

EL ACUÍFERO TERCIARIO DETRÍTICO DE MADRID: PASADO, POSIBILIDADES ACTUALES Y RETOS PENDIENTES

The Tertiary Detrital Aquifer of Madrid: past times, present possibilities and pending challenges

Javier G. Yélamos (*) y Fermín Villarroya Gil (**)

RESUMEN

El área metropolitana de Madrid se asienta sobre una cuenca sedimentaria, parte de la cual da lugar al denominado Acuífero Terciario Detrítico de Madrid (ATDM). Se trata de un acuífero único, muy heterogéneo y anisótropo de gran extensión y espesor, pero de discretos caudales en sus pozos. El modelo conceptual de flujo más admitido sigue las ideas de Hubbert (1940) y Toth (1962) de forma que se explica la presencia de sondeos surgentes sin capas confinantes. Las aguas del ATDM son de calidad aceptable para la mayoría de los usos y su composición química apoya el modelo conceptual de flujo. Actualmente, el ATDM juega un papel importante en el abastecimiento a Madrid; en breve, el Canal de Isabel II dispondrá de casi un centenar de pozos perforados profundos (hasta 800 m de profundidad) que serán capaces de extraer hasta 100-120 Mm³/año en periodos de sequía.

ABSTRACT

The Metropolitan Area of Madrid is on a sedimentary basin, partly forming the Tertiary Detrital Aquifer of Madrid (ATDM). It is a single aquifer, very heterogeneous and anisotropic, and large; nevertheless, the yield of wells is poor. The most admitted conceptual flow model is according the thesis of Hubbert (1940) and Toth (1962); so it is possible to explain the existence of flowing wells without confining levels. The water quality of ATDM is good for most uses and his chemical composition reflect the conceptual model of flow. Nowadays, ATDM has an important contribution to water supply of Madrid; in short, the Canal de Isabel II will have almost one hundred deep drilled wells (up to 800 m depth), which will can pump up to 100-120 Mm³/year during dry periods.

Palabras clave: abastecimiento, Madrid, acuífero Terciario Detrítico.

Keywords: water supply, Madrid, Tertiary detrital aquifer.

INTRODUCCIÓN

Al igual que la mayoría de las grandes capitales europeas, la ciudad de Madrid se ubica sobre una cuenca sedimentaria; para el caso de la urbe hispana se trata de la denominada Cuenca de Madrid, la más extensa de las dos subcuencas en que normalmente se divide la depresión recorrida por el río Tajo: cuenca de Madrid y cuenca de Loranca.

La cuenca de Madrid tiene una forma triangular con los siguientes límites montañosos (Fig. 1): a) un par de cordilleras dentro del Sistema Central (Sierras de Gredos y Guadarrama) por el noroeste, b) el Sistema Ibérico por el noreste, c) la somera Sierra de Altomira marca el borde oriental, d) el cierre sur viene marcado por las discretas elevaciones de los Montes de Toledo.

El principal relleno de la Cuenca de Madrid corresponde a sedimentos de edad terciaria, si bien en su base aparece un conjunto de materiales de edad Cretácico Superior, formado por arenas y calizas. La cuenca presenta un espesor medio del orden de

un kilómetro, si bien en algunas zonas éste puede superar los 3.000 m.



Fig. 1. Situación del acuífero Terciario detrítico de Madrid dentro de la cuenca sedimentaria del mismo nombre.

(*) Departamento de Geología y Geoquímica. C-VI-406. Campus de Cantoblanco s/n. Universidad Autónoma de Madrid. 28049-Madrid. javier.yelamos@uam.es

(**) Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040-Madrid. ferminv@geo.ucm.es

Desde una perspectiva muy simplista, en la cuenca de Madrid aparecen dos grandes conjuntos litológicos: uno de naturaleza lacustre, formado por sedimentos de grano fino y rocas sedimentarias químicas, que ocupa la zona más central de la cuenca; y un segundo de naturaleza detrítica, originado a partir de abanicos aluviales que arrastraban los sedimentos desde los bordes montañosos. Este segundo conjunto tiene su máximo desarrollo en el sector que mira al Sistema Central, coincidiendo con el borde de cuenca de mayor elevación tanto actual como en el pasado, y son los materiales que constituyen, *grosso modo*, el denominado acuífero del Terciario detrítico de Madrid (Fig. 1) y cuya definición, también simplista sería: un conjunto de lenticiones de arenas más o menos arcillosas, inmersas en otro conjunto de arcillas más o menos arenosas.

Hasta la llegada del Canal de Isabel II (en adelante CYII) en 1858, el abastecimiento tradicional a la Villa y Corte se realizó mediante dos tipos de captaciones someras en los materiales del Terciario detrítico. Unos eran los clásicos pozos excavados a pico y pala, de al menos 1 m de diámetro y unas pocas decenas de metros de profundidad. Prueba de ello es que al patrón de Madrid, San Isidro, se le relaciona con un milagro asociado a la subida del nivel de agua en un pozo para rescatar a un niño que accidentalmente se había caído en su interior.

El segundo sistema de captación se basaba en los denominados viajes de aguas, consistentes en una compleja red de galerías subterráneas poco profundas (en general de menos de 40 m) situadas al norte de la Capital; éstas recogían las aguas infiltradas a partir de la lluvia (galerías de captación) conduciéndolas hasta las puertas de la ciudad, donde se iniciaban unas galerías de conducción que finalizaban en la fuentes distribuidas por todo el casco urbano (López Camacho *et al.*, 1986).

Aparte de estos dos tradicionales sistemas de abastecimiento, a partir de la década de los sesenta del pasado siglo empiezan a proliferar en Madrid las captaciones de aguas subterráneas mediante pozos perforados de uno o varios cientos de metros de profundidad, principalmente realizados por particulares, en una región que estaba teniendo un importante crecimiento demográfico y, por ende, la necesidad de cubrir nuevas demandas de agua.

TOPÓNIMOS Y DEFINICIÓN DEL ACUÍFERO

En numerosos trabajos científicos realizados desde las universidades madrileñas, durante las décadas de los setenta y ochenta del pasado siglo, se utiliza la denominación *Acuífero Terciario Detrítico de Madrid* (en adelante ATDM) para referirse a estos materiales detríticos que se extienden sobre más de 7.000 km² de la cuenca de Madrid siguiendo el contacto con el complejo ígneo-metamórfico del Sistema Central, tanto en el sector central de la provincia del mismo nombre (donde ocupan unos 2.600 km²) como en las vecinas de Guadalajara y Toledo (Fig. 1). También se le hacía referencia como el *Acuífero Detrítico del Tajo*. En este contexto,

el acuífero comprende las subcuencas de los cinco grandes afluentes del Tajo por su margen derecha, que de oriente a occidente son: Henares (en realidad subsidiario del siguiente), Jarama, Manzanares (subsidiario del anterior), Guadarrama y Alberche. El estudio de la hidrogeología de cada una de estas cuencas fue el objeto específico de cinco tesis doctorales dirigidas por el Profesor Ramón Llamas desde la Facultad de Ciencias Geológicas de Madrid, que siguiendo el orden citado son: Villarroya (1977), López Vera (1975), Martínez Alfaro (1977), Rebollo (1977) y Sastre (1978).

Queda fuera de este esquema la depresión Terciaria de Campo Arañuelo, cruzada por el río Tiétar, y relativamente independiente de las cuencas anteriores; de hecho no se la suele considerar como parte de la Cuenca sedimentaria de Madrid. No obstante, su hidrogeología también fue objeto específico de otra tesis doctoral madrileña, en concreto la de Vicente (1985).

Con menor frecuencia, al ATDM también se le puede encontrar bajo el topónimo de acuífero Mioceno de Madrid denominación más preferida por el personal del extinto Servicio Geológico de Obras Públicas (p. e. Sánchez y Varela, 1989).

En los trabajos iniciales del Programa de Investigación de Aguas Subterráneas del Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME), allá en los comienzos de los setenta, se definió el topónimo de Sistema Acuífero nº 14 Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres. Recogiendo literalmente el texto de uno de los responsables del programa (San José, 1971), el sistema quedaba definido así: “con forma de triángulo rectángulo, está limitado al NW por el cauce del Tiétar hasta su confluencia con el Tajo y por el borde de los granitos y paleozoicos del Guadarrama hasta Torrelaguna. Desde allí el límite está en las facies de yesos terciarios que, por Alcalá de Henares, desciende hasta Esquivias, introduciéndose en el sistema 20 (la mesa de Ocaña)”.

Dos claras diferencias entre las definiciones del ATDM y el Sistema nº 14 son, por un lado, que este segundo incluye de forma explícita a los sedimentos de la depresión de Campo Arañuelo; en cambio, en esta definición inicial se dejaban fuera a los materiales detríticos de la cuenca del río Henares y una buena parte de los del Jarama, que se clasificaban como zonas con acuíferos aislados o prácticamente sin acuíferos, excepto aluviales.

En trabajos posteriores del IGME se amplía la superficie del Sistema Acuífero nº 14. Manteniendo los límites citados anteriormente, su borde oriental se desplaza hasta llegar a las estribaciones de la Caliza del Páramo, de manera que ahora sí que incluye las cuencas hidrográficas del Jarama y Henares. Además, el sistema acuífero nº 14 (Terciario Detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres) se desglosa en dos subunidades (López-Vílchez y Ruiz Celáa, 1983): a Subunidad Madrid-Toledo, de unos 8.100 km² de extensión, que se corresponde con las cinco cuencas citadas, esto es el área

habitual del ATDM, y b) Subunidad Cáceres, de tan sólo 1.600 km², que abarca la depresión de Campo Arañuelo.

Posteriormente, dentro del Catálogo de Unidades Hidrogeológicas de la España Peninsular y Baleares (SGOP-ITGE, 1990), la Subunidad Madrid-Toledo del sistema acuífero nº 14 fue dividida en dos: 1) Unidad 03.04 Guadalajara, para el sector oriental, y 2) Unidad 03.05 Madrid-Talavera, para el sector occidental. El límite entre ambas venía definido por un meridiano más o menos coincidente con el cauce del río Jarama. La depresión del Campo Arañuelo, o Subunidad Cáceres, pasó a ser denominada como Unidad hidrogeológica 03.09 Tiétar.

Actualmente, el acuífero Terciario detrítico está dividido en masas de aguas subterráneas tal como demanda la Directiva Marco del Agua. El principal cambio específico en comparación con las unidades anteriores consiste en la individualización como masas de agua de los aluviales cuaternarios suprayacentes sobre los detríticos Terciarios. La unidad 03.05 Madrid-Talavera se compone de las siguientes masas de agua (CHT, 2007): 30629 (03.05a) Talavera, 30631 (03.05b), Madrid: Aldea del Fresno-Guadarrama (o Madrid: Alberche-Guadarrama), 30630 (03.05c) Madrid: Guadarrama-Manzanares, 30627 (03.05d) Madrid: Manzanares-Jarama y 30628 Aluvial del Tajo: Toledo Montearagón. Las terrazas del Jarama en el límite entre las dos anteriores unidades hidrogeológicas pasan a formar la masa de agua 30638 Aluvial del Jarama: Madrid-Guadalajara, mientras que la unidad Guadalajara (03.04) queda como una sola masa de agua numerada 30637 (ó 03.04) y manteniendo el topónimo Guadalajara.

PASADO

Evolución de las ideas sobre las aguas subterráneas en la cuenca de Madrid

A mediados del siglo XIX se perforan en la cuenca de París los célebres sondeos surgentes de Grenelle y Passy, con profundidades de cientos de metros y caudales iniciales de 160 y 700 m³/hora. Estos sondeos captaban las aguas de las arenas albienses en la cuenca parisina. Muy posiblemente, el éxito de estas captaciones llevó a pensar que en la cuenca sedimentaria de Madrid se podía aplicar el mismo modelo y que el principal acuífero lo formaban los sedimentos cretácicos en contacto con el basamento.

A este esquema de Cuenca Artesiana de Madrid obedece el pozo de 1.001 m efectuado en las proximidades de la vieja estación de ferrocarril de Alcalá de Henares durante el bienio 1927-28. El sondeo no llegó a atravesar los materiales cretácicos, si bien alumbró aguas surgentes de baja calidad química. Sin embargo, con anterioridad ya existían datos que sugerían la idea de que el principal acuífero de Madrid se encontraba en los sedimentos detríticos terciarios en vez de los materiales cretácicos. En 1911, el ingeniero Janini dirigió la ejecución de diez sondeos en las proximidades del cauce del Manzanares,

con destino al riego de los jardines del Real Patrimonio. Varios de estos sondeos obtuvieron aguas surgentes (Janini, 1913). Para explicar el artesianismo de los pozos de Janini, que tan sólo cortaban sedimentos terciarios, se podría recurrir a la idea de los tubos o canales de arena: la existencia de lentejones de arena interconectados, confinados por niveles formados por lentejones de materiales arcillosos que también generaban niveles continuos (López Camacho, 1977).

A finales de los sesenta e inicios de los setenta del pasado siglo comienza una activa perforación de pozos a percusión, posteriormente a rotación directa, y finalmente a rotación inversa (López Vera y Llamas, 1976). Se trataba de satisfacer la creciente demanda de agua urbana e industrial en Madrid y su alfoz. La explotación de los pozos se potenciaba con las bombas eléctricas sumergibles, de forma que ya no era necesario el encontrar aguas artesianas surgentes para que un sondeo fuera positivo (Sastre, 1983). Todo ello facultó la posibilidad de estudiar con mayor detalle el ATDM y llegar a presentar los conceptos modernos sobre el funcionamiento del acuífero. Salvo error por nuestra parte, la primera vez que se hace referencia escrita a que el ATDM era la principal fuente de aguas subterráneas en Madrid es en el informe SGOP-CAT (1973), mientras que la aplicación de las ideas de Hubbert (1940) al comportamiento del acuífero tiene su primera aparición en el trabajo de Llamas y López Vera (1975).

Modelo conceptual vigente

El ATDM es considerado como un único conjunto acuífero de carácter libre, fuertemente heterogéneo y anisótropo, y de gran espesor, constituido por lentejones arenosos inmersos en una matriz arcillosa o arenoso-arcillosa que actúa como semipermeable. Como modelo conceptual de flujo se admiten las tesis de Hubbert (1940), de manera que en las zonas de interfluvio las equipotenciales disminuyen de valor al aumentar la profundidad, mientras que en las proximidades a los cauces de los ríos es al contrario; de esta forma pueden existir sondeos surgentes sin necesidad de recurrir a capas impermeables confinantes (Fig. 2). También se admite el esquema de Toth (1962) que supone la existencia de flujos locales intracuenca, intermedios entre cuencas vecinas, y regionales de mayor envergadura (Fig. 3). Se considera que la recarga es a partir de la infiltración eficaz de la lluvia sobre toda la superficie de afloramiento de los sedimentos terciarios, preferentemente en las zonas de divisoria de cuencas o interfluvios; a partir de estas áreas se establece un flujo hacia los fondos de valle hasta descargar en los principales ríos: el quinteto citado en el apartado 2 más el propio río Tajo. La descarga suele tener lugar, a través de los aluviales cuaternarios que hacen un simple papel de *by-pass*. La recarga lateral por los límites impermeables del acuífero (complejo ígneo-metamórfico de la Sierra de Guadarrama y materiales evaporíticos) se supone despreciable,

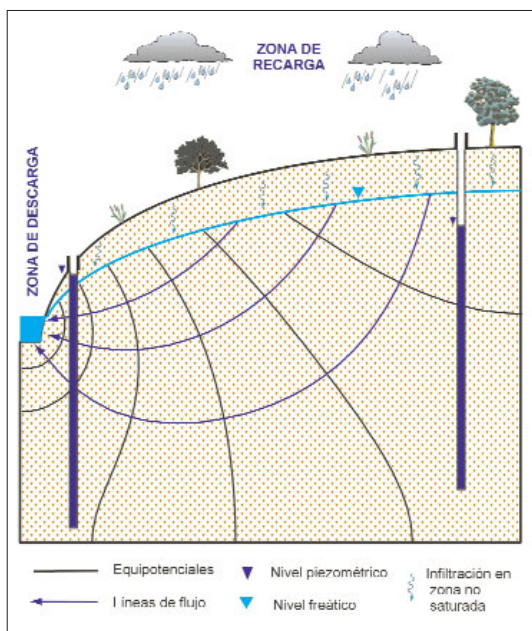


Fig. 2. Aplicación del modelo de Hubbert (1940) a un acuífero de gran espesor como el Terciario detrítico de Madrid. Nótese como en las zonas de recarga los pozos cortan equipotenciales de menor valor cuanto más profundas, mientras que en las zonas de descarga es al contrario, explicando la presencia de sondeos surgentes sin necesidad de capas impermeables confinantes.

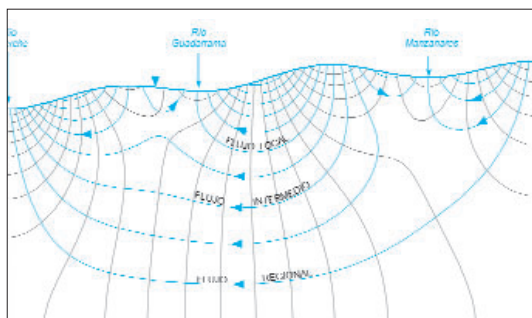


Fig. 3. Aplicación del modelo de Toth (1962) a un sector del acuífero Terciario detrítico de Madrid. El modelo supone la existencia de flujos locales intracuenca, intermedios entre dos cuencas vecinas y regionales entre cuencas alejadas.

aunque se admite que la parte más superficial de los materiales evaporíticos puede presentar una permeabilidad por karstificación. Las descargas por evapotranspiración, arroyos efímeros y manantiales también se consideran de escasa importancia cuantitativa.

Un reciente informe de la Comunidad de Madrid (en adelante CM) estima la recarga del acuífero en unos 200 Mm³/año (CM, 2004) dentro del territorio de la CM, mientras que el Plan Hidrológico de la Cuenca del Tajo (en adelante PCHT) aporta la cifra de 400 Mm³ (BOE, 1999) para la totalidad de la UH Madrid-Talavera (unos 6.000 km²).

Tanto la permeabilidad como la transmisividad del acuífero son más bien bajas. La permeabilidad horizontal oscila entre 0,1 y 0,3 m/día y la transmisividad es variable según las zonas, comprendida entre unas pocas unidades y unas pocas decenas, normalmente inferior a 50 m²/día, para los 200 primeros metros de zona saturada (Llamas, 1987).

Igualmente son bajos los valores de difusividad hidráulica, lo que da lugar a conos de depresión con forma de embudos muy profundos y de relativamente poca base.

Calidad de las aguas

Un primer estudio realizado por IGME (1984) ya indica que se trata de aguas de facies bicarbonatada cálcica y salinidad inferior a 500 mg/l, que hacia el sur de la cuenca, al entrar en contacto con los materiales evaporíticos, aumentan su salinidad pasando a facies sulfatada cálcica.

Para pozos perforados con profundidades entre 100 y unos 400 m, además de por la litología, la composición química del agua sufre modificaciones con el sentido del flujo, de manera que en las divisorias hidrográficas (o áreas de recarga) la facies hidroquímica es bicarbonatada cálcica, que pasa a ser bicarbonatada sódica en las zonas de descarga (cerca de los cauces superficiales principales). Otras modificaciones que se aprecian en el sentido del flujo son un aumento del pH, disminución del contenido en sílice, así como un valor de delta ¹⁸O más negativo, que puede ser indicativo de aguas recargadas en unas condiciones climáticas diferentes a las actuales (Herráez *et al.*, 1983 y 1987; Fernández Uría *et al.*, 1984).

La hidrogeoquímica de las captaciones someras (generalmente manantiales) fue analizada por Toves y Llamas (1983) llegando a la conclusión de que la composición química de estas captaciones someras está controlada principalmente por la litología sobre la que se ubican, coherentemente con la hipótesis de que estos puntos de agua drenan cursos de agua de carácter local o microlocal, de corto tiempo de residencia, y, por tanto, con una menor influencia del flujo en la composición química de estas aguas.

Sobre la hidrogeoquímica de las aguas más profundas el conocimiento es aún escaso. Los análisis químicos obtenidos en los pocos sondeos que sobrepasan los 1.000 m de profundidad revelan un alto contenido en sales disueltas (conductividades entre 70.000 y 200.000 μS/cm), aumentando con la profundidad (López Vera y Gómez Artola, 1984).

PRESENTE

Papel actual del ATDM en el abastecimiento a Madrid y su alfoz

En la actualidad el ATDM tiene un papel estratégico notable, al ser la principal reserva de agua dulce con que cuenta la CM. Se ha pasado de una época pretérita en donde primaba el abastecimiento

de núcleos ubicados fuera de la red del CYII mediante aguas procedentes del ATDM, al presente en que la mayor parte del agua procede de los embalses del CYII y donde adquiere mucho énfasis la calidad de las aguas. El PHCT establece una reserva de agua subterránea para el abastecimiento de la CM; para ello ha fijado un extenso perímetro de protección sobre el ATDM en el que las futuras captaciones profundas tan sólo serán destinadas a cubrir las demandas de abastecimiento urbano (BOE, 1999).

La Confederación Hidrográfica del Tajo estima que en la actualidad se están extrayendo unos 100 Mm³/año en el sector madrileño del ATDM (Casado, 2007). De esta cifra, entre 40 y 50 Mm³/año corresponden al CYII, que tan sólo pone en servicio sus captaciones en los periodos de sequía, mientras que en los años húmedos el abastecimiento a la CM se cubre con la red de 18 embalses y presas de derivación.

En total, el CYII dispone de 81 pozos de captación de aguas subterráneas, algunos de más de 700 m de profundidad, capaces de aportar en años secos unos 80 Mm³. Con objeto de incrementar su producción en 30 Mm³/año, y así llegar a los 100-120 Mm³, actualmente está perforando 26 sondeos a lo largo de la margen derecha del río Guadarrama (López-Camacho e Iglesias, 2007). La serie histórica de los bombeos del CYII puede verse en la figura 4; obsérvese como rara vez el Canal ha extraído más de 50 Mm³/año y como los bombeos tienen lugar cuando el volumen almacenado en los embalses está en valores bajos. En los momentos de sequía, el CYII también obtiene aguas del río Alberche, pero se hace precisa una costosa elevación por bombeo de las aguas desde el embalse de Picadas.

El inventario de captaciones de la CHT alcanza la cifra de 29.039 puntos de agua en la CM; de ellos

unos 1.200 son sondeos, de los cuales sólo 910 tienen más de 100 m de profundidad. Se estima que el abastecimiento a urbanizaciones supone un bombeo de unos 20 Mm³/año, y la misma cifra se asigna a extracciones de particulares, regadío y usos industriales (Casado, 2007).

A partir del número de campos de golf situados sobre el ATDM, sabiendo que se abastecen principalmente del propio acuífero, midiendo su superficie por fotos aéreas a escala 1:10.000 y con una dotación media de 8.000 m³/ha y año, se calcula que tales campos extraen del acuífero unos 12 Mm³/año.

Cambios en el sistema de flujo

Como es lógico esperar, la explotación del ATDM puede dar lugar a cambios en el movimiento natural del agua, modificando el esquema general que supone líneas de flujo desde las divisorias de aguas perpendicularmente hacia los cauces de ríos ganadores. Como botón de muestra, los pozos surgentes en el ATDM son escasos hoy en día.

Yélamos (1986) señala que, en el tramo del río Manzanares que recorre la ciudad de Madrid, en todas las medidas de nivel estático en pozos perforados situados a menos de 1 km del cauce del río estaban por debajo de la cota de su cauce (y, sin embargo, la mayoría habían sido surgentes en origen), lo que lleva a suponer que, al menos en este sector, el río Manzanares ya había pasado entonces a ser perdedor.

Aunque la baja difusividad del ATDM hace esperar conos de bombeo estrechos, la experiencia de la explotación matiza este supuesto. Yélamos y Villarroja (1991) muestran, a partir de los datos de la hasta

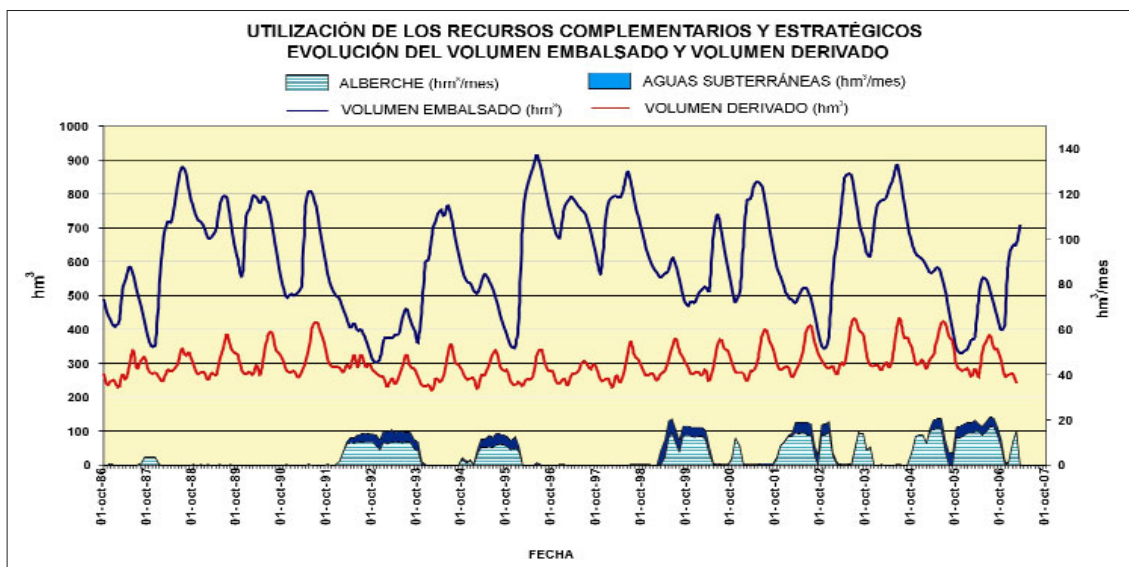


Fig. 4. Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas por parte del Canal de Isabel II en el periodo 1986-2007. El eje de ordenadas de la izquierda expresa el volumen de agua embalsado, cuya evolución refleja la gráfica superior. La gráfica del medio indica los volúmenes derivados de los embalses, cuyos valores se expresan en el eje de ordenadas de la derecha. La gráfica inferior indica las épocas en que se bombea agua de los campos de pozos y/o se bombea agua desde el río Alberche. Los valores respectivos se obtienen igualmente en el eje de ordenadas de la derecha. Tomado de López Camacho e Iglesias (2007).

entonces principal explotación de aguas subterráneas (los pozos de Fuencarral, 9 captaciones de unos 500 m de profundidad), como el efecto de este campo de pozos se hacía sentir en un radio de por lo menos 5 km.

En los datos recogidos por la nueva red oficial de piezometría de la CHT se observa que la situación de los niveles en el acuífero de Madrid es variopinta: mientras que unos se mantienen estables o incluso se observan ascensos, se aprecian en otros fuertes descensos, estando los focos de bombeo localizados en las proximidades de los grandes campos de pozos del CYII (Casado, 2007).

La figura 5 presenta las isopiezas en las cuencas de mayor explotación del ATDM para el año 2006 a partir de piezómetros de unos 100 m de profundidad. Se observa que existen tres grandes focos de bombeo en el Embalse de El Pardo, Boadilla del Monte y Moraleja de Enmedio. El tradicional esquema de flujo en el que los ríos son ganadores parece no funcionar ya, al menos en parte de los cauces de los ríos Guadarrama y Manzanares.

FUTURO

Desde hace muchos años se viene llamando la atención sobre la importancia del gran acuífero ATDM y la necesidad de estudiarlo más y mejor

(Llamas, 1986). Quedan muchos retos para mejorar el conocimiento del funcionamiento del acuífero, con vistas a una gestión óptima. Sin querer ser exhaustivos, consideramos que entre los futuros trabajos caben los que se indican en los siguientes párrafos.

1) Una actualización e integración de la geología del ATDM en los estudios hidrogeológicos. Todavía al hablar del ATDM se sigue partiendo de la distinción en facies que presentaron las cinco tesis citadas en el apartado 2; éstas “bebieron” de unos conocimientos geológicos de la Cuenca de hace ya 40 años. Como su propio nombre indica, la hidrogeología parte de una geología y en la medida en que se avanza en el conocimiento geológico es como se puede mejorar el conocimiento de un acuífero. Por tanto, sería prioritario actualizar los avances geológicos sobre la cuenca sedimentaria de Madrid de las cuatro últimas décadas, en los estudios sobre el ATDM.

2) Evaluación de la recarga del ATDM con la mayor precisión posible, dada la gran influencia que supone esta cifra a la hora de gestionar los recursos del acuífero. Somos conscientes de que esta tarea es de las más complejas en hidrogeología, dado su alto grado de incertidumbre independientemente del método que se use; sin embargo, parece muy limitado el asignar una recarga homogénea y por igual, tal como la establece el PHCT (BOE, 1999), para todo el acuífero, estimada en 33

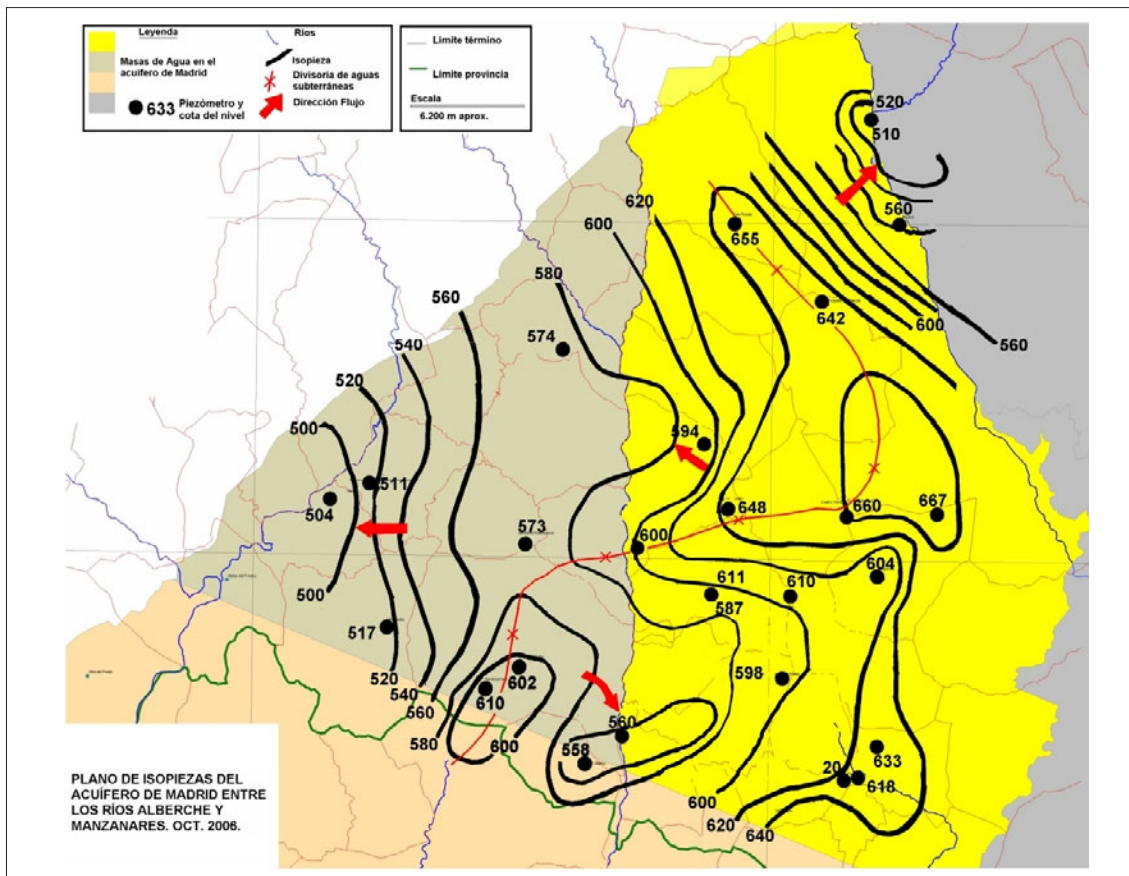


Fig. 5. Mapa de isopiezas reciente para la cuenca media del Guadarrama dentro del acuífero Terciario detrítico de Madrid. La explotación existente modifica notablemente la morfología de las isopiezas en régimen natural. Tomado de Casado (2007).

mm/año. Sería conveniente valorar la recarga lateral desde el borde sur formado por arcillas y yesos, pero que pueden estar karstificados (cuevas de Pedro Fernández en Estremera, de 8 km de longitud). Se debería estudiar lo que pueden aportar los cauces perdedores que bajan desde las montañas del Sistema Central, tal como ya señaló López Vera (1985). En una región tan antropizada como el área Metropolitana de Madrid, analizar cómo influyen en la recarga las zonas urbanas, ya sea con un efecto de impermeabilización del subsuelo, ya sea en la visión contraria, como fuente antrópica de recarga a partir de los miles de kilómetros de redes enterradas de aducción y alcantarillado.

3) Un estudio detallado del papel hidrogeológico de los acuíferos aluviales cuaternarios sobre el ATDM, desde dos vertientes: a) como recursos marginales de agua, pero que cada día tendrán un mayor interés por el imparable crecimiento de la demanda, y b) las relaciones entre cauces fluviales y estos acuíferos. Generalmente, estos acuíferos aluviales han sido dejados en un segundo plano ante la mayor entidad del ATDM, al ser considerados como el simple *by-pass* de su descarga. Quizás en este olvido influyeron los resultados, más bien poco positivos, de los pozos radiales instalados en el aluvial del Guadarrama (captación de la extinta Fundación Sur) y los de emergencia situados en la confluencia de los ríos Jarama-Lozoya para aliviar la crisis de abastecimiento que padeció Madrid en 1968 (García Agustín, 1974).

4) Plantear nuevas ideas sobre el acuífero que se ajusten mejor a la ingente masa de nuevos datos obtenidos en las últimas décadas, especialmente desde que el CYII empezó la explotación del ATDM y la CHT ha instalado sus redes oficiales de control. El viejo modelo de “acuífero único, heterogéneo y anisótropo” tiene un cierto halo de caducidad. Al menos, los resultados de las redes de control del CYII indican que sus sondeos profundos no parecen afectar a los piezómetros más someros, lo que aporta un punto de interrogación sobre si realmente es un único acuífero o quizás sea preferible plantear un modelo multicapa, al que de modo conceptual ya se hacía referencia en la década los setenta (Llamas y Cruces de Abia, 1976).

Sería muy deseable que para la realización de los mencionados estudios se generase un marco de colaboración entre los distintos organismos interesados en la gestión del acuífero (CHT, CYII, CM y Universidades Madrileñas), de manera que integrasen toda la información de que disponen individualmente.

5) La calidad de las aguas del ATDM debe ser muy tenida en cuenta, tal como preconiza la Directiva Marco del Agua. Aunque la baja permeabilidad del acuífero permite una cierta protección frente a las numerosas actividades potencialmente contaminantes en superficie, los sondeos abandonados se pueden convertir en vías preferentes de contaminación (Hernández *et al.*, 1998). Aquí existe un vacío legal, pues se carece de una normativa que gestione el abandono y sellado de las captaciones.

6) El método constructivo de captaciones profundas más extendido es el de rotación con circulación inversa de agua y/o lodos. El costo de un pozo completo (revestido, pero sin equipar con bomba) realizado por este método que lleva aparejado un diseño, calidad y seguimiento de la obra, no suele ser menos de 250 €/m lineal de pozo. Sería bueno que se aprueben unos manuales de buenas prácticas constructivas de pozos a aplicar por todas las empresas del mercado.

7) Si bien no es obligatorio por Ley, sería muy deseable que se constituyera la Comunidad de Usuarios del ATDM para mejorar la gestión del mismo. Ahora bien, a la vista de la experiencia de lo ocurrido en otras cuencas, no parece que esto pueda llevarse a la práctica sin contar con la decidida cooperación de los usuarios y de la Confederación Hidrográfica. Esto requiere notables dosis de formación, información y transparencia con una diáfana accesibilidad a la base de datos a través de los portales de Internet.

En síntesis, el ATDM es uno de los acuíferos más estudiados de la Península Ibérica. Su gran extensión, el gran volumen de agua que almacena y su localización (la parte septentrional de la ciudad de Madrid está emplazada en el acuífero) lo dotan de una extraordinaria importancia tanto por el hecho de servir como complemento al abastecimiento de Madrid, como por el carácter de referencia que para el resto de los abastecimientos españoles ha podido tener, tanto en el presente como (sobre todo) en el pasado.

BIBLIOGRAFÍA

Boletín Oficial del Estado (1999). Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de cuenca del Tajo, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio. *BOE* 207, 31958-31994.

Casado, M. (2007). *El papel de la Confederación Hidrográfica del Tajo en la gestión de las aguas subterráneas de la Comunidad Autónoma de Madrid. La importancia del acuífero de Madrid*. Ciclos Complutense de Ciencia y Tecnología, UCM. 23 pp.

Comunidad de Madrid (2004) *Control y seguimiento ambiental del acuífero del terciario detrítico de la Comunidad de Madrid*. Informe de divulgación del Estudio. Consultor IDRENA. Consejería de Medio Ambiente.

Confederación Hidrográfica del Tajo (2007). *Parte Española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica*. 94 pp. Disponible en <http://nuevoplan.chtajo.es:6000/CHTAJO/publica.htm>

Fernández Uría, A.; Herráez, I.; Llamas, M. R. y Rubio, P. (1984). Sistema de flujo y características químicas e isotópicas en el acuífero terciario detrítico de Madrid. *Memorias del I Congreso Español de Geología IV*, 123-138.

García Agustín, J. (1974). Las Aguas subterráneas en el suministro del Área Metropolitana de Madrid. *Agua*, 83, 17-34.

Hernández, M. E., Llamas, M. R. y Cruces, J. (1998) El impacto de los pozos abandonados sobre el acuífero detrítico del Terciario de Madrid. *Bol. Geol. Min.*, 109, 4, 395-402.

- Herráez, I., Fontes, Ch. y Llamas, M. R. (1983). Las variaciones isotópicas del acuífero de Madrid y su relación con el sistema de flujo y con las condiciones ambientales de infiltración.. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, 193-204.
- Herráez, I.; Rubio, P. L. y Fernández Uría, A. (1987). Relaciones entre las características químicas e isotópicas en el sistema de flujo del acuífero detrítico de Madrid. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XI, 51-64.
- Hubert, M.K. (1940) The theory of groundwater motion. *Journal of Geology*, XLVIII, 8, 785-944.
- Instituto Geológico y Minero de España (1984). *Calidad química de las aguas subterráneas de la cuenca del Tajo*. Primer informe. Colección Informe, 48 pp.
- Janini, R. (1913). *Noticias generales respecto a los pozos artesianos y a los arrendamientos de terrenos para huertas en el Real Patrimonio de El Pardo*. Intendencia General de la Casa Real y Patrimonio, 38 pp. Valencia.
- López Camacho, B. (1977). *Estudio del agua subterránea en medios heterogéneos y anisótropos mediante un modelo digital bidimensional: aplicación a la región de Madrid*. Memoria de la beca concedida por el colegio de I.C.C.P. 106 pp. Madrid.
- López-Camacho, B., Bascones, M. y De Bustamante, I. (1986). El agua subterránea de Madrid. *Bol. Inf. y Est. del SGOP*, 46, 1-128.
- López Camacho, B. y Iglesias, J. A. (2007). *Explotación de los recursos hídricos y abastecimiento de agua a la Comunidad de Madrid*. Preprint 14 pp. Ciclos Complutense de Ciencia y Tecnología, UCM.
- López Vera, F. (1975). *Hidrogeología de la cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid*. Tesis Doctoral. 3 Tomos. Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- López Vera, F. (1985). Las Aguas Subterráneas en la Comunidad de Madrid. *PIAM*, 7.
- López Vera, F. y Llamas, M. R. (1976). Tecnología de construcción de pozos de agua en el Terciario detrítico de Madrid. *Memorias del Simposio Nacional de Rocas Blandas*, 215-217. Madrid.
- López Vera, F. y Gómez Artola, C. (1984). Geoquímica de las aguas profundas del acuífero de Madrid. *I Congreso Español de Geología*, Tomo IV, 189-201. Segovia.
- López Vilchez, L. y Ruiz Celáa, C. (1983). Síntesis hidrogeológica de la cuenca del Tajo. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VII, 637-648.
- Llamas, M. R. y López Vera, F. (1975). Estudio sobre los recursos hidráulicos subterráneos del Área Metropolitana de Madrid y su zona de influencia: avance de las características hidrogeológicas del Terciario detrítico de la Cuenca del Jarama. *Agua*, 88, 36-55.
- Llamas, M. R. y Cruces de Abia, J. (1976). Conceptual and digital models of the ground water flow in the Tertiary Basin of Tagus river (Spain). *Memorias de la IAH*, 11, 186-202.
- Llamas, M. R. (1986). Las aguas subterráneas de Madrid: Esperanzas y preocupaciones, datos e incertidumbres, posibles líneas de acción. Jornadas sobre la Explotación de las Aguas subterráneas de Madrid. *PIAM*, 12, 11-36.
- Llamas, M. R. (1987) *Recursos hídricos en la Naturaleza de Madrid*. (Fernández Galiano y Ramos, editores). Consejería de Agricultura Comunidad de Madrid, 94-133.
- Martínez Alfaro, P. E. (1977). *Hidrogeología de los materiales Terciarios y Cuaternarios de la Cuenca del río Manzanares*. Tesis Doctoral. 3 Tomos. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- Rebollo, L. F. (1977). *Estudio hidrogeológico regional de la cuenca media y baja del río Guadarrama*. Tesis Doctoral. 3 Tomos. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- San José, M. A. de (1971). Síntesis hidrogeológica de la Cuenca del Tajo. 1^{er} Congreso Hispano Luso Americano de Geología Económica E-3-64. 659-677 TII. 3. Madrid.
- Sánchez, A. y Varela, M. (1989). The Madrid Mioocene aquifer as a component of the metropolitan water supply system. *IAHS Publ.* 189, 547-556.
- Sastre, A. (1978). *Hidrogeología regional de la cuenca terciaria del río Alberche*. Tesis Doctoral. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- Sastre, A. (1983). Los modelos antiguos de flujo de las aguas subterráneas de la cuenca de Madrid. *Libro Jubilar de José María Ríos*, T 3. IGME.
- Servicio Geológico de Obras Públicas-Comisaría de Aguas del Tajo (1973). *Estudio de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares*. Informe interno.
- Servicio Geológico de Obras Públicas-Instituto Geológico Geominero de España (1990). Unidades Hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. Síntesis de sus características y mapa a escala 1:1.000.000. *Bol. de Inf. y Est. del SGOP*, 52.
- Toth, J. (1962). A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 67,11. 4372-4387.
- Toves, L. y Llamas, M. R. (1983). Contribución al conocimiento de la hidrogeoquímica del Terciario detrítico mediante el estudio de los manantiales en la zona comprendida entre los ríos Guadarrama y Jarama. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, 167-180.
- Vicente, R. (1985). *Hidrogeología Regional de la Depresión del Campo Arañuelo*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alcalá de Henares.
- Villarroya, F. I. (1977). *Hidrogeología regional del Neógeno detrítico y el Cuaternario de la Cuenca del río Henares*. Tesis Doctoral. Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Publicado en 1983 por Edit. Univ. Complutense. Colección Tesis Doctorales 147/83. 745 pp.
- Yélamos, J. G. (1986). *Estudio de la Hidrogeología e Hidrogeoquímica en el sector NW del casco urbano de Madrid*. Tesis de Licenciatura. 152 pp. Facultad de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- Yélamos, J. G. y Villarroya, F. I. (1991). Variación de la piezometría y el caudal en cuatro explotaciones de aguas subterráneas en el acuífero del Terciario detrítico de Madrid. *Bol. Geol. Min.*, 102, 6, 857-874. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 20 de octubre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 4 de junio de 2008.