

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN UN SECTOR ACUÍFERO DE LA SERRANÍA ORIENTAL DE RONDA SOMETIDO A DIFERENTES CONDICIONES HIDROCLIMÁTICAS

Juan Antonio Barberá Fornell y Bartolomé Andreo Navarro

Dpto. de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). 29071 – Málaga

jabarbera@uma.es, andreo@uma.es

RESUMEN

El manantial del Barranco de Palomeras constituye uno de los principales puntos de descarga visible de agua subterránea del acuífero carbonático jurásico de la Sierra de los Merinos (Serranía de Ronda oriental, Málaga). El control hidrogeológico de la surgencia y de tres sondeos, perforados a distintas profundidades y situados a escasos metros de aquella, ha permitido registrar los cambios hidrodinámicos (caudal/nivel piezométrico), de mineralización y de temperatura del agua subterránea producidos en las inmediaciones de la zona de descarga, durante un período hidroclimático altamente variable. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto cierta variabilidad de la mineralización y temperatura del agua drenada por el manantial y de la existente en la columna de los sondeos, como consecuencia de episodios de recarga de poca magnitud y/o duración en el tiempo, lo que refleja el drenaje de flujos kársticos de procedencia preferentemente superficial (zona no saturada). En condiciones de elevada recarga, la red de flujo llega a saturarse por completo y se generan limitaciones en el sistema de drenaje, como resultado de la activación de flujos de agua verticales ascendentes, más mineralizados y química y térmicamente homogéneos, que demuestran la contribución predominante de la zona saturada del acuífero (de sectores más profundos y/o alejados) al caudal del manantial del Barranco de Palomeras.

Palabras clave: acuífero carbonático, zona de descarga puntual, contribución de flujo subterráneo, Serranía de Ronda oriental

1. INTRODUCCIÓN

La Serranía de Ronda oriental se localiza al NO de la provincia de Málaga y ocupa una superficie aproximada de 103 km². Está constituida por relieves orientados según la dirección NE-SO, de modo que en las crestas de las montañas afloran calizas y dolomías jurásicas y los valles se encuentran excavados en margas y margocalizas cretácicas (Cruz Sanjuán, 1974 y 1980; Martín-Algarra, 1987). El conjunto de rocas mesozoicas se encuentra, al NE, cabalgado por arcillas y areniscas cretácico-terciarias del Flysch del Campo de Gibraltar y, hacia el SO, está en contacto (discordante) con las calcarenitas y margas del Mioceno superior que constituyen el relleno detrítico de la Depresión de Ronda.

En el sector NO de la Serranía de Ronda oriental, se encuentran las sierras de los Merinos y Colorado (Fig. 1), las cuales muestran estructuras plegadas en anticlinal con charnela subhorizontal. Los pliegues tienen una dirección NE-SO y muestran una ligera inmersión hacia el NE. El anticlinal de la Sierra de los Merinos, con dirección aproximada N60E está limitado por dos fallas inversas que ponen en contacto la estructura principal, tanto al N como al S, con dos pliegues sinclinales constituidos por margas y margocalizas cretácicas (Fig. 1). En la parte SO de la Sierra de los Merinos, afloran arcillas con evaporitas triásicas, que forman el núcleo del anticlinal.

La Sierra de los Merinos constituye un acuífero de gran espesor (varios centenares de metros de potencia), con importante desarrollo de permeabilidad (secundaria) por fracturación y/o karstificación. La alimentación se produce fundamentalmente a partir de la infiltración de agua de lluvia a través de los afloramientos de calizas y dolomías jurásicas. Por su parte, la descarga de agua subterránea se lleva cabo en régimen natural, principalmente hacia su borde NE, (y de forma visible) por el manantial del Barranco de Palomeras (en adelante BP), situado a cota 560 m s.n.m., situado en un pequeño afloramiento de calizas jurásicas (~ 100 m²) que hay al

S del pueblo de Serrato, en el cauce del barranco homónimo (Fig. 1, recuadros inferiores). No obstante, podría existir transferencia de recursos hídricos subterráneos hacia otros sistemas hidrogeológicos, tanto al NE como hacia el SO (acuífero detrítico de la Depresión de Ronda).

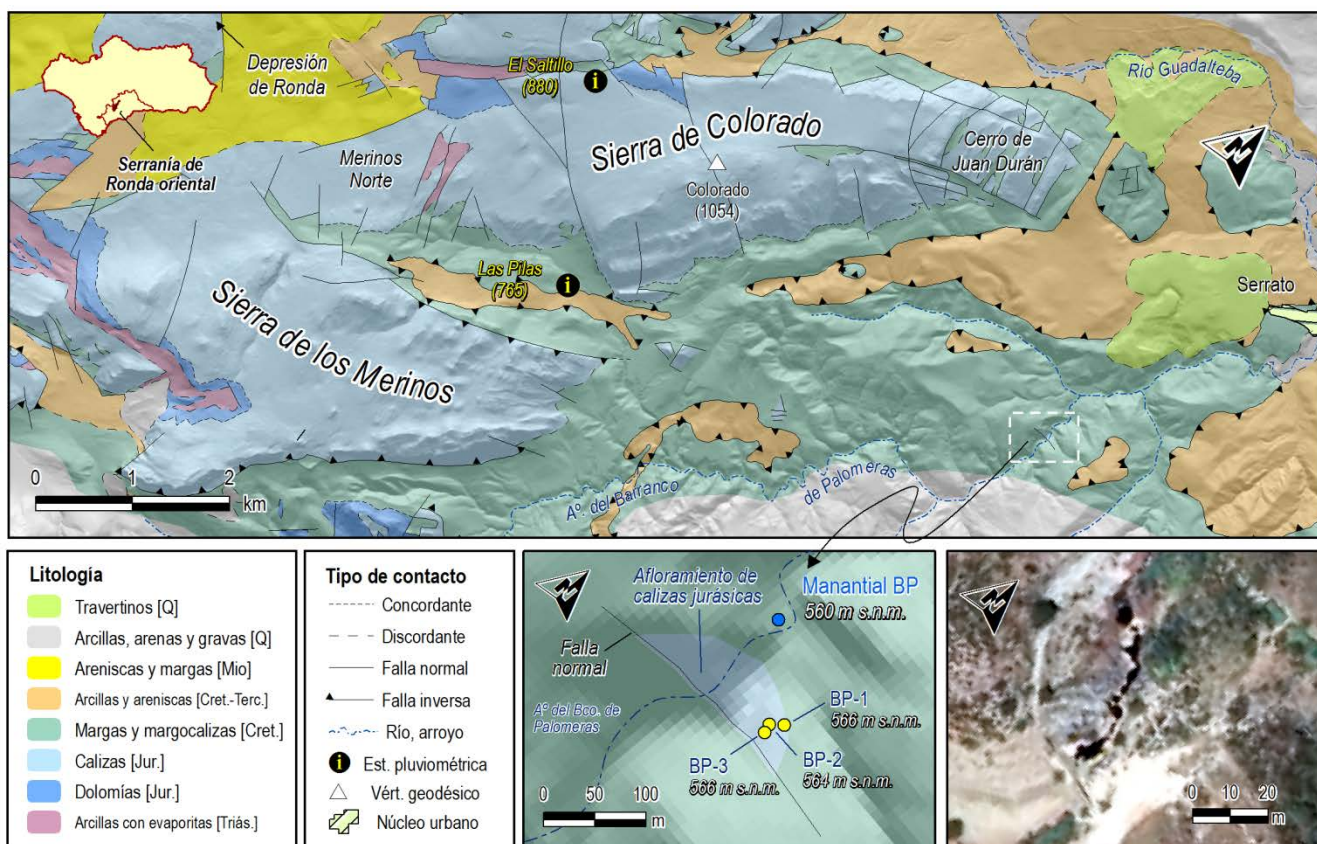


Figura 1. Localización geográfica de la Serranía de Ronda oriental y características geológicas de las sierras de Colorado y de los Merinos (recuadro superior). En detalle (recuadros ampliados en la parte inferior), se muestra la zona de descarga del manantial del Barranco de Palomeras (BP) y la ubicación de los tres sondeos perforados en las inmediaciones de la misma (BP-1, BP-2 y BP-3)

En el entorno del manantial se localiza una batería de tres piezómetros, emplazados a escasos metros entre sí (Figs. 1 y 2): Palomeras-1 (BP-1), Palomeras-2 (BP-2) y Palomeras-3 (BP-3), con 380, 172 y 220 m de profundidad, respectivamente. La columna litológica elaborada con datos del sondeo BP-1 (DGOH-GHUMA, 1995) pone de manifiesto la complejidad de la estructura geológica a escala local (Fig. 2), de modo que la perforación intersectó un pequeño afloramiento calizo con forma de cuña, aparentemente desconectado (en la vertical) de la potente formación jurásica infrayacente.

2. MÉTODOLÓGÍA DE TRABAJO

El trabajo de campo han consistido en la realización de numerosas campañas para la toma de medidas puntuales de caudal drenado por la surgencia (BP) y de niveles piezométricos en los tres sondeos ubicados en las inmediaciones. El caudal de descarga del manantial se ha medido con un micromolinetete OTT[®] C2, cuya precisión es del $\pm 2\%$. La sonda piezométrica utilizada fue de la misma marca (modelo KL 010), con 300 m de cinta. Se realizaron medidas puntuales de conductividad eléctrica (CE) y temperatura

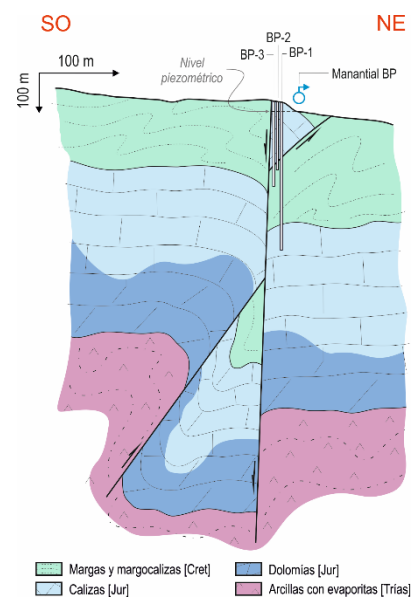


Figura 2. Estructura geológica de detalle en el área del manantial BP (modificado de DGOH-GHUMA, 1995)

del agua drenada por la surgencia con un conductivímetro portátil dotado de sensor de temperatura WTW[®] 340i (precisión de $\pm 0,5$ % para la CE). La periodicidad de estas medidas fue variable, semanal por término medio. Además, se han realizado siete perfiles verticales de CE y temperatura del agua en el sondeo BP-1, en diferentes condiciones hidrodinámicas, para conocer las variaciones espacio-temporales de mineralización y temperatura del agua subterránea en profundidad. Los registros se tomaron cada 1-5 m en la vertical del sondeo. Este último es uno de los pocos piezómetros profundos (no surgentes) existente en el área de estudio, lo que posibilita realizar registros verticales hasta profundidades de 300 m con la sonda multiparamétrica utilizada (SEBA[®] KLL-Q).

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de la serie temporal de caudales del manantial BP y del registro piezométrico de los sondeos BP-1, BP-2 y BP-3

El hidrograma del manantial BP muestra, en general, de 1 a 3 crecidas significativas por año hidrológico (Fig. 3), dependiendo de la distribución temporal y magnitud de las precipitaciones que ocasionan dichas crecidas. A medida que las lluvias son más abundantes y concentradas en el tiempo, menor es el número de eventos hidrodinámicos y viceversa.

Las escasas precipitaciones caídas a comienzos del año hidrológico 2007/08 no fueron suficientes para evitar la desecación del manantial (a partir de octubre de 2007; Fig. 3), hasta la llegada de las lluvias de enero de 2008, que reactivaron la emergencia de agua en el punto de descarga. No obstante, las crecidas hidrodinámicas más importantes del año se produjeron durante los meses de marzo y mayo.

Durante el año hidrológico 2008/09, el hidrograma presenta mayores valores de caudal (promedio de 46 l/s) y variaciones más suaves, como consecuencia de la distribución temporal de las precipitaciones (Fig. 3). No obstante, en el hidrograma se aprecian 3 crecidas, correspondientes a las lluvias de noviembre de 2008 y enero-febrero y marzo de 2009. El agotamiento de la surgencia se produjo lentamente, durante más de 6 meses, hasta finales de 2009.

El hidrograma del año hidrológico 2009/10 (aunque incompleto) muestra una sola crecida muy marcada, como respuesta a las lluvias excepcionales y abundantes que tuvieron lugar entre diciembre de 2009 y marzo de 2010 (Fig. 3). En este período se registró el 92 % de la precipitación anual acumulada en la estación de Las Pilas (765 m s.n.m; Fig. 1). La consecuencia directa fue un aumento progresivo de caudal, desde apenas 15 l/s hasta 192 l/s, en 3 meses. Además, estas precipitaciones cuantiosas y concentradas en el tiempo provocaron que los caudales se mantuvieran en el rango de valores máximos (152-192 l/s) registrados durante el período de investigación, desde finales de enero hasta, como mínimo, mediados de mayo de 2010 (Fig. 3).

Por otro lado, la evolución piezométrica de los sondeos BP-1, BP-2 y BP-3 reproducen en gran medida las variaciones hidrodinámicas observadas en el manantial BP (Fig. 3). Generalmente, las series de datos del nivel piezométrico muestran cambios (tanto ascensos como descensos) relativamente amortiguados y desfasados en el tiempo con respecto a los principales eventos de precipitación (Fig. 3). La magnitud de los ascensos piezométricos puede ser del orden de 20 m (BP-1/BP-3). Además, se observa que, por encima de la cota 562 m s.n.m., el nivel piezométrico en BP-1/BP-3 (representados con la misma simbología en Fig. 3) asciende con respecto al de BP-2. En definitiva, a medida que la cota piezométrica es más elevada (a partir de 562 m s.n.m.), la diferencia de nivel (ΔCP) entre sondeos es mayor.

3.2 Registros de conductividad eléctrica y temperatura del agua drenada por el manantial BP y en la vertical del sondeo BP-1

Los valores de CE de la surgencia presentan cambios más significativos durante el primer año hidrológico (diciembre de 2007 a agosto de 2008; Fig. 3). A partir del año 2007/08 y hasta el final del período de estudio, los valores de este parámetro muestran una tendencia ascendente, interrumpida por leves disminuciones de duración variable (octubre de 2008 a marzo de 2009 y enero de 2010). Las aguas subterráneas drenadas en la

última y mayor crecida registrada (enero a mayo de 2010; Fig. 3) mostraron una disminución puntual de CE coincidente con el primer evento de recarga efectivo, seguida de valores relativamente estables - en torno a 525 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - durante el régimen mantenido de caudales elevados (152-192 l/s) a partir de febrero de 2010.

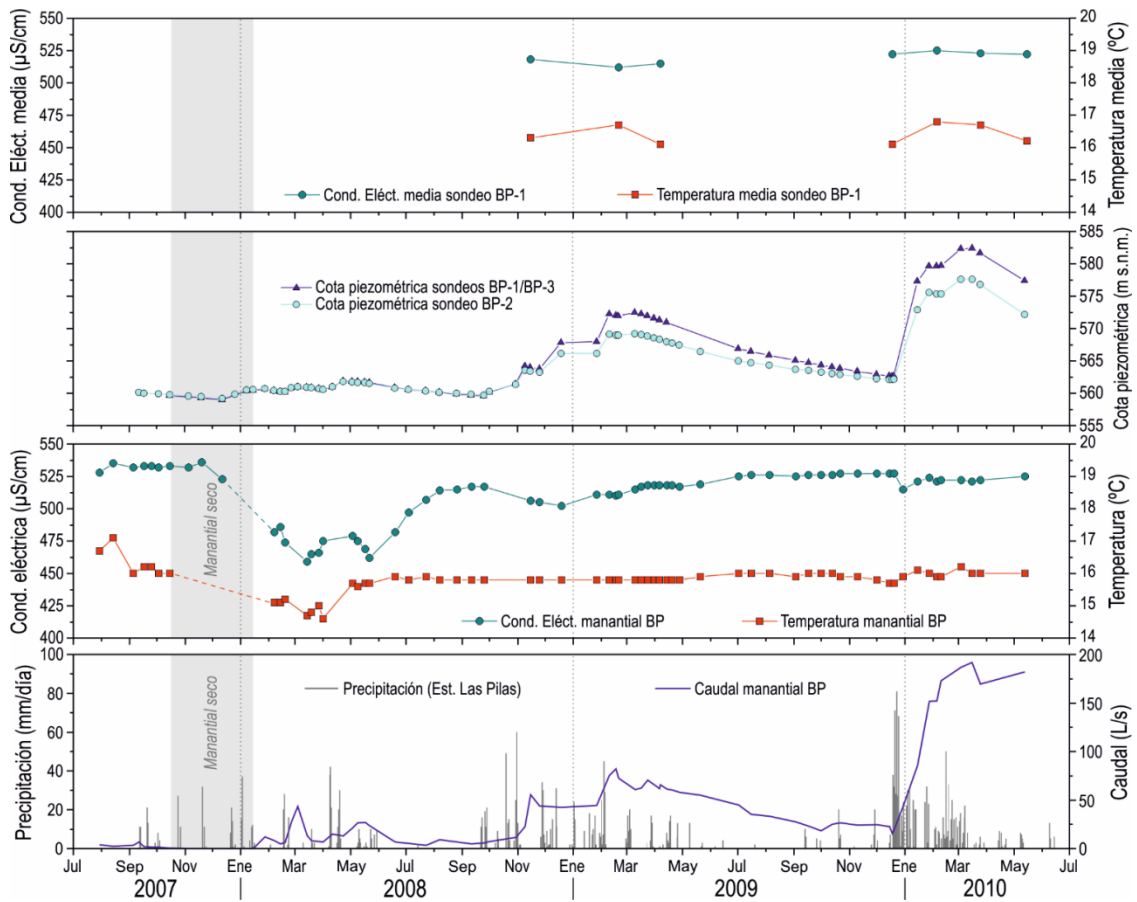


Figura 3. Serie temporal de datos de caudal, conductividad eléctrica y temperatura del agua drenada por el manantial BP y evolución piezométrica de los sondeos BP-1, BP-2 y BP-3 (esta última coincide con la del sondeo BP-1). En el gráfico superior se muestran los valores medios de conductividad eléctrica y temperatura del agua (considerando los datos de los primeros 200 m de columna) en cada uno de los siete perfiles verticales realizados durante el período de investigación en el sondeo BP-1

Los cambios térmicos registrados en las aguas del manantial muestran un doble comportamiento (Fig. 3): en el primer año hidrológico (2007/08) son de cierta magnitud, mientras que durante los dos años siguientes (2008/09 y 2009/10) resultan ser de escasa cuantía. Durante el año hidrológico 2007/08 se produjo un descenso generalizado de la temperatura del agua. La evolución de la temperatura del agua a lo largo del año hidrológico 2008/09 es prácticamente invariante. En el año 2009/10 (Fig. 3) se suceden ligeros descensos y ascensos de temperatura del agua ($\Delta\text{Temp} \leq 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$), que podrían estar relacionados con la recarga ocurrida durante este período.

La evolución temporal descrita por los valores medios de CE del agua en la vertical del sondeo BP-1 (Fig. 3, gráfico superior) muestra aumentos progresivos de mineralización del agua que terminan retornando al estado pre-crecida, a imagen de los ascensos piezométricos registrados en el mismo sondeo. En cambio, los valores medios de temperatura del agua a lo largo de la columna, bien disminuyen ligeramente (período 2008/2009) o bien se mantienen casi invariantes (2009/2010).

Las variaciones de CE y temperatura del agua observadas en la vertical del sondeo difieren según el estado hidrodinámico del acuífero (Fig. 3, gráfico superior, y Fig. 4). Así, en el primer registro de CE y temperatura del agua (15/11/2008), efectuado durante el tránsito de aguas bajas a altas del año hidrológico 2008/09 (Fig. 4), se aprecia una disminución de la CE y un aumento de temperatura en profundidad. No obstante, esta evolución presenta dos cambios más acentuados de ambos parámetros en 65 m (hasta este metro se registraron los valores más bajos de temperatura de todos los registros) y 172 m, que coinciden, respectivamente, con un

tramo más fracturado, en el que se estimó la entrada de un caudal de 15-20 l/s durante la perforación del sondeo, y con el límite de la tubería entre los tramos ranurado y ciego, coincidente con el contacto entre calizas (tramo superior) y margocalizas.

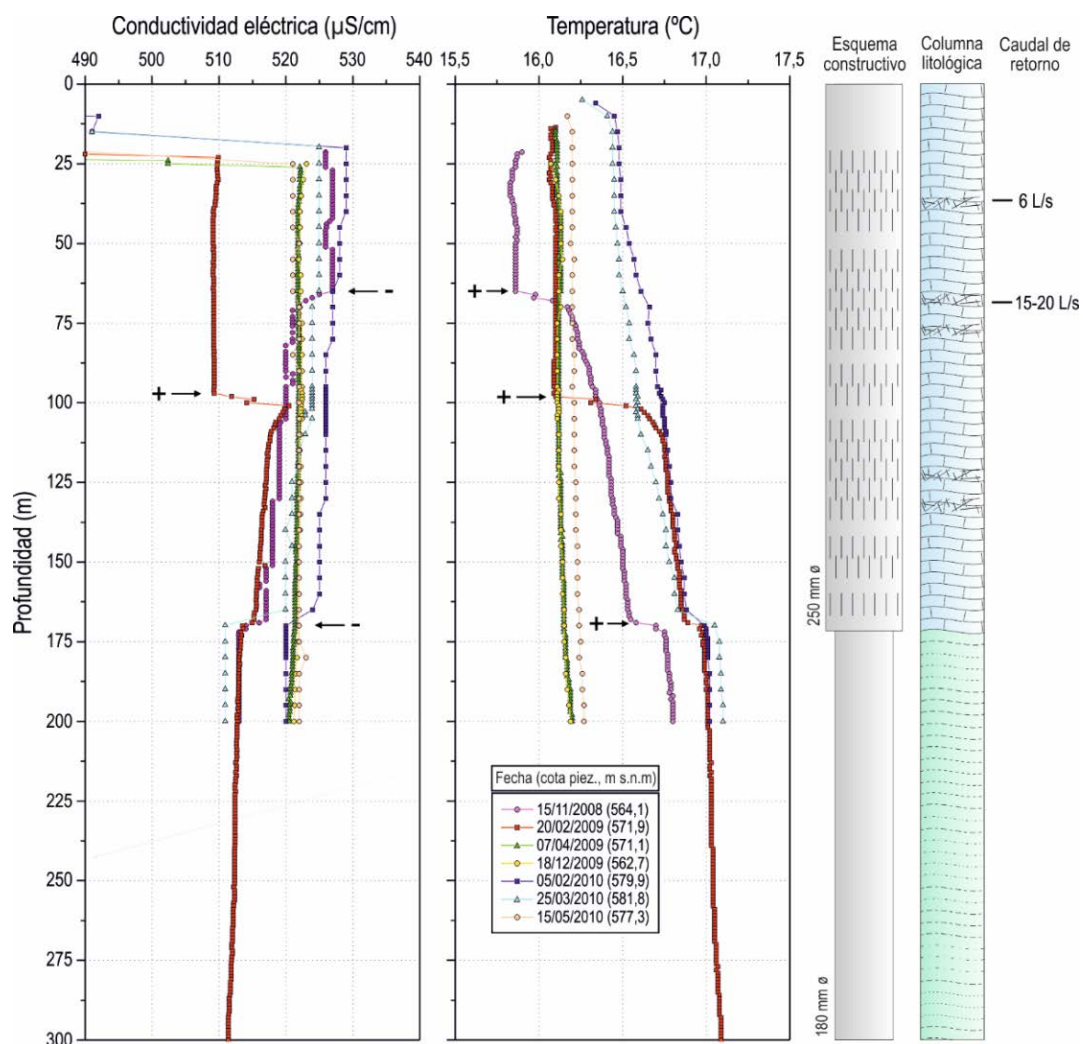


Figura 4. Perfiles verticales de conductividad eléctrica y temperatura del agua llevados a cabo en el sondeo BP-1, en diferentes condiciones hidrodinámicas (véase panel superior de la figura 3). Se adjunta, además, el esquema constructivo de la captación, los materiales atravesados durante la perforación (e información relativa al grado de fracturación/karstificación de los niveles productivos) y el caudal de retorno medido según se profundizaba en la obra (DGOH-GHUMA, 1995)

El perfil vertical efectuado el día 20/02/2009 coincidió con la cota piezométrica más elevada registrada durante la crecida hidrodinámica del año hidrológico 2008/09 (Figs. 3 y 4). En él se observa una disminución significativa de la mineralización (valores mínimos de CE de todos los registros) y menor temperatura del agua del sondeo en los primeros 98 m, seguidos en profundidad de valores de CE del agua similares a los registrados en el perfil anterior y mayores valores de temperatura del agua.

Los registros efectuados los días 05/02/2010 y 25/03/2010 coincidieron prácticamente con los dos máximos piezométricos medidos durante la crecida de gran magnitud del año 2009/10 (Figs. 3 y 4). Ambos registros presentan, hacia la parte más profunda del sondeo, una disminución de los valores de CE y un aumento de la temperatura del agua. Asimismo, en los dos registros se midieron los mayores valores de CE y temperatura del agua en la parte más superficial del sondeo y los valores más elevados de temperatura en profundidad.

Los perfiles de CE y temperatura del agua llevados a cabo los días 07/04/2009, 18/12/2009 y 15/05/2010 no muestran variaciones significativas de ambos parámetros (Fig. 4). Los valores de CE del agua están comprendidos entre 520 y 525 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los de temperatura entre 16 y 16,2 $^{\circ}\text{C}$.

3.3 Relación manantial BP - sondeo BP-1

En la figura 5A, se representan la cota piezométrica medida en el sondeo BP-1 frente al caudal del manantial BP. Ambas variables muestran una correlación no lineal, polinómica (de segundo orden), estadísticamente significativa ($R^2 = 0,89$), de modo que buena parte de las observaciones se sitúan en el espacio definido por los intervalos de confianza (95%). De forma adicional, se ha representado la variación de cota piezométrica (ΔCP) entre los sondeos BP-1/BP-3 y BP-2 mediante el tamaño del símbolo (esfera). Se aprecia que la ΔCP aumenta proporcionalmente al caudal del manantial BP o al nivel piezométrico de BP-1 (~ carga hidráulica del acuífero), a lo largo del período de estudio, hasta valores máximos de ~ 5 m (enero-mayo de 2010; Figs. 3 y 4).

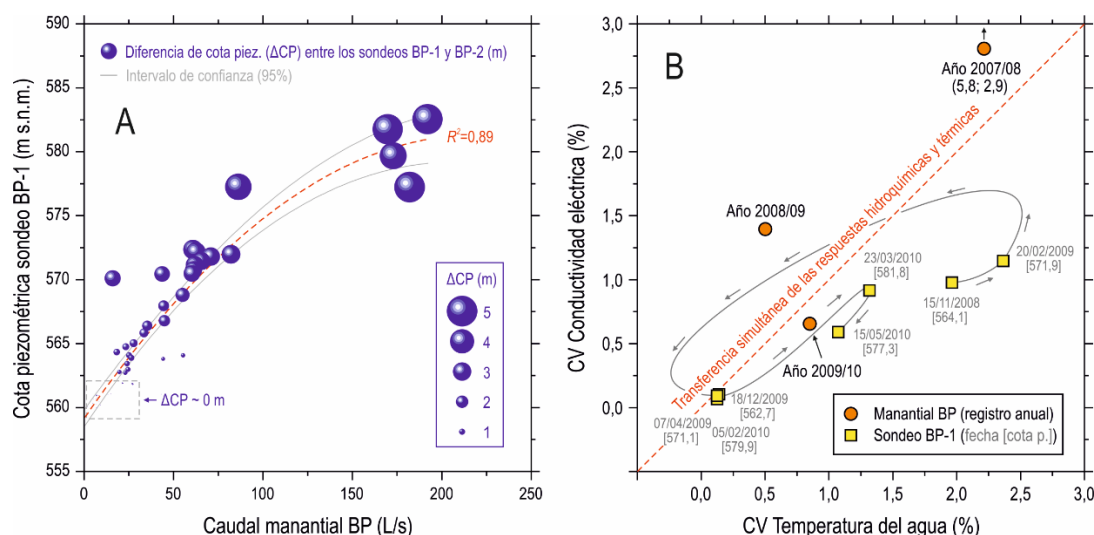


Figura 5. Relación entre la cota piezométrica medida en el sondeo BP-1 y el caudal registrado en el manantial BP (A). De forma adicional, se representa en este mismo gráfico (mediante esferas de color azul de tamaño variable) la diferencia de cota piezométrica observada entre los sondeos BP-1 (o BP-3) y BP-2. En el gráfico B, se ilustra la relación entre los coeficientes de variación calculados con los datos de CE y temperatura del agua en la surgencia (por año hidrológico) y en la vertical del sondeo BP-1 (por registro realizado, considerando los datos de los primeros 200 m de columna de agua). En el caso del sondeo, se describe la trayectoria temporal de los perfiles realizados

La variabilidad estadística (coeficiente de variación) de los datos obtenidos de CE y temperatura del agua en el manantial BP (registro correspondiente a cada año hidrológico del período de estudio) y en cada uno de los perfiles verticales efectuados en el sondeo BP-1 (datos de los primeros 200 m) se ilustran en la figura 5B. En el caso de la surgencia, se observa que, a medida que el año hidrológico representado es más húmedo desde el punto de vista hidroclimático (ver Fig. 3), los coeficientes de variación de CE y temperatura tienden a equipararse (o aproximarse a la línea 1:1 de la Fig. 5B). Esto último se aprecia claramente en el año hidrológico 2009/2010.

Al trazar la evolución temporal de la variabilidad estadística calculada para cada uno de los perfiles verticales, se aprecian mayores coeficientes de variación de la temperatura del agua que de la CE en los perfiles representativos de condiciones de aguas intermedias-altas (15/11/2008, 20/02/2009, 23/03/2010 y 15/05/2010). En todos estos casos, los coeficientes –de ambos parámetros– son más elevados ($CV > 0,5$) que en el resto de perfiles. En aquellos registros efectuados en condiciones de aguas altas s.s. (07/04/2009, 18/12/2009 y 05/02/2010), los coeficientes de variación calculados para ambos parámetros son equivalentes y próximos a 0.

4. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

La infraestructura hidrogeológica (zona de descarga puntual y tres sondeos perforados a distintas profundidades en las cercanías de la surgencia) utilizada para el presente trabajo ofrece la posibilidad de

analizar conjuntamente las respuestas del acuífero en el punto de confluencia de líneas de flujo subterráneo (manantial) y a lo largo de las columnas de sondeos, que captan parte de la red de drenaje kárstica. Esto último aporta una perspectiva adicional para el estudio de la distribución de flujos de agua subterránea en zonas más profundas del acuífero.

Las series temporales de parámetros hidrogeológicos (caudal, CE y temperatura del agua) registrados en el manantial BP muestran fluctuaciones relativamente suaves y amortiguadas en el tiempo (p.e. decrecidas prolongadas en el tiempo), como consecuencia de la transferencia de agua subterránea hacia el punto de descarga (Fig. 3). Esta evolución también se reproduce, incluso más suavizada, en la serie de datos de niveles piezométricos en los sondeos. Desde el punto de vista de la jerarquización de la red de fracturas o conductos kársticos, las observaciones anteriores indicarían, en términos generales, un desarrollo moderado de la fracturación y/o karstificación (Barberá, 2014). Este grado intermedio de karstificación podría explicar la morfología característica del hidrograma del manantial en el año hidrológico 2009/2010 (Fig. 3), con una evolución plana en el rango de caudales elevados (152-192 L/s), lo que se interpreta como una restricción del drenaje kárstico en condiciones excepcionales de recarga (Bonacci, 2001), muy probablemente debido a las dimensiones limitadas del sistema de fracturas y/o conductos que permiten la evacuación de caudales hacia el punto de descarga. La relación hidráulica entre la descarga del manantial y la cota piezométrica del sondeo BP-1 (Fig. 5A), a partir de una regresión polinómica, en la que se registran niveles piezométricos menos elevados de lo que cabría esperar para el tramo de caudales de descarga elevados en condiciones de colinearidad, sería distintiva de un flujo presurizado. Esta relación cota-descarga reforzaría la hipótesis de restricción en el drenaje kárstico. Este fenómeno hidrodinámico ha sido observado por Barberá y Andreo (2011) en el manantial de Cañamero o de Serrato, punto de descarga principal de la Sierra de Colorado (Fig. 1), a escasos 3 km de distancia de la zona de descarga del manantial BP.

Las condiciones hidroclimáticas registradas a lo largo del período de observación, progresivamente más húmedas, han permitido conocer con mayor detalle los mecanismos de transferencia del flujo subterráneo hacia el manantial BP. Así, durante el primer año hidrológico (2007/2008), la morfología más puntiaguda del hidrograma posterior a la desecación del manantial por la escasez de precipitaciones y los valores más bajos y variables de CE y temperatura del agua (Figs. 3 y 5B) ponen de manifiesto el drenaje de un flujo subterráneo rápido, a partir de una red de fracturas/conductos parcialmente saturada, probablemente procedente de zonas superficiales del acuífero (zona no saturada). En este sentido, Barberá (2014) determinó valores medios de carbono orgánico total –trazador natural característico del suelo– progresivamente decrecientes (0,71 mg/L en el período 2007/2008; 0,4 mg/L en 2008/2009; y 0,35 mg/L en 2009/2010) en el agua subterránea drenada por el manantial BP, lo que apoyaría la hipótesis afirmada previamente.

En el período 2008/2009, el registro de una dilución de poca magnitud seguida de un aumento de la mineralización del agua drenada por el manantial, su estabilidad térmica y la medida de cotas piezométricas en el sondeo BP-1 por encima del umbral piezométrico 562 m s.n.m. ($\Delta CP > 0$) (Fig. 3), da cuenta de la activación de la red drenaje, con la llegada de agua inicialmente poco mineralizada, que posteriormente es sustituida por agua con mayor CE y, por tanto, con tiempos de residencia más prolongados. Esta transición hidrodinámica (flujo de aguas bajas-altas), queda reflejada en el registro vertical de noviembre de 2008 (Fig. 4), en el que se determinaron cambios significativos de CE y temperatura del agua en profundidad (con CV más elevados, Fig. 5B) asociados a la entrada lateral de flujo a partir de niveles calizos más productivos.

Durante el último año hidrológico (2009/2010), a lo largo del cual las condiciones de recarga resultaron excepcionalmente altas, se midieron los caudales más elevados de la surgencia, así como la máxima diferencia de cotas piezométricas entre los sondeos BP-1/BP-3 y BP-2 (~ 5 m), cuyo valor se prolongó a lo largo de varios meses. La diferencia de niveles entre sondeos, mayor a medida que la recarga es elevada e intensa, se produce debido a que los sondeos BP-1/BP-3, más penetrativos que BP-2, captan flujos subterráneos correspondientes a equipotenciales de mayor cota en condiciones excepcionales de recarga y se transmite desde la potente formación calizo-dolomítica confinada (Fig. 2) hacia el pequeño afloramiento calizo en superficie. La homogeneización de los valores (máximos) de CE y temperatura del agua drenada por el manantial, pero también en profundidad, en el agua del sondeo BP-1 (perfiles 18/12/2009 y 15/05/2010; Fig. 4), confirma la existencia de flujos de agua verticales ascendentes (similares a los descritos por Larruzea, 2007), movilizados a través de un sistema presurizado (fracturas/conductos totalmente saturados). En estas circunstancias se produce la completa homogeneización química y térmica del agua subterránea (CV de CE y temperatura

mínimos en perfiles 07/04/2009, 18/12/2009 y 05/02/2010; Fig. 5B) procedente de zonas más profundas (zona saturada) - y/o de mayor recorrido - del acuífero carbonático de la Sierra de los Merinos, con mayor interacción agua-roca y en equilibrio térmico con la roca.

5. CONCLUSIONES

El análisis de la variabilidad espacio-temporal del caudal/nivel piezométrico, mineralización y de la temperatura del agua subterránea, tanto en el manantial del Barranco de Palomeras como en sondeos próximos perforados a distintas profundidades, ha permitido precisar el funcionamiento hidrogeológico de la zona de descarga visible del acuífero carbonático jurásico de la Sierra de los Merinos (Serranía de Ronda oriental, Málaga), en condiciones hidroclimáticas altamente cambiantes.

Las respuestas hidrodinámicas registradas en el manantial del Barranco de Palomeras muestran cambios progresivos y de magnitud variable, según la cuantía e intensidad de la recarga. De ello se desprende que el sector acuífero drenado por la surgencia presenta un desarrollo intermedio de la jerarquización del drenaje kárstico, lo que le confiere cierta capacidad de regulación. En situaciones excepcionales de recarga, como las que tuvieron lugar durante el período de estudio, el drenaje muestra dificultades para el desalojo de los caudales drenados debido muy probablemente a las dimensiones limitadas del sistema de fracturas y/o conductos que alimentan al punto de descarga.

En períodos hidroclimáticos altamente cambiantes, con años hidrológicos secos que evolucionan a muy húmedos, la recarga del acuífero provoca el drenaje de agua subterránea progresivamente más mineralizada y con mayor temperatura a medida que se satura la red kárstica, hasta alcanzar por completo la homogeneidad química y térmica. De esta forma, el volumen de agua procedente de las zonas más superficiales del acuífero, más frío y menos mineralizado, tiende a reemplazar paulatinamente al volumen almacenado en profundidad en el acuífero (y probablemente proveniente de sectores distantes), con un mayor tiempo de contacto con la roca y en equilibrio térmico con la misma. En estado de máxima saturación de la red kárstica (a partir de la cota 562 m s.n.m., en el sondeo BP-1), las respuestas hidroquímicas y térmicas se transfieren de forma simultánea y ciertamente atenuadas.

Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución a los proyectos de investigación P06-RNM 02161 de la Junta de Andalucía y CGL2008-06158 BTE y CGL2012-32590 de la DGICYT, así como al Grupo de Investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía. Se agradece la labor de corrección del revisor/a anónimo del Comité Científico.

REFERENCIAS

- Barberá, J.A. y Andreo, B. (2011): Functioning of a karst aquifer from S Spain under highly variable climate conditions, deduced from hydrochemical records. *Environmental Earth Sciences* 65: 2337–2349.
- Barberá (2014): Investigaciones hidrogeológicas en los acuíferos carbonáticos de la Serranía oriental de Ronda, provincia de Málaga. Tesis Doctoral Univ. de Málaga, 661 p.
- Bonnacci, O. (2001): Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal* 9: 328-338.
- Cruz-Sanjulián, J.J. (1974): Estudio geológico del sector Cañete la Real-Teba-Osuna (Cordillera Bética, región occidental). Tesis Doctoral Univ. de Granada, 374 p.
- Cruz-Sanjulián, J.J. (1980): Mapa Geológico y Memoria de la hoja nº 1037 (Teba). Mapa Geológico de España E1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME. Depósito legal: M-9215-1991.
- DPM-IGME-GHUMA (2007): Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga. Diputación Provincial de Málaga, Instituto Geológico y Minero de España y Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (Eds.). 3 tomos. 704 p.

- GHUMA-CHSE (1995): Informe sobre los trabajos realizados en el marco del estudio hidrogeológico para el aprovechamiento de los acuíferos de la Sierra del Valle de Abdalajís y de la cuenca del Guadalteba para el abastecimiento a Málaga. Plan Metasequía. Informe inédito.
- IGME (1983): Investigación hidrogeológica de las cuencas del sur de España (Sector Occidental). Sistemas acuíferos nº 35 Mioceno Detrítico de Ronda y nº 36 Mesozoico Calizo Dolomítico de la Serranía de Ronda. Informe técnico nº 4, inédito.
- Larruzea, I. (2007): Hidrogeología de las sierras de Badaia y Arkamo (U.H. Calizas de Subijana, País Vasco). Investigación mediante la aplicación conjunta de diversas técnicas con especial incidencia en la dinámica intra-pozo. Tesis Doctoral Univ. del País Vasco, 462 p.
- Martín-Algarra, A. (1987): Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Externas de la Cordillera Bética. Tesis Doctoral Univ. de Granada, 1171 p.