

ESTUDIO HIDROGEOQUIMICO DE LA CUENCA DEL RIO ADRA

J. Benavente Herrera* y A. Castillo Martín*

RESUMEN

El estudio se ha realizado por procedimientos convencionales y multivariados: Análisis «Cluster», para identificar grupos de aguas con afinidad química, y Análisis Factorial, para analizar la importancia relativa de los procesos que determinan el quimismo de las aguas subterráneas. Los resultados también ilustran sobre las características de los acuíferos y de los diferentes sistemas de flujo.

La cuenca estudiada (unos 750 km², entre las provincias de Almería y Granada) presenta como principal peculiaridad hidrológica, un clima húmedo en cabecera dentro de un contexto semiárido. Los principales acuíferos son carbonatados triásicos; registran diferentes rasgos hidroquímicos en función de aspectos litológicos y de la propia dinámica subterránea: desde aguas bicarbonatadas con salinidad inferior a 400 mg/l hasta cloro-sulfatadas con unos 1.500 mg/l; estas últimas, además, imponen el quimismo del río en su tramo final, y éste hace lo mismo con el acuífero detrítico costero, donde también actúan procesos modificadores naturales y antrópicos. Las aguas de flujos hipodérmicos en relación con las metapelitas de cabecera tienen salinidad inferior a 100 mg/l, son ácidas y generalmente con gas carbónico libre. Su quimismo suele modificarse por efecto de los «careos» —un tipo muy peculiar de recarga artificial que data de la dominación musulmana— o, de manera más local, por la influencia de aguas supuestamente relacionadas con flujos profundos, que ascienden a favor de fracturas de entidad regional.

Palabras clave: *agua subterránea, hidroquímica, análisis multivariable.*

ABSTRACT

The methodological approach of this study uses both conventional and multivariate procedures. The latter includes Cluster Analysis, for grouping water samples of similar chemistry, and Factor Analysis that shows the relative importance of the main hydrochemical processes. The results so obtained give us in addition some new insights about the aquifers and the groundwater flow systems involved.

From a hydrological standpoint, although located in the semiarid SE Spain, the studied basin keeps a humid climate in its head area. The main aquifers are triassic carbonates; they show different hydrochemical features according their lithology and the particular flow systems, and range from bicarbonate waters with less than 400 mg/l of TDS, to chloride-sulphate and 1.500 mg/l. The latter type are responsible for the streamwater quality in its final path and, as a consequence of this, for the coastal detritic aquifer groundwater chemistry too. The subsurface flow waters of the metamorphic head area have less than 100 mg/l of TDS, acid character and free carbonic gas. An old recharge practice in the region —known as «careos»— can modify the original chemistry of these waters. Other possible change may appear locally as a consequence of the mixing with deep-flow waters, that rise in the vicinity of some important fracture traces.

Key words: *groundwater, hydrochemistry, multivariate analysis.*

Introducción

Ambito geológico

La cuenca del río Adra, de 746 km² de extensión y cerca de 2.800 metros de elevación máxima, se

localiza entre las provincias andaluzas de Granada y Almería, en el sureste de España, y ocupa parte de la comarca de Las Alpujarras.

Desde el punto de vista de su localización geológica, y dentro del ámbito de las Cordilleras Béticas, la cuenca se incluye en su totalidad dentro de la Zona

* Departamento de Geodinámica e IAGM (Universidad de Granada-CSIC). Avda. Fuentenueva, s/n (Facultad de Ciencias). 18002 Granada (España).

Bética. De manera simplificada, los materiales que integran la cuenca corresponden a los tres grupos siguientes (fig. 1):

A) Materiales del Complejo Nevado-Filábride. Se trata, fundamentalmente, de esquistos y cuarcitas de edad Trías o más antigua.

B) Materiales del Complejo Alpujárride. Constan, en esencia, de una formación superior carbonatada triásica y otra inferior metapelítica, de filitas, cuarcitas y esquistos, más antigua.

C) Materiales terciarios. Aparecen sobre todo en la depresión de Ugíjar, donde son predominantemente

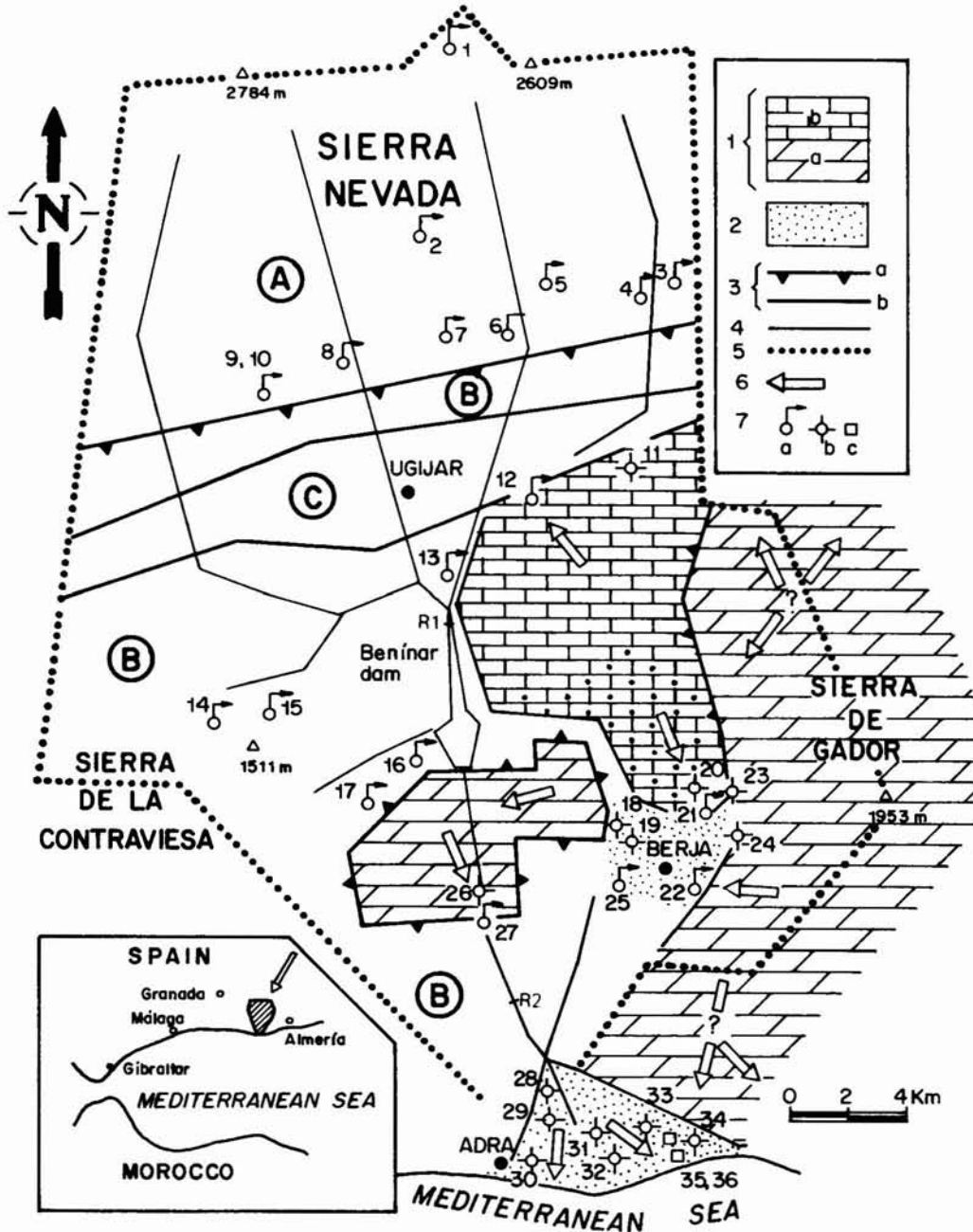


Fig. 1.—Esquema hidrogeológico de la cuenca del río Adra.—1: Acuíferos carbonatados alpujárrides (a: unidad inferior; b: unidad superior; los puntos en la trama indican recubrimiento neógeno permeable). 2: Acuíferos detríticos postorogénicos. 3: Principales contactos tectónicos (a: cabalgamiento; b: fracturas tensionales). 4: Principales cursos de agua. 5: Divisoria hidrográfica. 6: Dirección aproximada del flujo subterráneo. 7: Localización de los puntos de agua considerados en esta investigación (a: surgencias; b: captaciones; c: albuferas). En blanco, áreas de predominio de materiales impermeables (A: Complejo Nevado-Filábride; B: Complejo Alpujárride; C: Depresión neógena de Ugíjar).

detríticos heterométricos con abundante fracción fina. Al Norte de Berja son calcareníticos, mientras que en las proximidades de Adra presentan facies deltáicas.

También existen materiales cuaternarios, entre los que cabe destacar los depósitos aluviales, que adquieren entidad sobre todo en el sector del delta, donde aparecen asimismo varios niveles de glaciares y depósitos limosos en relación con albuferas. Otro recubrimiento aluvial de cierta extensión, aunque de escaso espesor, es el que se localiza en los alrededores de Berja.

La estructura general de los materiales metamórficos (grupos A y B) corresponde a una serie de mantos de corrimiento. A su vez, el conjunto del grupo B es cabalgante sobre el A. Más información al respecto puede obtenerse en Díaz de Federico *et al.* (1981) y Aldaya *et al.* (1983).

La depresión de Ugíjar está delimitada en gran parte de su extensión por fracturas, fundamentalmente de salto en dirección, que son parte, a su vez, de un accidente de mayor escala —el denominado «Corredor de Las Alpujarras»— y ponen de manifiesto una actividad neotectónica importante (Aldaya *et al.*, 1984; Sanz de Galdeano *et al.*, 1985) reflejo de la cual es también la aparición de frecuentes cambios de facies en los depósitos neógenos, como se desprende de los datos sedimentológicos (Rodríguez Fernández, 1982; González Donoso *et al.*, 1983).

Rasgos morfológicos y climáticos

El análisis de los principales rasgos morfológicos de la cuenca permite diferenciar cuatro sectores:

1. Vertiente meridional de Sierra Nevada. El terreno desciende sin irregularidades importantes desde altitudes generalmente superiores a los 2.500 metros hasta, aproximadamente, los 1.100-1.200 metros. Corresponde, sobre todo, a materiales del grupo A y a una estrecha franja del B, estos últimos muy tectonizados.

2. Depresión de Ugíjar. Ocupada en su mayor parte por materiales del grupo C. Se extiende entre los 650 y 950 metros de altitud.

3. Sierras de Gádor y La Contraviesa. A este sector, cuyas altitudes máximas son del orden de 2.000 y 1.500 metros, respectivamente, corresponde la mayor parte de la cuenca. Con la excepción de recubrimientos cuaternarios poco importantes, el principal de los cuales es el situado en el entorno de Berja, está ocupado por materiales del grupo B, aunque al Este del río Adra predominan los afloramientos carbonatados y al Oeste los metapelíticos.

4. Llanura costera de Adra. Comprende, aproximadamente, desde la cota 100 hasta el mar. La mayor parte de este sector lo integran depósitos holocenos, aluviales y de albufera, que ocupan las partes más bajas, mientras que las situadas a más altitud

corresponden a los afloramientos de la formación deltaica pliocena y a varios niveles de glaciares y terrazas marinas pleistocenas.

Los valores medios anuales aproximados de precipitación y temperatura para estos cuatro sectores son, respectivamente: 650 mm, 10°; 375 mm, 16°; 425 mm, 16° y 350 mm, 18° (Pulido *et al.*, 1986). En la subcuenca aguas arriba del embalse de Benínar, Vega y García-Rossell (1977) señalan la existencia de dos dominios climáticos: húmedo y semiárido, cuyo límite se sitúa alrededor de los 950 metros de cota; el segundo de ellos es el predominante en las partes bajas de la cuenca (Jabaloy, 1984).

No es de extrañar que, debido a la variedad de condiciones climáticas, topográficas y litológicas de la cuenca, se identifiquen diferentes tipos de modelado: kárstico incipiente en los materiales carbonatados alpujarrides; «bad land» muy desarrollado en los materiales detríticos de la depresión de Ugíjar y en las filitas alpujarrides; cuevas, mesas y glaciares en depósitos pliocuaternarios; incluso restos de modelado glacial en las partes más altas (Vega y García-Rossell, 1977).

Un caso particular de evolución morfológica corresponde a la llanura costera de Adra, notablemente condicionada por la dinámica litoral y fluvial; ambas, a su vez, en estrecha relación con determinadas acciones antrópicas acaecidas a lo largo de los dos últimos siglos (Jabaloy, 1984).

El efecto geomorfológico de la actividad neotectónica se hace notar, no sólo en la morfología litoral del área del Poniente almeriense (Goy y Zazo, 1983; Dabrio *et al.*, 1984), sino también en relación con ciertos accidentes que, como los que delimitan el citado Corredor de La Alpujarras, han inducido variaciones espaciales apreciables en determinados parámetros ilustrativos de la intensidad de la erosión fluvial (Benavente y Vega, 1986).

Síntesis hidrogeológica

Antecedentes

El primer reconocimiento hidrogeológico de la cuenca se lleva a cabo por parte del Instituto Geológico y Minero de España, en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (IGME, 1977, 1980). A partir de entonces se establece una red de control piezométrico, foronómico y de calidad química en algunos puntos de la cuenca (IGME, 1982).

La realización del embalse de Benínar sobre el río Adra por parte de la Dirección General de Obras Hidráulicas del MOPU, planteó la necesidad de conocer con más detalle el entorno hidrogeológico de dicha obra y, sobre todo, analizar la eventual relación de las aguas embalsadas con una serie de surgencias

importantes localizadas río abajo: las Fuentes de Marbella. Parte de los resultados se recogen en Carrasco *et al.* (1981), aunque la labor de seguimiento continúa actualmente. También el Servicio Geológico del MOPU controla periódicamente la piezometría en el sector costero, con objeto de evaluar el impacto que sobre las aguas subterráneas en ese sector tendrá el funcionamiento de la mencionada obra de regulación.

Más recientemente, en el marco del Proyecto LUCDEME, se realiza otro estudio hidrogeológico a nivel de cuenca (Pulido *et al.*, 1986), a partir del cual se han obtenido los datos hidroquímicos que se tratarán más adelante. El sector costero ha sido últimamente objeto de algunos trabajos (Benavente *et al.*, 1987; Pulido, 1988; Pulido *et al.*, 1988).

Los acuíferos: características y funcionamiento

Los principales acuíferos de la cuenca corresponden a los materiales carbonatados alpujárrides y a los depósitos postorogénicos del sector costero (fig. 1). Dentro de los primeros cabe distinguir dos unidades: inferior y superior.

La unidad alpujárride inferior corresponde a materiales del manto de Lújar-Gádor. Aflora en ventanas tectónicas en los sectores central y oriental de la cuenca. En el primero de ellos, el afloramiento (ventanas de Turón y Peñarrodada) está atravesado por el río, inmediatamente aguas abajo del embalse de Benínar; en el segundo, constituye el extremo occidental del macizo de Sierra de Gádor.

No parece existir conexión hidrogeológica entre los dos afloramientos citados de la unidad alpujárride inferior. En un caso la descarga natural se produce por las Fuentes de Marbella (nº 27, fig. 1), con unos 500 l/s en su conjunto, que surgen a 165 metros de cota. Algunas captaciones en el borde Noroeste de la depresión de Berja (el nº 18 es una de ellas) presentan el nivel piezométrico a una cota similar. En el otro caso, el principal drenaje natural se produce a la cota 310 por el nacimiento de Alcaudique (nº 22, con unos 40-60 l/s de caudal) y, verosímilmente, en parte también de forma subterránea hacia la depresión de Berja.

La unidad alpujárride superior corresponde esencialmente a los afloramientos del manto de Murtas y ocupa un amplio sector entre las depresiones de Berja y Ugíjar (fig. 1). El principal drenaje natural se produce a 540 metros de cota por el manantial nº 12, con caudales del orden de 100 l/s. También existe flujo subterráneo hacia la depresión de Berja, en cuyo borde septentrional se localizan una serie de galerías (nº 21, por ejemplo, a 400 metros de cota). En este último sector los materiales alpujárrides acuíferos están recubiertos por una secuencia neógena (calcarenitas y conglomerados, fundamentalmente), de natura-

leza también permeable, de manera que existe conexión hidráulica entre ambas formaciones.

Entre otros aspectos, las dos unidades alpujárrides difieren en el grado de metamorfismo: prácticamente ausente en la inferior y apreciable en la superior, y en que, a diferencia de ésta, aquélla presenta frecuentemente intercalaciones de naturaleza litológica más diversa: margas, rocas volcánicas y evaporitas. También es distintiva la presencia a techo de la serie neógena citada. Existe, por último, una diferencia notable en el espesor de las formaciones carbonatadas de ambas unidades: del orden de 900 metros en la inferior frente a unos 200 metros en la superior, aunque, ciertamente, este aspecto puede verse modificado, en ocasiones de manera notable, merced a circunstancias tectónicas.

El otro acuífero de interés corresponde al conjunto de materiales neógenos y cuaternarios del sector costero. Existen, no obstante, algunos niveles poco permeables dentro de dicha secuencia que pueden conformar un sistema de tipo multicapa. El sustrato general de este acuífero, al igual que para los carbonatos triásicos, debe corresponder a las metapelitas alpujárrides.

En cuanto a particularidades en el funcionamiento de los acuíferos, cabe señalar que la unidad inferior presenta una estrecha relación hidráulica con el río Adra, que experimenta pérdidas hacia el acuífero en el sector del embalse de Benínar, mientras que aguas abajo de las Fuentes de Marbella actúa como curso efluente. En la unidad superior, tal y como deducen Carrasco *et al.* (1981), debe existir alimentación subterránea procedente del borde de Sierra de Gádor, sistema éste que, a su vez, debe verosímilmente drenar también de manera oculta hacia otros bordes permeables adyacentes, en su mayoría fuera ya de la cuenca estudiada. En lo relativo al acuífero del delta, la recarga está, directa o indirectamente, impuesta por las aportaciones del río, lo que, en última instancia, supedita los recursos de este sistema al drenaje natural de la unidad alpujárride inferior. La complejidad de estas relaciones —por otra parte bastante análogas a las que presenta la cuenca adyacente del río Guadalfeo (Benavente, 1982)— aconsejan la adopción de criterios de uso conjunto aguas superficiales-subterráneas en la gestión de los recursos hídricos del área.

El resto de los materiales de la cuenca ofrecen menor interés hidrogeológico, en lo que a magnitud de recursos y volumen de reservas se refiere, y pueden considerarse, en su conjunto, como impermeables. En los materiales nevado-filábrides (A, fig. 1) la circulación subterránea está restringida casi exclusivamente a la franja superficial de alteración. No obstante, sus afloramientos ocupan el área de mayor tasa de recarga dentro de la cuenca, y, además, en ellos se lleva a cabo desde antiguo una práctica peculiar de recarga artificial, los «careos», de notable trascenden-

cia hidrológica y ecológica en las vertientes del macizo de Sierra Nevada. En los materiales alpujárrides de predominio metapelítico (B, fig. 1) existen también afloramientos carbonatados permeables, aunque tanto su extensión reducida como su situación topográfica les confieren escaso interés hidrogeológico. Los puntos nº 14 a 17 (fig. 1) son ejemplos del drenaje natural de tales afloramientos.

Estudio hidrogeoquímico

Datos de partida y su tratamiento

Aunque los puntos inventariados en la cuenca son del orden del centenar, se han seleccionado para esta fase de la investigación los 36 representados en la figura 1. Esta selección incluye, obligatoriamente, los puntos principales de drenaje natural de las dos unidades alpujárrides comentados en el apartado anterior. Para los puntos restantes se ha buscado evitar al máximo posibles redundancias en la información, tanto desde el punto de vista areal como en lo que a variedad de la tipología hidrogeológica se refiere.

De los puntos seleccionados, 10 corresponden a surgencias en materiales nevado-filábrides; otros 17 son manantiales, galerías y captaciones en relación con los acuíferos alpujárrides; los 9 restantes se localizan en el acuífero costero y son todo captaciones, excepto los números 35 y 36 que son muestras obtenidas en las dos principales albuferas que existen en el extremo oriental de este sector.

En esta investigación hemos considerado las concentraciones en los seis componentes iónicos mayoritarios de las aguas, así como los contenidos en los iones potasio y nitrato, el valor del pH y el de la conductividad eléctrica a 20°. También se han obtenido las concentraciones de NO_2^- , Li^+ , B, NH_4^+ y P_2O_5 , así como el TSD, aunque no se han considerado en los tratamientos por no aportar apenas información adicional respecto a las determinaciones antes citadas.

Las muestras fueron tomadas en febrero-marzo de 1984. Comparados los resultados obtenidos con los de otra campaña llevada a cabo en el período de estiaje, se comprobó que no existían variaciones significativas en la magnitud y proporción de los contenidos iónicos en la mayoría de los puntos. Todas las determinaciones analíticas han sido realizadas en el Centro de Análisis de Aguas, S. A. (Murcia).

La interpretación de los datos analíticos se ha llevado a cabo, en una primera fase, en base al cálculo de determinadas relaciones iónicas y mediante el apoyo de algunos tipos de gráficos cuyo empleo es práctica común en todos los estudios hidrogeoquímicos (Custodio, 1976). Posteriormente, se han aplicado técnicas multivariantes, en concreto los procedimientos

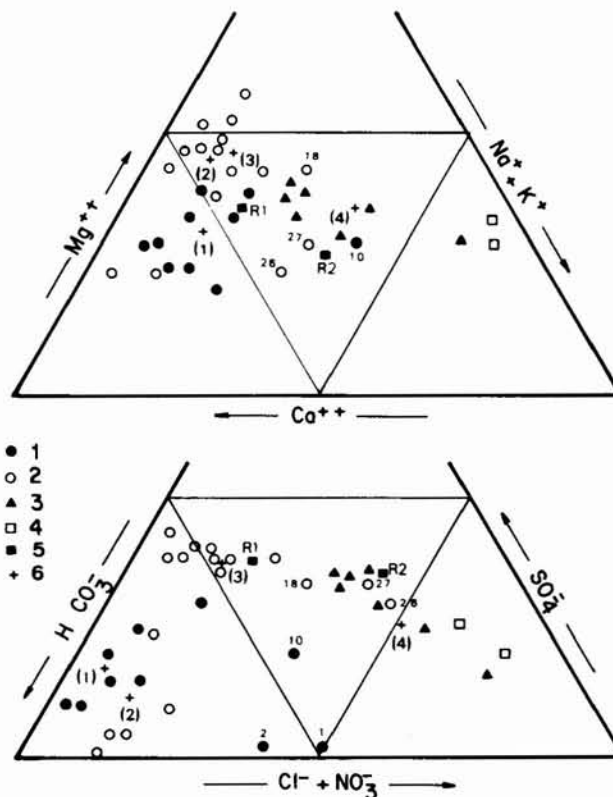


Fig. 2.—Proporciones iónicas de los puntos de agua analizados.—
1: Puntos en relación con metapelitas nevado-filábrides. 2: Puntos en relación con acuíferos alpujárrides. 3: Puntos del acuífero del delta. 4: Muestras de las Albuferas. 5: Muestras de aguas superficiales. 6: Composiciones medias de los grupos de aguas deducidos del análisis «cluster» (más detalles en texto).

de Análisis «Cluster» y Factorial (programas de Davis, 1973, adaptados por Padilla *et al.*, 1986), cada vez más utilizadas de manera rutinaria en este tipo de investigaciones (Benavente *et al.*, 1983; Ibáñez y Sanchis, 1983; Benavente y Carrasco, 1984; Fernández-Rubio y Benavente, 1984; Moral *et al.*, 1984; Martínez Gil *et al.*, 1986; Candela y Pawlowsky, 1987; Marcos y Molina, 1987).

En la figura 2 se representan en diagramas triangulares las muestras estudiadas. La figura 3 incluye diagramas poligonales complementados con cortes hidrogeológicos muy simplificados, que pretenden esquematizar la tipología de los puntos de agua más representativos de la cuenca. En ambas figuras se representan también los puntos ficticios correspondientes a las composiciones medias de grupos de aguas obtenidos a partir del análisis «Cluster». Las figuras 4 y 5 ilustran en forma de dendrogramas los resultados de la aplicación de dicha metodología, donde se ha seleccionado el coeficiente de correlación lineal como medida original de semejanza entre las muestras.

Resultados

En primer lugar hay que señalar que la mineralización de los puntos muestreados, representativos de las aguas subterráneas en la cuenca, cubre un amplio espectro: desde unos 50 mg/l a casi 5 g/l. Más variación aún se registra en algunos componentes iónicos, caso de sulfatos y sodio, donde las diferencias de concentración alcanzan los tres órdenes de magnitud.

De acuerdo con la procedencia de las muestras, según se aprecia en la figura 2, el único grupo que presenta una cierta individualidad en el diagrama, en especial en el campo de los aniones, es el de los puntos correspondientes al acuífero costero. Dentro del ámbito de la cuenca se caracterizan por registrar las proporciones más elevadas de cloruros. Las diferencias entre las distintas muestras de este acuífero estriban sobre todo en variaciones en las relaciones iónicas Cl^-/SO_4^{2-} y Ca^{2+}/Na^++K^+ , que fundamentalmente responden a procesos de mezcla con aguas congénitas salobres en relación con depósitos litorales recientes y a fenómenos asociados de intercambio catiónico (Benavente *et al.*, 1987). Dentro de ese mismo ámbito hidrogeológico destacan, a su vez, las muestras obtenidas en las dos principales albuferas, que son las que presentan mayor proporción de cloruro sódico de la cuenca. Recientemente se ha llevado a cabo la inves-

tigación hidrodinámica e hidroquímica detallada de este sector de interés ecológico (Benavente, 1987).

A tenor de lo expuesto, las muestras del acuífero costero han sido consideradas como un grupo hidroquímico suficientemente homogéneo a nivel de cuenca, mientras que, dentro de dicho acuífero, las albuferas presenta rasgos singulares. En la tabla 1 se incluyen los valores medios de este grupo (4), a partir de los cuales se ha representado en los diagramas de las figuras 2 y 3, que indican una facies hidroquímica de tipo clorurada sódico-magnésica y TSD algo superior a 1,5 g/l, frente a la de las albuferas, que es netamente clorurada sódica y con TSD unas tres veces superior.

Los puntos asociados a materiales nevado-filábrides presentan mayor variedad hidroquímica. Para facilitar la interpretación se ha efectuado en ellos un análisis «Cluster». El dendrograma que resulta (fig. 4) pone de manifiesto una serie de muestras afines (1) y dos singularidades: puntos 1-2 y 10.

Los puntos 1 y 2 corresponden a surgencias situadas en las áreas elevadas de la cuenca (altitudes aproximadas de 2.050 y 1.900 metros, respectivamente). Destacan, sobre todo, por su baja mineralización, del orden de 50 mg/l. Su posición en el diagrama inferior de la figura 2 refleja la elevada proporción de nitratos (15-25%) en el total de aniones. Como se

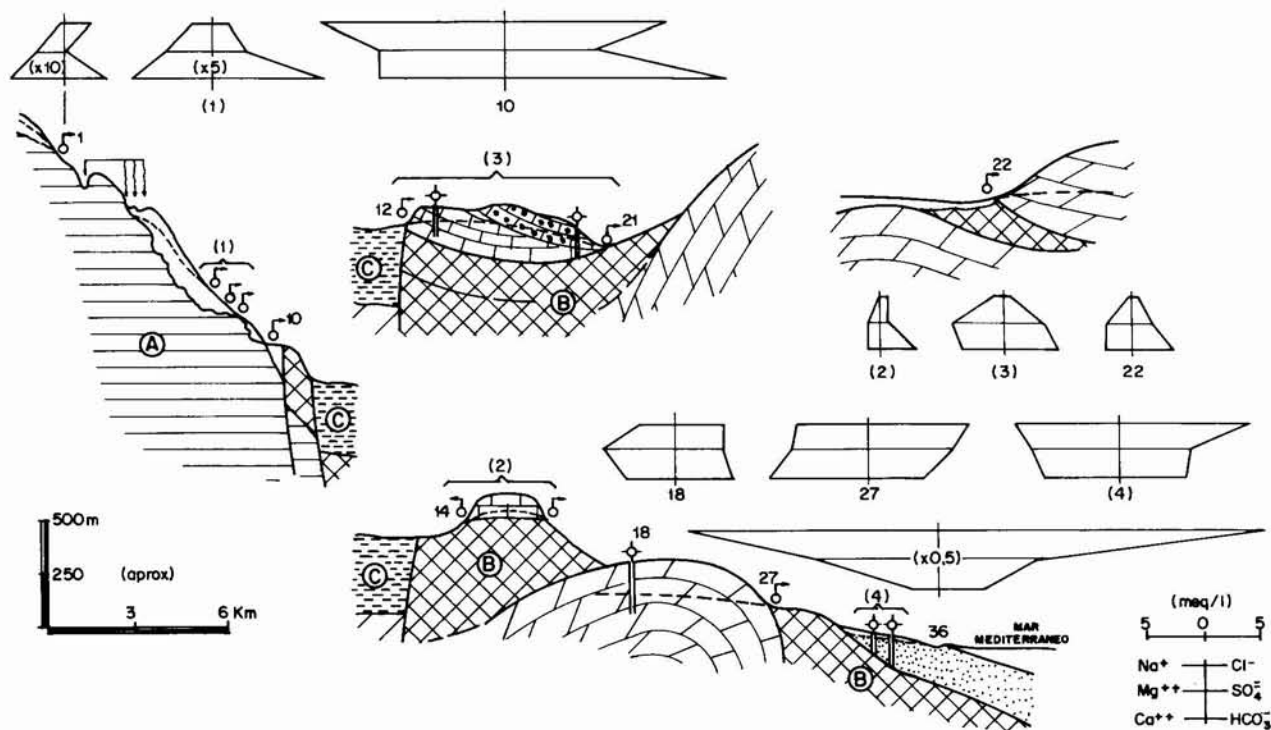


Fig. 3.—Cortes esquemáticos, en dirección aproximada N-S, ilustrativos de la tipología hidrogeológica de los puntos de agua más representativos de la cuenca, acompañados de diagramas hidroquímicos poligonales (algunos de los cuales tienen la escala modificada para facilidad de la representación). Con paréntesis se indican los grupos de puntos afines resultantes del análisis «cluster» (ver texto y leyenda de la figura 1 para más detalles).

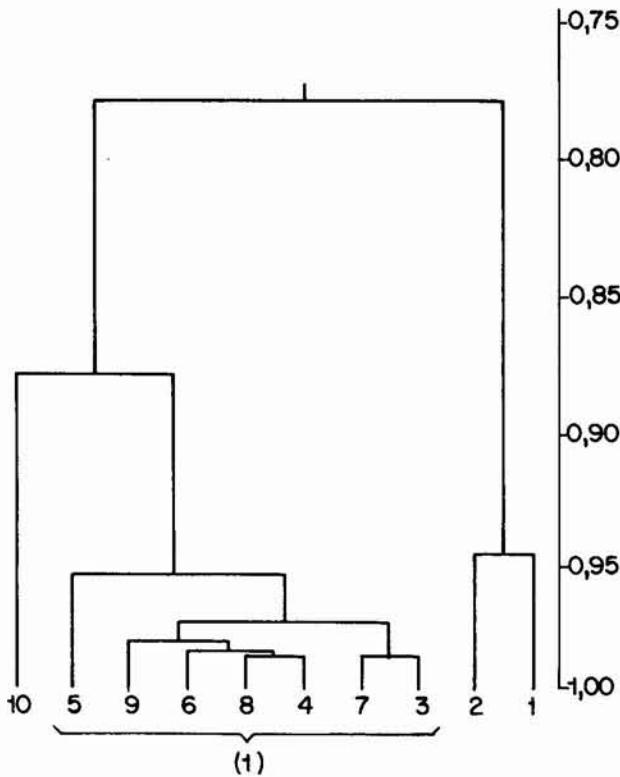


Fig. 4.—Dendrograma correspondiente a los puntos de agua en relación con materiales nevado-filábrides.

esquematiza en la figura 3, su origen debe estar en relación con sistemas de flujo epidérmico en la franja de alteración de los esquistos y cuarcitas.

La singularidad del punto 10 reside, además de presentar carácter termal, en su mineralización relativamente elevada, unos 3 g/l, y su alta proporción de cloruro sódico disuelto (fig. 2). El contenido muy alto en bicarbonatos que registra está en relación con un exceso de gas carbónico libre. Fuentes de este tipo, denominadas «agrias» en los toponímicos alpujarreños, son frecuentes en la comarca y suelen jalonar la traza del accidente que delimita septentrionalmente el Corredor de las Alpujarras, luego prolongado hacia otros sectores de la cordillera (Benavente y Sanz de Galdeano, 1985). Esta situación, que se esquematiza en la figura 3, es análoga a la del caso, más conocido, de Lanjarón, unos 25 km al Oeste, algunas de cuyas surgencias presentan similar quimismo (Rodríguez-Gordillo *et al.*, 1981).

La composición media de las muestras recogidas en el citado grupo (1) indica facies bicarbonatada cálcica a cálcico-magnésica, con mineralización del orden de 200 mg/l. Aunque su origen está también en relación con la franja superficial meteorizada, en su mayor parte se induce por una práctica de recarga artificial que data del período de dominación musulmana,

denominada «careo» en la toponimia local, la cual consiste, básicamente, en desviar agua de la cabecera de los ríos en época de crecida y provocar su percolación en determinados enclaves favorables, de manera que la infiltración demora un cierto lapso de tiempo que suele bastar para asegurar el caudal de estiaje de las fuentes, situadas unos centenares de metros más abajo, utilizadas normalmente para el abastecimiento a los núcleos de población.

Respecto al tipo de aguas representado por los manantiales 1 y 2, el principal efecto hidroquímico en relación con la citada práctica de recarga parece ser, además del lógico incremento en la mineralización, el aumento en la proporción de bicarbonatos y sulfatos en detrimento de la de cloruros y nitratos (fig. 2).

El dendrograma correspondiente a los puntos asociados a los acuíferos alpujárrides (fig. 5) pone de manifiesto la existencia de, al menos, tres grupos de aguas. Uno de ellos, señalado como (2), comprende a

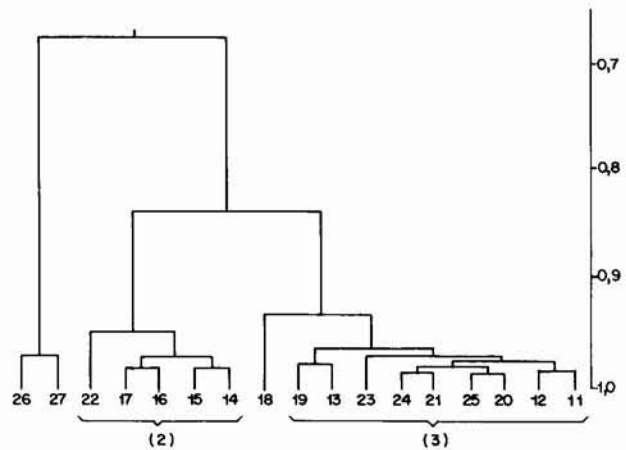


Fig. 5.—Dendrograma correspondiente a los puntos de agua en relación con los acuíferos alpujárrides.

los pequeños manantiales que drenan afloramientos «colgados», cuya tipología se esquematiza en la figura 3; su facies es bicarbonatada cálcico-magnésica, con TSD medio del orden de 300 mg/l. Dentro de este grupo, el punto 22, en relación con la unidad inferior, registra comparativamente mayores contenidos en sulfatos y mineralización más alta que los restantes. El modelo hidrogeológico para este punto significativo de descarga natural debe corresponder, al igual que para los anteriores, a una tipología de drenaje a muro (figura 3).

La agrupación más numerosa de la figura 5 (3) reúne a una serie de surgencias y captaciones en relación con la unidad alpujárride superior y bordes de la depresión de Berja. Se trata, por tanto, de un ámbito hidrogeológicamente más complejo. La composición media de este grupo (tabla 1) indica un TSD de casi

Tabla 1.—Valores medios de conductividad eléctrica (C.E. a 20°, en microS/cm) y de los contenidos de los iones mayoritarios (en mg/l) para los diferentes grupos de puntos de agua que se han considerado en este estudio (A); también se incluyen una serie de puntos singulares (B) y muestras de agua de escorrentía superficial (C).

	A				B					C	
	(1)	(2)	(3)	(4)	1	10	18	27	36	R1	R2
C.E.	215	314	716	2.093	61	4.100	1.325	1.945	7.010	780	1.933
Cl ⁻	6,5	14	32	403	8,5	517	149	303	1.992	71	290
SO ₄ ⁻	24	25	188	316	0,5	366	235	346	763	190	345
HCO ₃ ⁻	132	211	300	353	22	1.236	330	351	474	254	251
NO ₃ ⁻	3	10	14	49	7,8	13	13	5	0	6	6
Na ⁺	9	6	18	220	0,5	374	87	153	1.069	36	181
Mg ⁺⁺	11	23	54	100	2m9	142	78	87	290	38	76
Ca ⁺⁺	28	39	78	136	10	233	92	162	120	84	148
K ⁺	0,7	1,2	1,5	8	0,4	28	2	6	31	2,6	6,4

700 mg/l y facies mixta: bicarbonatada-sulfatada magnésico-cálcica. Respecto al grupo (2) denota, además del incremento de salinidad, un aumento neto en la relación SO₄⁻/HCO₃⁻.

Por último, el área de descarga de las Fuentes de Marbella, representada en este muestreo por el punto más caudaloso de drenaje y por un sondeo surgente situado aguas arriba, presenta rasgos hidroquímicos peculiares respecto al resto de los puntos en relación con los acuíferos alpujárrides de la cuenca: además de carácter termal, registra salinidad del orden de 1,5 g/l y facies mixta cloro-sulfatada cálcica, con proporción también apreciable de magnesio y sodio. Tales rasgos, por lo demás, son asimilables a los de otras surgencias igualmente representativas, a nivel regional, del drenaje de esta unidad y cuya tipología hidrogeológica es también bastante análoga: caso de las ventanas tectónicas de Albuñol (Nieto, 1974; Almecija *et al.*, 1986) y Sierra de Lújar (sector de Rules: Carrasco, 1981).

La singularidad del punto 18 en la figura 5 responde a su carácter intermedio, en mineralización y facies, entre las aguas del grupo (3) y las del área de descarga de Marbella, lo que traduce el hecho de su localización próxima a la unidad superior, aunque en conexión hidrogeológica con la inferior, según ya se citó con anterioridad.

El elevado caudal de las Fuentes de Marbella en relación con las aportaciones medias superficiales en ese punto, es la causa de que la calidad química del río Adra aguas abajo esté condicionada estrechamente por la de las aguas subterráneas recibidas. A su vez, como ya ha sido citado, es la calidad química de las aguas del río la que condiciona el quimismo de gran parte del acuífero detrítico costero.

La comparación entre las muestras R1 y R2 (tabla 1), tomadas en el curso del río aguas arriba de la presa y aguas abajo de las surgencias, respectivamente, ilustra sobre dicha modificación. Se aprecia (fig. 2)

cómo la influencia de las Fuentes de Marbella se traduce, a nivel catiónico, en un incremento neto de la proporción de Na⁺ frente a la de alcalinotérreos; a nivel aniónico el aumento corresponde, fundamentalmente, a la relación Cl⁻/HCO₃⁻.

Como paso previo al Análisis Factorial, se ha calculado la matriz de los coeficientes de correlación entre las variables iónicas consideradas. Se pone de manifiesto una relación muy estrecha (coeficientes superiores a 0,90) entre cloruro, sodio, magnesio y potasio. De hecho, existe una relación lineal casi perfecta (0,99) entre los dos primeros. El ión sulfato lo está, a su vez, con el magnesio (0,96) y también con la pareja cloruro-sodio (0,87). La mayor correlación del calcio es con el bicarbonato, con coeficiente de 0,74. El ión nitrato, por el contrario, no muestra ninguna relación significativa con el resto de los iones y presenta coeficientes inferiores a 0,40 en todos los casos. Todas las correlaciones han resultado positivas.

De los Componentes Principales asociados con la citada matriz de correlación, el primero responde del 70% de la varianza original; los tres siguientes explican, respectivamente, el 13, 10 y 3%. La selección de los tres primeros autovalores y su interpretación como nuevas variables no correlacionadas que son, a su vez, combinación lineal de las ocho originales («factorización») respondería, por tanto, de casi el 95% de la varianza que subyace en la matriz de correlación.

De los tres factores retenidos, una vez sometidos a rotación por el criterio Varimax, el primero está condicionado por las variables siguientes: cloruro, sulfato, sodio, magnesio y potasio. Su significado es, pues, muy general, al estar en relación con los procesos de adquisición mayoritaria de salinidad por las aguas subterráneas. Más concreto es el segundo factor, que responde exclusivamente de las variaciones en el ión nitrato. Ello implica que, a nivel de cuenca, los procesos, fundamentalmente antrópicos, que determinan su adquisición por las aguas subterráneas tienen una

importancia que no es desdeñable. El factor tercero está condicionado por las variaciones en los iones bicarbonato y calcio, lo que no es de extrañar habida cuenta de la importancia de los materiales carbonatados en la cuenca y de la existencia en ellos de diferentes tipos de flujo subterráneo, lo que implica variaciones en la forma en que tales iones pasan a disolución en los acuíferos correspondientes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se encuadra en el estudio, más amplio, del medio físico de la cuenca del río Adra, en el que se han considerado otros aspectos además de los recursos hídricos, y ha sido financiado por el ICONA en el marco del Proyecto LUCDEME.

Nuestro agradecimiento a dicho organismo, así como al profesor Pulido Bosch por su colaboración en el trabajo, de cuyo desarrollo ha sido responsable, y al resto de los compañeros del Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada que también han participado en el mismo.

Referencias

- Aldaya, F.; Baena, J. y Ewert (1983a). *Mapa Geológico de España*. 1:50.000 (1.043). Berja. IGME.
- Aldaya, F.; Baena, J. y Ewert, K. (1983b). *Mapa Geológico de España*. 1:50.000 (1.057). Adra. IGME.
- Aldaya, F.; Campos, J.; García-Dueñas, V.; González-Lodeiro, F. y Orozco, M. (1984). El contacto Alpujarrides Nevado-Filábrides en la vertiente meridional de Sierra Nevada. Implicaciones tectónicas. En: *El borde mediterráneo español: evolución del orógeno bético y geodinámica de las depresiones neógenas*. CSIC, Granada, 18-20.
- Almecija, C.; Benavente, J. y Fernández-Rubio, R. (1986). Evolución hidroquímica en el acuífero aluvial de la rambla de Albuñol (Granada). *II Simp. Agua Andalucía*, II: 3-12. Granada.
- Benavente, J. (1982). *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 571 págs.
- Benavente, J. (1987). *Síntesis hidrogeológica de las Albuferas de Adra (Almería). Contribución al Estudio Integral de las Albuferas de Adra (Almería)*. Inst. Est. Almerienses. Mem. inédita. 42 págs. (en prensa).
- Benavente, J.; Almeida, C.; Castillo, A. y Oliveira, M. (1983). Algunos ejemplos de aplicación del Análisis Factorial al tratamiento de datos hidroquímicos. *Hidrogeol. y Rec. Hídrául.*, 9: 297-310. Madrid.
- Benavente, J. y Carrasco, F. (1984). Evolución hidroquímica en el río Guadalhorce (Málaga). *Bol. Geol. Min.*, 95: 374-382.
- Benavente, J.; Pulido Bosch, A. y Morales, G. (1987). Principales rasgos hidrogeoquímicos del delta del río Adra. *Hidrogeol. y Rec. Hídrául.*, 11: 131-140. Palma de Mallorca.
- Benavente, J. y Sanz de Galdeano, C. (1985). Relación de las direcciones de karstificación y del Termalismo con la fracturación en las Cordilleras Béticas. *Estudios Geol.*, 41: 177-188.
- Benavente, J. y Vega, R. (1986). Relaciones entre erosión fluvial y tectónica de fractura en un sector de Las Alpujarras. *Mediterránea, Ser. Geol.*, 5: 135-146.
- Candela, L. y Pawlowsky, V. (1987). Análisis estadístico de los datos hidroquímicos del acuífero de Carne-Capellades-Sant Quinti (Barcelona). *Hidrogeol. y Rec. Hídrául.* 11: 463-4575. Palma de Mallorca.
- Carrasco, A.; Carrasco, F.; Ruiz-Tagle, M. y Thauwin, J. P. (1981). Características hidrogeológicas del acuífero calizodolomítico de la Unidad Gádor-Lújar en el sector de Berja-Benar (Almería) y su relación con las Fuentes de Marbella. *I Simp. Agua Andalucía*, I: 249-268. Granada.
- Custodio, E. (1976). Hidrogeoquímica. In: *Hidrología subterránea*; Custodio, E. y Llamas, M. R., Eds. 2 t. Omega. Barcelona.
- Dabrio, C.; Goy, J. L. y Zazo, C. (1984). Dinámica litoral y ambientes sedimentarios en el golfo de Almería desde el Tirreniense hasta la actualidad. *I Congr. Esp. de Geología*, I: 507-522.
- Davis, J. C. (1973). *Statistics and Data Analysis in Geology*. Wiley. New York.
- Díaz de Federico, A.; Burgos, J.; Almarza, J. y Orozco, M. (1981). *Mapa Geológico de España*. 1:50.000 (1.028). Aldeire. IGME.
- Fernández-Rubio, R. y Benavente, J. (1984). Estudio hidroquímico de los aportes de agua a la mina de Reocín (Santander). *VII Congr. Int. Minero Metalug.*, 257-278. Barcelona.
- González-Donoso, J. M.; Rodríguez-Fernández, J.; Estévez, A.; Linares, D.; López-Garrido, A. C.; Sanz de Galdeano, C. y Serrano, F. (1983). El Neógeno del borde SE de la depresión de Granada y su conexión con el corredor de Las Alpujarras. *X Congr. Nac. de Sedimentología*, 5: 33-34. Menorca.
- Goy, J. L. y Zazo, C. (1983). Pleistocene tectonics and shorelines in Almería (Spain). *Bull. INQUA*, Neotectonics Comisión; 9-13.
- Goy, J. L. y Zazo, C. (1983). Niveles marinos cuaternarios y su relación con la neotectónica en el litoral de Almería (España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.)*, 80: 171-184.
- Ibáñez, V. y Sanchis, E. (1983). Utilización de modelos estadísticos multivariados en hidrogeoquímica. *Hidrogeol. y Rec. Hídrául.*, 9: 263-275. Madrid.
- IGME (1977). *Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Sur (Almería)*. PNIAS. Memoria Resumen. Colec. Informe. 145 págs. Madrid.
- IGME (1982). *Síntesis de los datos hidrogeológicos y de calidad de las aguas subterráneas destinadas al Plan Hidrológico Nacional. Cuenca Sur, sector oriental*. Informe inédito. II: 67-71.
- IGME (1980). *Calidad de las aguas subterráneas en las cuencas del Sur de España*. Col. Informe. 151 págs. Madrid.
- Jabaloy, A. (1984). Evolución de la desembocadura del río Adra (Almería). *I Congr. Esp. de Geología*, I: 523-534. Segovia.
- Marcos, L. A. y Molina, M. A. (1987). Aplicación del Análisis Factorial al estudio hidroquímico de los acuíferos de los alrededores de Andújar (Jaén). *Hidrogeol. y Rec. Hídrául.*, 12: 857-868. Palma de Mallorca.
- Martínez-Gil, F. J.; Pablo, F. y Sánchez, J. A. (1986). Estudio hidrogeoquímico de los acuíferos carbonatados del Macizo de Guara (prov. de Huesca). *Jorn. Karst en Euskadi*, 253-274. San Sebastián.
- Moral, S.; Pulido, A. y Valenzuela, P. (1984). Aplicación de los análisis Cluster al estudio de características físico-químicas de aguas subterráneas. *Estudios Geol.*, 40: 193-200.
- Nieto-Salvatierra, M. (1974). *Estudio hidrogeológico de la rambla de Albuñol (Granada)*. Monogr. Geol. Univ. Granada. 102 págs.

- Padilla, A.; Pulido, A. y Benavente, J. (1986). Programas para elaboración y tratamiento de datos físico-químicos de interés en hidrogeología. *II Simp. Agua en Andalucía*, I: 437-448. Granada.
- Pulido, A. (1988). Síntesis hidrogeológica del delta del río Adra (Almería). *Simp. Int. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*, II: 145-170. ETSIMM-IGME.
- Pulido, A.; Benavente, J.; Castillo, A. y Padilla, A. (1986). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Adra*. Dpto. Hidrogeología, Univ. Granada (mem. inédita), 66 págs.
- Pulido, A.; Calaforra, J. M. y Padilla, A. (1986). Rasgos climatológicos de la cuenca del río Adra (Almería). *II Simp. Agua en Andalucía*, II: 637-653. Granada.
- Pulido, A.; Morales, G. y Benavente, J. (1988). Hidrogeología del delta del río Adra (Almería). *Estudios Geológicos* (en prensa).
- Rodríguez-Fernández, J. (1982). *El Mioceno del sector central de las Cordilleras Béticas*. Tesis Doct., Univ. Granada. 379 págs.
- Rodríguez-Gordillo, J.; Vellilla, N. y Fernández-Rubio, R. (1981). Hidroquímica y termalismo de las aguas de Lanjarón (Granada). *I Simp. Agua en Andalucía*, I: 501-508. Granada.
- Sanz de Galdeano, C.; Rodríguez-Fernández, J. y López-Garrido, A. C. (1985). A strike-slip fault corridor within the Alpujarra mountains (Betic Cordilleras, Spain). *Geol. Rundschau*, 74/3: 641-655.
- Vega, R. y García Rossell, L. (1977). Valor de la erosión fluvial en la cuenca del río Grande (provincias de Granada y de Almería). *V. Coloq. Geografía*, 141-150. Granada.

Recibido el 10 de enero de 1989
 Aceptado el 1 de marzo de 1989