

HIDROGEOLOGÍA E HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DE LOS MANANTIALES DE GORMAZ Y SU IMPORTANCIA EN EL CAUDAL BASE DEL RÍO DUERO, ESPAÑA

• L. Carolina Távara-Espinoza • Eugenio Sanz •
Universidad Politécnica de Madrid, España

Resumen

El río Duero, España, incrementa su caudal base en varios m^3/s , al atravesar unos afloramientos carbonatados mesozoicos en un pequeño tramo de su cabecera; esto es de especial importancia en época de estiaje, cuando la mayor parte del caudal base del río procede de manantiales que allí se sitúan. Dichos afloramientos corresponden a uno de los dos acuíferos calcáreos confinados, que se desarrollan en paralelo y están hidráulicamente desconectados por una capa impermeable, que forman el sistema acuífero de los manantiales de Gormaz. Este sistema se encuentra en estado de régimen natural y está apenas explotado. Se define el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, considerando el papel hidrogeológico de la falla de Gormaz, situada en la zona de descarga del sistema. Analizando información geológica antecedente y la geofísica exploratoria realizada, se obtuvo un mejor conocimiento de la geometría y los límites de los acuíferos, definiéndose un sistema acuífero con una zona de recarga en el sur, correspondiente a los afloramientos calcáreos, los cuales se confinan hacia el norte bajo el Terciario, hasta intersectar con la falla normal de Gormaz. El salto de falla genera una barrera para las formaciones permeables situadas al extremo norte (margen derecha del río Duero); a su vez, el plano de falla facilita el ascenso del agua subterránea del sistema acuífero en estudio y pone en conexión hidráulica los dos acuíferos. Se estimaron, además, los parámetros hidráulicos de los acuíferos en los alrededores de la falla. La buena correlación entre los niveles piezométricos y las descargas subterráneas al río Duero han permitido la reconstrucción del hidrograma de los manantiales de Gormaz en el periodo 1992-2006. Se calcula así que la contribución subterránea al río Duero es de $135.9 \text{ hm}^3/\text{año}$, que supone el 18.9% de la aportación total del río.

Palabras clave: acuífero carbonatado, caudal base, manantial, río Duero, España.

Introducción

El río Duero incrementa su caudal base en varios m^3/s en un pequeño tramo de su cabecera de 4 km de longitud, en el que el río atraviesa unos afloramientos carbonatados mesozoicos (DGOH, 1999). Este aumento de caudal es importante respecto al caudal del río, sobre todo en estiaje, y se realiza a través de manantiales situados en la orilla y de descargas subterráneas sumergidas de carácter difuso.

Se han realizado estudios en la zona a diversas escalas; algunos, de carácter general

y orientados a inventariar las unidades hidrogeológicas españolas (DGOH-SGOP, 1989; IGME, 1983; ITGE, 1989); se han desarrollado también estudios más centrados en el área de interés y en relación con los acuíferos carbonatados orientados a la exploración geofísica (DGOH, 1995), y a la caracterización del régimen hidrológico de estos caudales base (DGOH, 1999).

Por su carácter regulador y por su descarga diferida como flujo base, las aguas subterráneas constituyen un recurso complementario que podría permitir la existencia de un caudal

durante todo el año en los ríos; siendo de especial interés en las épocas de sequía que regularmente se producen en España, dada la gran variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en el clima de gran parte del país (Cruces de Abia, 1999).

La zona de Gormaz se encuentra prácticamente sin explotación de aguas subterráneas, por lo tanto constituye una interesante posibilidad de estudio de las condiciones naturales del acuífero y el análisis de posibles aprovechamientos de sus aguas; para ello es indispensable, en primer lugar, definir el funcionamiento del sistema.

En este estudio se busca definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonatados mesozoicos, así como su geometría en profundidad y, en especial, el papel hidrogeológico jugado por la falla de Gormaz. Además, se espera cuantificar la descarga subterránea de los manantiales, valorando la importancia de su regulación natural en el caudal del río.

Materiales y métodos

Este trabajo es una síntesis de los datos y antecedentes existentes, así como de los trabajos de campo y gabinete realizados ex profeso, correspondientes al ámbito geológico, hidrogeológico, climatológico e hidrológico.

Se ha realizado un inventario de cien puntos de agua, que incluye la casi totalidad de los puntos existentes en la zona, obtenidos a partir de los registros de diversas bases de datos, como el catálogo de sondeos y piezómetros del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), el registro histórico de niveles piezométricos de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHDuero), información de los estudios realizados por el Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas (SGOP-DGOH), otros estudios locales asociados con el abastecimiento, así como información levantada en campo. Toda esta información ha sido analizada, organizada y sintetizada en un SIG.

Con base en las cartas geológicas a 1:50000 (ITGE, 1991) y la información geofísica correlacionada con la información litológica de los sondeos inventariados, ha sido posible trazar líneas de contorno estructural o mapas de elevación de los niveles de techo y muro de las formaciones carbonatadas.

Asimismo, a partir de los registros de niveles ha sido posible conocer la piezometría y evolución dinámica del sistema y completar la serie de aforos de las descargas subterráneas en el río Duero mediante una correlación de los valores piezométricos con aforos diferenciales existentes para el río en la zona de estudio.

Se ha realizado un seguimiento hidroquímico durante un año en las surgencias de Gormaz, que permitió caracterizar las aguas de la zona.

Mediante ensayos de bombeo y la aplicación de la ley de Darcy se obtuvieron los parámetros hidrogeológicos en el entorno de los manantiales de Gormaz, junto a la falla del mismo nombre.

El último paso de la investigación es la síntesis de toda la información hidrogeológica existente y generada para la elaboración de un modelo de funcionamiento hidrogeológico.

Zona de estudio

Características generales

La zona de estudio se sitúa en la parte alta de la cuenca del río Duero, al noroeste de la península Ibérica (figura 1). En el área de estudio, el río discurre formando meandros por una amplia planicie, salvo en un corto recorrido de apenas 1 km entre las localidades de Gormaz y Vildé, donde se encaja, al atravesar los relieves calcáreos de la loma de La Pedriza, lugar que en el que se ha construido una pequeña represa para regadíos de la margen derecha del río. La pendiente del cauce en todo el trayecto es baja, del orden del 0.5%, con cotas que van desde los 900 msnm al este de Andaluz, hasta los aproximadamente 855 msnm en las inmediaciones de la Fuente del Molino.

Al norte del Duero dominan los relieves suaves con amplias planicies, salvo en las inmediaciones de Burgo de Osma y Andaluz, donde las sierras calcáreas de orientación este-oeste constituyen relieves más escarpados cortados transversalmente por los ríos Ucero y Fuentepinilla, respectivamente. La altitud en esta parte de la zona oscila entre los 900 y los 1 050 msnm.

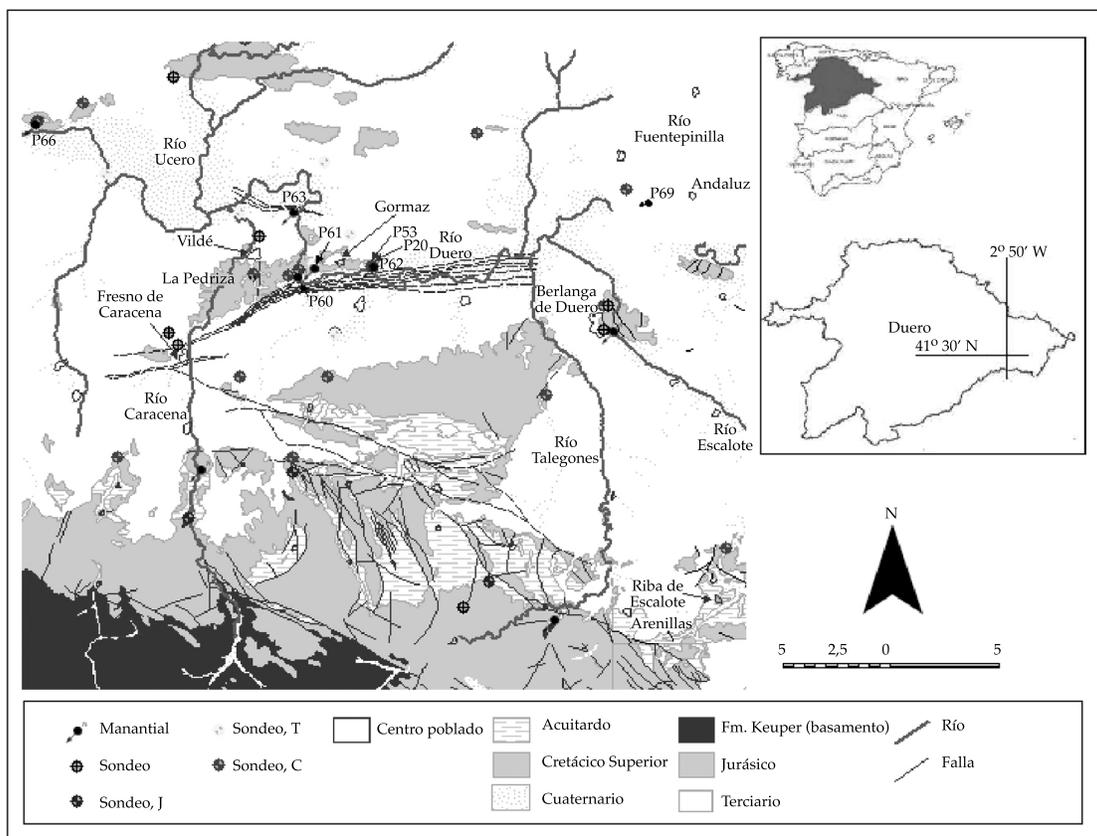
En la parte sur (margen izquierda del Duero) dominan las formas de penillanura, con alturas entre los 1 100 y 1 300 msnm, entre las que se intercalan planicies encajadas, modeladas por una erosión reciente, con una orientación predominante norte-sur.

El clima es continental árido, con inviernos muy fríos y veranos cortos poco calurosos.

La pluviometría anual está alrededor de los 500 mm/año, con pequeñas diferencias entre las estaciones situadas en la zona o sus proximidades (Riba de Escalote: 457 mm/año; Berlanga de Duero: 520 mm/año; Burgo de Osma: 525 mm/año). Por mes, la precipitación media se sitúa alrededor de los 40 mm; los periodos más lluviosos corresponden a los meses de mayo-junio, y diciembre-enero. La variabilidad de la precipitación mensual oscila entre 0 y 200 mm.

Referente geológico

Las formaciones mesozoicas de interés se sitúan en el borde sur occidental de la cuenca terciaria de Almazán, en contacto con los



Sondeo, J: Sondeo con los filtros situados en el Jurásico. Sondeo, T: Sondeo con los filtros situados en el Terciario. Sondeo, C: Sondeo con los filtros situados en el Cretácico. P60: Fuente San Luis (Vildé) P61: Fuente "La Laguna"; P62: Fuentes Grandes; P63: Fuente "La Presa (Vildé) P66: Fuente "El Molino"; P69: Fuente "Andaluz"; P53 y P20: Pozos donde se realizaron los ensayos de bombeo.

Figura 1. Situación de la zona de estudio.

materiales mesozoicos de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica. A grandes rasgos, la estructura que presenta el Mesozoico en este borde meridional de la cuenca de Almazán es el de una serie inclinada hacia el norte, donde la serie Triásica aparece al sur, el Jurásico en una franja intermedia y los materiales metálicos en la parte más septentrional, sumergiéndose bajo la discordancia de la base del Neógeno.

La estructura general es monoclin, de borde de cadena, emergiendo hacia el norte con una tectónica distensiva en bloques (Bond, 1996; Casas *et al.*, 1996, 2000; Maestro, 2004). El zócalo mesozoico está afectado por plegamientos y fallas de dirección este-oeste, que generan subfosas tectónicas; los afloramientos calcáreos cretáceos dan lugar a alineaciones anticlinales, que a veces emergen de entre el Terciario arcilloso, como es el caso del afloramiento de Gormaz.

De techo a muro se pueden diferenciar los siguientes conjuntos estratigráficos (figura 2), atendiendo principalmente a sus características hidrogeológicas:

- Sedimentos aluviales cuaternarios. Representados principalmente por el aluvial del río Duero y por otros aluviales de menor entidad de los ríos afluentes en la zona de estudio.
- Sedimentos terciarios (Neógeno). Con predominancia de materiales arcillo-margosos que recubren los materiales mesozoicos mediante discordancia. El espesor de estos sedimentos es muy variable; en la zona de estudio pueden llegar a alcanzar los 600 m. Estos sedimentos son de permeabilidad media-baja (IGME, 1983; DGOH, 1995) y forman el acuitardo de la cubeta de Almazán.
- Sedimentos mesozoicos. En ellos se encuentran los acuíferos carbonatados objeto de este estudio. Se pueden diferenciar varios tramos, los cuales, atendiendo principalmente a sus características hidrogeológicas, se pueden describir del siguiente modo:
 - a) Cretácico. En este tramo pueden distinguirse únicamente formaciones del Cretácico Medio y del Cretácico Superior.

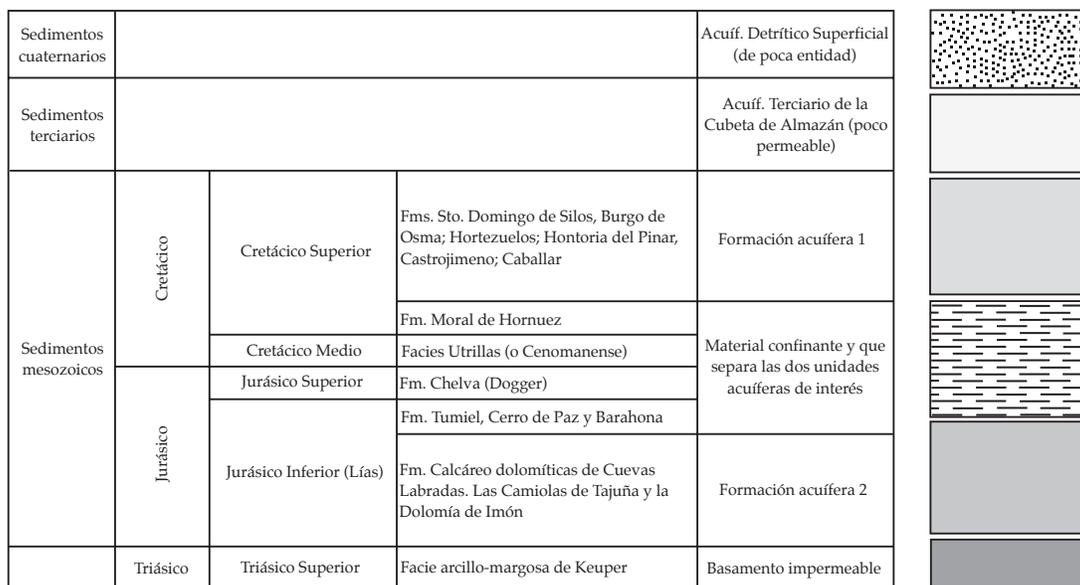


Figura 2. Resumen estratigráfico de la zona de estudio.

El Cretácico Superior está representado por un potente conjunto de calizas y dolomías de 150 m de espesor, bastante karstificadas. Los principales afloramientos se localizan en la margen izquierda del río Duero, estando bastante afectados por la tectónica, y forman un monoclin al suave con buzamiento hacia el norte. En el valle del Duero y en su margen derecha afloran solamente la bóveda de anticlinales con una orientación general este-oeste.

Este conjunto calcáreo descansa sobre un tramo formado por margas y calizas margosas y arenosas —Fm. Moral de Hormuez— con un espesor de unos 50 m, debajo del cual aparece la facie Utrillas del Cretácico Medio, constituida por arenas, microconglomerados y arcillas, con unos 60 m de espesor. Ambos conjuntos pueden considerarse como impermeables (DGOH, 1995; Maestro, 2004) y constituyen el material confinante que separa las formaciones acuíferas de interés.

- b) Jurásico. El Jurásico Inferior (Lías) está ampliamente representado en la zona, aflorando en la parte sur en forma de penillanura. Predominan las formaciones calco-dolomíticas y carniolas, adquiriendo un espesor medio conjunto de unos 200 m.
- c) Triásico. Está representado por la facie arcillo-margosa del Keuper, que representa la base impermeable del acuífero carbonatado jurásico.

En la parte sur, los acuíferos carbonatados mesozoicos, cretácicos y jurásicos afloran en extensas zonas, sumergiéndose hacia el norte, propiciadas por una tectónica de bloques en las proximidades del río Duero a ambos márgenes del mismo, donde se produce la mayor parte de las descargas de los acuíferos. La comunicación entre los paquetes permeables del Cretácico y del Jurásico se ve dificultada por las facies margosas y pelíticas que hay entre ambas.

Hidrogeología

Tal como se hace referencia en el punto anterior, en la zona pueden distinguirse tres unidades hidrogeológicas fundamentales: el Cuaternario aluvial del Duero; el detrítico de la Cubeta Terciaria, poco permeable (IGME, 1983; ITGE, 1989) y que se extiende en la zona norte; y los sedimentos mesozoicos carbonatados del Cretácico y Jurásico, que constituyen el objeto estudio.

Marco hidrogeológico

La zona donde el río Duero adquiere el incremento de caudal coincide con una cúpula anticlinal de calizas del Cretácico Superior de orientación este-oeste, y que emerge de entre los depósitos neógenos horizontales de naturaleza arcillosa. Este recubrimiento terciario impide conocer cómo es la continuación lateral del acuífero calcáreo hacia el norte y hacia el sur, y su conexión hidráulica con el resto de los afloramientos existentes.

Para dilucidar su geometría en profundidad, ha sido importante la interpretación conjunta de los estudios geofísicos —realizados con anterioridad— con la geología de superficie; también se han aprovechado los datos de los pocos sondeos existentes. De esta manera se han elaborado mapas de contorno estructural, un bloque diagrama y una serie de cortes, donde se sintetiza la estructura de la zona.

En el bloque diagrama de la figura 3 y en los cortes de la figura 4 se puede observar cómo el anticlinal de Gormaz está fallado por su flanco meridional mediante una falla normal de unos 150-200 m de salto (DGOH, 1995) y como tanto en el Cretácico como en el Jurásico —de contactos paralelos y plegamiento concéntricos— se disponen monoclinamente buzantes hacia el sur (sección BB' de la figura 4), emergiendo del Terciario y extendiéndose en una amplia penillanura, dada la abundancia de los afloramientos, junto con el hecho de que las

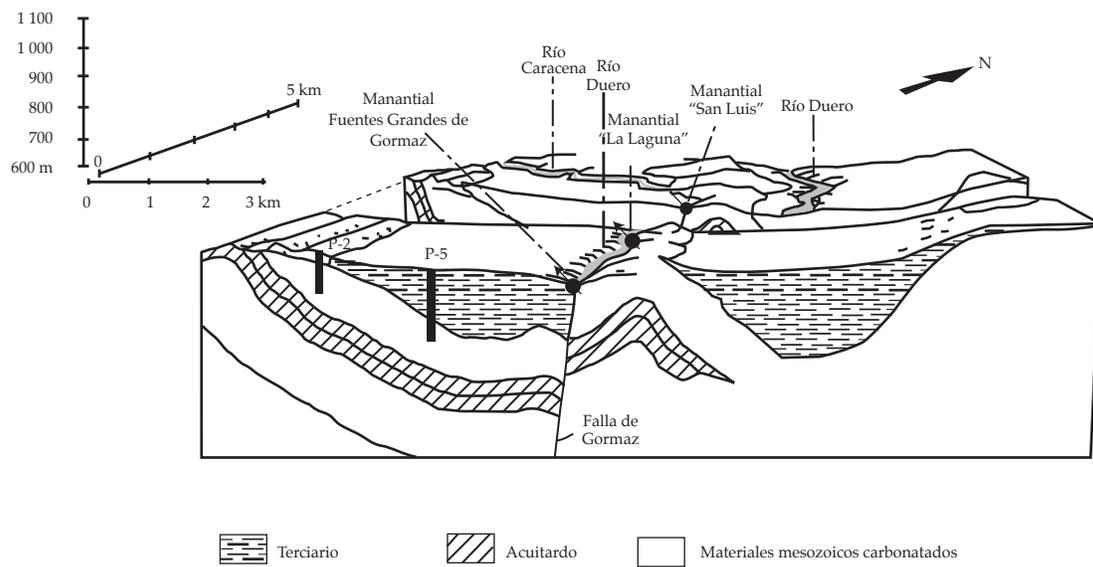


Figura 3. Bloque diagrama representativo de la geometría del acuífero de estudio.

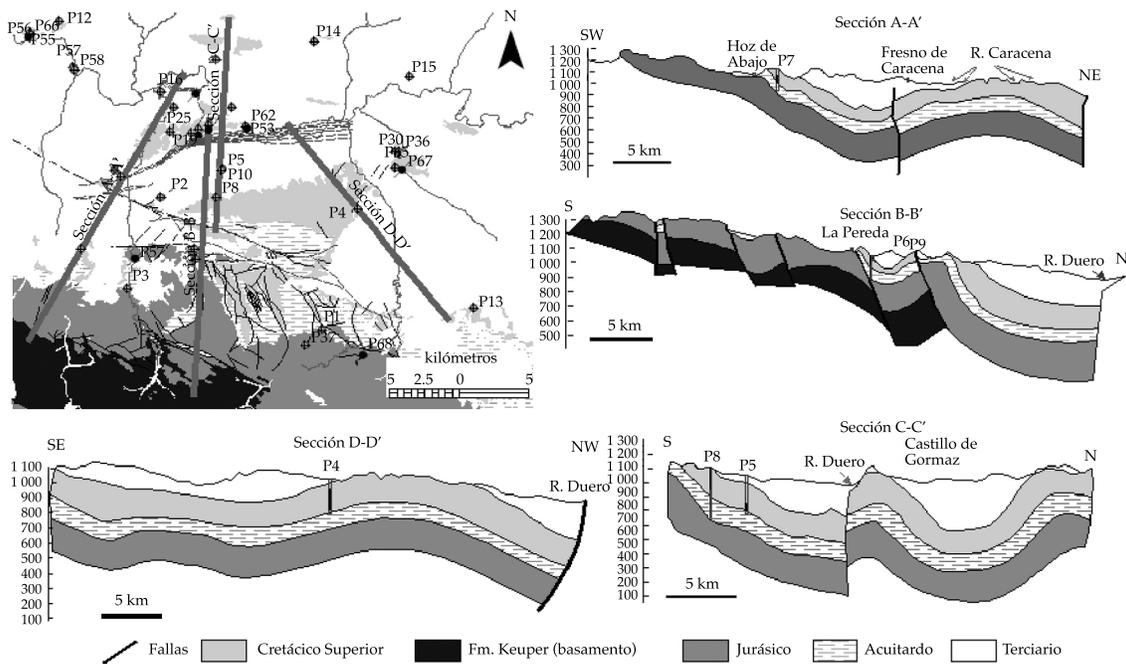


Figura 4. Cortes hidrogeológicos de los acuíferos cretácico y jurásico de Gormaz.

mayores precipitaciones se sitúan en estas zonas, se favorece el desarrollo de formas exokársticas (Rodríguez, 2008), que serían la

principal área de recarga; situación similar de otros acuíferos carbonatados españoles (Moral *et al.*, 2008).

Hacia el norte y bajo el Terciario, donde adquiere casi 600 m de potencia, el Cretácico se pliega en sinclinal, seguido de un anticlinal que llega a aflorar en una pequeña ventana. Su continuación más hacia el norte (fuera ya del ámbito del bloque diagrama) se resuelve en sucesivas alineaciones sinclinales y anticlinales de dirección este-oeste. Algunos de los anticlinales cretácicos emergen también del Terciario, pero no tienen gran superficie de afloramiento, ni por tanto superan áreas de recarga importantes al acuífero calcáreo. El Jurásico nunca aflora entre el Terciario.

El acuífero jurásico está conformado por las calizas y dolomías, y del Jurásico Inferior: dolomías de Imón, las carniolas de Cortes de Tajuña y las calizas de Cuevas Labradas. Su límite inferior lo configura la facie arcillo-margosa del Keuper, que representa sustrato impermeable, que aflora en el borde meridional (figura 5a), mientras que su límite superior lo constituyen las formaciones terciarias (figura 5b).

Como se observa en la figura 4b, este acuífero aflora en el borde meridional de la zona de estudio alrededor de la cota 1 100 msnm, formando relieves suaves de penillanura, sometidos a procesos de erosión (Rodríguez, 2008) y se extiende por toda el área a diferentes profundidades. La potencia media de este acuífero puede considerarse de 200 metros.

El tramo acuífero del Cretácico está formado por calizas blancas y dolomías grises duras, generalmente poco fisuradas, con un grado de karstificación medio a alto en algunos tramos (DGOH, 1995).

Espacialmente, este acuífero se extiende en un 80% del área de estudio, oscilando desde zonas de afloramiento, en la parte sur, hasta zonas confinadas a 400 metros de profundidad (DGOH, 1995). La facie detrítica de Utrillas constituye el límite inferior (figura 5c); esta facie está formada fundamentalmente por arenas y microconglomerados, apareciendo en algunas columnas litológicas una parte inferior más arcillosa al este del área de estudio. Su límite superior está configurado por la presencia del

Terciario, que en la parte norte del estudio forma una fosa que se extiende hasta el afloramiento del Cretácico en el borde noroeste debido a la existencia de una falla normal (figura 5d).

Resultados hidrodinámicos

Del análisis de la información inventariada se seleccionaron aquellos puntos con registros piezométricos —y columnas litológicas— que permitiesen evaluar la dinámica de funcionamiento de los acuíferos carbonatados (figura 6).

La media de los niveles piezométricos en el Cretácico oscila entre los 1 007 msnm en la parte meridional de la zona de estudio, en el área de los afloramientos, y los 880 msnm cerca del Duero. Los piezómetros del Jurásico se sitúan todos en la zona de los afloramientos, y sus niveles piezométricos medios están entre los 1 082 y 1 045 msnm. Hay zonas donde hay un equilibrio de niveles entre el Jurásico y el Cretácico, pero en otras, en puntos cercanos se aprecian diferencias de hasta 60 m (puntos P6 y P9), situándose los niveles del Jurásico por encima de los del Cretácico. Estas diferencias de niveles se reducen en dirección oeste. Hay sondeos surgentes en la zona próxima a las descargas de los acuíferos calcáreos en el Duero.

Al suroeste de la zona de estudio, los niveles de los dos paquetes calcáreos son similares (DGOH, 1995). Esto puede deberse al menor espesor de las margas cenomanenses que separan los acuíferos y por la presencia de una tectónica más desarrollada, que permitiría una mayor comunicación entre ambos acuíferos.

En cuanto a la dirección regional del flujo, en la figura 6 se representa un mapa de isopiezas con base en una mezcla de niveles de manantiales y sondeos emplazados tanto en el acuífero cretácico y en el jurásico, por lo que hay que tomar dicho mapa como una aproximación. Los valores piezométricos corresponden a enero de 1994, como parte de la campaña de campo realizada por la DGOH.

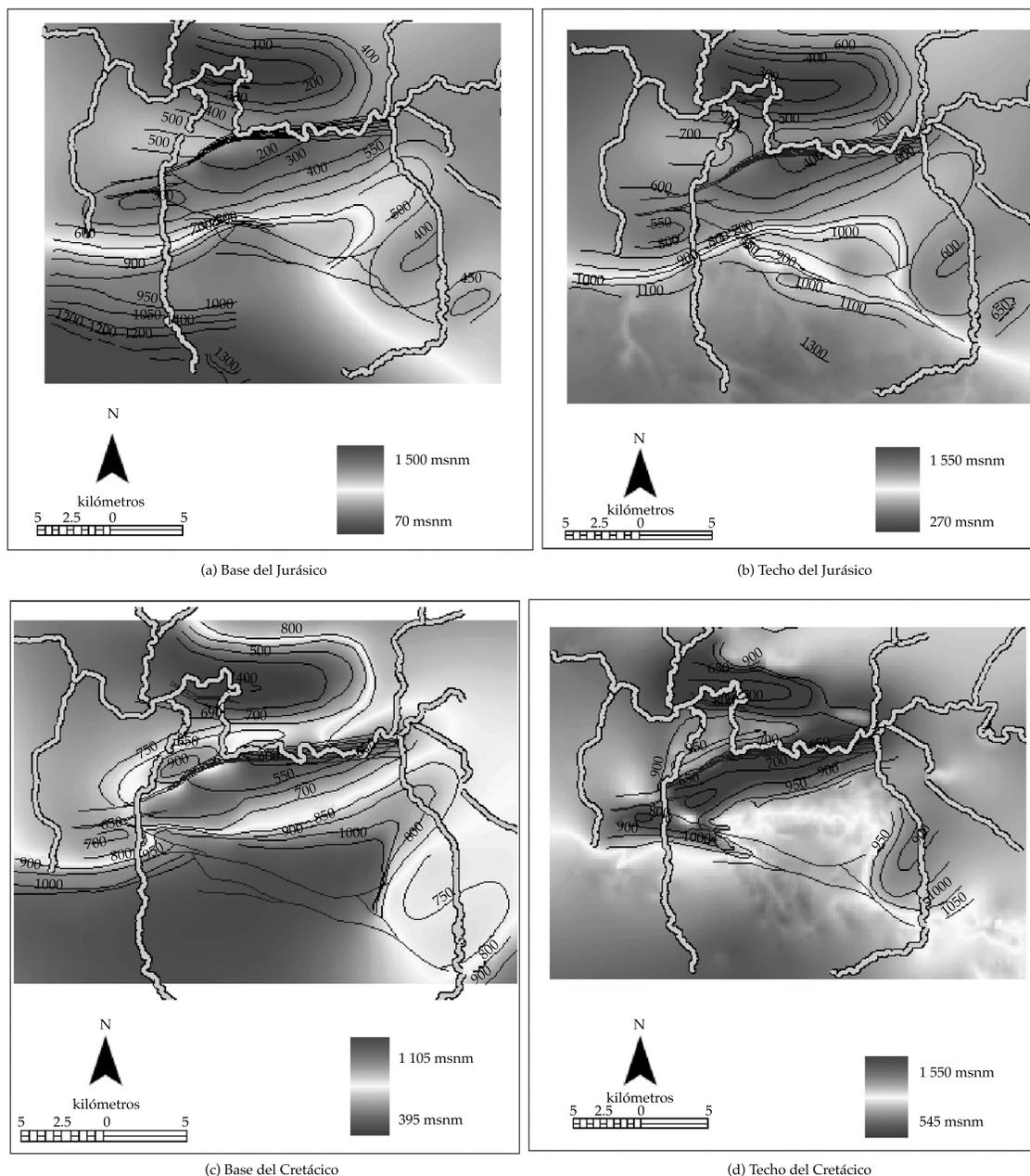


Figura 5. Mapas de contorno estructural de (a) la base y (b) el techo del acuífero jurásico; y de la (c) base y (d) el techo del acuífero cretácico.

Se observa cómo el flujo va dirigido hacia el río Duero, que es ganador, concentrándose las descargas en el área de Gormaz, donde, aparte de haber descargas ocultas dentro del río, hay tres manantiales importantes situados en la orilla del río y a lo largo de la falla de Gormaz:

Fuentes Grandes de Gormaz (P62), La Laguna (P61) y el manantial de San Luis de Vildé (P60), y que juntos pueden dar un caudal de más de 1 m³/s. Estos manantiales son de caudal muy regular, y se sitúan 1 o 2 metros por encima del nivel medio del río.

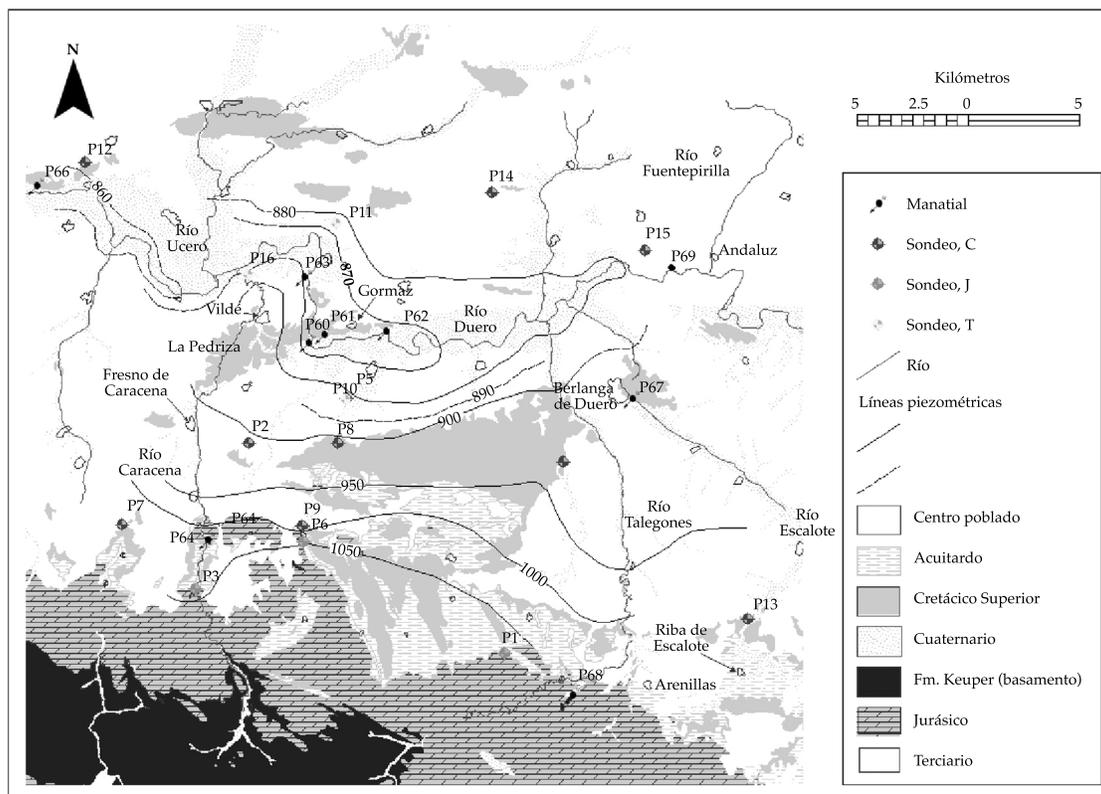


Figura 6. Mapa de isopiezas de la zona de estudio correspondiente a enero de 1994 (ver leyenda explicativa de la figura 1).

En cuanto a la evolución de los niveles, se observan variaciones en el borde sur (P1) siguiendo las oscilaciones pluviométricas, como corresponde a áreas de recarga (Custodio y Llamas, 1983; Park y Parker, 2008), tal como se aprecia en la figura 7a, mostrándose el resto de los piezómetros existentes sin oscilaciones importantes (figura 7b).

Según estudios realizados por la DGOH (1995), en la parte norte del río Duero quizá haya que contar con una pequeña alimentación del acuífero proveniente de pequeños y dispersos afloramientos cretácicos que totalizan 20 km², y de áreas más alejadas situadas a 20 km de distancia, fuera ya de la zona de estudio; así como una pequeña transferencia desde el acuitardo Neógeno, difícil de cuantificar. El núcleo oculto de margas impermeables cretácicas del anticlinal de Gormaz (figura

4) hace de barrera hidráulica para el flujo proveniente del norte y, de hecho, no hay surgencias importantes en el flanco norte, localizándose todas en el flanco sur. El flujo por este lado debe ser por tanto pequeño y muy lento.

Al sur del río Duero, la alimentación se produce en su mayor parte por infiltración directa del agua de lluvia y a través de sumideros en la red de drenaje que atraviesa el Jurásico y el Cretácico en una zona de afloramientos que puede ser considerada como área de recarga (Rodríguez, 2008; DGOH, 1995); hay que contar también con otras posibles transferencias desde el Terciario (DGOH, 1995). Aunque esta transferencia hidráulica es difícil de precisar, debe ser muy pequeña, dada la baja conductividad hidráulica del Terciario y del hecho de que no haya diferencias importantes

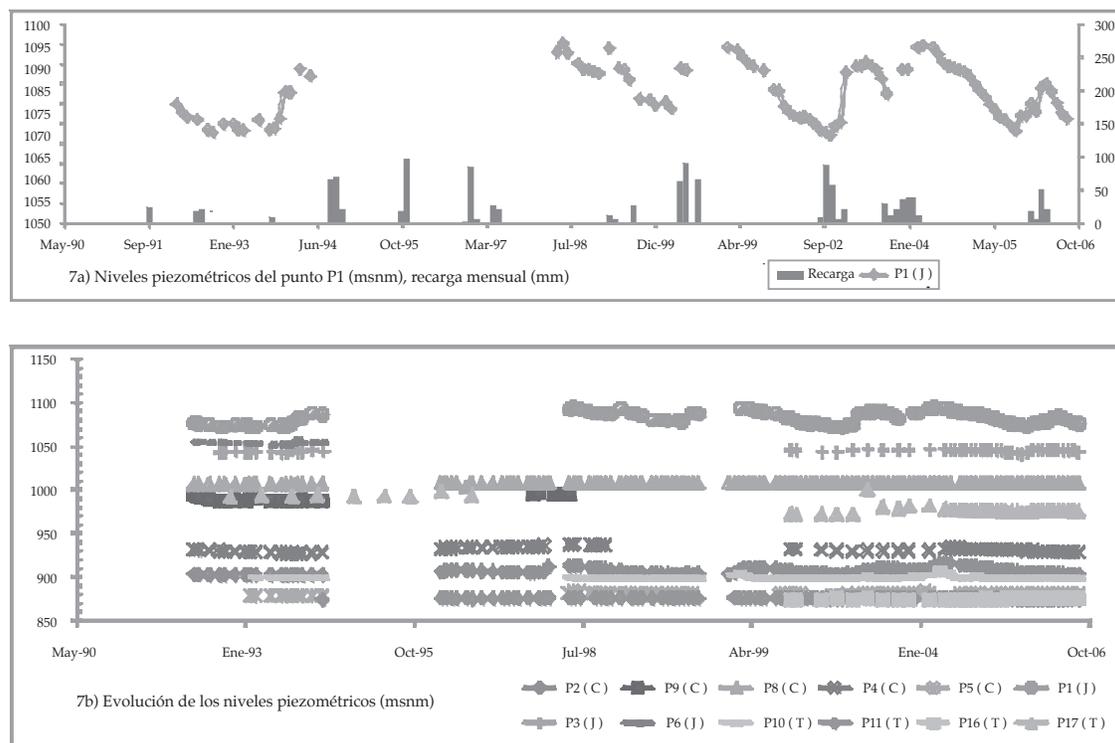


Figura 7. (a) Gráfico comparativo de la variación piezométrica del punto P1, situado en el Jurásico, con la estimación de recarga mensual obtenida a partir de balance hídrico; (b) evolución piezométrica de los puntos de control de la CHDuero dentro de la zona de estudio.

de niveles entre los sondeos del Terciario y del Cretácico al sur de la falla de Gormaz (figura 7b).

Así pues, el flujo del agua subterránea en el acuífero jurásico y cretácico se realiza desde las áreas de recarga situadas en el sur, donde se extiende una superficie permeable en penillanura entre los 1 000 y 1 200 metros de altitud, que totalizan 90 km² para el Cretácico y 320 km² para el Jurásico. La recarga se realiza por infiltración del agua de lluvia en estos afloramientos permeables, más la infiltración en sumideros de arroyos provenientes de cuencas alógenas y que han sido estimadas en unos 28 hm³/año (Sanz, 1999).

El flujo va dirigido hacia el norte, a través de las formaciones carbonatadas cretácicas y jurásicas de manera aislada. Ambos acuíferos se confinan al norte por las capas superiores

del Terciario margoso y del Cretácico margoarenoso, respectivamente. El gradiente hidráulico, según el mapa de isopiezas, puede estar en ambos acuíferos en torno al 0.03. El flujo sigue dirección sur-norte hasta llegar a la falla de Gormaz, que por un lado hace de barrera impermeable, pues debido a su movimiento y salto enfrenta los acuíferos ante formaciones impermeables; pero, por otro lado, constituye una vía de escapatoria del agua, obligando al flujo del acuífero cretácico y del jurásico a ascender a través de ella, mezclándose las aguas de ambos acuíferos, y saliendo por los manantiales de Gormaz y por el río Duero, en el contacto fallado Terciario-Cretácico. El acuífero jurásico nunca aflora entre el Terciario y tiene que desviarse al exterior por el acuífero cretácico superior a través de esta falla.

Parámetros hidrogeológicos de los acuíferos cretácico y jurásico en las proximidades de la falla de Gormaz

Se estiman a continuación los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos cretácico y jurásico en las proximidades de la falla conductora de agua de Gormaz; se trata de estimaciones locales en el entorno de la falla y que no representan los parámetros medios conjuntos del acuífero. Ya que se conoce bastante bien la geometría del acuífero en el entorno de la falla, ha sido interesante aplicar la ley de Darcy para conocer las características del medio. Además se han dispuesto dos ensayos de bombeo —uno de ellos realizado para la investigación— en dos pozos próximos a Fuentes Grandes de Gormaz (P53 y P20 en la figura 1).

Esta estimación se hará mediante dos procedimientos distintos, primero aplicando la ley de Darcy y, en segundo lugar, mediante ensayos de bombeo en pozos perforados en el acuífero cretácico en las proximidades de la falla.

- a) Método en el que se aplica la ley de Darcy. Se parte de los siguientes datos (figura 8): caudal total que fluye por la falla (Q), proveniente de la suma del flujo a través del acuífero cretácico (Q_c) y del acuífero jurásico (Q_j), que ha sido obtenido del registro de veinte años de aforos calculados a partir de las variaciones piezométricas. Este caudal medio es de $Q = 3.78 \text{ m}^3/\text{s} = 326\,592 \text{ m}^3/\text{día}$, que puede repartirse proporcionalmente entre ambos acuíferos según sus áreas de recarga, ya que la recarga unitaria es parecida en uno y otro acuífero. Así, al Cretácico (de 90 km^2 , 22%) le correspondería un $Q_c = 71\,850 \text{ m}^3/\text{día}$; y al Jurásico (de 320 km^2 , 78%), $Q_j = 254\,741.7 \text{ m}^3/\text{día}$.

Al ser acuíferos cautivos, el espesor saturado del Cretácico coincide con su potencia, que es de $b_c = 150 \text{ m}$, y el del Jurásico, $b_j = 200 \text{ m}$. El gradiente hidráulico en las cercanías de

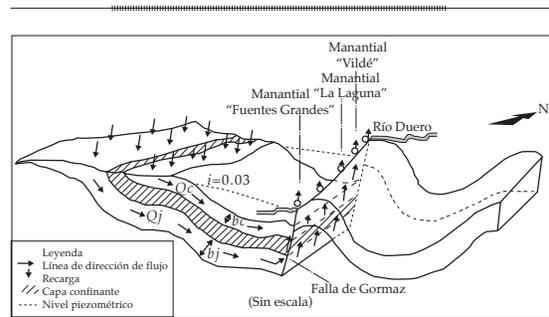


Figura 8. Esquema hidrogeológico para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos en el entorno de la falla de Gormaz.

la falla para los dos acuíferos es de $i = 0.03$, que ha sido obtenido del mapa de isopiezas; la longitud efectiva de la falla puede considerarse de $l = 4\,000 \text{ m}$.

De esta manera, la conductividad hidráulica K puede ser obtenida por Darcy mediante $K = (Q/A).i$, donde A es la sección total, T es la transmisividad y se estima como $T = K.b$.

En el Cretácico resulta $K_c = 11.97 \text{ m/día}$, y $T_c = 1\,796 \text{ m}^2/\text{día}$; en el Jurásico, $K_j = 31.8 \text{ m/día}$, y $T_j = 6\,368 \text{ m}^2/\text{día}$.

- b) Ensayos de bombeo. Se realizaron varios ensayos de bombeo en distintos pozos de 200 y 250 metros de profundidad, situados en el acuífero cretácico aflorante del anticlinal de Gormaz, muy cerca de las Fuentes Grandes y de la falla. En esa zona el acuífero es libre, aunque se aprecia un flujo ascendente y un flujo local NW-SE. Con la interpretación del ensayo de bombeo se ha obtenido una transmisividad T_c entre $1\,504$ y $1\,762 \text{ m}^2/\text{día}$, así como un coeficiente de almacenamiento $S_c = 0.03$. Para la transmisividad de $1\,504 \text{ m}^2/\text{día}$ resulta una $K_c = 10 \text{ m/día}$, que es muy similar a la obtenida por Darcy.

Hidrogeoquímica

Con base en los análisis químicos de los 26 sondeos perforados por la DGOH (1995) en

los acuíferos calcáreos jurásicos y cretácicos, así como de otros análisis (Álvarez *et al.*, 1976; Sanz, 1999), se puede concluir que las aguas de estos acuíferos son de facies bicarbonatadas cálcicas y de buena calidad.

En una perforación de 200 m de profundidad, situada en el acuífero cretácico en la zona de descarga de la falla de Gormaz, a pocos metros de ella, y junto al manantial

Fuentes Grandes, se hizo un seguimiento mensual de determinaciones químicas y bacteriológicas durante un año—de diciembre de 2005 a noviembre de 2006—, que pueden considerarse representativas de las descargas subterráneas de Gormaz (figura 9).

Se observa cómo el agua es de mineralización débil, cuya composición química predominante es bicarbonatada cálcica, y

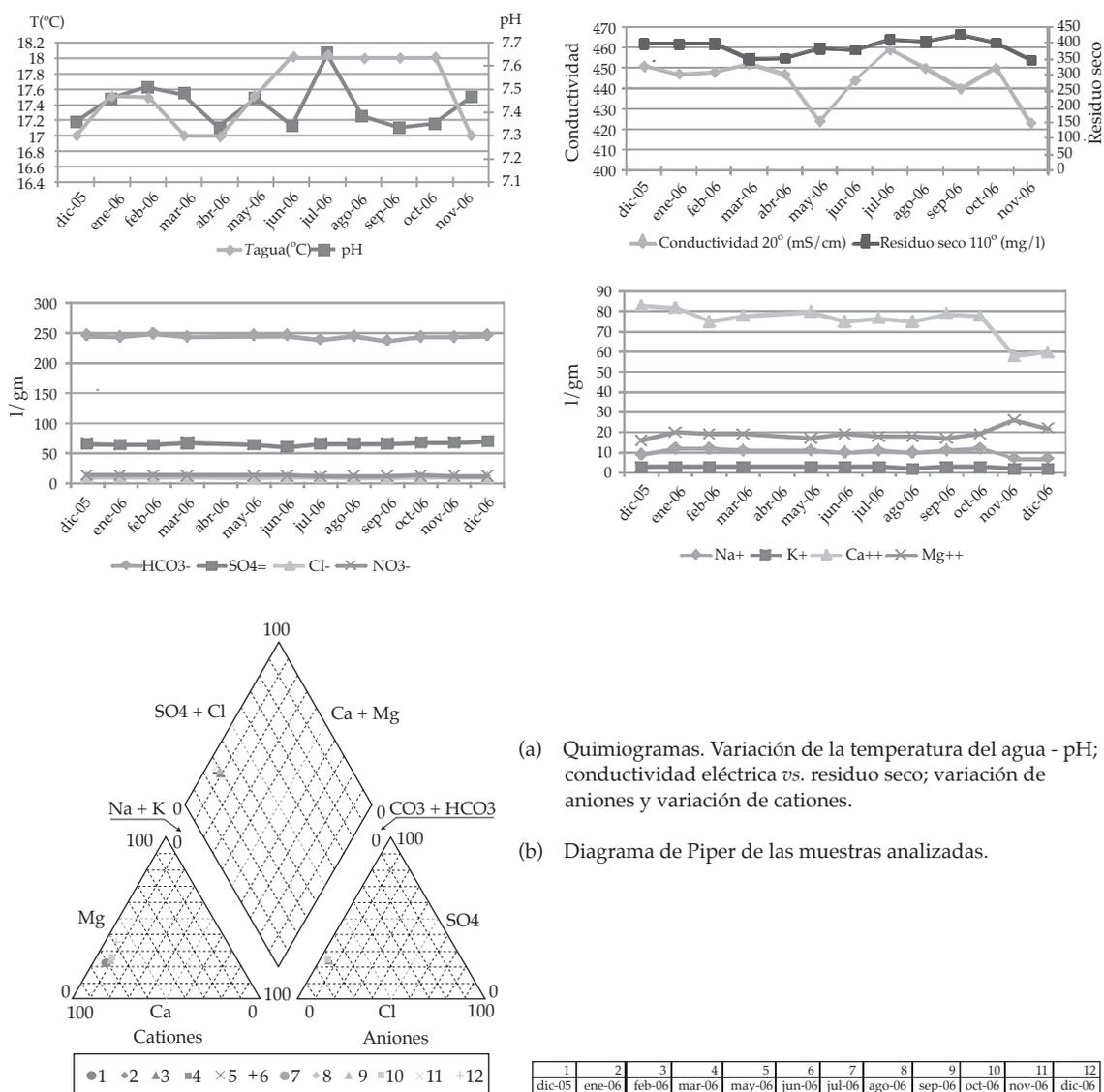


Figura 9. Resultados de los análisis químicos y bacteriológicos correspondientes al seguimiento de los manantiales de Gormaz (de diciembre de 2005 a noviembre de 2006).

con contenidos bajos o nulos de indicadores de contaminación química o mineralógica. Todos y cada uno de los parámetros se mantienen muy constantes en el tiempo, con fluctuaciones mínimas, y no se ven afectados por la composición de las lluvias ni por el regadío estival de la vega del Duero (nitratos, por ejemplo), ya que el flujo es vertical ascendente. Los afloramientos carbonatados que constituyen el área de recarga están alejados unos 10-15 km hacia el sur, donde apenas hay poblaciones y fuentes de contaminación, y existe un Terciario arcilloso de cientos de metros de espesor que aísla el acuífero cretácico del exterior.

Cuantificación de las descargas subterráneas en el río Duero a través de la falla de Gormaz

Se hizo una campaña de aforos en toda la cabecera del río Duero, a fin de cuantificar el caudal de base de sus afluentes durante el año hidrológico 1988-1999, coincidente con una situación de estiaje prolongado con precipitaciones prácticamente nulas por ser un periodo de sequía. En esta situación se hizo ostensible la ganancia del río Duero en Gormaz, ya que el río bajaba con sólo 3642 l/s aguas arriba de la falla, y a su salida tenía 6336 l/s, con 2694 l/s de ganancia. Este caudal

de base destacaba además de todos los ríos afluentes aforados en aquella campaña (figura 10).

Desde entonces se han hecho diferentes campañas de aforos diferenciales en Gormaz, tanto propios como de la DGOH (1999). Un aspecto de interés es que se ha podido completar el hidrograma de estos manantiales durante 14 años (1992-2006) con base en el registro piezométrico existente (figura 11), ya que hay una correlación lineal con un ajuste de bondad muy aceptable entre la variación de niveles de los piezómetros situados en los acuíferos cretácico y jurásico con los aforos diferenciales, según se expresa en Sánchez (2000), para la zona de estudio. El ajuste se verifica en casi todos los piezómetros; con una bondad de ajuste similar se ha escogido el hidrograma del piezómetro con registro más largo (figura 7b).

Resulta así un caudal medio de 4.31 m³/s, equivalente a una aportación de 135.9 hm³/año, con un máximo de 9.06 m³/s y un mínimo de 2.26 m³/s.

Si se compara con las aportaciones totales en régimen natural calculadas para el río Duero en Gormaz con las ganancias subterráneas, y aunque no sean comparables del todo porque corresponden a periodos distintos, nos podemos hacer una idea de la importancia que suponen estos manantiales en el caudal del río.

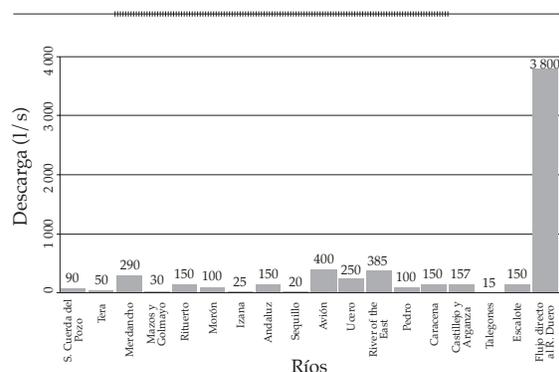


Figura 10. Caudal de base aforado en la cabecera del río Duero, incluyendo afluentes del mismo (de diciembre de 1988 a enero de 1989).

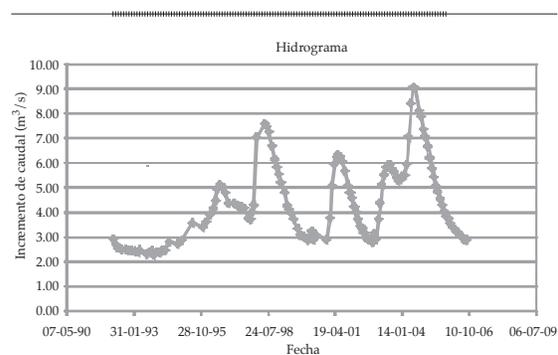


Figura 11. Hidrograma de los manantiales de Gormaz (en m³/s) en el periodo 1992-2006, con base en la relación con los piezómetros de los acuíferos.

Cuadro 1. Aportación total del río Duero en Gormaz y descargas subterráneas en el río en el tramo de Gormaz (en hm³/año).

	Año húmedo	Año medio	Año seco
Aportación total (m ³ /año) (1)	1 616	718	223
Manantiales de Gormaz (hm ³ /año) (2)	285.7	135.9	71.27
Porcentaje de aportación subterránea de los manantiales de Gormaz (%)	17.7	18.9	31.96

(1) Valores de la serie 1940/41 -1977/78 en régimen natural del Plan Hidrológico Nacional; (2) valores estimados en el periodo 1992-2006 para este trabajo.

En el cuadro 1 se refleja la proporción que supone la aportación subterránea de los manantiales de Gormaz en el río Duero, que representa el 18.9% para un año medio. Esta proporción aumenta hasta el 31.96% para el año más seco, pero esta importancia es mayor aún si en vez de considerar valores anuales nos fijamos en estiajes de periodos más cortos. Así, por ejemplo, en la mencionada sequía de 1988/89, los manantiales de Gormaz representaban el 70% del caudal que circulaba por el río Duero aguas abajo de ese punto, ya que el Pantano de la Cuerda del Pozo, situado aguas arriba del área de estudio en el Alto Duero, estaba embalsando agua.

Los grandes manantiales de Gormaz (junto con el del Molino en San Esteban de Gormaz, 200 km más aguas abajo y de 0.5 m³/s) son posiblemente los últimos manantiales grandes que tiene el Duero en su cauce hasta Portugal. Esta situación especial de los manantiales en cabecera de la cuenca contribuyen de forma importante a mantener el caudal de base del río Duero en estiaje, sobre todo en estiajes fuera de la época de regadío, que es cuando el embalse de la Cuerda del Pozo, situado aguas arriba, está embalsando agua. Como se ha visto, el agua de los manantiales es de muy buena calidad y contribuye de manera importante a sustentar el caudal ecológico del río Duero, no sólo en cantidad, sino también en calidad.

Conclusiones

Se comprueba en este artículo —a partir de la información histórica y de los mapas

de acotados realizados— que el modelo conceptual de los acuíferos carbonatados de los manantiales de Gormaz queda determinado por una zona de recarga correspondiente a los extensos afloramientos de las formaciones mesozoicas cretácicas y jurásicas, situados al sur de la zona estudio. Dichas formaciones están confinadas paralelamente hacia el norte por las capas superiores del Terciario margoso y del Cretácico margoarenoso, respectivamente, constituyendo la parte central del sistema acuífero. Propiciadas por una tectónica de bloques, en las proximidades del río Duero, el acuífero calcáreo cretácico emerge entre el Terciario y a través de una falla se produce la mayor parte de las descargas de los acuíferos.

Se ha trazado un mapa de isopiezas conjunto del sistema acuífero de Gormaz que ha permitido determinar el funcionamiento hidrogeológico general, determinándose que el flujo subterráneo sigue dirección sur-norte a través de las formaciones carbonatadas cretácicas y jurásicas, con un gradiente hidráulico de 0.03 en ambos acuíferos hasta llegar a la falla de Gormaz. Dicha falla hace de barrera impermeable en el límite norte, al enfrentar a los acuíferos ante formaciones impermeables y, a la vez, constituye una vía de escapatoria del agua, obligando al agua subterránea de ambas formaciones a ascender a través de ella, mezclándose y saliendo por los manantiales de Gormaz y por el río Duero, en el contacto fallado Terciario-Cretácico.

Los parámetros hidrogeológicos de los acuíferos cretácicos y jurásicos en las proximidades de la falla de Gormaz presentan valores

de conductividades hidráulicas del orden de los 10 m/d para los acuíferos cretácicos, y de 30 m/día para los jurásicos, y transmisividades de 1 700 y 6 000 m²/día, respectivamente.

Se ha reconstruido el hidrograma de los manantiales de Gormaz durante el periodo 1992-2006, a partir de la correlación entre los niveles piezométricos y las descargas subterráneas al río Duero. Se calcula así que la contribución subterránea al río Duero de aguas de buena calidad es de 135.9 hm³/año, que supone el 18.9% de la aportación total del río.

Recibido: 08/07/09

Aprobado: 08/03/10

Referencias

- BOND, J. Tectono-sedimentary evolution of the Almazan basin. *NE Spain in Tertiary basins of Spain: the stratigraphic records of crustal kinematics*. London: Cambridge University Press, 1996, pp. 203-213.
- CASAS, A. and MAESTRO, A. Deflection of compressional stress field by large-scales basement faults. A case study from the Tertiary Almazan Basin (Spain). *Tectonophysics*. Vol. 255, 1996, pp. 135-156.
- CASAS, A., CORTÉS, A. and MAESTRO, A. Intra-plate deformation and basin formation during the Tertiary at the northern Iberian plate: Origin an evolution of Almazan basin. *Tectonics*. Vol. 19, no. 2, 2000, pp. 258-289.
- CHDUERO. *Propuesta del Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero. Memoria y Anejos*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas, 1995.
- CRUCES DE ABIA, J. Evaluación de los recursos subterráneos. *Las aguas subterráneas en el Libro Blanco del Agua en España – Actas de las jornadas celebradas en Madrid*. Samper, J. y Llamas, M.R. (editores). Madrid: Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español, 1999.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. *Hidrología subterránea*. Segunda edición. Vol. I y II. Barcelona: Ediciones Omega, 1983.
- DGOH-SGOP. *Estudio hidrogeológico de Soria. Anejo 4. Inventario de puntos de agua*. Madrid: Dirección General de Obras Hidráulicas, Servicio Geológico de Obras Públicas, 1989.
- DGOH. *Estudio hidrogeológico de la Cubeta de Almazán (Soria). Segundo informe 2-884*. Madrid: Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio del Medio Ambiente. Inédito, 1995.
- DGOH. *Informe hidrogeológico: cuantificación del caudal de base del río Duero entre Andaluz y San Esteban de Gormaz, a partir de datos piezométricos*. Núm. de informe 12. Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio del Medio Ambiente. Inédito, Madrid, 1999.
- IGME. Investigación hidrogeológica básica del sistema nº 88 (10bis)-Terciario del Sureste de Soria, Cuenca del Duero. *Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 1983.
- ITGE. *Las aguas subterráneas en España (estudio de síntesis). Memoria*. Madrid: Instituto Tecnológico y Geominero de España, 1989.
- ITGE. *Mapas geológicos 1/50000 nº 377 (Burgo de Osma), nº 378 (Quintana Redonda), nº 405 (Berlanza de Duero), nº 406 (Almazán) y nº 433 (Atienza)*. Madrid: Instituto Tecnológico y Geominero de España, 1991.
- MAESTRO, A. *Estructura y evolución alpina de la cuenca de Almazán (cordillera Ibérica)*. Tesis doctoral. Colección de Temas Sorianos núm. 48. Soria, España: Área de Geodinámica, Departamento de Geología, Universidad de Zaragoza, Excma. Diputación Provincial de Soria, España, 2004.
- MORAL, F., CRUZ-SANJULIÁN, J. and OLÍAS, M. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers of Sierra Segura (Betic Cordillera, Southern Spain). *Journal of Hydrology*. Vol. 360, 2008, pp. 281-296.
- PARK, E. and PARKER J.C. A simple model for water table fluctuation in response to precipitation. *Journal of Hydrology*. Vol. 356, 2008, pp. 344-349.
- RODRÍGUEZ, J.A. *Geomorfología de un sector de la cuenca de Almazán (Soria): procesos de erosión de suelos y planteamiento de escenarios ante el cambio climático*. Tesis doctoral. Madrid: Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- SÁNCHEZ, A., SAHUN, B. y MENÉNDEZ, A. Conocimiento y predicción de caudales base de ríos procedentes de acuíferos inexplorados. Ejemplo del Duero entre Almazán y San Esteban de Gormaz. *Boletín de Informaciones y Estudios nº 55*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2000, pp. 7-16.
- SANZ, E. *Las aguas subterráneas en Soria*. Ediciones de la Exma. Soria, España: Diputación Provincial de Soria, 1999, 367 pp.

Abstract

TÁVARA-ESPINOZA, L.C. & SANZ, E. *Hydrogeology and hydrodynamic of the Gormaz Springs Aquifer and its importance to the base flow of the Duero River, Spain. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. I, no. 3, July-September, 2010, pp. 5-20.*

In a short stretch of its headwaters, the base flow of the River Duero increases by several m³/s as it traverses some Mesozoic carbonate outcrops. This is of special importance during the dry season, when the majority of the base flow of the river proceeds from springs in this reach. The outcrops correspond to one of two confined calcareous aquifers that developed in parallel but which are not hydraulically connected because of an impermeable layer. Together, they constitute the aquifer system of the Gormaz Springs. The system is still in its natural regime and is hardly exploited. This study defines the conceptual model of hydrogeological functioning, taking into consideration the role of the Gormaz Fault, which is situated in the discharge zone of the system. Analysis of both antecedent geological information and geophysical explorations has led to a better understanding of the geometry and boundaries of the aquifers, defining an aquifer system with a recharge zone in the south corresponding to in the calcareous outcrops. These calcareous outcrops are confined to the north below Tertiary formations, as far as their intersection with the normal fault of Gormaz. The throw of the fault forms the barrier of the permeable formations situated in the extreme north (right bank of the River Duero). In turn, the fault plane facilitates the upflow of groundwater from the aquifer system and creates hydraulic connection between the two aquifers. In addition, the study estimated the hydraulic parameters of the aquifer around the fault. The close correlation between piezometric levels and the groundwater discharges to the River Duero has enabled the reconstruction of the hydrogram of Gormaz springs over the period 1992-2006. By this means, it is calculated that the groundwater contribution to the River Duero is 135.9 hm³/year, or 18.9% of the total river inflow.

Keywords: carbonate aquifer, base flow, spring, Duero River, Spain.

Dirección institucional de los autores

Ing. L. Carolina Távvara-Espinoza

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid, España
Profesor Aranguren s/n
Teléfono: +34 (91) 3365 351
carolina.tavara@gmail.com

Dr. Eugenio Sanz

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid, España
Profesor Aranguren s/n
Teléfono: +34 (91) 3365 351
esanz@caminos.upm.es