, deuterio y oxígeno-18). Se efectuaron ensayos de bombeo, no descritos en este artículo. De manera principal para el objetivo de los trabajos, se efectuó un marcado de las columnas de agua para la identificación de flujos.

¹ En el caso de una mezcla de dos componentes conservativos a y b para formar un componente c, la fracción x con la cual contribuye el componente a se obtiene por medio de la expresión siguiente: $x C_a + (1-x) C_b = C_c$, siendo C la concentración.

- Los sondeos se perforaron hasta alcanzar formaciones litológicas profundas. En dos de ellos, se penetró en la unidad estratigráfica de halita. En estos sondeos, el nivel piezométrico resultó ser mucho más profundo que el que debería tener si estuviera asociado al nivel freático conformado por los yesos de la unidad estratigráfica superior. Esta circunstancia, por sí misma, implica la existencia de un tramo o tramos profundos, relativamente permeables, que determina que el nivel de agua no alcance la posición correspondiente al acuífero superior.
- En concreto, este abatimiento del nivel piezométrico se produce en los sondeos SC-2 y SC-3, que cortan la unidad de halita, mientras que en el SC-1, que no la corta, el nivel se encuentra en la posición asociada a los yesos superiores. De esta circunstancia se infiere que existe un tramo permeable en las proximidades del contacto entre la unidad de yesos y glauberita con la de halita. La presencia de un tramo permeable profundo se confirma por cuatro hechos convergentes en su existencia: posición del nivel piezométrico, pérdida total del agua de perforación (sondeo SC-3), evolución de los perfiles de dilución del trazador y secuencia de recuperación en los ensayos de bombeo.
- Las columnas de agua de los sondeos fueron marcadas con yodo-131, midiéndose la dispersión en el tiempo de la concentración de isótopo. A partir de estos datos pudieron acotarse las profundidades de las capas de agua, y, en algunos casos, su magnitud, así como los litotipos a que estaban asociadas.
- Los flujos subterráneos detectados confirman que el agua se mueve por fracturas o estrechos tramos fracturados, así como por contactos estratigráficos, que facilitan la circulación de agua. Esta última circunstancia se produce en el sondeo SC-3, donde se detectó un significativo flujo subterráneo en el contacto entre la unidad inferior de yesos y la de halita, a 42,4 m de profundidad. En el sondeo SC-2, el nivel permeable se localiza a 49,1 m, 2 metros por encima de la unidad de halita. Por su parte, en el sondeo SC-1 se identifica un tramo permeable a 27 m de profundidad, teóricamente dentro de la unidad de yesos.
- El hecho de que la permeabilidad esté asociada a fracturas por las que circula o ha circulado agua, y de que estas discontinuidades mecánicas puedan afectar a todo el tramo subterráneo investigado, implica que, en principio, no pueda descartarse la presencia de agua en cualquiera de las formaciones litológicas que contengan materiales solubles que no estén aisladas por materiales arcillosos. No obstante, la probabilidad de cortar vetas de agua aumenta hacia las formaciones yesíferas superiores, en las que, sin embargo (como sucede en el entorno del sondeo SC-1), pueden existir sectores sin agua.
- Los caudales máximos que pueden drenar las capas de agua, de acuerdo con los datos contrastados y asumiendo la heterogeneidad del marco hidrogeológico, se estiman del orden de algunas decenas de litros/hora.
- Aunque no se ha detectado, ni parece probable que exista, un flujo de agua cuantioso, en presencia de materiales solubles y degradables un drenaje no controlado eventualmente provocado por una excavación produciría, previsiblemente, una erosión del terreno por arrastre y socavación.
- Todas las unidades geológicas estudiadas estratigráficamente por encima de las formaciones arcillosas podrían tener tramos permeables, no habiéndose constatado su existencia en la unidad de halita. No obstante, la zona de transición entre esta unidad y la de yesos y glauberita su-
prayacente parece especialmente sensible a configurar un tramo de relevancia geotécnica, dadas su posible permeabilidad y la presencia de sales muy solubles.
- Los análisis químicos e isotópicos ayudan a deslindar la procedencia de las distintas aguas existentes en los sondeos. De acuerdo con los análisis de tritio, el agua recuperada en el bombeo del sondeo SC-1 incluía parte de agua de perforación, que sólo sería evacuada con posterioridad del entorno del taladro por el flujo subterráneo existente. Por el contrario, el agua muestreada en el sondeo SC-2 corresponde a agua subterránea profunda, con una aportación complementaria del acuífero superior. En este caso, el agua inyectada en el terreno durante la perforación se evacuó fuera del entorno del sondeo, previsiblemente porque se perdió a una cota superficial muy transmisiva.
- Los contenidos isotópicos de las primeras aguas muestreadas en el sondeo SC-3 presentan interrogantes en su interpretación. En concreto, los contenidos en isótopos estables apuntan a que estas aguas son diferentes al resto de las tomadas en los otros sondeos y a las aguas de perforación. Sin embargo, los contenidos en tritio indican que las aguas de bombeo están contaminadas por las de perforación. Una analítica posterior al bombeo refleja que, con gran lentitud, las aguas de perforación estaban siendo desplazadas por las del acuífero profundo.
- Las conclusiones alcanzadas confirman la práctica impermeabilidad de la unidad de halita en las zonas de ensayo, dado que los contenidos químicos y/o isotópicos no varían en el tiempo, mostrando que se trata de aguas que no se renuevan dentro de los taladros.
- Por el contrario, lavadas ya de las aguas de perforación, las muestras extraídas a las profundidades en que se emplazan los acuitardos profundos presentan unos contenidos en tritio muy bajos, propios de aguas infiltradas con anterioridad a 1953. También serían significativamente inferiores a los correspondientes a los de las capas freáticas superiores, que contienen aguas infiltradas más recientemente. A efectos prácticos, esta antigüedad refleja la imposibilidad de una recarga natural si eventualmente se drenaran capas permeables profundas, una vez agotadas.
- En el sondeo SC-3, en el que las primeras pruebas mostraron una apreciable circulación de agua en el contacto entre las unidades de glauberita y de halita, el seguimiento de la evolución del contenido de tritio de esta capa acuífera confirma la escasa cuantía de los caudales que se podrían drenar en el caso de ser cortada por una excavación. Sin embargo, la alta solubilidad y degradabilidad de los materiales hace que la presencia de este acuitardo haya de ser tomada en consideración.
- La composición química de las aguas profundas emplazadas a muro de la unidad de yesos y glauberita es diferente en los sondeos SC-2 y SC-3. Probablemente se trata de aguas antiguas que siguen caminos diferentes, asociados al régimen de fracturación del terreno, delimitando un marco hidráulicamente discontinuo. Este hecho confirmaría que, al igual que se ha constatado para las aguas que se mueven por la unidad superior de yesos, deben existir tramos sin vetas de agua.
- Tanto la metodología como las técnicas de trabajo utilizadas se revelan adecuadas para dilucidar la problemática geotécnica planteada, a efectos de acotar la geometría y cinemática de las aguas subterráneas, en un marco hidrogeológico complejo, para a evitar o hacer frente a eventuales drenajes de capas salinas.