

# Identificación de diferentes tipos de flujo en acuíferos carbonatados en la cadena del Rif (N de Marruecos)

S. GARCIA LOPEZ, J. J. CRUZ SANJULIAN y J. BENAVENTE HERRERA.

*Instituto del Agua, Universidad de Granada. C/ Rector López Argüeta, s/n. 18071 Granada.*

**Resumen:** Se han controlado las principales surgencias relacionadas con varios afloramientos carbonatados de pequeña extensión, pertenecientes a diversos dominios paleogeográficos, que están situados en el extremo septentrional de la cadena del Rif (Norte de Marruecos). Tanto la variabilidad de la descarga de los manantiales controlados, como las características físico-químicas y la concentración de los constituyentes mayoritarios de sus aguas permiten definir varios sistemas hidrogeológicos de funcionamiento diferente: Jebel Musa, Jebel Fahés y Jebel Chinder, cuyas aguas presentan, respectivamente, facies bicarbonatada cálcica, bicarbonatada a sulfatada cálcica y bicarbonatada magnésico-cálcica. El comportamiento de los manantiales y la diversidad hidroquímica observada están relacionados con la litología de los acuíferos (calizas, dolomías y eventualmente niveles de yeso), con el grado de fracturación (intenso en los materiales metamórficos), con la importancia de los procesos de karstificación (más intensos en los materiales calizos de la Unidad de Jebel Musa) y con la geometría de los bloques carbonatados, que condiciona el volumen de reservas. Todos estos factores producen diferencias en la naturaleza y profundidad del flujo subterráneo y en el tiempo de residencia y permiten distinguir entre acuíferos de flujo difuso y acuíferos cuya circulación se produce mayoritariamente a través de conductos.

**Palabras Clave:** cadena del Rif, acuíferos carbonatados, sistemas de flujo difuso, sistemas de circulación a través de conductos.

**Abstract:** The main springs draining some small carbonate outcrops belonging to various paleogeographic units in the northernmost part of the Rif Chain (N Morocco) have been monitored. The outflow variability together with the physico-chemical characteristics as well as the contents of the major constituents of these waters allow us to define a number of hydrogeological systems with different behaviour: Jebel Musa, Jebel Fahés y Jebel Chinder, with  $\text{HCO}_3^-$ -Ca,  $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{SO}_4$ )-Ca and  $\text{HCO}_3^-$ -Mg(Ca) water types, respectively. Springs response and hydrochemical diversity are related with (a)

the lithology of the aquifers (limestone, dolostone and gypsum layers), (b) the importance of fracturing (intense in the case of metamorphic material), (c) with the development of karstification, which is more abundant in calcareous materials of Jebel Musa unit and (d) with the geometry/volume of reserves of the carbonate blocks. All these factors induce differences in the way and depth of the groundwater flow as well as in the residence time, so it could be distinguished between diffuse flow and conduit flow aquifers.

**Key Words:** Rif Chain, carbonate aquifers, diffuse flow feeder-system, conduit feeder-system.

García-López, S., Cruz-Sanjulián, J.J. y Benavente, J. (1994): Identificación de diferentes tipos de flujo en acuíferos carbonatados en la Cadena del Rif (N de Marruecos). *Rev. Soc. Geol. España*, 7 (3-4): 319-326.

Los sistemas hidrogeológicos investigados están situados en el Norte de Marruecos, en las proximidades del pueblo de Beliunech, que se localiza a unos 6 km al Oeste de Ceuta. Las rocas carbonatadas afloran en varios relieves abruptos con cimas elevadas (Punta Leona: 638 m, Jebel Musa: 840 m, Jebel Fahés: 756 m y Jebel Chinder: 480 m), a escasa distancia del mar (Figura 1). Estos relieves constituyen las estribaciones septentrionales de la cadena montañosa carbonatada de Haouz, que presenta una extensa continuidad hacia el Sur.

En este trabajo se diferencian cuatro sistemas hidrogeológicos, tres de los cuales se descargan a través de una decena de manantiales en el sector de la Bahía de Benzú, y se proponen diferentes modelos preliminares de funcionamiento para estos últimos. La variabilidad en los caudales de las surgencias y las características hidroquímicas de sus aguas ponen de manifiesto importantes diferencias en cuanto al funcionamiento de los sistemas, como consecuencia sobre todo de factores litológicos y tectónicos. En particular, y siguiendo la sistematización

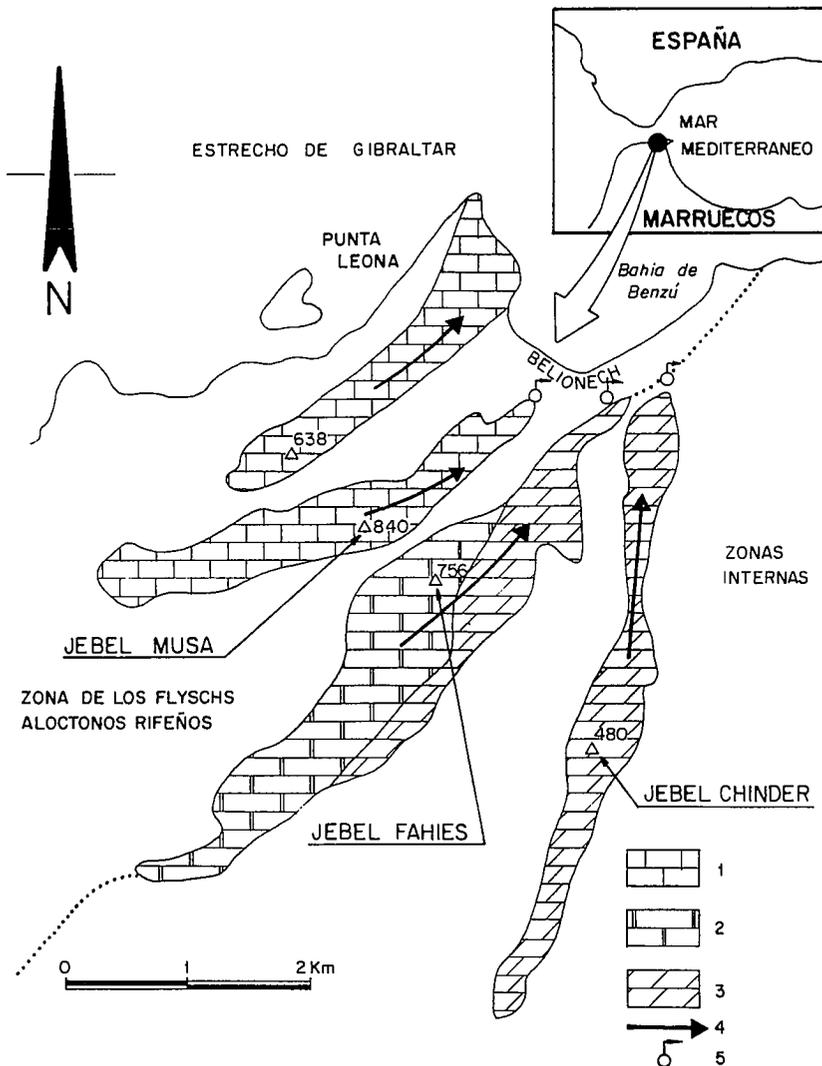


Figura 1.- Localización y esquema hidrogeológico de los acuíferos investigados. 1: calizas y dolomías de la unidad del Jebel Musa; 2: calizas y dolomías de la Dorsal Calcárea; 3: calizas y dolomías del Complejo Sébtide; 4: dirección principal del flujo; 5: grupo de manantiales.

propuesta por Shuster y White (1971), el grado de fisuración y/o karstificación de las rocas carbonatadas, estrechamente relacionado con su composición (calizas o dolomías) y su estado de fracturación, condiciona que el flujo se produzca a través de conductos bien desarrollados (conduit feeder-system) o de forma difusa a través de fisuras (diffuse-flow feeder system).

### Contexto geológico

Desde el punto de vista geológico, este sector corresponde al límite entre Zonas Internas y Zonas Externas de la Cordillera Rifeña, que presenta una notable complejidad estructural y litológica. A pesar de su relativa proximidad, los materiales carbonatados que constituyen los sistemas investigados son atribuidos a tres diferentes dominios (Service Géologique du Maroc, 1979):

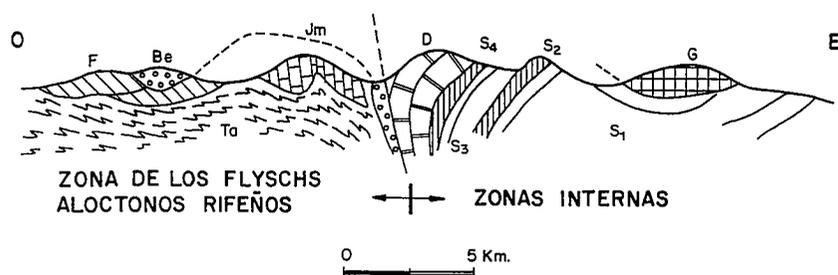
- a) Complejo Sébtide de las Zonas Internas.
- b) Dorsal Calcárea.
- c) Unidad del Jebel Musa (Flysch Alóctonos Rifeños).

El Complejo Sébtide está constituido, en este sector, por dos formaciones litológicas bien diferenciadas: una

inferior metapelítica (esquistos, areniscas esquistosas y cuarcitas), de edad paleozoica, y otra superior carbonatada (calizas y dolomías), de edad Trías medio-superior. Su estructura en mantos de corrimiento consiste en una superposición tectónica de diferentes unidades con una secuencia estratigráfica muy parecida, que, en ocasiones, pone de manifiesto importantes laminaciones y adelgazamientos tectónicos.

La Dorsal Calcárea representa una estrecha franja de rocas fundamentalmente carbonatadas, de carácter alóctono, de edad Trías superior-Malm, que constituye los relieves alargados de la cadena Haouz. Su estructura, muy tectonizada, consta de escamas apretadas e imbricadas. La Dorsal separa las Zonas Internas (al E) de las Zonas Externas y Zona de Flysch Alóctonos (al W).

La unidad del Jebel Musa, que consta de 500-600 m de calizas y dolomías de edad liásica, es considerada por algunos autores (Durand-Delga y Villiaumey, 1963) como una unidad alóctona, de origen paleogeográfico no precisado, que se superpone tectónicamente sobre los materiales cretácicos de la Unidad de Tánger (Zonas Externas), que constituirían el autóctono relativo tanto para esta unidad como para otras unidades de Flyschs. Sin embargo, para otros autores (Bourgois, 1979), tanto la



**Figura 2.-** Corte geológico esquemático del sector investigado (modificado de Didon *et al.*, 1973). ZONAS INTERNAS: S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>: Unidades del Complejo Sébtide, G: Complejo Ghomáride, D: Dorsal Calcárea. ZONA DE LOS FLYSCH ALOCTONOS RIFEÑOS: Be: Unidad de Beliunech, F: Unidad de Tisirene, Jm: Unidad del Jebel Musa. ZONAS EXTERNAS: Ta: Unidad de Tánger.

geometría de los contactos como la disposición de los bloques asignados a esta unidad, podrían sugerir que los citados bloques constituyen otros tantos olistolitos emplazados en una formación olistostrómica de gran entidad: el Flysch de Beliunech.

La disposición general de los materiales se muestra en la Figura 2, en la que se advierte que la estructura de los materiales carbonatados liásicos de la Unidad del Jebel Musa difiere sensiblemente de la disposición geométrica de los materiales carbonatados de otros dominios (Sébtides y Dorsal), lo cual tiene una gran trascendencia desde el punto de vista hidrogeológico. En efecto, los primeros o bien reposan sobre los materiales impermeables de la Unidad de Tánger, o bien están englobados en éstos, pero con un enraizamiento reducido (aunque no hay pruebas concluyentes acerca de esta cuestión). Por el contrario, los segundos, en el contacto Zonas Internas-Zonas Externas, constituyen el flanco occidental de un gran pliegue de dirección NE-SW y se disponen subverticales o con un buzamiento pronunciado, lo que induce a pensar en un sustrato impermeable profundo y un importante volumen de reservas.

### Funcionamiento hidrogeológico

Los afloramientos carbonatados estudiados constituyen acuíferos bien diferenciados, de funcionamiento libre, al menos en los sectores donde afloran, y en gran medida independientes: Punta Leona, Jebel Musa, Jebel Fahíes y Jebel Chinder (Figura 1). Presentan una forma alargada en la dirección NE-SW y su superficie conjunta es de 8.3 km<sup>2</sup>, de los cuales el 43% corresponde al mayor de ellos (Jebel Fahíes).

La porosidad y permeabilidad de estos acuíferos es de tipo secundario, por fracturación y disolución. De acuerdo con el esquema propuesto por Shuster y White (1971) para acuíferos carbonatados, la circulación subterránea se produce siguiendo mecanismos distintos, según el tipo de porosidad secundaria predominante. Cuando la porosidad está relacionada con una red bien desarrollada e interconectada de diaclasas, fracturas, planos de estratificación, modificados por disolución y con aperturas reducidas, el flujo se produce de forma difusa. El medio carbonatado tiende entonces a comportarse como un medio poroso con flujo laminar, con la permeabilidad uniformemente distribuida, aunque con una anisotropía importante. Los acuíferos de Jebel Fahíes y Jebel Chinder deben de presentar este tipo de porosidad, debido en gran

medida a la elevada proporción de material dolomítico y a la intensa fracturación que afecta a los materiales que los componen, según se desprende de los controles realizados, como se verá más adelante.

Por el contrario, cuando la porosidad consiste fundamentalmente en grandes conductos y cavidades de tamaño centimétrico a métrico, producidos por disolución y/o erosión mecánica, el flujo, a menudo turbulento, se localiza en tales conductos, mientras que la permeabilidad de los bloques de roca separados por éstos es muy baja o prácticamente nula. Los acuíferos de Punta Leona y Jebel Musa, mayoritariamente calizos, parecen responder a este modelo.

La totalidad de los recursos de cada acuífero proviene de la infiltración de la precipitación sobre la superficie de los afloramientos correspondientes. La precipitación media anual en el sector se estima comprendida entre 780 mm en el nivel del mar y más de 1000 mm en las cumbres más altas. Estos valores se han obtenido, dada la inexistencia de pluviómetros sobre los relieves carbonatados, a partir del gradiente pluviométrico altitudinal establecido para el sector meridional de la provincia de Cádiz, al otro lado del Estrecho: 30 mm/100 m, aplicado a los datos de la precipitación registrada en la cercana estación de Ceuta (García-López, 1992). La distribución de la precipitación a lo largo del año presenta máximos en invierno, con precipitaciones mensuales medias superiores a 130 mm (Diciembre a Febrero) y mínimos en torno a cero en verano (Julio-Agosto), lo que trae consigo una fuerte estacionalidad en la recarga.

La evapotranspiración media, calculada por el método de Thornthwaite a partir de valores mensuales para cada afloramiento, está comprendida entre el 45% y el 50% de la precipitación, lo que implica unos valores medios anuales de lluvia útil entre 515 mm (Jebel Musa) y 420 mm (Jebel Chinder).

La infiltración debe ser elevada, pese a las fuertes pendientes de los relieves carbonatados y a la inexistencia de grandes formas kársticas de absorción, pues está favorecida por varios factores: la disposición estructural de los macizos, con la estratificación en algunos casos subvertical; la intensa fracturación de los materiales, tanto en los liásicos como, en mayor grado, en los de las Zonas Internas, y el escaso desarrollo de una cobertera edáfica.

El flujo subterráneo se dirige hacia las zonas de descarga localizadas en los extremos septentrionales de los afloramientos (sector de la Bahía de Benzú). El afloramiento de Punta Leona carece de descarga visible y su

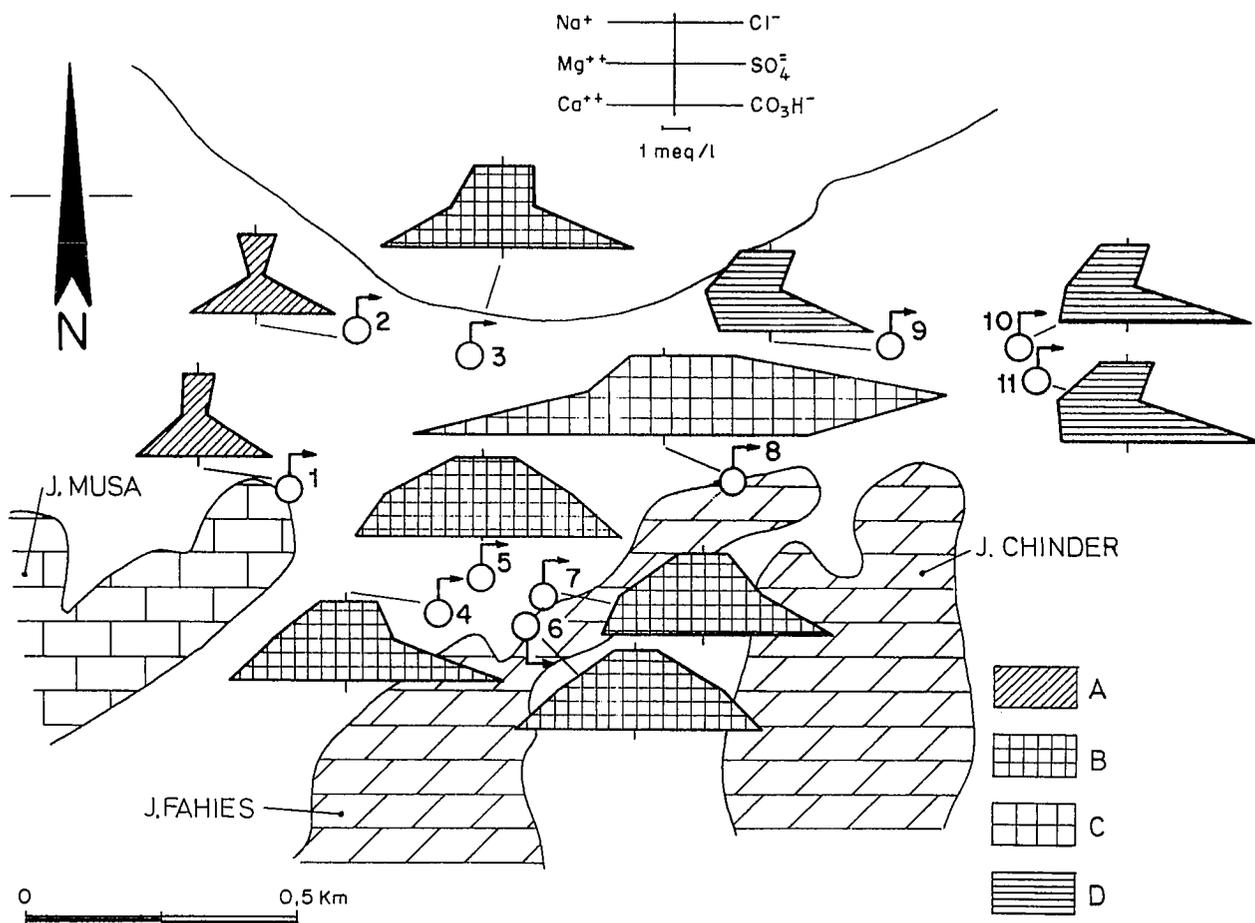


Figura 3.- Situación de los manantiales y diagramas de Stiff de los valores medios de las aguas de cada uno. Las tramas dentro de los diagramas indican el sistema con el que se relaciona cada manantial; A: Jebel Musa; B: Jebel Fahies-1; C: Jebel Fahies-2; D: Jebel Chinder.

drenaje debe producirse, de manera oculta, hacia el mar. En los otros tres acuíferos la descarga se produce por una decena de manantiales, emplazados bien sobre derrubios de ladera, bien directamente al pie de los macizos carbonatados, con cotas comprendidas entre los 5 y los 115 m (Figura 3). Es en estos manantiales donde se han realizado los controles que constituyen la base de este trabajo.

Estos controles, así como las encuestas realizadas, han puesto de manifiesto una respuesta diferente de los manantiales frente a las precipitaciones. Mientras que en los manantiales relacionados con las calizas jurásicas de la unidad del Jebel Musa las fluctuaciones de caudal son importantes, con caudales conjuntos en momentos de crecida por encima de 160 l/s y caudales en estiajes prolongados casi nulos, el resto de los manantiales presentan escasa variabilidad en el caudal a lo largo del año (Tabla I).

En función del caudal medio de descarga de los manantiales, y teniendo en cuenta los valores de precipitación y lluvia útil antes indicados, se ha establecido un coeficiente de infiltración comprendido entre 40 y 35%, para un año medio.

### Características hidroquímicas

A partir de los resultados de varios muestreos, realizados entre Enero y Junio de 1990 en el conjunto de ma-

nantiales antes citados, se han establecido las características hidroquímicas de las aguas drenadas por los tres acuíferos definidos previamente en los que existe descarga visible.

Las variables físico-químicas (conductividad y pH) fueron medidas electrométicamente "in situ", mediante los correspondientes equipos portátiles marca Crison (modelos 523 y 506). En particular, en las determinaciones de pH se utilizó un electrodo de vidrio combinado, con electrodo de referencia de Ag-AgCl.

Las determinaciones analíticas se realizaron en los laboratorios de la Universidad de Granada en los días inmediatamente posteriores a la recogida de las muestras, en especial las relativas a los iones más fácilmente precipitables ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Las muestras fueron almacenadas en frascos de polietileno de doble tapón. Los métodos analíticos utilizados son variados: el ion  $\text{HCO}_3^-$  ha sido analizado por volumetría, con HCl como agente valorante, considerando la alcalinidad total representativa de la concentración de  $\text{HCO}_3^-$ , dado los rangos de pH registrados en las aguas muestreadas, comprendidos entre 7.0 y 8.0. El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  ha sido analizado por el método turbidimétrico, con medida espectrofotométrica a longitud de onda de 420 nm. El ion  $\text{Cl}^-$  ha sido determinado por volumetría, con  $\text{AgNO}_3$  como agente valorante. Los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  han sido determinados por espectrofotometría de emisión atómica, con longitudes de onda de 589 y

766.5 nm, respectivamente. Por último, los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  han sido analizados por valoración complexométrica, el segundo de ellos a partir de la dureza total.

En la Tabla I se muestran los valores medios de las variables estudiadas, relativas a las aguas drenadas de cada acuífero. Hay que señalar que los valores aquí recogidos corresponden a valores medios de varios muestreos en varios manantiales de características afines, por lo que sólo se pretende aproximar las características generales de las aguas drenadas en cada uno.

En el acuífero de Jebel Fahíes se han distinguido dos tipos de aguas, que difieren principalmente en temperatura de surgencia y en la concentración de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y, por tanto, en conductividad.

Ambos tipos de aguas deben de estar relacionadas con flujos superpuestos de características diferentes. Mientras que los manantiales que se relacionan con el primer tipo (Jebel Fahíes-1) deben de responder a la descarga de aguas infiltradas en las proximidades de los manantiales, con flujos más locales, de menor recorrido y profundidad (menor conductividad y temperatura), las

aguas drenadas por el manantial más caudaloso del sistema (nº 8), que se incluye en el tipo Jebel Fahíes-2, deben de corresponder a aguas infiltradas a mayor cota y distancia de la zona de surgencia, que están sometidas a un flujo más largo y profundo (mayor conductividad y temperatura). En este sentido son significativos los contenidos de isótopos ambientales (Oxígeno-18 y Deuterio) de las aguas de los distintos manantiales de este sistema, que han resultado ser ligeramente menos negativos (menor cota de recarga) en los manantiales de aguas más frías (García-López, 1992).

La temperatura media varía de unos sistemas a otros en algo más de  $3^\circ\text{C}$ . Dado que los afloramientos se hallan en un mismo contexto climático, con altitudes medias del área de recarga sensiblemente parecidas, las diferencias de temperatura son atribuibles, bien a un diferente grado de karstificación, lo que condicionaría una mayor o menor duración del contacto agua-roca, bien a diferencias en la profundidad de circulación. La temperatura relativamente baja de las aguas del sistema del Jebel Musa (al menos durante el periodo de control, que ha coincidi-

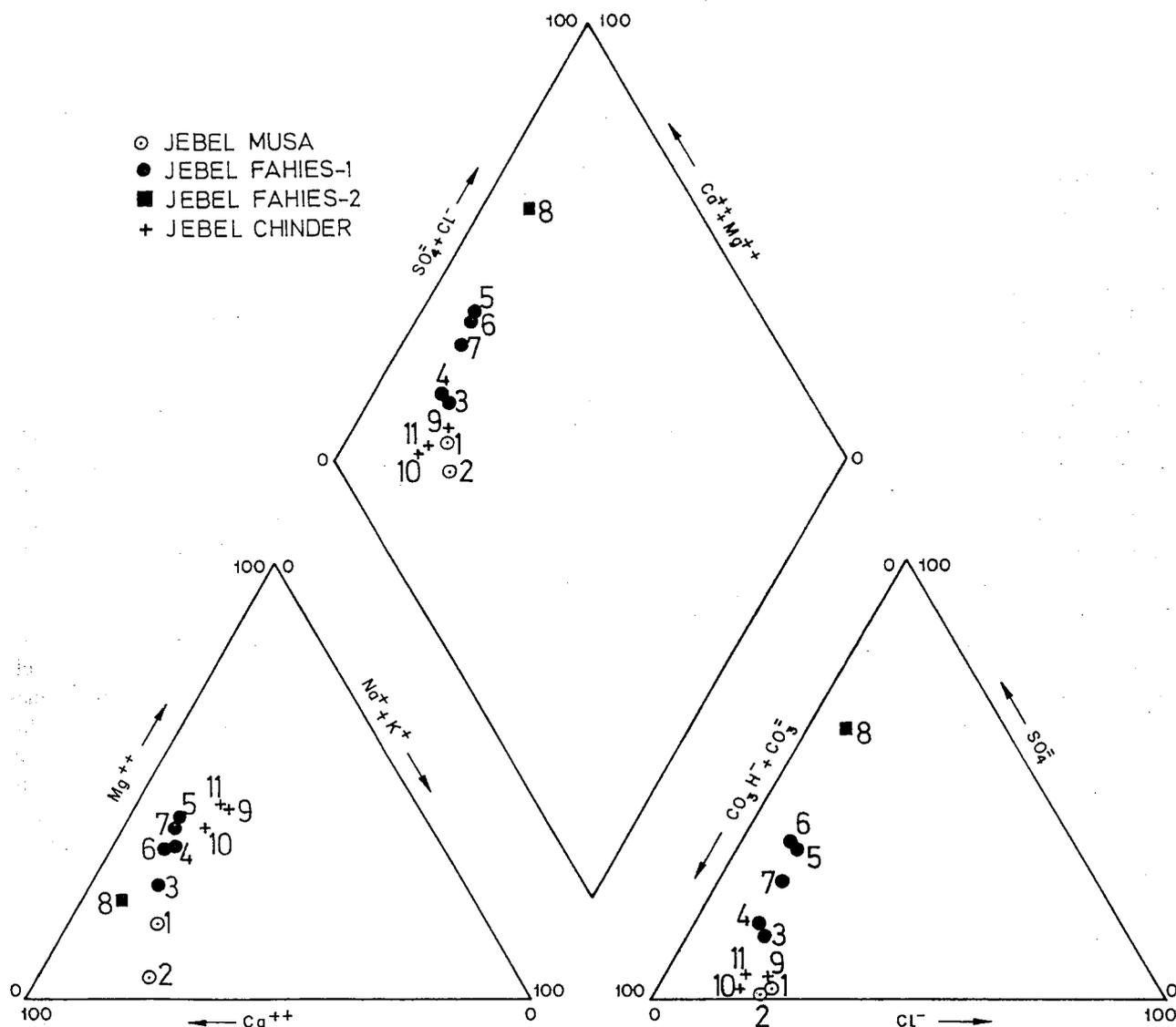


Figura 4.- Diagrama de proporciones iónicas (Piper) de los valores medios de las aguas de cada manantial.

**Tabla I.-** Rango de variación de los caudales conjuntos drenados de cada sistema y características hidroquímicas medias durante el periodo de estudio (Enero-Junio de 1990) de las aguas.

	J. MUSA	J. FAHIES-1	J. FAHIES-2	J. CHINDER
RANGO Q (l/s)	158-38	20-18.5	36-31	15-11
Nº MANANT.	2 (*)	5	1	3
Nº ANALISIS	4	18	4	10
TEMPER. (°C)	14.8	16.9	18.0	15.9
COND. (µS/cm)	320	700	1174	480
pH	7.55	7.29	7.12	7.55
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	48	89	188	47
Mg <sup>2+</sup> "	6	36	39	31
Na "	16	21	24	22
K <sup>+</sup> "	1	3	2	2
Cl <sup>-</sup> "	27	34	37	34
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> "	162	323	322	280
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> "	4	110	480	12

(\*): uno de ellos de funcionamiento esporádico.

do con la época de recarga), algo inferior a la temperatura anual media del área de recarga, evidenciaría un flujo rápido a través de una zona saturada poco potente. La temperatura más elevada del sistema de Jebel Fahies indica un calentamiento de las aguas meteóricas de al menos 2°C durante su residencia en el acuífero, como consecuencia de un flujo más profundo y un espesor importante de material saturado. Todo ello estaría de acuerdo con el esquema geológico planteado en el apartado 1.

Por otra parte, la conductividad eléctrica permite clasificar las aguas de los manantiales en tres grupos: <350, 400-500 y 600-1200 µS/cm, que se relacionan respectivamente con los acuíferos de Jebel Musa, Jebel Chinder y Jebel Fahies. Hay que destacar la gama amplia de conductividades registrada en relación con aguas que drenan materiales constituidos mayoritariamente por el mismo tipo de rocas: calizas y dolomías, aunque la eventual presencia de yeso debe influir también notablemente en este hecho.

En la Figura 3 se muestra la situación de los manantiales y su relación espacial, en cada caso, con el acuífero carbonatado correspondiente. También se incluyen las características químicas medias de sus aguas mediante diagramas poligonales (Stiff modificado). Se puede observar la semejanza entre los diagramas correspondientes a aguas de un mismo sistema, si bien cabe señalar que en el caso del sistema de Jebel Fahies, donde se han distinguido dos tipos de aguas, la variabilidad es mayor, como consecuencia de la dispersión en los contenidos de ion sulfato y calcio. Además, las aguas del manantial más septentrional de este sistema (nº 3), situado muy próximo al mar y a sólo 10 m de cota, presentan indicios de mezcla con aguas del acuífero de Jebel Musa, como se deduce de los valores de la concentración de los iones principales, intermedios entre ambos acuíferos. Esta mezcla tendría lugar durante el flujo a través de materiales detríticos localizados al pie de los relieves carbonatados. En la Figura 4 se muestra el diagrama de las proporciones

iónicas (Piper) de las aguas de los manantiales y de nuevo se observa idéntica agrupación de puntos, así como el efecto de la mezcla antes citado.

Las aguas del sistema del Jebel Musa, con facies bicarbonatada cálcica, presentan una débil mineralización atribuible a la ausencia de yesos en la serie carbonatada y a una dinámica rápida, puesta de manifiesto también por la gran variación de los caudales. Esta rápida circulación indicaría una mayor karstificación funcional en este acuífero que en los restantes, como consecuencia, entre otras razones, de la composición litológica (mayor abundancia de las calizas frente a las dolomías). Asimismo, hay que destacar que la descarga se produce por un único manantial permanente (nº 1), aunque en épocas de importantes crecidas entra en funcionamiento otra surgencia situada a menor cota (nº 2). Este último hecho se justifica por la existencia de materiales permeables de pie de monte que reciben directamente la descarga del acuífero carbonatado en épocas de crecida.

Por el contrario, el sistema del Jebel Fahies presenta una mineralización más elevada como consecuencia de un mayor tiempo de residencia de las aguas y de la disolución de yesos, muy posiblemente localizados en la base de la formación carbonatada sébtide o de la Dorsal. Las facies correspondientes a este sistema varían desde bicarbonatadas cálcicas (con cantidades significativas de sulfatos) a sulfatadas cálcicas, en el manantial de mayor caudal (nº 8). Existe cierta correlación directa entre las temperaturas de surgencia y el contenido en sulfatos, lo que indica que las aguas de circulación más profunda disuelven mayor cantidad de yeso.

Las aguas relacionadas con el tercer sistema (Jebel Chinder), donde la importancia relativa de dolomías es mayor, presentan mineralizaciones intermedias y facies bicarbonatada magnésico-cálcica. Tanto este sistema como el anterior presentan una dinámica lenta, como se deduce de la escasa variación de caudales observada en la mayoría de sus manantiales, así como de su relativamen-

te elevada mineralización, especialmente en lo que se refiere al ion  $Mg^{2+}$ , proveniente de la lenta disolución de la dolomita.

Los contenidos en  $Cl^-$  y  $Na^+$  de las aguas de los manantiales son reducidos (entre 0.75 y 1 meq/l). Su origen parece estar relacionado con el aerosol marino, que, en un sector costero como éste, confiere al agua de lluvia un contenido significativo en estos iones. El análisis de una muestra de agua de lluvia colectada durante la época de recarga (Febrero de 1990) proporcionó un valor de  $Cl^-$  de 0.45 meq/l.

El ion  $Cl^-$  es particularmente útil para realizar una estimación de la evapotranspiración media que afecta a los sistemas, debido a su carácter conservativo (Custodio, 1983). Si admitimos que: a) los acuíferos carbonatados no aportan cantidades apreciables de cloruros al agua subterránea, b) la eventual retención de este ion por la vegetación (en todo caso escasa) es devuelta al suelo al descomponerse ésta, c) no existe aporte artificial de dicha sustancia, y d) la escasa escorrentía sobre los materiales permeables presenta un contenido en  $Cl^-$  similar al de las aguas subterráneas, por efecto del lavado de la ca-

materiales carbonatados. Ello estaría de acuerdo con una karstificación más intensa, tanto superficial como profunda, puesta de manifiesto anteriormente.

En la Tabla II, se presentan los resultados analíticos correspondientes al primer muestreo en cuatro manantiales representativos de los tipos descritos, así como los índices de saturación obtenidos mediante el programa HIDSPEC (Carvalho y Almeida, 1989), que permite evaluar el estado de equilibrio de las aguas respecto de los minerales más relevantes presentes en la roca. Se ha elegido este muestreo por ser uno de los más completos y por presentar menores errores analíticos. Sus resultados no difieren de forma importante de los valores medios de cada acuífero reflejados anteriormente (Tabla I).

Las aguas de los cuatro manantiales se hallan próximas al equilibrio respecto de la calcita, o, en cualquier caso, dentro del intervalo de incertidumbre inherente a los cálculos realizados. No obstante, en el n° 1, relacionado con el acuífero del Jebel Musa, se obtiene un valor bajo para el IS de la calcita (-0.14), que, dependiendo del intervalo de incertidumbre a considerar, podría indicar

**Tabla II.** - Parámetros correspondientes al muestreo de enero de 1990 en cuatro manantiales representativos de los sistemas e índices de saturación de las aguas respecto de los minerales principales.

ACUIFERO	N° REF. MANANTIAL			
	1	7	8	11
	J.MUSA	J.FAHIES-1	J.FAHIES-2	J.CHINDER
CAUDAL (l/s)	98.6	8.5	36.1	2.7
TEMPER. (°C)	14.5	16.5	18.0	16.0
COND. ( $\mu S/cm$ )	306	654	1111	490
pH	7.52	7.20	7.05	7.37
$Ca^{2+}$ (mg/l)	48	80	182	48
$Mg^{2+}$ "	6	38	55	33
$Na^+$ "	10	14	27	23
$K^+$ "	1	1	3	2
$Cl^-$ "	25	43	50	32
$CO_3H^-$ "	168	320	343	313
$SO_4^{2-}$ "	2	94	420	2
CALCITA (IS)	-0.14	-0.03	0.13	-0.05
DOLOMITA "	-1.07	-0.24	-0.19	-0.12
YESO "	-3.29	-1.55	-0.70	-3.38

pa edáfica, entonces la evapotranspiración será igual a:

$$ETP = 1 - Cl_p/Cl_s$$

donde  $Cl_p$  es la concentración de  $Cl^-$  del agua de lluvia y  $Cl_s$  la concentración de  $Cl^-$  del agua subterránea.

Si el valor de  $Cl^-$  de la precipitación obtenido para Febrero se considera representativo de la media correspondiente a la recarga, los valores de evapotranspiración media calculada de esta manera (Jebel Musa: 41%, Jebel Chinder: 48%), se aproximan sensiblemente a los calculados por el método de Thornthwaite. Estos resultados corroboran que la infiltración eficaz (a igualdad de coeficiente de escorrentía), es superior en las calizas y dolomías de la Unidad del Jebel Musa que en el resto de los

un ligero grado de subsaturación de las aguas del manantial respecto a este mineral.

Sólo el agua del manantial n° 1 se encuentra claramente subsaturada respecto de la dolomita (IS: -1.07). Los manantiales n° 7, 8 y 11 se encuentran en equilibrio o en una situación indistinguible de éste, dado el amplio intervalo de incertidumbre asociado al cálculo de equilibrio de la dolomita ( $\pm 0.5$  unidades).

Por último, las aguas de estos manantiales se encuentran claramente subsaturadas respecto del yeso, en especial las relacionadas con los acuíferos de Jebel Musa y Jebel Chinder, donde la presencia de yesos intercalados en los materiales carbonatados debe de ser prácticamente inexistente. Por el contrario, en el manantial n° 8, debido a una circulación relativamente profunda a través de ma-

teriales con cierta proporción de yeso, las aguas se encuentran cargadas de ion  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y con ello, menos subsaturadas respecto de este mineral.

### Conclusiones

Se han definido cuatro acuíferos carbonatados de funcionamiento prácticamente independiente en el sector de Beliunech (Marruecos). Tres de ellos presentan descarga visible a través de manantiales, lo que ha permitido poner de manifiesto diferencias notables tanto en su funcionamiento como en las características hidroquímicas de sus aguas. Las facies hidroquímicas identificadas son: bicarbonatada cálcica (Jebel Musa), bicarbonatada a sulfatada cálcica (Jebel Fahés) y bicarbonatada magnésico-cálcica (Jebel Chinder).

De acuerdo con la clasificación que hacen Shuster y White (1971) de los sistemas de flujo en los acuíferos carbonatados, el acuífero de Jebel Musa quedaría incluido en el tipo "conduit feeder-system"; la descarga se produce a través de un único manantial permanente que responde rápidamente a las precipitaciones, con grandes fluctuaciones en su descarga, superiores a 2 órdenes de magnitud, junto con variaciones estacionales en las características físico-químicas; el tiempo de residencia es relativamente corto y, generalmente, las aguas se encuentran algo subsaturadas respecto de la calcita y claramente subsaturadas respecto de la dolomita, como consecuencia de la escasa duración del contacto agua-roca. Además, el coeficiente de infiltración es algo superior en los materiales carbonatados del Jebel Musa que en los restantes, como se deduce del contenido en cloruros. Ello es consecuencia, no sólo de la mayor altitud en el área de recarga que presentan estos materiales, sino también de su mayor grado de karstificación superficial.

Por el contrario, los acuíferos de Jebel Fahés y Jebel Chinder estarían incluidos en el tipo "diffuse flow feeder-system"; la descarga natural se realiza a través de un elevado número de pequeñas surgencias que, en general, presentan escasa variación, tanto en sus caudales como en las características físico-químicas de sus aguas; el tiempo de residencia es relativamente elevado y las

aguas se encuentran próximas al equilibrio respecto de la calcita y la dolomita. Una diferencia importante entre ambos acuíferos está relacionada con la presencia de yeso, que en el segundo es prácticamente inexistente, mientras que en el Jebel Fahés aporta por disolución contenidos significativos de iones sulfato y calcio. Es en este último sistema donde, en virtud de las características de las aguas drenadas, se pueden distinguir distintas líneas de flujo superpuestas, que difieren fundamentalmente en temperatura, conductividad y contenido en isótopos ambientales.

Agradecemos a los revisores su contribución a la mejora del presente trabajo.

### Bibliografía

- Bourgeois, J. (1978). *La transversale de Ronda, Cordillères Bétiques, Espagne. Données géologiques pour un modèle d'évolution de l'arc de Gibraltar*. Thèse Doct. Univ. Besançon. Ann. Sci. de l'Université, Géol. 3<sup>ème</sup> série, fasc. 30: 445 pp.
- Carvalho, M.R. y Almeida, C. (1989). HIDSPEC: Um Programa para Especificação e Cálculo de Equilíbrios Agua-Roca. Geociencias, Rev. Univ. Aveiro, 4(2): 1-22.
- Custodio, E. (1983). Evolución geoquímica de las aguas en los acuíferos. In: *Hidrología Subterránea*. 2 Tomos. (E. Custodio y R. Llamas, Eds.). Ed. Omega. Barcelona: 1019-1036.
- Didon, J., Durand-Delga, J. y Kornprobst, J. (1973). Homologies Géologiques entre les deux rives du Déroit de Gibraltar. *Bull. Soc. géol. de France*, t. XV: 77-105.
- Durand-Delga, M. y Villiaume, M. (1963). Sur la Stratigraphie et la Tectonique du Groupe du Jebel Musa. *Bull. Soc. géol. de France*, t. V: 70-79.
- García-López, S. (1992). *Estudio Hidrogeológico de los acuíferos carbonatados del sector de la Bahía de Benzú (Marruecos)*. Tesis de Licenciatura. Univ. Granada. Mem. Inéd.
- Service Géologique du Maroc (S.G.M.). (1979). *Carte Géologique de Sebta, échelle 1/50.000*. Ministère de l'Energie et des Mines (Maroc).
- Shuster, E.T. y White, W.B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *J. Hydrol.*, 14: 93-128.

*Manuscrito recibido el 18 de Octubre de 1993.  
Aceptado el manuscrito revisado el 2 de Septiembre de 1994.*