

## SIERRA NEVADA, UN MACROSISTEMA HIDROLÓGICO DESIGUALMENTE CONOCIDO

A. Pulido Bosch, A. Castillo, G. Al Alwani, A. Vallejos,  
W. Martín Rosales, J. Gisbert y M.L. Calvache

*G.I. "Recursos Hídricos y Geología Ambiental" Universidad de Granada. Proyecto AMB95-0493*

**RESUMEN.**- Sierra Nevada, Parque Natural, Reserva de la Biosfera y, posiblemente, Parque Nacional en un futuro próximo, constituye un macrosistema hidrológico de alta potencialidad, por recibir importantes aportaciones pluviométricas, una parte considerable de las mismas en forma de nieve, con el consiguiente poder regulador; la existencia de una orla de materiales carbonatados acuíferos, estrechamente relacionados con las aguas superficiales, incrementa el poder regulador del macizo, al poder ser utilizados como embalses reguladores de la escorrentía. Pero Sierra Nevada es también un gran almacén energético, susceptible de ser utilizado como fuente de energía hidroeléctrica, favorecida por los grandes desniveles y caudales existentes. Pero pese a la importancia hidrológica del macizo, aún persisten notables deficiencias de conocimiento, como la cuantía y distribución de las precipitaciones, los procesos relacionados con la nivología (fusión, sublimación y fusión), la alimentación del agua de deshielo al suelo, al flujo hipodérmico, a los niveles más profundos, a los cursos de agua, a la vegetación, etc. El funcionamiento hidrogeológico tampoco se conoce aún bien, tanto globalmente como en detalle; se sabe que existen sistemas de flujo locales, intermedios y regionales; áreas con notables anomalías hidrogeotérmicas e hidrogeoquímicas, destacando de entre estas últimas la existencia de aguas carbogaseosas y ferruginosas, con sensibles cambios de composición en distancias muy cortas, lo que complica considerablemente los esquemas interpretativos; tampoco se conoce bien el poder mineralogénico de estas aguas muy mineralizadas, que producen depósitos asociados en sus áreas de descarga.

**Palabras clave:** *Aguas superficiales y subterráneas, uso conjunto, sistemas de flujo, aguas minero-medicinales.*

### INTRODUCCIÓN

Sierra Nevada constituye un macrosistema hidrológico de gran potencialidad, aprovechado en la actualidad en régimen prácticamente natural. Su forma alargada paralela al litoral mediterráneo y el amplio rango altitudinal que cubre, le confieren una serie de peculiaridades climatológicas, botánicas, geomorfológicas e hidrológicas. En su línea de cumbres se localiza la divisoria entre las cuencas atlántica (cuenca del Guadalquivir) y mediterránea (cuenca Sur); los cursos superficiales tienen un marcado régimen nival en cabecera, que se amortigua en el sentido de la escorrentía, pasando a ser pluvionival en las cuencas bajas, así como en las más orientales del macizo.

Las precipitaciones, que explican los regímenes citados, tienen lugar preferentemente en forma de nieve por encima de los 2.400 m de altitud durante el período otoñal e invernal, y más esporádicamente, durante la primavera. La precipitación aumenta con la altitud,

aunque sin excluir la posible existencia de un umbral (Pulido Bosch, 1980), y disminuye hacia el Este. La temperatura disminuye, lógicamente, con la altitud, con un gradiente medio anual de  $-0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , aunque existe cierta dispersión de los valores según sectores y orientaciones (op. cit.). Con todo ello, parece lógico que la evapotranspiración también disminuya en el mismo sentido que lo hace la temperatura, con valores máximos en los meses de estío y mínimos durante el invierno.

Desde el punto de vista geológico, en Sierra Nevada se diferencian dos grandes dominios, ambos correspondientes a las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas: el Complejo Nevado-Filábride y el Alpujarride; el Complejo Maláguide no está presente dentro del macizo, aunque sí en los bordes. El Complejo Nevado-Filábride está representado por los mantos de Mulhacén y Veleta; desde el punto de vista litológico, dominan los micasquitos, que llegan a superar varios miles de metros de espesor -aunque también están afloran otros materiales como cuarcitas, mármoles, anfibolitas y serpentinitas (Puga, 1976; Díaz de Federico, 1980). Los materiales alpujarrides afloran en forma de orla alrededor del núcleo nevado-filábride, con anchura muy variable de unos sectores a otros. En todos los casos se diferencian una serie de mantos -hasta cinco en algunas transversales- generalmente constituidos por una base metapelítica con cuarcitas, una secuencia de transición calcoesquistosa y una formación carbonatada a techo; esta última puede alcanzar varios cientos de metros de espesor, aunque en algunos mantos está escasamente representada (Aldaya, 1969; Gallegos, 1975; Navarro-Vilá, 1976; Estévez *et al.*, 1985; Sanz de Galdeano *et al.*, 1995). Entre los aspectos tectónicos que tienen interés hidrológico, cabe reseñar la estructura en mantos de corrimiento de geometría irregular, la existencia de un levantamiento reciente de todo el macizo y la actuación de fallas en períodos muy recientes, aún activas muchas de ellas (Galindo, 1993). Todo ello ha condicionado, en gran medida, la red de drenaje, su morfología, densidad, etc.

La reciente Conferencia Internacional "Sierra Nevada, Conservación y Desarrollo Sostenible" (Chacón y Rosúa, 1996) ha reunido a expertos de todo el mundo para abordar diferentes temas relacionados con el macizo. Los volúmenes que recogen los trabajos presentados constituyen una obra de consulta obligada para los estudiosos de Sierra Nevada. Las síntesis de Castillo (1985 y 1993) son también obras de consulta sobre los temas hidrológicos en el macizo.

## LAS AGUAS SUPERFICIALES

### Los cursos principales

Sierra Nevada reparte sus aguas entre la cuenca del Guadalquivir -vertiente Atlántica- y la cuenca del Sur de España -vertiente mediterránea-. Los afluentes del río Guadalquivir corresponden al Gadiana Menor y al Genil. El curso más representativo de la cuenca del Gadiana Menor es el río Fardes, que recoge las aguas que drenan hacia la Depresión de Guadix-Llanos del Marquesado; está regulado por el embalse del "Ingeniero Abellán" de reciente construcción. Son numerosos los arroyos y ramblas que aportan su escorrentía, comenzando por el Morollón y Alhama de Lugros, afluentes del río Fardes por su margen derecha, y Bernal, Alhorí, Alcázar, Lanteira y Gallego, entre otros menores, que son afluentes del río Verde (o de Guadix), afluente a su vez del río Fardes por su misma margen derecha. El río Genil, con sus afluentes Aguas Blancas y Maitena -por la margen derecha- y Monachil y Dílar- por la margen izquierda- completan los aproximadamente 700 km<sup>2</sup> de

cuenca atlántica. En esta subcuenca existen dos embalses ya construidos, el de Quéntar, sobre el río Aguas Blancas, y el de Canales, sobre el río Genil.

Los restantes ríos de Sierra Nevada pertenecen a la cuenca Sur, y desembocan al mar Mediterráneo; la superficie vertiente a esta cuenca es de unos 1.300 km<sup>2</sup>. Las subcuencas existentes son las de los ríos Guadalfeo, Adra y Andarax (figura 1). Lógicamente, todos estos ríos tienen una serie de afluentes de distinta envergadura. Los principales tributarios del río Guadalfeo -el de mayor cuenca vertiente de toda Sierra Nevada- son el Dúrcal, Torrente, Lanjarón, Chico, Poqueira, Trevélez y Cádiar; los tres primeros, junto con el río Albuñuelas, conforman el río Ízbor, que confluye en el Guadalfeo, propiamente dicho, aguas arriba de la presa de Rules, actualmente en construcción. Hay otro embalse en esta cuenca, este ya construido, que es el de Béznar, sobre el río Ízbor. La cabecera del río Adra está formada por una cabellera de afluentes, de entre los que destacan los ríos Mecina, Válor, Nechite, Laroles, Bayárcal y Alcolea. Sus aguas se regulan -en cierta medida- en el embalse de Benínar, aguas abajo de la confluencia de los afluentes citados. Finalmente, el río Andarax recoge las aguas del borde oriental y nororiental del macizo. Lo integran dos ramales principales, el río Laujar, y el río Nacimiento. Al contrario que las restantes subcuencas, la del Andarax carece por el momento de embalses de regulación.

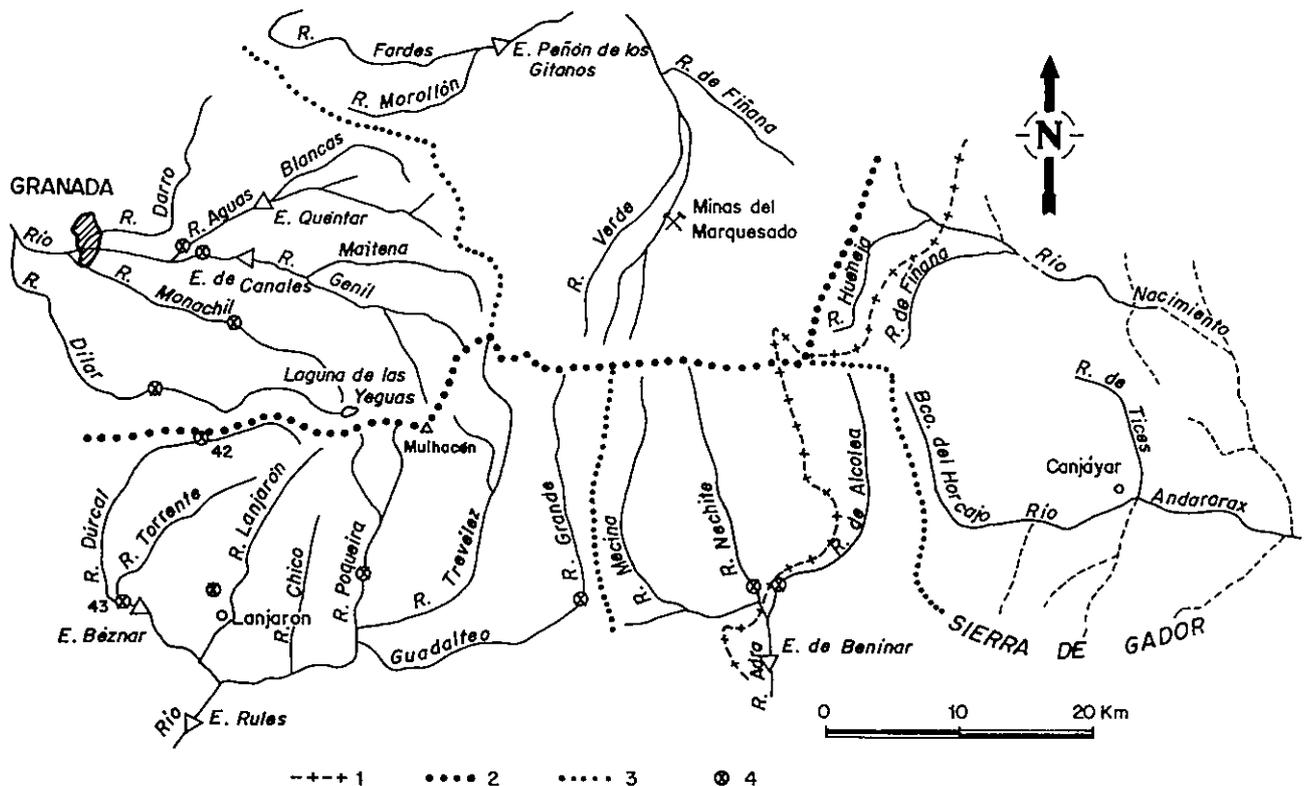


Figura 1.- Esquema hidrográfico de Sierra Nevada y sus bordes, con indicación de los principales embalses existentes o en construcción. 1: Límite provincial de Granada-Almería; 2: Divisoria atlántico-mediterránea; 3: Divisoria hidrográfica de subcuencas; ; 4: Estación de aforos.

Aparte de la red fluvial ya citada, existen otras aguas superficiales de suma importancia ecológica y paisajística en Sierra Nevada, como son las de las lagunas de su alta montaña; con aguas temporales o permanentes, su génesis está estrechamente ligada al último

periodo glacial, sea como cubetas de sobreexcavación o como cierres por frentes morrénicos (Soria y Soria, 1986-87). El número de ellas se aproxima al medio centenar, siendo las más numerosas las ubicadas en la cuenca del río Trevélez, en la vertiente mediterránea. Todas ellas son de gran belleza y constituyen hábitats muy singulares, dadas las características climáticas del área (Cruz, 1981). Todas permanecen en estado natural, a excepción de la de las Yeguas, que fue represada a mediados de los años setenta; después de varias obras de reacondicionamiento, hoy día presenta un impacto ambiental aceptable, aunque es discutible su función reguladora.

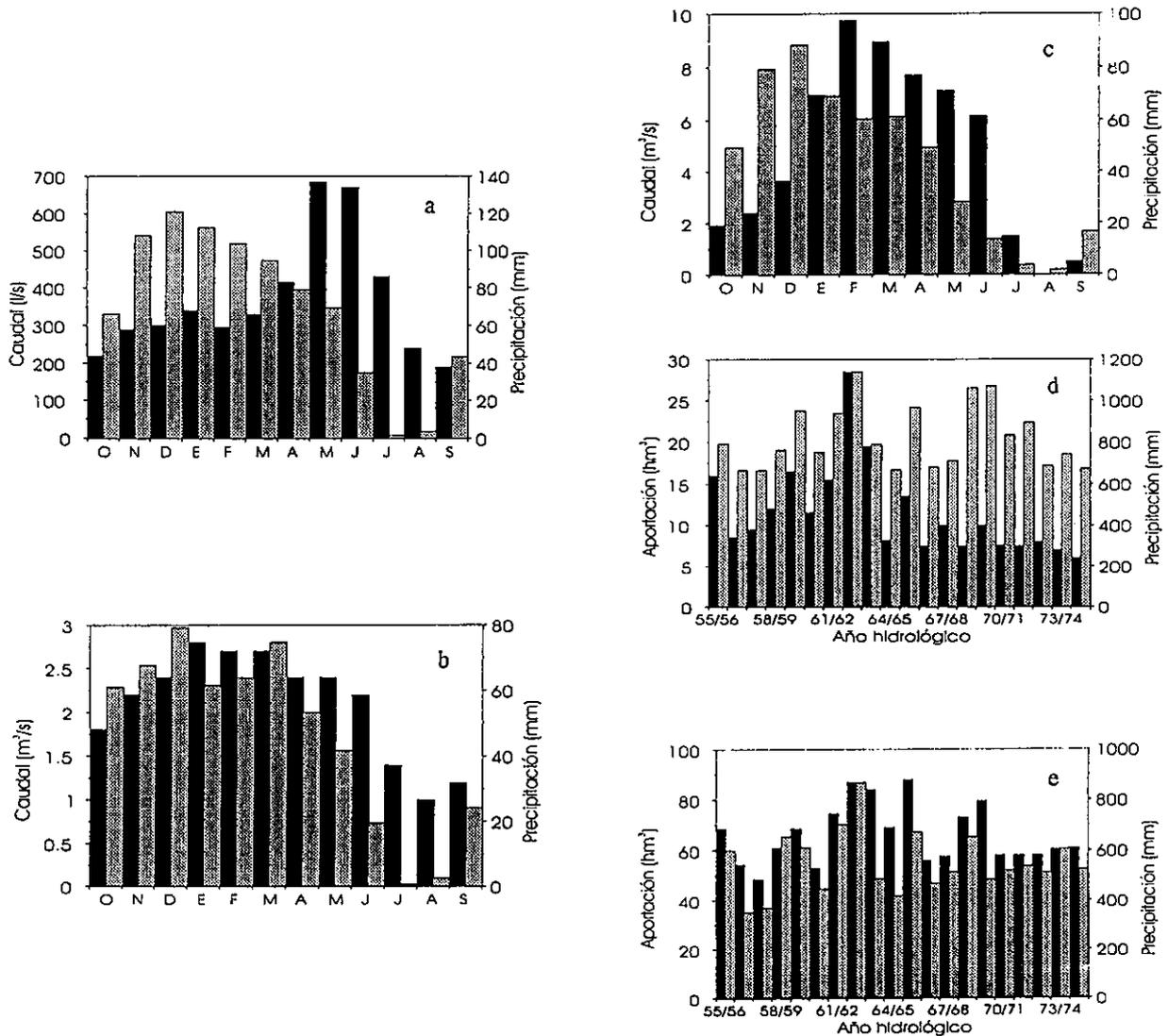


Figura 2.- Caudales medios mensuales en las estaciones de los Sauces, presa Melegís (en el río Dúrcal, números 42 y 43 de la figura 1) y azul de Lobres (a, b y c, respectivamente), a las que se superponen las precipitaciones medidas en Dúrcal presa, Dúrcal central y Vélez de Benaudalla. Las figuras d y e representan las aportaciones anuales en las dos primeras estaciones citadas.

## Régimen y aportaciones

Una característica común a todos los cursos fluviales de Sierra Nevada es su marcado régimen nival en las cotas más altas, amortiguado en el sentido del flujo. Al margen del efecto de eventuales aguaceros, queda claro que en cabecera es el deshielo el que controla, directa o indirectamente, la aportación de los ríos; no obstante, hay que precisar que hacia el Este es cada vez menos marcada la influencia nival, acompañada por un descenso de la altitud de la línea de cumbres y de las precipitaciones.

El caso de la cuenca del Guadalfeo puede ser representativo. En la figura 2 se muestran los caudales medios mensuales en las estaciones de los Sauces, Presa-Melegís -ambas en el río Dúrcal-, y del azud de Lobres, ya en el río Guadalfeo propiamente dicho. Se puede constatar cómo en la estación más septentrional -los Sauces- el régimen nival es bien marcado, con caudales máximos en los meses de Mayo y Junio; aunque la influencia nival es manifiesta en Presa-Melegís, ya el caudal máximo se registra en Enero. En cuanto a las aportaciones, se puede constatar la alta variabilidad existente, tal y como muestran la figura 2 y el cuadro 1. Las aportaciones decrecen considerablemente hacia el Este y al disminuir la altitud.

RÍO	Superficie (km <sup>2</sup> )	Aportación (hm <sup>3</sup> /año)	Extremos (hm <sup>3</sup> /año)	C.E.	Qs (l/s/km <sup>2</sup> )
Genil	184	84	57-116	0.59	14.5
Monachil	48	27	15-40	0.60	17.0
Dílar	45	27	15-47	0.60	19.0
Dúrcal (42)	20	12	6-28	0.59	18.8
Dúrcal (43)	328	65	49-86	0.30	6.3
Salado	5.2	1.2	0.9-1.5	0.35	7.3
Cádiar	67	14	26-9	0.3	6.5
Poqueira	81	53	87-29	0.72	20.6
Guadalfeo	1.250	258	-	0.28	6.
Ugíjar	128	11	2.3-23.5	0.16	2.8
Alcolea	190	17	3.5-36.3	0.17	2.8

*Cuadro 1.- Algunos parámetros hidrológicos de once estaciones de aforo localizadas en las cuencas de los ríos Genil, Guadalfeo y Adra. Datos tomados de Pulido Bosch (1980), Pulido Bosch et al. (1986) y Al-Alwani (1992). C.E.: Coeficiente de escurrentía; Qs: Caudal específico.*

## Simulación matemática de procesos hidrológicos

Con el fin de conocer mejor los procesos hidrológicos de Sierra Nevada, Al-Alwani (1996) lleva a cabo actualmente una investigación de Tesis Doctoral; la herramienta utilizada es el modelo HSPF (Hydrological Simulation Program FORTRAN), puesto a punto por la EPA. El modelo requiere una serie de datos y parámetros de entrada de tipo meteorológico y fisiográfico, obteniéndose -mediante los algoritmos de cálculo correspondientes- una serie de datos de salida.

Dentro de los primeros se precisan la precipitación, temperaturas máxima y mínima, evapotranspiración, radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío; para cada cuenca a simular se suministra, como datos más importantes, la latitud y altitud media -normalmente por segmentos- un factor corrector de la temperatura en relación con la altitud, la proporción de umbría debida a bosques o construcciones, los espesores máximos de nieve alcanzable, la densidad de la nieve, la temperatura del inicio de nevada y el contenido de agua en el manto nival.

Los parámetros fisiográficos e hidrológicos suministrados son, entre otros, longitud y pendiente del declive, porcentaje forestado, capacidad de infiltración del suelo, porcentaje de infiltración profunda, porcentaje de precipitación interceptada, y coeficiente de rugosidad de Manning. Como se puede suponer, no es fácil disponer de todos estos parámetros fiablemente medidos, motivo por el cual hay que proceder a su estimación y ajuste en pasadas sucesivas, tomando como criterio la bondad de la reproducción del caudal medido en una estación de aforos.

Los datos de salida suministrados por el modelo, susceptibles de ser también tomados como criterio de ajuste, son entre otros, volumen total del manto nival y contenido en cada fase, espesor medio de la capa de nieve, densidad, fracción de la cuenca cubierta por nieve, temperatura media de la capa nival, sublimación, agua liberada por fusión, cantidad total de agua almacenada en la cuenca, ETP y ETR, escorrentía total y fracción de sus componentes (superficial, hipodérmica y subterránea).

Los estudios realizados hasta la fecha han servido -entre otras cosas- para poner de manifiesto la existencia de numerosas deficiencias en el conocimiento de los procesos relacionados con la caída de nieve, su sublimación, fusión, retención, etc.

### Características hidroquímicas

Las aguas fluviales de Sierra Nevada, procedentes en su mayor parte de la fusión nival, como ya se ha comentado anteriormente, presentan muy bajos contenidos salinos. La determinación de la concentración iónica de la nieve pone de manifiesto que existiría un ligero aumento al disminuir la altitud, pero siempre con valores del residuo seco próximos a 20 mg/l (Pulido Bosch, 1980). Presenta un ligero contenido en  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  -en lo que se refiere a los aniones- y en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , en cuanto a los cationes.

Las aguas de los ríos más occidentales presentan valores de residuo seco comprendidos entre 35 y 170 mg/l. La facies dominante es bicarbonatada cálcica; el mayor contenido salino corresponde a la cuenca baja del río Lanjarón, donde debido a la presencia de niveles de yeso y de otras sales evaporíticas, los cloruros y el sodio llegan a ser dominantes (op. cit.; Pulido Bosch *et al.*, 1990).

Las actividades antrópicas tienen muy poca repercusión en el quimismo de las aguas de Sierra Nevada. Los efectos más indeseables se han relacionado siempre con las aguas residuales de los núcleos urbanos; especial repercusión ecológica han tenido los vertidos de la estación de esquí de Pradollano al río Monachil (Ropero, 1981; Zamora y Alba, 1993); la depuradora allí instalada, ha tenido problemas de eficiencia debido a la baja actividad biológica por las bajas temperaturas reinantes. La nueva depuradora, además de ser mucho mayor, al parecer ha conseguido superar las deficiencias citadas (J. Castillo, comunicación personal).

## LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

### Propiedades hidrogeológicas de los materiales

La mayor parte del macizo de Sierra Nevada se encuentra ocupado por materiales metapelíticos de comportamiento hidrogeológico -en principio- como acuífero pobre a muy pobre. Tal es el caso de los micasquitos nevado-filábrides, si bien existen ciertos factores que pueden modificar en sentido opuesto el comportamiento citado. Los materiales predominantes, los esquistos nevado-filábrides, quedarían incluidos dentro de las *rocas cristalinas* escasamente permeables, pero al mismo tiempo *rocas duras* ("hard rocks"; IAH, 1993) y/o rocas fisuradas. En ellas el almacenamiento y, sobre todo, la transmisión del agua se efectúa a través de las discontinuidades de la roca, que incluyen juntas de estratificación, esquistosidad, diaclasas, fisuras, fracturas, zonas brechificadas, etc.

En principio, la permeabilidad del material es directamente proporcional al cubo de la abertura de las fracturas, motivo por el cual siempre se ha considerado que la permeabilidad de este tipo de materiales decrece con la profundidad, llegándose a anular en la vertical, con el cerramiento de las fracturas. El modelo conceptual de acuífero fisurado considera dos elementos, uno *capacitivo* -integrado por pequeñas discontinuidades del material, incluyendo una eventual participación de la matriz, si ésta tiene cierta porosidad- y otro *transmisivo*, que estaría formado por fracturas abiertas alimentadas por bloques capacitivos (Louis, 1974); el almacenamiento sería, en general, bastante bajo, y las reservas, por tanto, escasas. Las investigaciones realizadas ponen de manifiesto -especialmente en áreas llanas- que las fracturas permanecen productivas hasta sólo un centenar de metros de profundidad, lo cual no impide que a veces se detecten fracturas productivas a profundidades más elevadas. Tal podría ser el caso de Sierra Nevada, pero en este caso por el hecho de existir fenómenos de descompresión, asociados al fuerte relieve de sus laderas.

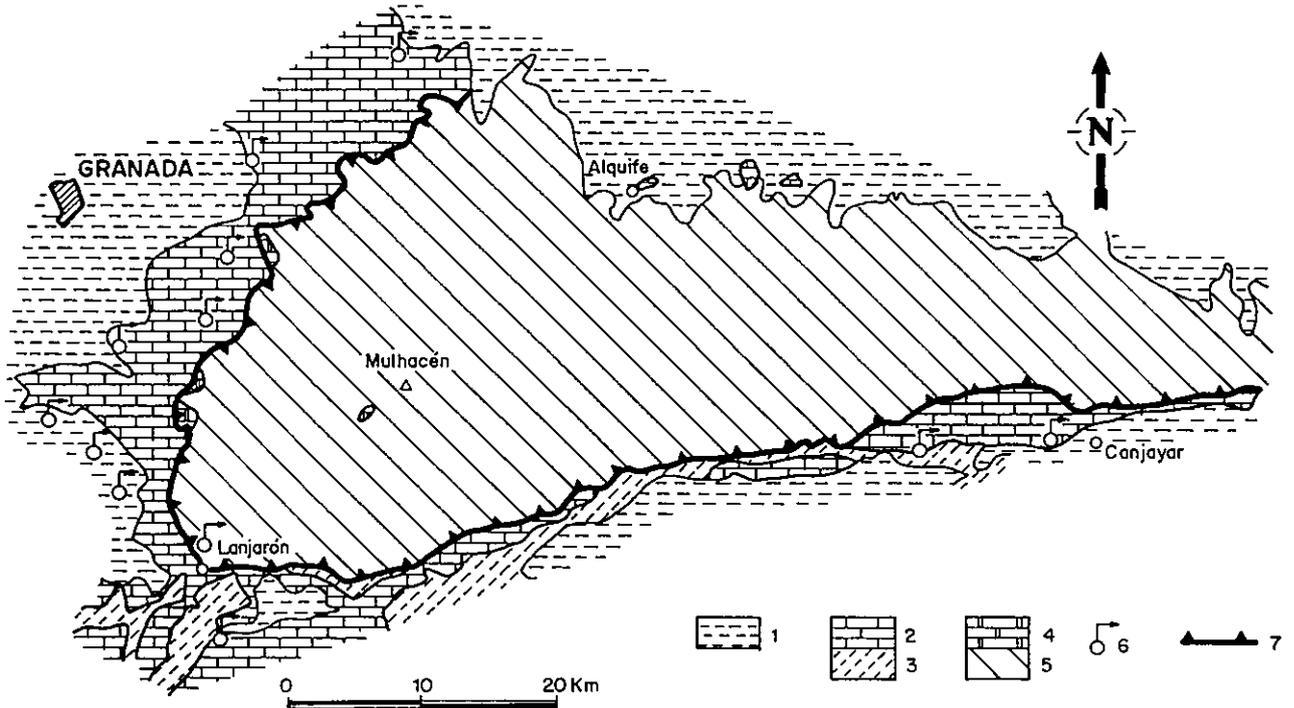
Además del acuífero fisurado, a lo largo de la franja superficial alterada, descomprimida y recubierta de materiales coluvionares ligados a los procesos glaciares y periglaciares, se desarrolla un acuífero granular de desigual continuidad lateral, en gran medida conectado con el fisurado, aunque a veces en el contacto de ambos se detecten rezumes y pequeñas surgencias. Dada la gran heterometría y angulosidad de los materiales detríticos y de alteración que conforman la capa suprayacente a la roca madre, la permeabilidad de esta franja es baja.

Lo expuesto también es válido para la base metapelítica de los mantos alpujárrides, aunque estos materiales afloran en muy poca extensión en Sierra Nevada. De todas formas, y dado que el grado de metamorfismo de estos materiales es menor, la permeabilidad sería aun más baja; un caso extremo de baja permeabilidad sería el de las filitas alpujárrides ("launas"), que como es bien sabido se emplean como material impermeabilizante en la Alpujarra (para techumbres, balsas de riego, etc).

En resumen, en este tipo de materiales metapelíticos son frecuentes las surgencias de escaso caudal, raramente superior a 5 l/s; las captaciones en ellos no suelen superar los 10 l/s, con descensos de varios metros o incluso, decenas de metros. Los caudales específicos medios más frecuentes están comprendidos entre 0,02 y 0,5 l/s/m. Ello no impide que excepcionalmente se puedan superar 20 l/s (Alcalde y Pulido Bosch, 1991), especialmente cuando existen niveles menos plásticos intercalados, y en especial niveles cuarcíticos. El bajo valor de coeficiente de almacenamiento de estos materiales hace que los caudales se reduzcan sensiblemente tras el deshielo o la época lluviosa; en otros casos, la disminución del rendimiento se debe a la corrosión de las entubaciones metálicas, ya que se trata de aguas

normalmente ácidas y agresivas.

Por último, hay que reseñar los materiales acuíferos convencionales, tipo mármoles (figura 3), conglomerados y cuarcitas fisuradas y fracturadas; no alcanzan gran desarrollo dentro del complejo Nevado-Filábride, aunque allí donde se encuentran pueden actuar de colectores de las aguas de los materiales del entorno, menos transmisivos. Los afloramientos de mármoles adquieren escaso desarrollo dentro del macizo, por lo que su importancia en el almacenamiento global es también escasa.



**Figura 3.- Esquema hidrogeológico del macizo de Sierra Nevada y sus bordes. 1: Materiales detríticos de depresiones del contorno; 2 y 3: Materiales alpujárrides (2: rocas carbonáticas, y 3: filitas y esquistos esencialmente); 4 y 5: Materiales nevado-filábrides (4: mármoles y 5: metapelitas fundamentalmente); 6: Manantial representativo; 7: Contacto nevado-filábride-alpujárride.**

De la potencialidad hidrogeológica de los mármoles puede dar una idea el drenaje forzado de las minas de Alquife, que explotan el mineral que sustituye a los mármoles y/o que rellena todo un extenso aparato paleokárstico (Torres, 1980). Los sondeos de drenaje bombean un caudal conjunto próximo a los 300 l/s, necesario para mantener constantemente seco el fondo de la explotación a cielo abierto existente; los valores de la transmisividad obtenidos están comprendidos entre 5.000 y 15.000 m<sup>2</sup>/día (Medina *et al.*, 1978). Parte del agua bombeada ha servido para llevar a cabo una interesante experiencia de recarga artificial junto al río Verde (ITGE, 1991).

La serie carbonática alpujárride constituye el material acuífero por excelencia del macizo de Sierra Nevada; estos materiales se disponen en forma de orla alrededor del núcleo metapelítico nevado-filábride; a lo largo del borde occidental es donde alcanzan más amplitud sus afloramientos, mientras que están ausentes en casi todo el borde septentrional (figura 2). Debido a la desigual composición, textura y estructura de los carbonatos de estos mantos, sus características hidráulicas son también muy variables. Mientras que los carbonatos del

manto del Trevenque son dolomías muy trituradas -kakiritas-, los del manto de Víboras son esencialmente calizas bien estratificadas con numerosos indicios de karstificación. Las kakiritas son más homogéneas, pero de permeabilidad media sensiblemente más baja.

Dada la extensión que estos materiales ocupan en el borde occidental del macizo y debido al considerable espesor de las series permeables, se ha descrito la existencia de al menos dos sistemas de flujo (Pulido Bosch, 1980), uno relacionado con los ríos que surcan los materiales -manantiales de Huenes, abastecimiento a Monachil, los Berros...-, y otro intermedio, que tendría su sector de drenaje principal en la turbera de Padul -Ojo Oscuro, como manantial más representativo- y otros con anomalía térmica positiva (Bacamia, Baños de Chite y Urquizar, entre otros).

Los rendimientos de las obras que captan estos materiales carbonatados son muy variables de unos sectores a otros, aunque en casos excepcionales pueden superar los 200 l/s, con caudales específicos superiores a 100 l/s/m; por el contrario, otras captaciones resultan prácticamente improductivas, como corresponde al modelo conceptual de acuífero kárstico-fisurado (Bakalowicz *et al.*, 1995). Lo más habitual en sondeos en kakiritas es que se obtengan caudales comprendidos entre 20 y 30 l/s, con una decena de metros de descenso.

### Características hidrogeoquímicas y sistemas de flujo

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas ligadas a los materiales metapelíticos presentan gran variedad de facies, temperaturas y contenidos salinos. Como ejemplo de la diversidad de tipologías de aguas que pueden coexistir, se tiene el caso del entorno de Lanjarón; en este sector se pueden diferenciar dos tipos extremos, con toda una gama de transición (Rodríguez Gordillo *et al.*, 1981). Un grupo corresponde a aguas frías de bajo contenido salino y facies bicarbonatada cálcica, correspondientes a un flujo epidérmico o superficial; en el otro extremo afloran aguas con ligera anomalía térmica positiva, y contenido salino muy elevado, con facies clorurada sódica, ligadas a flujos profundos a través de fracturas y discontinuidades tectónicas del contacto nevadofilábride-alpujárride. Como resultado de mezclas variables de uno y otro tipo de aguas se tendrían toda una serie de aguas de calidades intermedias, y todas surgentes en un área relativamente poco extensa, localizada alrededor del núcleo de Lanjarón.

A todo ello hay que añadir dos anomalías hidrogeoquímicas más en el sector; se trata de las aguas ferruginosas, de sabor característico, y de las carbogaseosas, con contenidos de gases que pueden llegar a ser muy elevados. Recordemos que Lanjarón se ubica sobre una mesa travertínica de elevado contenido en hematites. En relación con algunas surgencias son visibles procesos actuales de formación de travertinos ferruginosos, aprovechando también como lugar de depósito las ramas de los árboles que se introducen en el agua; se trataría de aguas carbogaseosas ferruginosas que liberan parte del CO<sub>2</sub> en contacto con la atmósfera, mientras que el hierro ferroso, único soluble en agua en condiciones "normales", se oxida a férrico, precipitando rápidamente.

Esta anomalía carbogaseosa es relativamente frecuente a todo lo largo de la parte baja de la Alpujarra (fuentes *agrias*). También han sido descritas en la cercana cuenca del río Adra, donde existe un esquema hidrogeoquímico relativamente parecido, aunque las aguas de mayor contenido salino y ligeramente termales mantienen como anión dominante el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pero con notable aumento de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup>; el Na<sup>+</sup>, en los cationes, aumenta también sensiblemente (Pulido Bosch *et al.*, 1986; Benavente y Castillo, 1989).

Como dato indicativo de la presión de CO<sub>2</sub> que se puede alcanzar en algunos puntos del contacto nevadofilábride-alpujárride puede citarse el sondeo que se realizó a comienzo de los ochenta en el emplazamiento de la anterior planta embotelladora de Aguas de Lanjarón; al perforar el metro 125 -tras varios metros con desprendimiento de gases perceptibles por el sondista- el sondeo comenzó a arrojar una lluvia de barro y trozos de roca, algunos de varios kilogramos de peso; ciertamente, no se trataba de un nivel acuífero confinado a gran carga, sino un nivel sometido a alta presión de gas, en gran medida característico de zonas tectónicas activas con procesos latentes de metamorfismo y existencia de materiales carbonatados en profundidad, que liberarían el CO<sub>2</sub> (Cerón, 1995).

Las características fisicoquímicas de las aguas procedentes de los carbonatos alpujárrides presentan mayor contenido salino y facies típicamente bicarbonatada cálcica, con concentraciones variables en magnesio y sulfato en función de la naturaleza del material acuífero (calizas y dolomías) y de la mayor o menor concentración en yesos, estos últimos frecuentemente relacionados con la transición metapelitas-carbonatos (Fernández Rubio *et al.*, 1982).

Se trata, en todos los casos, de aguas que no tienen problemas de calidad, toda vez que las actividades antrópicas contaminantes sobre estos materiales son muy escasas o nulas -topografía abrupta y práctica ausencia de suelos desarrollados-.

## RELACIÓN AGUAS SUPERFICIALES-AGUAS SUBTERRÁNEAS

El funcionamiento hidrológico de todo el macizo es relativamente sencillo; el núcleo de Sierra Nevada recibe la mayor parte de las precipitaciones, y además estas lo son en forma sólida; parte de la nieve se sublima y el resto funde. La fracción que funde discurre superficialmente y/o hipodérmicamente y/o más profundamente; la primera y la segunda alimentan a los cursos de superficie en el *sistema* más *local* de flujo; la fracción de circulación profunda puede incorporarse al sistema *intermedio* y/o *profundo*, aumentando su contenido salino y su temperatura. Salvo la fracción última, las otras dos se generan en procesos que son bastante rápidos; ello, unido al escaso poder de almacenamiento del tramo granular y fisurado superior -como ya ha sido indicado- hacen que los tiempos de tránsito sean relativamente rápidos, con un poder regulador de moderado a bajo.

Con el fin de aumentar este tiempo de tránsito, en la Alpujarra se lleva a cabo una práctica ancestral -conocida con el nombre de *careo*- consistente en dejar circular el agua de deshielo por determinadas áreas más permeables y/o a lo largo de zonas de fractura, para así garantizar el caudal de estiaje de las "fuentes" y "remanentes" más próximos a los núcleos urbanos, situados en las partes más bajas de las laderas (Pulido Bosch y Ben Sbih, 1995); simultáneamente, el agua aumenta su temperatura -el agua de deshielo es muy fría- y su contenido salino. Para tener una idea de la importancia que tiene esta tradición en el sector, en la cabecera de las cuencas de los ríos Guadalfeo y Adra, entre los ríos Chico de Orgiva y Nechite se han inventariado 22 acequias con 40 puntos de careo (Ben Sbih, 1995). Tan sólo en el Poqueira existen ocho puntos conocidos de careo.

Esta práctica secular tiene, además, notable impacto ambiental positivo. Como se sabe, el agua que retorna a las surgencias es sólo una pequeña fracción de la total careada; al margen de la que pueda incorporarse al sistema de flujo intermedio y/o profundo, una fracción notable es utilizada por la vegetación; ello ha sido favorecido por el hecho de que la densa red de acequias que surca la Alpujarra ha estado tradicionalmente sin revestir; esta aparente falta de eficiencia hidráulica tiene como contrapartida el que las pérdidas alimentan

las laderas, permitiendo el desarrollo de la vegetación, con el consiguiente descenso de la erosión y aumento del valor paisajístico del área. Una evidencia de lo expuesto es el efecto inmediato detectado en los tramos de acequia revestidas últimamente, que ha provocado la muerte de una parte importante de la vegetación de cierto porte.

La orla carbonatada acuífera que bordea el núcleo nevado-filábride sería susceptible de ser utilizada en el marco de un esquema de uso conjunto aguas superficiales-aguas subterráneas; la construcción de baterías de sondeos en áreas especialmente permeables permitiría la explotación en estiaje a fin de garantizar las demandas e incluso suministrar caudales ecológicos en aquellos tramos de río con problemas; en épocas de deshielo o de aguaceros, las aguas superficiales, así como las de infiltración directa alimentarían al acuífero de forma natural, o mediante esquemas que pudieran provocar la recarga.

Conviene recordar que los ríos Fardes, Genil, Ízbor, Guadalfeo y Adra (figura 1) tienen embalses en sus cuencas, activos o en construcción (caso de las presas de Rules en el río Guadalfeo). La ausencia de embalses en la cuenca del Andarax resulta llamativa, especialmente si se tiene en cuenta que reúne condiciones favorables para el establecimiento de un esquema de uso conjunto, incluyendo un embalse y sistemas de recarga artificial (Pulido Bosch *et al.*, 1992). Con el fin de prevenir las consecuencias que las altas tasas de erosión tendrían sobre el embalse de Rules, se elaboró un modélico estudio multidisciplinar de restauración hidrológico-forestal de la cuenca alimentadora; una síntesis bilingüe de dicho estudio fue editada por la CHSE (Vázquez *et al.*, 1995).

## CONSIDERACIONES FINALES

Sierra Nevada constituye un macrosistema hidrológico de gran importancia económica y ambiental. El marcado régimen nival de los cursos que drenan el macizo le confieren un notable poder autoregulator, aunque posiblemente insuficiente en un futuro, y en épocas de sequía, para hacer frente a la creciente demanda para usos agrícola, industrial y urbano de las áreas periféricas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el núcleo del macizo tiene un cierto poder regulador, pero, debido a la reducida capacidad de almacenamiento y baja permeabilidad de los materiales metapelíticos que lo integran, sólo posibilitan una regulación a corto plazo; en cualquier caso, estos materiales cumplen un gran papel ecológico, como sustentadores de caudales de base estivales de los ríos de Sierra Nevada. La orla carbonatada de borde sí presenta mucho mayor potencial regulador, derivado del hecho de tener cierta capacidad de almacenamiento y valores moderados de permeabilidad. Esta orla debe jugar un importante papel dentro de un esquema de uso conjunto aguas superficiales-subterráneas. Estos materiales tienen, además, una potencialidad hidrogeotérmica inaprovechada y poco explorada, pero importante. La continuidad en profundidad de estos materiales bajo el relleno de las depresiones intramontañosas de los contornos, con áreas de alimentación a cotas elevadas, permite augurar la existencia de aguas con importantes cargas hidráulicas y temperatura posiblemente susceptibles de utilización para calefacción urbana, entre otros usos posibles.

La sequía tan pronunciada que ha afectado al sudeste español durante la primera mitad de la década de los noventa, debe hacer reflexionar a los responsables de la gestión de las aguas de la imperiosa necesidad de poner a punto esquemas de uso conjunto aguas de superficie -mediante embalses y sistemas de derivación- aguas subterráneas, mediante la explotación por sondeos y la realización de recarga artificial en períodos excedentarios.

Antes de terminar este repaso rápido al agua de Sierra Nevada, conviene hacer algunas referencias al notable poder hidroeléctrico, derivado del hecho de la existencia de grandes diferencias de altitud y caudales de deshielo muy elevados. Son numerosas las centrales hidroeléctricas existentes -en general de escasa potencia-, aunque posiblemente el sistema sea compatible con varias más.

Por último, recordar el potencial que las aguas minero-medicinales de Sierra Nevada han tenido en épocas no muy lejanas, para fines terapéuticos, como aguas de bebida o en usos de balneoterapia e hidroterapia. Baste recordar el centro balneario por excelencia de Sierra Nevada, Lanjarón, cuya actividad se remonta a la historia de la propia ciudad (López de Azcona y Fernández-Rubio, 1980). Además, sus aguas envasadas se encuentran entre las más consumidas en España, con una amplia comercialización en otros países.

## REFERENCIAS

- Al-Alwani, G.K. (1992). *Bases para la gestión de los recursos hídricos totales del río Guadalfeo (Granada)*. Tesis Lic. Univ. Granada. 212 p.
- Al-Alwani, G.K. (1996). *Hidrología e Hidrogeología de la cuenca del río Guadalfeo*. Tesis (en elaboración).
- Alcalde, F. y Pulido Bosch, A. (1991). Caracterización hidrogeológica de las metapelitas alpujárrides de la Costa del Sol granadina. *III SIAGA*, I: 279-287. Córdoba.
- Aldaya, F. (1969). *Los mantos alpujárrides al sur de Sierra Nevada*. Tesis Univ. Granada, 527 p.
- Bakalowicz, M. et al. (1995). The characteristics of karst groundwater systems. In "Karst groundwater protection". *Europ. Commission*, pp: 349-369.
- Benavente, J. y Castillo, A. (1989). Estudio hidrogeoquímico de la cuenca del río Adra. *Est. Geol.* 45: 81-90.
- Ben Sbih, Y. (1995). *Etude physico-chimique des eaux en relation avec la recharge artificielle dans la haute Alpujarra grenadine (Espagne)*. Tesis Univ. Tetuán. 113 p.
- Castillo, A. (1985). Aguas superficiales y subterráneas en Sierra Nevada. In *Sierra Nevada y La Alpujarra*, Ferrer, M. edit. Edit. Andalucía. Granada.
- Castillo, A. (1993). Aguas de Sierra Nevada. In *Sierra Nevada*. Ferrer, M. pp: 187-244. Emasagra.
- Cerón, J.C. (1995). *Estudio hidrogeoquímico del acuífero del Alto Guadalentín (Murcia)*. Tesis Univ. Granada. 268 p.
- Chacón, J. y Rosua, J.L. (1996). *Actas de la 1ª Conferencia Internacional "Sierra Nevada, conservación y desarrollo sostenible"*. V volúmenes. Univ. Granada y otros.
- Cruz, L. (1981). *Estudio de la comunidad zooplanctónica de un lago de alta montaña (la Caldera, Sierra Nevada, Granada)*. Tesis Univ. Granada.
- Díaz de Federico, A. (1980). *Estudio geológico del complejo de Sierra Nevada en la transversal del puerto de la Ragua (Cordillera Bética)*. Tesis Univ. Granada. 536 p.
- Estévez, A. et al. (1985). Los alpujárrides al Sur de Sierra Nevada. Una revisión de su estructura. *Mediterránea*, 4: 5-32.
- Fernández-Rubio, R. et al. (1982). Termalismo y mineralogénesis en la ventana tectónica de Albuñol (Granada, España). *3ª Semana Hidrogeología*, pp: 123-142. Lisboa.
- Galindo, J. (1993). *Geometría de las deformaciones neógenas en Sierra Nevada (Cordilleras Béticas)*. Tesis Univ. Granada. 249 p.

- Gallegos, J.A. (1975). *Los alpujárrides al W de Sierra Nevada*. Tesis Univ. Granada. 494 p.
- IAH (1993). *Hydrogeology of hard rocks*. Memoires of the XXIVth Congress. 1205 p. Oslo.
- ITGE (1991). *Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos*. 54 p. Madrid.
- López de Azcona, J.M. y Fernández-Rubio, R. (1980). Consideraciones sobre los manantiales mineromedicinales de Lanjarón. *Anal. Real Acad. Farmacia*. XLVI, 2. Madrid.
- Louis, C. (1974). *Etude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et leur influence sur la stabilité des massifs rocheux*. Tesis Univ. Paris. VI. EDF. Bull. Dir. Rech. Série A, 3, 131 p.
- Medina, F., Fernández-Rubio, R. y Gordillo, A. (1978). Hydrogéologie de la Plaine du Marquesado et influence de son drainage méridional (Dépression Guadix-Baza, Espagne). *Conf. Budapest, IAH*, pp: 336-350.
- Navarro-Vilá, F. (1976). *Los mantos alpujárrides al N de Sierra Nevada*. Tesis Univ. Bilbao, 288 p.
- Puga, E. (1976). *Investigaciones petrológicas en Sierra Nevada occidental (Cordilleras Béticas)*. Tesis Univ. Granada. 269 p.
- Pulido Bosch, A. (1980). *Datos hidrogeológicos sobre el borde occidental de Sierra Nevada*. Serie Univ. n° 123, 51 p. Fund. J. March.
- Pulido Bosch, A. et al. (1986). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Adra*. Proy. LUCDEME (mem. inédita). 66 p.
- Pulido Bosch, A. et al. (1990). *Evaluación de la calidad del agua subterránea en el Bajo Andarax (Almería)*. IARA-Univ. Granada (Mem. inédita).
- Pulido Bosch, A., Sánchez Martos, F., Navarrete, F. y Martínez Vidal, J.L. (1992). Groundwater problems in a semiarid area. *Env. Geol. Water Sci.* 20(3): 195-205.
- Pulido Bosch, A. y Ben Sbih, Y. (1995). Centuries of artificial recharge on the southern edge of the Sierra Nevada (Granada, Spain). *Env. Geol.* 26: 57-63.
- Rodríguez Gordillo, J. et al. (1981). Hidroquímica y termalismo de las aguas de Lanjarón (Granada). *I SIAGA*. I: 501-515.
- Ropero, M.L. (1981). *Calidad de las aguas corrientes de Sierra Nevada*. Tesis Lic. Univ. Granada. 142 p. Dip. Granada.
- Sanz de Galdeano, C., Delgado, F., López-Garrido, A.C. y Martín Algarra, A. (1995). Appartenance alpujarride proposée de l'unité de La Mora au NE de Grenade (Cordillère Bétique, Espagne). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 321, série II a: 893-900.
- Soria, F.J. y Soria, J.M. (1986-87). Depósitos de glaciares rocosos en Sierra Nevada (Granada). *Acta Geol. Hispánica*, 21-22: 123-129.
- Torres, J. (1980). *Los yacimientos de hierro de la comarca del Marquesado del Zenete*. Tesis Univ. Granada. 321 p.
- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geoph. Res.* 68: 4795-4812.
- Vázquez, F. et al. (1995). *Restauración hidrológico-forestal de la cuenca alimentadora del embalse de Rules en el río Guadalfeo (Granada)*. CHSE, 275 p. Málaga.
- Zamora, C. y Alba, J. (1992). *Caracterización y calidad de las aguas del río Monachil (Sierra Nevada, Granada)*. Univ. Granada. 171 p.