

Consideraciones hidrogeoquímicas sobre el acuífero detrítico costero de Bou Ahmed (Marruecos)

Hydrogeochemical aspects about the detritic coastal aquifer of Bou Ahmed (Morocco)

Aida El Attar ⁽¹⁾, Karim El Morabiti ⁽¹⁾, Luis Molina⁽²⁾, Francisco Sánchez-Martos ⁽²⁾ y Younes El Kharim ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geología. Universidad Abdelmalek Essaadi. Facultad de Ciencias. 2121 Tetuán. Marruecos. aida2408@yahoo.fr; kmorabit@yahoo.fr; ykharim@yahoo.fr

⁽²⁾ Departamento de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería. 04120 Almería. España. Imolina@ual.es; fmartos@ual.es

ABSTRACT

The salinity of the waters of the detritic aquifer of Bou Ahmed (Morocco) is very diverse. Based on their hydrogeochemistry, two types of water have been differentiated. The less saline group of waters (electrical conductivity less than 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) is directly related to the surface waters of the two rivers that feed the aquifer. The more saline group (1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - 3.900 $\mu\text{S}/\text{cm}$) corresponds to sampling points along the valley sides. Their greater salinity is a consequence of the longer contact time with the marly sandstones, which has allowed ion exchange processes to develop. In addition, waters have an elevated HCO_3^- content as a result of the influence of a deep source of CO_2 .

Key words: Coastal aquifer, hydrogeochemical evolution, Bou Ahmed

Geogaceta, 46 (2009), 159-162
ISSN: 0213683X

Introducción

El acuífero de Bou Ahmed está situado sobre la costa mediterránea de Marruecos y tiene aproximadamente 11 km² de extensión (Fig. 1). El clima de la región es mediterráneo, caracterizado por dos estaciones bien diferenciadas: una húmeda y fresca, desde Octubre hasta Abril; y otra seca y calurosa, entre Mayo y final de Septiembre (El Attar, 2004).

El valle de Bou Ahmed esta rodeado por terrenos metamórficos de la unidad Sidi-Ahmed el Filali que pertenecen a las unidades Sébtides que constituyen el substrato. Es una fosa tectónica formada por subsidencia en la cual durante la trasgresión pliocena se produjo una sedimentación margosa arenosa (D.R.H, 1994). Sobre estos materiales se depositan una serie de terrazas cuaternarias constituidas por facies detríticas fluviales formadas por conglomeradas y arenas continentales.

A partir de los estudios geofísicos realizados mediante sondeos eléctricos verticales y de una serie de perforaciones se ha definido la geometría y potencia de acuífero detrítico Bou Ahmed. Es un acuífero libre formado por arenas y gravas aluviales que se superponen a las margas arenosas que afloran en los bordes del valle (D.G.H, 2000). Los materiales metamórficos constituyen el

substrato impermeable de la unidad (Fig. 1). La profundidad de substrato tiene 124 m en la parte central y 90 m en la costa.

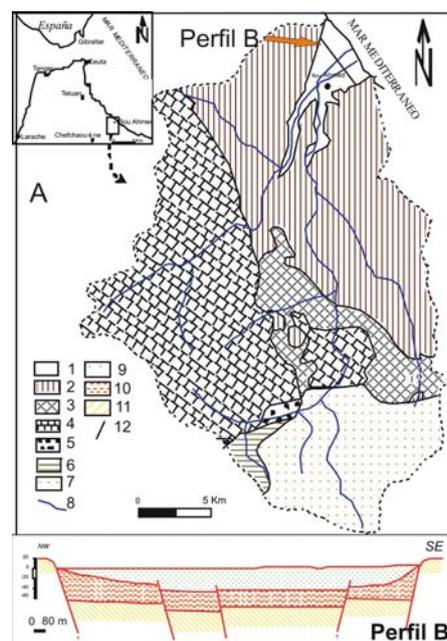
La piezometría realizada en septiembre de 2005 muestra que las curvas isopiezas varían de 48 m s.n.m hasta 4 m s.n.m en las proximidades del mar, con una dirección de flujo desde el SW hacia NE, siguiendo la dirección del río Tihissasse (Fig. 2). Su forma es conver-

gente y radial e indica que la alimentación principal se produce a partir del río, aunque también pueden existir aportaciones laterales en el sector SE del valle.

El objetivo de este trabajo es la caracterización hidrogeoquímica del acuífero detrítico costero de Bou Ahmed, identificando los principales factores que condicionan su variabilidad hidrogeoquímica.

Fig. 1.- Situación geológica del valle Bou Ahmed. 1: Materiales detríticos; 2: Peridotitas, gneis y micasquistos (Unidades Sébtides); 3: Esquistos y rocas carbonatadas (Unidades Ghomarides); 4: Dorsal Calcárea. 5: Calizas con intercalaciones margosas (Unidad Beni Darkoul); 6: Margas y margocalizas; 7: Flysch; 8: Red hidrográfica. (Modificado de El Attar et al., 2007). Perfil hidrogeológico transversal al valle de Bou Ahmed. 9: Aluviones; 10: Margas arenosas; 11: Substrato metamórfico; 12: Falla supuesta. (Modificado de D.G.H., 2000).

Fig.1.- Geological situation of the Bou Ahmed valley. 1: Detritic deposits; 2: Peridotites, gneiss and micaschists (Sebtide Units); 3: Schists and carbonate rocks (Ghomaride Units); 4: Dorsal Calcareous. 5: Limestones with marly intercalations (Beni Darkoul Unit); 6: Marls and margolimestones; 7: Flyschs; 8: Hydrographic network. (modified from El Attar et al., 2007). Hydrogeological cross section of the Bou Ahmed valley. 9: Alluvia; 10: Sandy marls; 11: Metamorphic substratum; 12: Assumed geoelectrical fault. (modified from D.G.H., 2000).



	Puntos	C.E.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Área central	1	858	340	92	164	0	79	5	65	51
	3	1090	328	142	120	0	120	7	67	44
	8	1300	370	157	104	3	153	1	56	41
	5	1060	314	92	123	3	84	4	74	42
	2	1182	387	159	124	4	128	16	82	34
	6	1400	365	162	97	0	143	5	77	44
	9	1100	309	123	95	2	112	4	64	40
	10	936	193	82	121	2	55	4	70	28
	12	834	292	45	114	2	42	3	80	33
	13	837	265	54	126	1	59	4	80	25
	14	785	273	44	138	1	38	3	82	37
	15	634	280	32	98	0	31	2	80	27
	23	913	288	120	104	0	81	3	76	36
	24	944	271	54	94	3	69	3	63	24
	26	996	328	88	85	0	91	4	85	16
Áreas laterales	4	2300	518	511	127	3	420	9	68	42
	7	1800	439	299	117	3	223	1	87	40
	11	1460	299	244	134	8	206	4	52	51
	16	2300	407	403	116	2	291	4	96	27
	17	3000	526	744	130	0	438	9	94	25
	18	2900	568	696	116	9	388	13	59	62
	19	5200	742	702	130	7	432	22	136	84
	20	1900	476	203	124	6	144	4	92	55
	21	3800	776	685	104	9	462	9	196	35
	22	3800	727	741	127	0	452	17	144	86
	25	3500	544	934	108	0	427	12	244	69
	28	3500	575	651	82	8	413	12	121	48
	29	3900	525	878	108	1	409	23	203	78
30	1300	332	214	108	7	120	4	105	32	
31	1500	350	203	88	7	140	3	97	23	
32	1900	371	393	130	7	149	5	211	34	
33	3300	489	688	204	8	284	18	298	63	
Río El Kanar	636	232	28	67	0.03	75	4	119	74	
Río Bouhya	530	183	28	36	0.02	44	3	120	42	

Tabla I.- Datos hidroquímicos correspondientes a las aguas superficiales (río El Kanar y río Bouya) y a las aguas subterráneas, diferenciando los dos grupos definidos a lo largo del texto. C. E. Conductividad eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$. Iones en mg/L .

Table I.- Hydrochemical data corresponding to the surface waters (rivers El Kanar and Bouya) and groundwaters, distinguishing the two groups defined in the text. C.E. Electrical conductivity in $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ions in mg/L .

Metodología

Para conocer las características hidroquímicas del acuífero se realizó un muestreo en 32 en puntos acuíferos durante Septiembre de 2005 (Fig. 2). Además se han muestreado las aguas superficiales de los ríos El Kanar y Bouhya que atraviesan el valle de Bou Ahmed.

La conductividad eléctrica se midió in situ. Los análisis químicos se efectuaron en el Laboratorio de la Agencia de la Cuenca Hidráulica Loukkos en Tetuán. En la tabla I se muestran los valores de los parámetros analizados en cada punto agrupados según los dos sectores que se han definido en el área. Sobre estos datos se ha aplicado un análisis de componentes principales (ACP).

Resultados y Discusión

La salinidad en las aguas subterráneas oscila entre $600 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $3.800 \mu\text{S}/\text{cm}$,

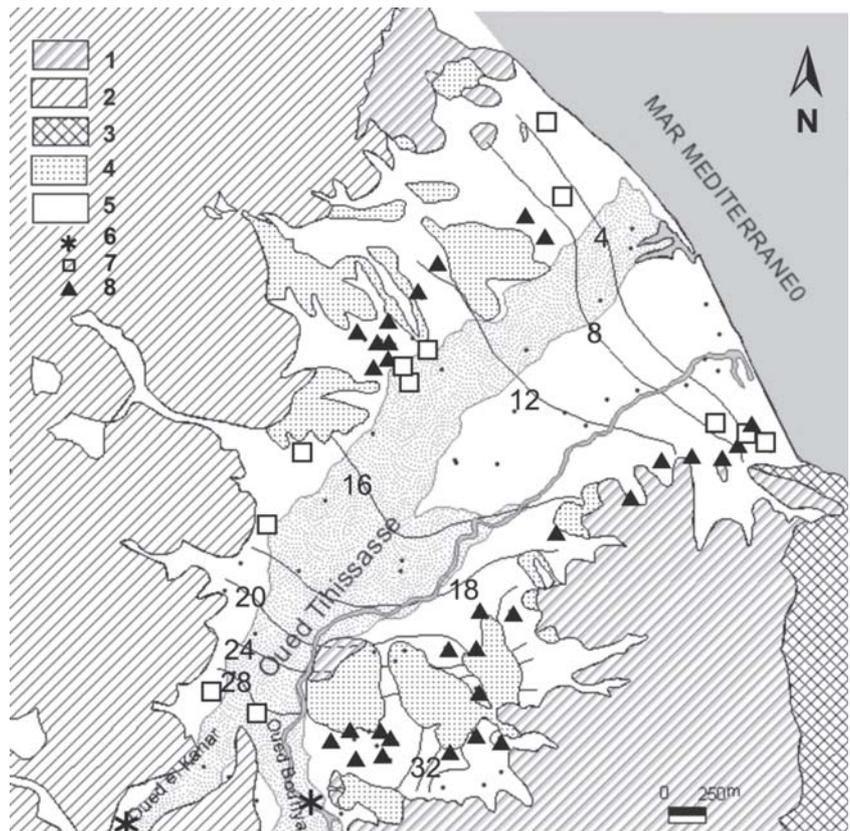


Fig. 2.- Esquema geológico del valle de Bou Ahmed, representando la piezometría del acuífero detrítico en septiembre de 2005. 1: Gneiss; 2: Micaschists and Pegmatites, 3: Kinzigites, 4: Margas arenosas, 5: Gravas y arenas aluviales. Red de puntos muestreados indicando los grupos definidos en el texto: 6: Aguas superficiales de los ríos El Kanar y Bouhya. 7: Área central, 8: Áreas laterales.

Fig. 2.- Geological scheme of the Bou Ahmed valley showing the aquifer piezometry in September 2005. 1: Gneiss; 2: Micaschists and pegmatites, 3: Kinzigites, 4: Sandy marls, 5: Alluvial sands and gravels. Water sampling points, highlighting the two hydrogeochemical groups defined in the text. 6: Surface water from the rivers El Kanar and Bouhya. 7: Points situated in the centre part of the valley. 8: Points situated along the valley sides.

solamente un punto alcanza $5.200 \mu\text{S}/\text{cm}$. Las facies varían desde bicarbonatadas cálcicas hasta cloruradas sódicas con una ausencia total de facies sulfatadas y/o magnésicas. Las aguas superficiales de los dos ríos tienen una salinidad baja ($630 - 530 \mu\text{S}/\text{cm}$) y facies bicarbonatadas cálcicas. (Tabla I, Fig. 3).

El ACP se ha aplicado a todos los datos, incluyendo las aguas superficiales y las subterráneas, al objeto de interpretar la evolución hidrogeoquímica del área, teniendo en cuenta su relación con las aguas superficiales. Mediante este análisis se definen dos componentes que en conjunto explican el 71,5 % de la varianza, con un valor más elevado en el componente I (55,1 %) que el II (16,4%).

La disposición de las variables con respecto a estos dos componentes se ha representado en la figura 4A. El componente I agrupa a las variables asociadas con la concentración salina (HCO_3^- , Cl^- , Na^+) en el extremo positivo. Este compo-

nente se asocia a los factores que determinan en gran medida la salinidad de las aguas ligada a procesos naturales, fundamentalmente en relación con la disolución de sales. Es significativa la asociación del HCO_3^- que alcanzan altos valores en todos los puntos del área, especialmente en los puntos con más salinidad. El NO_3^- se encuentra en los valores negativos del componente I, muy alejado del resto de las variables. Esta variable está relacionada con procesos de contaminación antrópica.

Las observaciones se distribuyen muy dispersas a lo largo de los dos componentes (Fig. 4 B). Con respecto al componente I, existe un gradiente de acuerdo con el incremento de salinidad. Los puntos de las aguas superficiales y los de menor salinidad ($< 1.400 \mu\text{S}/\text{cm}$) están muy agrupados, con valores negativos del eje I. Estos puntos están situados en la zona central del valle. El resto de puntos con salinidad superior ($> 1.300 \mu\text{S}/\text{cm}$) se dis-

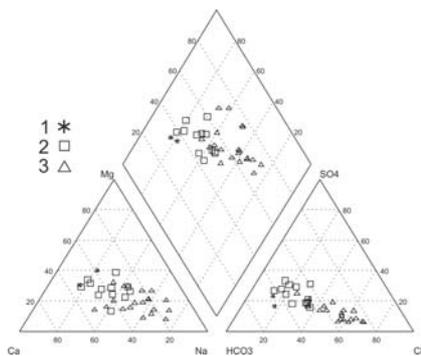


Fig. 4.- Distribución de los parámetros químicos (A) y de las observaciones (B) en los componentes I y II del ACP.

Fig. 4.- Distribution of physicochemical variables (A) and observations (B) in the components I and II of the ACP.

ponen muy dispersos en el gráfico, como consecuencia los diferentes procesos hidrogeoquímicos que actúan conjuntamente y afectan al quimismo de sus aguas. Estos puntos se extienden fundamentalmente a lo largo de las dos áreas laterales del valle. También se separan los puntos que alcanzan valores de NO_3^- más

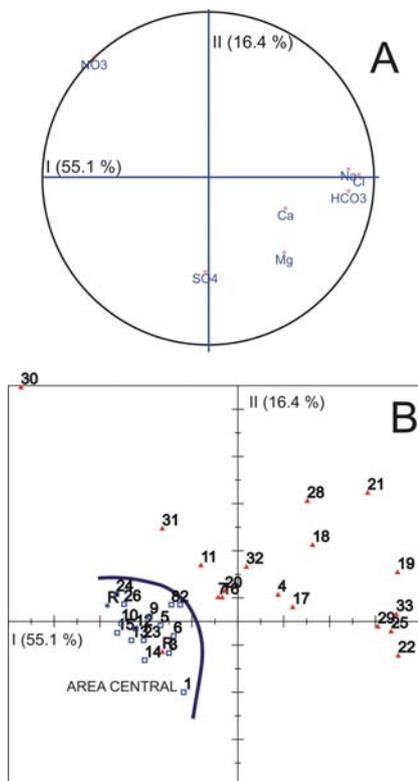


Fig. 3.- Diagrama de Piper con los datos correspondientes a las aguas superficiales (1) y a las aguas subterráneas, donde se ha separado los dos grupos definidos: Área central (2) y Áreas laterales (3).

Fig. 3.- Piper diagram using data corresponding to the surface waters (1) and groundwaters, distinguishing the two groups defined: Central area (2) Lateral areas (3).

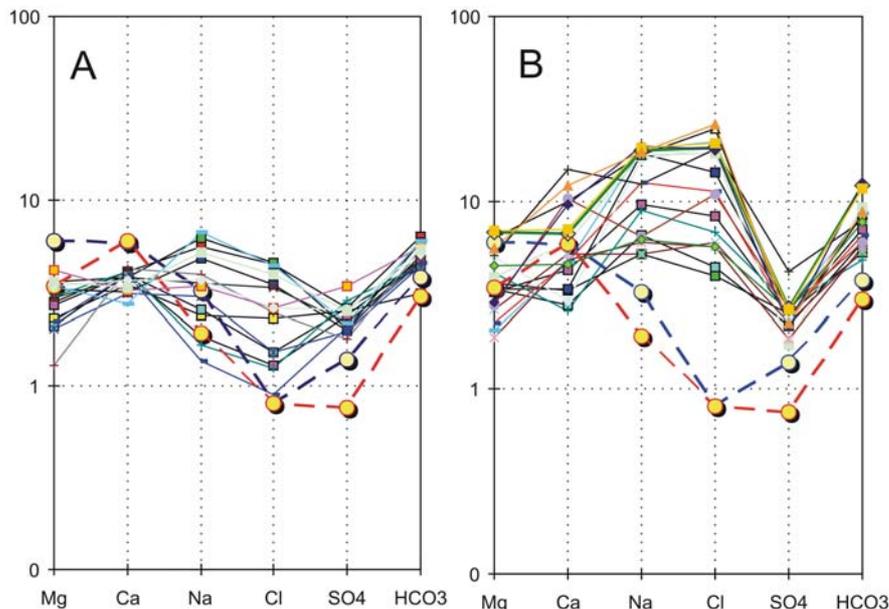


Fig. 5.- Diagrama de Schoeller-Berkaloof en el que se han separado los grupos definidos en el texto: área central (A) y áreas laterales (B). En ambos gráficos se señala con línea discontinua la representación de las aguas superficiales.

Fig. 5.- Schoeller-Berkaloof diagram, separating the groups defined in the text: central area (A) lateral area (B). The discontinuous line in both graphs corresponds to the surface waters.

elevados, y salinidad más baja en los valores positivos del eje II.

De acuerdo con la disposición de los materiales aflorantes, las características de los puntos acuíferos y considerando los resultados del ACP, los puntos se han dividido en dos grupos correspondientes a los puntos situados en el área central y en las áreas laterales (Tabla I). El área central del valle incluye a todos los puntos relacionados directamente con los depósitos aluviales donde la topografía es más llana. La conductividad es la más baja de todo el área (inferior a 1.400 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Los iones con contenidos más elevados, son HCO_3^- , Cl^- y Na^+ , mientras que el contenido en SO_4^{2-} es siempre inferior a 140 mg/L, solo un punto alcanza 164 mg/L (Tab. 1). En las dos áreas laterales del valle se encuentran un conjunto de puntos que están muy cercanos o incluso situados directamente sobre los materiales margoso arenosos de edad plioceno que bordean el valle (Fig. 3). La conductividad de sus aguas oscila entre 1.300 - 3.900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alcanzando en un punto 5.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los iones más elevados son también HCO_3^- , Cl^- y Na^+ . El SO_4^{2-} posee un valor más estable (Tabla I).

Las aguas correspondientes a los puntos situados en el área central del valle presentan una evolución directa a partir del agua superficial, con un aumento gradual de la salinidad, desde 630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta tendencia mues-

tra un ligero aumento de los contenidos iónicos (Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-}) con respecto a las aguas superficiales (Fig. 5).

A lo largo de los bordes del valle se encuentra un conjunto de afloramientos separados entre si y correspondientes a materiales margoso arenosos de edad plioceno con baja permeabilidad. En los materiales detríticos aluviales cercanos se encuentra un grupo de puntos acuíferos, con características hidroquímicas diferentes al resto. La conductividad eléctrica tiene valores superiores a 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta alcanzar valores máximos de 5.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los mayores contenidos salinos se alcanzan en algunos puntos que están alejados de la costa y tienen los mayores contenidos en Cl^- , Na^+ y Ca^{2+} . Sus aguas tienen una mayor salinidad que los puntos situados en el área central del valle y sus relaciones iónicas son diferentes a las aguas superficiales (Fig. 5). Estos puntos están alejados del flujo preferencial, más rápido, a través de los depósitos aluviales. Los contenidos salinos más elevados se asocian con la circulación más lenta a través de estos materiales de reducida permeabilidad lo que favorece el aumento del contacto agua roca. Esto favorece la disolución de sales y se eleva el contenido en Cl^- . Además se desarrollan algunos procesos modificadores, fundamentalmente de intercambio iónico, asociados con la circulación de aguas bicarbonatadas cálcicas a través de las margas arenosas pliocenas. De hecho en

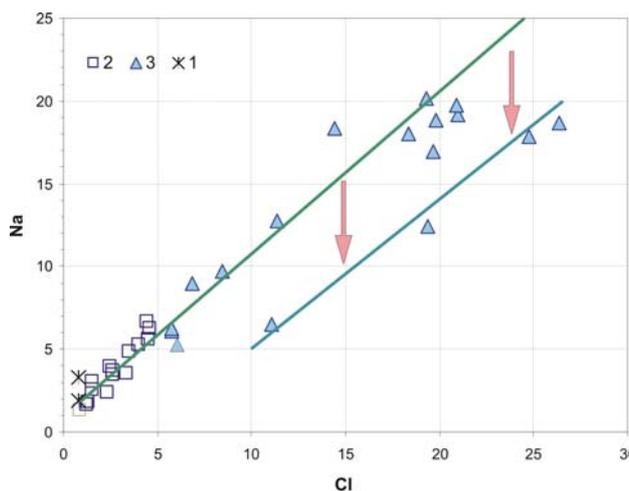


Fig. 6.- A: Relación entre Cl⁻ y Na⁺ (meq/L), diferenciando los grupos definidos: Aguas superficiales (1), Área central (2) y Áreas laterales (3). B: Representación lineal de los contenidos iónicos de los puntos ordenados con una salinidad creciente en los dos sectores diferenciados en las Áreas laterales. La situación de los puntos se encuentra en la Fig. 3. Datos en mg/L.

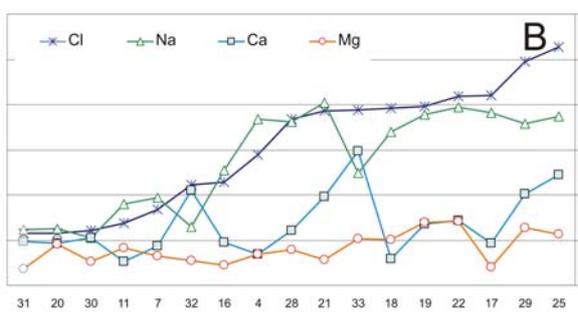


Fig. 6.- A: Ratio Cl⁻ y Na⁺ (meq/L), distinguiendo the groups defined: Superficial water (1), Central area (2) and Lateral areas (2). B: Linear representation of the ion content of the sampling points, ranked by increasing salinity in the two sectors A: Central area, B: Lateral areas. The situation of the sampling points is given in figure 3. Data in mg/L.

los puntos con mayor contenido en Cl⁻ se observa que la evolución del contenido en Na⁺ y Ca²⁺ presenta tendencia opuesta, con aumento del contenido de Ca²⁺ y descenso de contenido en Na⁺. Estos puntos son los que muestran un déficit de Na⁺, con respecto a la tendencia general que poseen estos dos iones para todo el acuífero (Fig. 6). Esto induce a pensar en el desarrollo de procesos de intercambio iónico, tal y como han sido descritos en numerosas áreas costeras, con la presencia de materiales margosos arenosos (Tellam *et al.*, 1986; Appello y Postma, 1993; Fidelibus *et al.*, 1992; Molina *et al.*, 1999).

Otro aspecto significativo desde el punto de vista hidroquímico son los altos contenidos en HCO₃⁻ que se alcanzan: los valores medios son 415 mg/L, casi un 30 % de los puntos tiene concentraciones superiores a 500 mg/L y tres puntos superan ligeramente los 700 mg/L. Todo esto induce a pensar que esta anomalía debe corresponder con algún proceso de carácter regional, en relación con una posible influencia de CO₂ de origen profundo. La tectónica de la zona es muy activa, por lo que las fallas que afectan a Rif pueden favorecer la influencia de los fluidos hidrotermales, a menudo enriquecidos

por los iones metálicos y los gases (El Morabiti, 2000).

Consideraciones finales

El acuífero de Bou Ahmed es un acuífero detrítico costero situado en un estrecho valle en el que afloran lateralmente depósitos margoso arenosos de edad plioceno. La salinidad de las aguas es diversa y a partir de los datos hidroquímicos se han diferenciado dos grupos de aguas que corresponden a evoluciones diferentes. Un grupo incluye a las captaciones situadas directamente sobre los materiales aluviales, sus aguas tienen menor salinidad y están directamente relacionadas con las aguas superficiales de los dos ríos que alimentan al acuífero. El segundo grupo, con aguas más salinas, incluye los puntos enclavados en los bordes del valle, donde afloran los materiales margosos pliocenos. Su evolución hidrogeológica es ligeramente diferente, como consecuencia del mayor tiempo de contacto agua roca, identificándose algunos procesos de intercambio iónico. Un aspecto significativo de todo área son los altos contenidos en HCO₃⁻ que presentan las aguas, lo que se relaciona con una posible influencia de CO₂ de origen profun-

do favorecido por la tectónica activa del Rif.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto «Caracterización hidrogeológica del acuífero de Bou Ahmed (Marruecos) A/014404/07 de la Agencia Española de Cooperación Internacional y con la colaboración del proyecto CGL2007-63450/HID financiado por el MEC. A. El Attar ha disfrutado de una beca de la AECI. Agradecemos los comentarios de los revisores que han mejorado la calidad final del trabajo.

Referencias

Appello, C.A.J. y Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, 536 p.
 Arad A, Kafri V, Halice K y Brenner I. (1986). *Chemical Geology*, 54: 251-270.
 D.G.H. (2000). *Etude par prospection électrique, nappes d'Oulad Ogbane, Ksar Es Sghir, Emsa et Azla (Province de Tétouan), nappe de Bou Ahmed et Targha (Province de Chefchaouène)*, inédito, Marruecos, 97 p.
 D.R.H. (1994). *Synthèse hydrogéologique de la plaine de Bou Ahmed, province de Chefchaouen*, Inédito, 8 p.
 El Attar, A. (2004). *Contribution à la connaissance hydrogéologique de l'aquifère de Bou Ahmed (Province de Chefchaouène, Maroc Nord Occidental)*. Faculté des Science, Tétouan, Maroc, Inédito, 78 p.
 El Attar, El Morabiti K, El Kharim, Y. y Ben Makhlof. (2007). *TIAC' 07*, Instituto Geológico y Minero de España, vol I, 95-103.
 El Morabiti, K. (2000). *Contribution à la connaissance géologique, hydrochimique et isotopique des eaux thermales du Maroc septentrional*. Thèse de Doc. Fac. Sci., Tétouan, 277 p.
 Fidelibus M D, Giménez E, Morell I. y Tulipano L. (1992). *Proc. 12 th Salt Water Intrusion Meeting*. Barcelona. 267-283.
 Molina, L. Pulido-Bosch, A. y Vallejos, A.. (1999). *Hidrogeology and Land Use Management*. Bratislava (Slovak Republic). Proc XXIX Congres AIH: 213-219.
 Tellam, J.H. y Lloyd, J.W. (1986). *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 19: 389-398.