

Respuesta de los acuíferos en el área de Mula (Murcia, SE de España) a los movimientos sísmicos de 1999

Aquifer response to earthquakes of 1999 in Mula (Murcia, SE Spain)

M. Martínez Parra y J.J. Durán Valsero

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. C/Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

ABSTRACT

In February 1999th an earthquake near the city of Mula (Murcia, SE Spain) happened with 4,8 magnitude. Later, occurred more earthquakes, the main of them in May, with 3,0 magnitude. In epicentral zone there are thermal springs with special hydrochemical characteristics, related with the presence of important regional faults. This work discusses possible alterations of groundwater physico-chemical parameters caused by these earthquakes. Oscillations in concentrations have been observed, mainly in sulphate.

Key words: hydrochemical changes, Mula earthquake, Murcia, thermal waters.

Geogaceta, 36 (2004), 131-134

ISSN:0213683X

Introducción

La región de Murcia es una de las que registran mayor actividad neotectónica y sísmica de la Península Ibérica. Desde 1993 a 1998 se han registrado 122 terremotos de distinta magnitud.

Desde el punto de vista geológico, la región murciana se sitúa en la Cordillera Bética Oriental. Afloran materiales de las zonas Interna y Externa, situadas en la mitad Sur y Norte, respectivamente. También existen varias cuencas sedimentarias neógenas y cuaternarias. El área estudiada se encuentra situada en la denominada Cubeta de Mula, rellena de sedimentos terciarios (fig. 1).

En relación con la fracturación, existen tres familias de fallas importantes, de dirección NE-SO a NNE-SSO, N60E a E-O y NO-SE. Otras familias secundarias, como las de direcciones N-S, intersectan las anteriores (Fig. 1). Entre las primeras destacan la FAM (Falla de Alhama de Murcia) y la de Bullas-Archena o de Crevillente, con saltos importantes en la vertical, de hasta 500 m. La FAM es uno de los mayores accidentes frágiles regionales, prolongándose más de 90 km desde Huerca-Overa (Almería) a Orihuela (Alicante), afectada por fallas transversales normales. Las fallas NO-SE delimitan la cuenca de Lorca, siendo significativas en el Mar Menor; entre las fallas E-O destacan en la Zona Interna las del Norte de Mazarrón y la de Socovos en la Zona Externa (ITGE-RM, 1991).

En lo relativo a la sismicidad en Murcia, existen referencias históricas desde el año 1048, con una presumible intensidad X-XI (ITGE-RM, 1991). Uno de los últimos, el de Mula de febrero de 1999, alcanzó una intensidad de VI-VII y una magnitud de 4,8. Posteriormente, en mayo de 1999, se produjeron otros sismos en la misma zona. Los sectores sísmicamente activos correspon-

den principalmente a la FAM, al accidente del Segura y a la zona de Bullas-Archena. Estos terremotos están asociados a la reactivación de la falla de Crevillente, con una componente de desgarre importante y epicentro somero, a menos de 10 km de profundidad, aunque las réplicas pueden estar asociadas a fallas próximas, como la de Mula (Martínez-Díaz *et al.*, 2002).

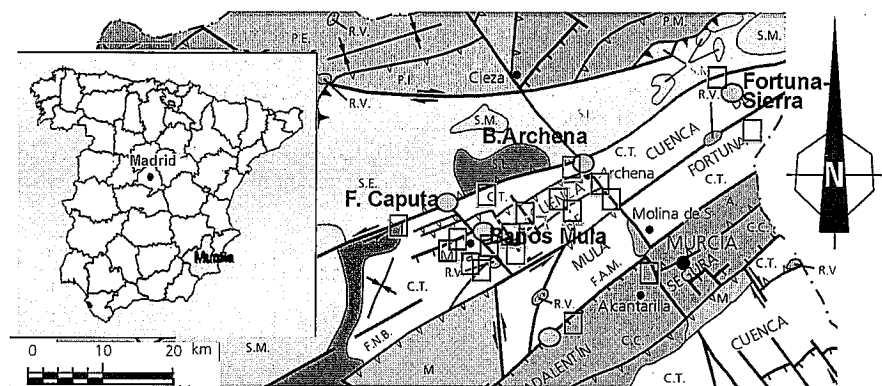


Fig. 1.- Esquema geológico del área de estudio, con indicación de los principales accidentes tectónicos, los epicentros correspondientes al año 1999 (cuadrados) y puntos de aguas termales y otros citados en el texto (círculos) (modificado de Pinuaga y Martínez, 2003). DT: diapiros triásicos, RV: Rocas volcánicas, A: Alpujarride, M: Maláguide, SI: Subbético Interno, SM: Subbético medio, SE: Subbético Externo, PM: Prebético Meridional, PI: Prebético Interno, PE: Prebético Externo, CT: Cuenca Terciaria, CC: Cuenca Cuaternaria, FC: Falla de Crevillente. FNB: Falla NorBética. FAM: Falla de Alhama de Murcia.

Fig. 1.- Geological sketch of the study area. Main faults, epicentres from 1999 earthquakes (squares) and thermal springs (circles) are showed (modified from Pinuaga and Martínez, 2003). DT: Triassic diapirs, RV: Volcanic rocks, A: Alpujarride Complex, M: Maláguide Complex, SI: Internal Subbetic, SM: Medium Subbetic, SE: External Subbetic, PM: Southern Prebetic, PI: Internal Prebetic, PE: External Prebetic, CT: Tertiary Basin, CC: Quaternary Basin. FC: Crevillente fault. FNB: Northbetic fault. FAM: Alhama de Murcia fault.

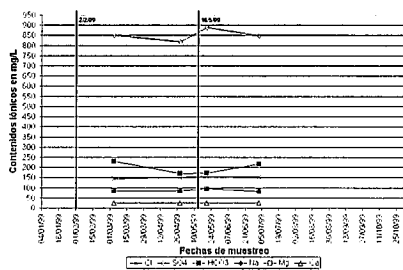


Fig. 2.- Evolución de los principales componentes mayoritarios en las aguas de Baños de Mula. Con las líneas negras se marcan los principales sismos estudiados: Mula (2/2/99) de magnitud 4,8; Archena, Mula (18/5/99) de magnitud 3,0.

Fig. 2.- Evolution of majority groundwater components in Baños de Mula, vertical lines show main earthquakes: Mula (2/2/99) with 4,8 magnitude; Archena, Mula (5/18/99) with 3,0 magnitude.

Los efectos de los terremotos en los acuíferos

La respuesta del medio acuífero ante estímulos de origen sísmico se agrupan, a grandes rasgos, en: variaciones de las condiciones de permeabilidad del acuífero, oscilaciones del nivel piezométrico, variaciones de la calidad física y química de las aguas subterráneas y superficiales, y variaciones del caudal drenado por los manantiales.

Todos estos cambios aparecen generalmente combinados, pero no siempre simultáneamente. En el terremoto de Loma Prieta (California), de magnitud 7,1 se observaron variaciones en los caudales, en las concentraciones de soluto y en el nivel piezométrico (Rojstaczer y Wolf, 1991). Los mecanismos para explicar los cambios en el nivel piezométrico y en las descargas pueden estar relacionados con la expulsión de fluidos sobrepressionados en zonas sismogénicas o al colapso de redes de fracturas de dilatación antes del terremoto, aunque también se ha apuntado a cambios próximos a la superficie: compresión elástica de acuíferos confinados y cambios de permeabilidad episuperficiales. Así, el incremento de caudal se puede asociar a un incremento de la permeabilidad próxima a la superficie (Rojstaczer y Wolf, 1991). También las oscilaciones en el nivel piezométrico pueden estar ocasionadas por la variación de la presión del fluido que puede cambiar las propiedades del acuífero, produciéndose dichas variaciones para equilibrarse las propiedades alteradas (Roeloffs, 1998). Estas variaciones se pueden producir antes, durante y después del sismo, siendo a corto plazo y muy variadas: caídas o ascensos bruscos, pulsaciones,

ascensos y descensos suaves (Kissin et al., 1996). Los efectos en los acuíferos confinados suelen mantenerse más tiempo. Tras el terremoto de Loma Prieta se registraron descensos piezométricos durante seis meses (Rojstaczer y Wolf, 1991) y tras el de Alaska de marzo de 1964 los niveles freáticos no se recuperaron tras un año (Waller, 1964).

Las anomalías presísmicas consisten habitualmente en ascensos de concentraciones en torno a las fallas próximas al hipocentro, aunque estas anomalías pueden cesar semanas o días antes del sismo, como ocurrió a 20 Km del epicentro del terremoto de Hyogo-Ken Nambú (Japón) de 1995 (Tsunogai y Wakita, 1996). Las anomalías postsísmicas son, en general, descensos de la concentración hasta alcanzar la habitual, en función de la magnitud y distancia hipocentral; antes del terremoto de Kobe (Japón) de enero de 1995 y magnitud 7,2 se observaron incrementos en la concentración de Cl⁻ de hasta un 10 % hasta el terremoto y, tras dos meses, esta descendió (Tsunogai y Wakita, 1995). Puede ocurrir que el terremoto incorpore aguas de otros acuíferos, por lo que es preciso conocer las características de las aguas de los diferentes acuíferos del entorno.

Las variaciones hidrométricas suelen corresponder a incrementos de los caudales de descarga en manantiales, como se observó con el terremoto de Kobe (Japón) de magnitud 7,2 (Tsunogai y Wakita, 1995).

Si bien el radón es uno de los elementos de mayor interés para estudiar sus variaciones, en el caso aquí presentado se han usado como indicadores los componentes químicos mayoritarios debido a su facilidad de análisis. Se han observado variaciones en los componentes físicos y

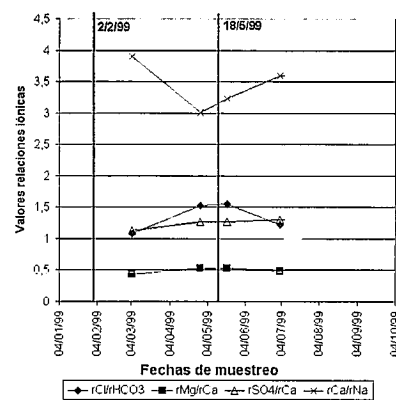


Fig. 3.- Evolución de algunas relaciones iónicas en los Baños de Mula.

Fig. 3.- Evolution of ionic ratios in Baños de Mula spring.

químicos de las aguas subterráneas: en la concentración de iones mayoritarios (Cl⁻, SO₄²⁻), minoritarios (Hg, F, Rn), relaciones iónicas, conductividad eléctrica, temperatura y turbidez.

Los sismos de la Región de Murcia durante el año 1999

En 1999 se produjeron en la Región de Murcia un total de 55 sismos, 35 de ellos situados en la zona de Mula y su entorno inmediato (Tabla I). El de mayor intensidad fue el día 2 de febrero, con epicentro en Baños de Mula e intensidad de 4,8, al que siguieron réplicas y sismos menores hasta el día 18 de dicho mes. Con posterioridad, durante los meses de abril, mayo, julio, agosto y noviembre de 1999 se produjeron otros movimientos sísmicos en Mula y Archena, destacando el del día 18 de mayo con una magnitud de 3,0, que fue claramente percibido por los ciudadanos.

| Fecha | Epicentro | Magnitud | Fecha | Epicentro | Magnitud |
|-----------|-----------|-------------|------------|-----------|----------|
| 2/2/1999 | Mula | 3,6 2,5 2,1 | 9/4/1999 | Mula | 2,2 |
| | | 4,8 3,8 2,8 | | | |
| | | 2,5 2,4 2,6 | | | |
| | | 2,9 2,5 | | | |
| 3/2/1999 | | 3,5 2,8 | 16/5/1999 | Archena | 2,4 |
| 4/2/1999 | Mula | 2,2 2,1 | 18/5/1999 | E Mula | 3,0 |
| | | 2,3 | | | |
| 7/2/1999 | | 2 2,5 | 21/7/1999 | NE Mula | 2,1 |
| 8/2/1999 | | 2,7 2,6 | 19/8/1999 | NE Alhama | 2,4 2,9 |
| 14/2/1999 | | 2,4 | 25/8/1999 | S Fortuna | 2,4 |
| 15/2/1999 | | 2,9 | 31/8/1999 | NE Mula | 2,1 |
| 16/2/1999 | | 2,6 | 14/11/1999 | O Archena | 2,7 |
| 18/2/1999 | | 2,85 2,4 | 23/11/1999 | Mula | 2,7 |

Tabla I.- Sismos registrados en la zona de la Cuenca de Mula (datos procedentes del Instituto Geográfico Nacional).

Table I.- Earthquakes registered in Mula Basin (data from Instituto Geográfico Nacional).

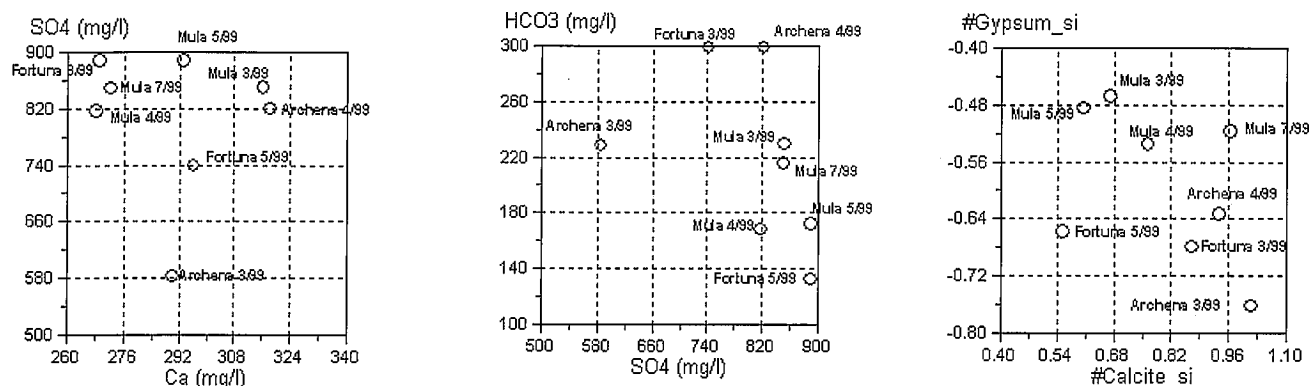


Fig. 4.- Gráficos comparativos, SO₄/Ca (a), HCO₃/SO₄ (b), índice de saturación del yeso/ Calcita (c), en los diferentes puntos de agua estudiados.

Fig. 4.- Comparative graphics, SO₄/Ca (a), HCO₃/SO₄ (b), gypsum and calcite saturation index (c) of studied springs.

Características principales de los puntos de estudio

Tras el terremoto de febrero de 1999 se seleccionaron como puntos de control para estudiar la posible respuesta de los acuíferos frente a los terremotos, las surgencias termales de Baños de Mula, el balneario de Archena, el manantial nuevo de Fortuna-Leana y la fuente Caputa (Fig. 1).

La surgencia termal de Baños de Mula (caudal medio de 65 L/s) se localiza en la localidad del mismo nombre. Es la descarga de un complejo sistema acuífero confinado, constituido por varios centenares de metros de rocas carbonáticas jurásicas y triásicas, cubierto por una secuencia de similar potencia de materiales cretácicos y terciarios margosos. La temperatura de surgencia es de 37,3°C. Al mismo sistema acuífero se encuentra asociado el manantial del Balneario de Archena, situado junto al río Segura y cuyas aguas surgen a una temperatura de 49,7°C. Su caudal no es aforable, conociéndose también aportes difusos al río Segura. El manantial nuevo de Fortuna corresponde a uno de los dos que se emplean en el Balneario de Fortuna-Leana. Surgen con una temperatura de 44,5°C y sus aguas pueden estar asociadas al mismo sistema acuífero de Baños de Mula y Archena o bien a otro sistema termal (Pinuaga y Martínez, 2003). Por último, la fuente Caputa es el drenaje natural del acuífero Herreros.

Resultados y evolución

Se han analizado los cambios acaecidos durante el año 1999 en las aguas subterráneas del entorno del terremoto. Las determinaciones realizadas se recogen en la tabla 2. El primer análisis procede de una muestra recogida el 4 de marzo, 30 días después del

terremoto de M=4,8. No se dispone de analítica fiable previa a este terremoto.

La evolución de los componentes mayoritarios en Baños de Mula muestra, tras el terremoto de febrero, entre las aguas recogidas en marzo y abril, un descenso de la concentración de SO₄²⁻, Ca²⁺ y HCO₃⁻, manteniéndose parecidas las concentraciones de Mg²⁺ y Na⁺. Sin embargo, dos días después del terremoto del 18 de mayo aumentan los contenidos de SO₄²⁻ (8,6%), Mg²⁺ (10,4%) y Ca²⁺ (9,3%), manteniéndose similares los de HCO₃⁻ y Mg²⁺. Transcurrido mes y medio, las aguas muestran descensos generalizados en las concentraciones de SO₄²⁻ (4,3%), Ca²⁺ (7,7%), Mg²⁺ (12,6%) y un fuerte incremento de HCO₃⁻ (24,8%). El Cl⁻ muestra leves ascensos tras el terremoto (4%) para, con posterioridad al terremoto, descender (Fig. 2).

Los elementos minoritarios (Tabla II) analizados son F, As, Cu, Fe y Zn. De ellos, F⁻ y As muestran contenidos que, tras el terremoto de febrero de 1999, disminuyen; tras el sismo de mayo, ascienden de nuevo, más ligeramente en el caso del F⁻.

No se observan tampoco variaciones notables en la temperatura en el agua subterránea en 1999, con una variación máxima de 0,3°C. Con el TSD calculado, se observa que, tras el terremoto de febrero de 1999, se produce un descenso del 7,2% para, tras el terremoto de mayo de 1999, producirse un ascenso del mismo orden y, posteriormente, descender progresivamente un 12%.

Los valores de algunas relaciones iónicas muestran ascensos (rNa/rK, rCl/rHCO₃, rCa/rHCO₃, rCa/rNa, rCl/rSO₄ y rMg/rCa) antes de los terremotos de mayo, para tras los mismos descender en todos los casos excepto para la relación rCa/rNa. En el caso de la rCl/rNa se comporta de manera inversa: disminuye antes

del sismo, para luego incrementar sus valores (Fig. 3).

Comparando algunos de los iones (Figs. 4a, b) se observa variabilidad entre las muestras. La relación SO₄-Ca en Baños de Mula (fig. 4a) muestra una mayor similitud entre las aguas de abril y julio que entre las más próximas a los terremotos (febrero y mayo). Sin embargo esto no resulta tan evidente en la relación HCO₃⁻/SO₄²⁻, en la que los incrementos de SO₄²⁻ no llevan parejos incrementos de HCO₃⁻, lo que podría indicar diferentes aportes para las aguas subterráneas.

La surgencia termal del Balneario de Archena, muestra, entre el 4 de marzo y el 28 de abril (tabla 2), 22 días antes del sismo, fuertes ascensos del contenido en SO₄²⁻ (40,4%), HCO₃⁻ (30,6%), Na⁺ (26,1%) y más leves de Mg²⁺ (22,1%), Ca²⁺ (9,6%), manteniéndose similar el Cl⁻ (1,4%). El incremento de NO₃⁻ podría estar asociado a una incorporación de aguas más superficiales, incluso las del próximo río Segura. La temperatura del agua subterránea prácticamente se mantuvo igual.

Las muestras de Baños de Mula y Archena previas al terremoto del 18 de mayo se tomaron el 28 de abril, 20 días antes del mismo. Sin embargo, en el Balneario de Fortuna, posiblemente asociado al mismo acuífero que los Baños de Mula y Archena (Pinuaga y Martínez, 2003), el muestreo se realizó el 10 de mayo, 8 días antes del sismo de mayo. También se han observado incrementos de SO₄²⁻ (20%), HCO₃⁻ (4,3%), Na⁺ (27,9%), Ca²⁺ (7,6%) y Cl⁻ (3,3%).

La evolución del caudal de Fuente Caputa entre noviembre de 1996 y enero de 1999 es de cierta estabilidad, entre 3,7 y 5,5 L/s; Sin embargo, tras el terremoto de febrero de 1999, la fuente se secó (Rodríguez Estrella, com. pers.), para incrementarse con posterioridad y disminuir

| | Baños de Mula | | | | Balneario de Archena | | Fortuna-Sierra | |
|------------------------|---------------|---------|---------|--------|----------------------|---------|----------------|---------|
| | 4/3/99 | 28/4/99 | 20/5/99 | 2/7/99 | 4/3/99 | 28/4/99 | 4/3/99 | 10/5/99 |
| Fecha | 4/3/99 | 28/4/99 | 20/5/99 | 2/7/99 | 4/3/99 | 28/4/99 | 4/3/99 | 10/5/99 |
| T(°C) | 37,6 | 37,3 | 37,2 | 37,3 | 50 | 49,7 | 44,7 | 44,5 |
| Error analítico (%) | 2,6 | 2,2 | 2,7 | 2,3 | 2,3 | 1,5 | 4,9 | 0,7 |
| TSD calculado | 1759 | 1631 | 1749 | 1563 | 3708 | 4299 | 3915 | 4156 |
| Total aniones (meq/L) | 25,63 | 24,1 | 25,81 | 25,6 | 61,06 | 67,98 | 67,42 | 65,57 |
| Total cationes (meq/L) | 27,01 | 25,17 | 27,27 | 24,44 | 58,35 | 70,12 | 68,34 | 59,49 |
| Cl | 144 | 150 | 156 | 153 | 1600 | 1623 | 1600 | 1653 |
| SO ₄ | 850 | 817 | 888 | 849 | 584 | 820 | 740 | 888 |
| HCO ₃ | 230 | 169 | 173 | 216 | 229 | 299 | 139 | 133 |
| NO ₃ | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 14 | 1 | 1 |
| Na | 93 | 102 | 104 | 87 | 839 | 1049 | 850 | 1087 |
| Mg | 84 | 86 | 95 | 83 | 72 | 88 | 91 | 90 |
| Ca | 316 | 268 | 293 | 272 | 290 | 318 | 296 | 269 |
| K | 11 | 11 | 12 | 10 | 57 | 54 | 10 | 9 |
| F | 1,73 | 1,29 | 1,31 | 1,31 | 2,43 | 2,33 | 2,18 | 2 |
| Fe | 0,03 | 0 | 0,17 | 0 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| Mn | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,023 | 0,028 | 0 | 0 |
| Zn | 0 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cr | 0,007 | 0 | 0,021 | 0 | 0 | 0 | 0,009 | 0 |
| As | 0,017 | 0,012 | 0,018 | 0 | 0,013 | 0 | 0 | 0 |
| Hg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,008 | 0 |

También se han analizado Cu, Pb, Cd y Se con 0 mg/L en todos los análisis y 8,9 mg/L NO₂ en Archena (28/4/99).

Tabla II.- Determinaciones físicas y químicas realizadas en las aguas subterráneas (concentraciones en mg/L, excepto lo indicado).

Table II.- Groundwater analysis (concentration in mg/L; some exceptions are indicated).

progresivamente. Así, el 4 de marzo de 1999, 30 días después del sismo de febrero, se estimaron 30 L/s y, a los 60 días el caudal medido era de 9,71 L/s. No obstante, el sismo de mayo de 1999 no parece manifestar ninguna influencia. Las precipitaciones en el año 1998-99 son escasas, con máximos de 31-40 mm en el mes de marzo.

Discusión y conclusiones

Se ha estudiado la respuesta de los acuíferos ante los movimientos sísmicos acaecidos en la Cuenca de Mula en el año 1999: el del 2 de febrero de 1999 con epicentro en Mula (Mb= 4,8) y el del 18 de mayo de 1999 con epicentro situado al Este de Mula (Mb= 3,0).

Se han observado ciertas variaciones en el contenido químico de los iones mayoritarios-principalmente en el SO₄²⁻-en las relaciones iónicas, en el total de sólidos disueltos (TSD), así como en el caudal emergente; sin embargo, las variaciones resultan prácticamente nulas en los elementos minoritarios analizados y en la temperatura del agua. Estos cambios resultan más evidentes tras los terremotos, aunque tienen distinto signo: en Baños de Mula, dos días después del terremoto de mayo, se produce un aumento en la concentración de SO₄²⁻ (8,6 %), el Mg²⁺ (10,4 %) y Ca²⁺ (9,3 %), acompañado de un incremento del TSD (7,2 %). Previamente a este sismo, sin embargo, se observan descensos en las concentraciones iónicas, aunque esto podría tratarse más de una recuperación del comportamiento hídrico

anterior al terremoto de febrero de 1999, que a un indicador presísmico.

En los manantiales termales de Archena y Fortuna sí se producen fuertes incrementos 20 y 8 días antes, respectivamente, al terremoto de mayo. Incrementos de cloruros y sulfatos han sido descritos asociados antes y después del terremoto de Kobe, para descender progresivamente (M= 7,2) (Tsonugai y Wakita, 1995).

Estas variaciones, relativamente bruscas, pueden ser naturales o bien influenciadas por los sismos. Las fuentes termales, asociadas a acuíferos confinados, son más sensibles a los cambios tensionales volumétricos (Koizumi *et al.*, 1996). También pueden asociarse a la entrada de aguas subterráneas procedentes de otros acuíferos (Tsonugai y Wakita, 1995). Como posibles explicaciones se apuntan: 1) la movilización de las aguas intersticiales de los poros, bien del acuífero o bien de las margas terciarias suprayacentes; 2) incorporación de iones procedentes de posibles yesos y sales en los depósitos margosos terciarios suprayacentes o de las arcillas y evaporitas triásicas que constituyen el sustrato del acuífero. Esta incorporación estaría causada por la fricción originada por el conjunto de esfuerzos tectónicos. Tras la influencia sísmica, el acuífero recuperaría su funcionamiento natural.

Parece advertirse en la evolución hidroquímica del agua subterránea de Baños de Mula una cierta similitud entre las aguas de abril y julio, las más alejadas temporalmente de los sismos, mientras

que las aguas de marzo y mayo de 1999, más próximas a los mismos, presentan una composición diferente; esto se observa en los gráficos SO₄/Ca y IS yeso/ IS calcita (Fig. 4c). No obstante, no se dispone de una serie analítica amplia y continuada para determinar con mayor seguridad el comportamiento natural del sistema acuífero y establecer qué tipo de influencia se ha podido producir debido a los movimientos sísmicos.

Por otra parte, el estudio de la evolución temporal de Fuente Caputa muestra tras el terremoto de febrero de 1999 un brusco descenso acompañado posteriormente de un fuerte incremento del caudal para, nuevamente, ir descendiendo de manera gradual. Dicha fuente se encuentra asociada a un acuífero independiente del que origina las surgencias termales de Mula, Archena y Fortuna.

La utilización de los elementos mayoritarios puede resultar adecuada para estudiar la influencia de los movimientos sísmicos del área de Mula, asociados a las fallas NO-SE como la de Bullas-Archena o Crevillente, e incluso para establecer variaciones previas a los mismos. Sin embargo, para ello, es preciso disponer de estudios más detallados, con determinaciones diarias de la conductividad y de las concentraciones de los iones más significativos.

Referencias

- ITGE-Región de Murcia (1991): 99pp. 5 mapas.
- Kissin, I.G.; Belikov, V.H.; Ishankuliev, G.A. (1996): *Tectonophysics* 265, 313-326.
- Koizumi, N.; Kano, Y.; Kitagawa, Y.; Takahashi, M.; Nishimura, S.; Nishida, R. (1996): *Journal of Physics of the earth*. N° 44, 4. 373-380.
- Martínez-Díaz, J.J.; Rigo, A.; Louis, L.; Capote, R.; Hernández-Enrile, J.L.; Carreño, E.; Tsige, M. (2002): *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1), 23-33.
- Pinuaga, I. y Martínez, M. (Eds.) (2003): *IGME*. 192 pp.
- Roeloffs, E. (1998): *Journal of geophysical research*, 103, B1. 869-889.
- Rojstaczer, S.; Wolf, S. (1991): *Open File Report 91-567, US Geological Survey, Menlo Park, California*. pp. E51-E64.
- Tsonugai, U. y Wakita, H. (1995): *Science*. V. 269, 61-63.
- Tsonugai, U. y Wakita, H. (1996): *Journal of Physics of the earth*, 44 (4), 381-390.
- Waller, R.M. (1964): *Geological Survey Professional Paper 544-B*. 17 pp. 1 Plate.