

Los manantiales termominerales de Salar (Granada). Un sistema de flujo profundo ligado esencialmente a la descarga de Sierra Gorda

The thermomineral springs of Salar (Granada, Spain). A deep-flow system linked to the discharge of Sierra Gorda

M. López Chicano y A. Pulido Bosch

Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. 18071 Granada.

ABSTRACT

Within the framework of the geometry and functioning of the carbonate aquifer of the Sierra Gorda (Granada, Spain) the discharge zone of Salar has outstanding anomalous characteristics—in geothermal, hydrochemical, isotope and hydrodynamic terms—with respect to the other springs which drain the aquifer. Monitoring of the principal physico-chemical characteristics of the springs during more than one hydrological cycle indicates the deep mixing of waters before discharge.

Key words: geothermal anomaly, hydrogeochemistry, deep flow, carbonate aquifers.

Geogaceta, 18 (1995), 138-141

ISSN: 0213683X

Introducción

El área de descarga de Salar consiste en un conjunto de surgencias localizado a unos 400 m al suroeste del pueblo de igual nombre, en el extremo occidental de la provincia de Granada (Fig. 1). Dispersas en apenas medio km², totalizan un caudal medio del orden de 85 l/s, una parte del cual es utilizado para el abastecimiento del pueblo y otra parte se destina al riego. Por su importancia destacan tres manantiales que reciben el nombre de Membrillo, Bañuelo y Fuente Alta, todos ellos con características fisicoquímicas relativamente parecidas. Los dos primeros, separados por una distancia de apenas 150 m, se sitúan a cota 545 m s.n.m. y funcionan permanentemente. El manantial de Fuente Alta, que se localiza a cota más elevada (unos 568 m s.n.m.), sólo funciona tras un período largo de continuas precipitaciones, a manera de “trop plein”.

El carácter hidrotermal y la estrecha relación de estos manantiales con el acuífero de Sierra Gorda no ha empezado a ser puesto de manifiesto hasta los trabajos de López Chicano (1989) y Diputación Provincial de Granada-ITGE (1990), probablemente debido a que la temperatura de surgencia no es muy elevada (apenas 4 °C mayor que la temperatura media del aire de la región), por lo que se encuentran en el “límite del termalismo” si se aplica el criterio de clasificación de Schoeller (1962). Sin embargo, tal como se trata de demostrar en este estudio,

estos manantiales deben ser clasificados como termominerales, ligados a una zona de circulación relativamente profunda (en el sentido de Sokolov, 1965) del acuífero de Sierra Gorda (López Chicano, 1992), habida cuenta de la anomalía hidroquímica que presentan, un diferente comportamiento hidrodinámico y una temperatura de 3 a 5 °C más elevada, todo ello respecto al resto

de los manantiales de la región.

Contexto hidrogeológico

La posición geológica de los manantiales de Salar coincide aproximadamente con el borde occidental de la depresión neógena de Granada, en el contacto entre los materiales miocénicos

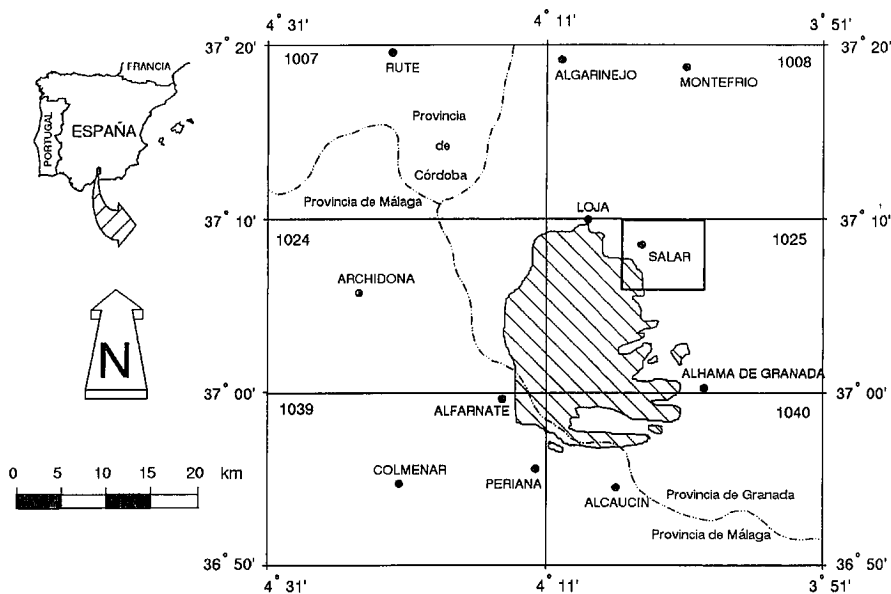


Fig. 1.-Localización geográfica del sector de Salar. El rayado oblicuo indica los principales afloramientos del acuífero de Sierra Gorda.

Fig. 1.-Geographical position of the Salar sector. The oblique lines indicate the principal outcrops of the Sierra Gorda aquifer.

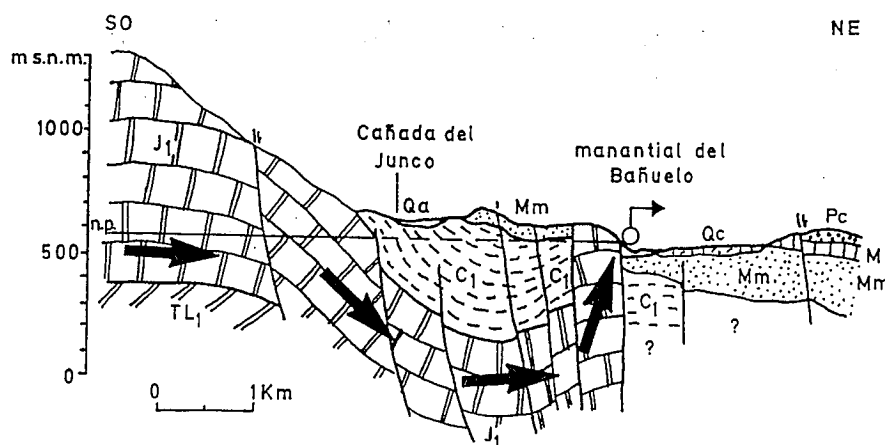


Fig. 2.-Esquema hidrogeológico explicativo de la posición de las surgencias termominerales de Salar. Unidad de Sierra Gorda: TL1, dolomías liásicas; J1, calizas jurásicas; C1, margas y margocalizas cretácicas. Depresión de Granada: Mm, lutitas y margas del Mioceno superior; MI, calizas lacustres del Messiniense; Pc, materiales detríticos del Plio-Pleistoceno; Qc, Cuaternario coluvial; Qa, Cuaternario aluvial.

Fig. 2.-Hydrogeological scheme explaining the position of the Thermomineral springs of Salar. Sierra Gorda Unit: TL1 Liassic dolomite; J1 Jurassic limestone; C1 Cretaceous marls and marly limestones. Granada Basin: Mm, Upper Miocene silts and marls; MI, Messinian lacustrine limestone; Pc, Plio-Pleistocene detrital materials; Qc, Quaternary colluvial; Qa, Quaternary alluvial.

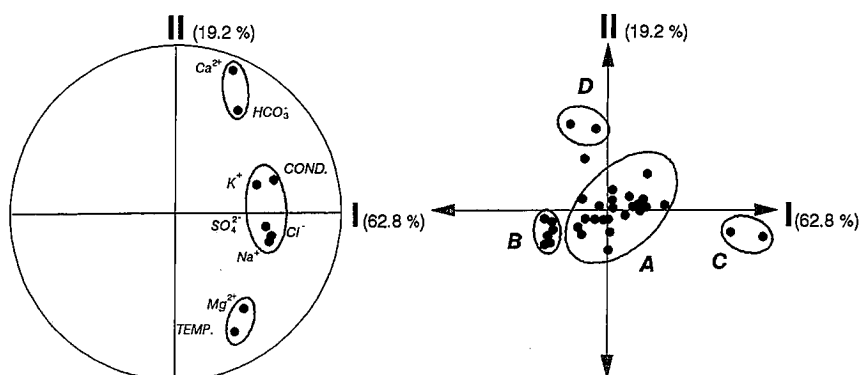


Fig. 3.-Proyección, respecto a los dos primeros componentes del ACP, de las muestras analizadas en 33 puntos de agua del acuífero de Sierra Gorda. A, manantiales del sector de Loja-Riofrío; B, manantiales del sector meridional; C, manantiales del sector de Salar; D, manantiales epikársticos.

Fig. 3.-Projection, with respect to the first two components of the ACP, of the samples analysed at 33 points of water from the Sierra Gorda aquifer. A, springs in the Loja-Riofrío sector; B, springs in the southern sector; C, springs in the Salar sector; D, epikarstic springs.

que la rellenan y los mesozoicos preorogénicos de la unidad de Sierra Gorda correspondientes al dominio Subbético interno (Vera, 1966). Como en otros muchos sectores marginales de la depresión, este borde está jalonado por importantes fallas que afectan tanto a materiales preorogénicos como postorogénicos, en este caso de orientación NO-SE. La estructura general de la unidad de Sierra Gorda en este sector coincide con un gran sinclinal fallado, de igual orientación que las fracturas, y mostrando un núcleo ocupado por margas y margocalizas cretácicas de hasta 500 m de potencia. Bajo éstos, las dolomías y calizas jurásicas de la unidad

(acuífero de Sierra Gorda) se hallan confinadas en profundidad, aflorando en pequeña extensión en el flanco oriental del pliegue, justo en el sector donde se encuentran los manantiales, y ampliamente hacia el oeste donde configuran los relieves de las sierras de Loja y Gorda (*s.str.*). Bajo estos materiales carbonatados presumiblemente se encuentran otros de facies detrítico-evaporíticas del Triásico que constituyen el impermeable de base.

Aunque la descarga principal del acuífero de Sierra Gorda se sitúa en las proximidades de Loja, a cota 500 m, la posición geológica de las surgencias de Salar, junto con la estructura y geome-

tría general del acuífero en este sector, no deja lugar a muchas dudas acerca del origen de esta descarga (Fig. 2), a la vez que permite explicar la originalidad físicoquímica de las mismas que más adelante pondremos de manifiesto.

El pequeño afloramiento de calizas jurásicas de Salar emerge entre otros materiales neógenos y cuaternarios del relleno de la depresión, algunos de los cuales pueden incluir niveles permeables en contacto con aquéllas, como ocurre con las calcarenitas y conglomerados tortonienses.

Originalidad físicoquímica

Especialmente por sus características físicoquímicas, los manantiales de Salar son surgencias totalmente atípicas en el conjunto de Sierra Gorda. La hidrofacies generalizada es la bicarbonatada cálcica o cálcico-magnésica, acorde con la composición litológica del acuífero; sin embargo, para el Bañuelo ésta es bicarbonatada-clorurada cálcico-sódica y bicarbonatada-sulfatada cálcica-magnésica para el Membrillo. Estas diferencias de facies en manantiales termominerales muy próximos entre sí constituye un fenómeno frecuente, puesto de manifiesto en otros sistemas acuíferos con termalismo (Benavente y Pulido Bosch, 1979).

La figura 3 muestra los resultados obtenidos del Análisis en Componentes Principales efectuado sobre la composición mayoritaria de las surgencias del sistema. La posición del grupo de Salar destaca claramente respecto a otros conjuntos de aguas drenadas por el sistema acuífero, caracterizándose por altos contenidos en sulfatos, cloruros y sodio, junto con una conductividad eléctrica dos veces más elevada (994 $\mu\text{mhos/cm}$ en Bañuelo y 859 $\mu\text{mhos/cm}$ en Membrillo). La temperatura de estas aguas, aunque ligeramente mayor que en los restantes manantiales del acuífero, no acompaña a la anomalía hidrológica, lo que podría sugerir la existencia de una mezcla con aguas más frías en el ascenso como se verá más adelante. El carácter termomineral viene, pues, asociado al criterio de mineralización de las aguas (Cruz San Julián, 1976), más que a la temperatura de las mismas (20,4 °C para el Bañuelo y 19,4 °C para el Membrillo). El quimismo de estas surgencias indica claramente la existencia de un lavado de sales en profundidad, probablemente ligado a la influencia de las evaporitas triásicas del substrato.

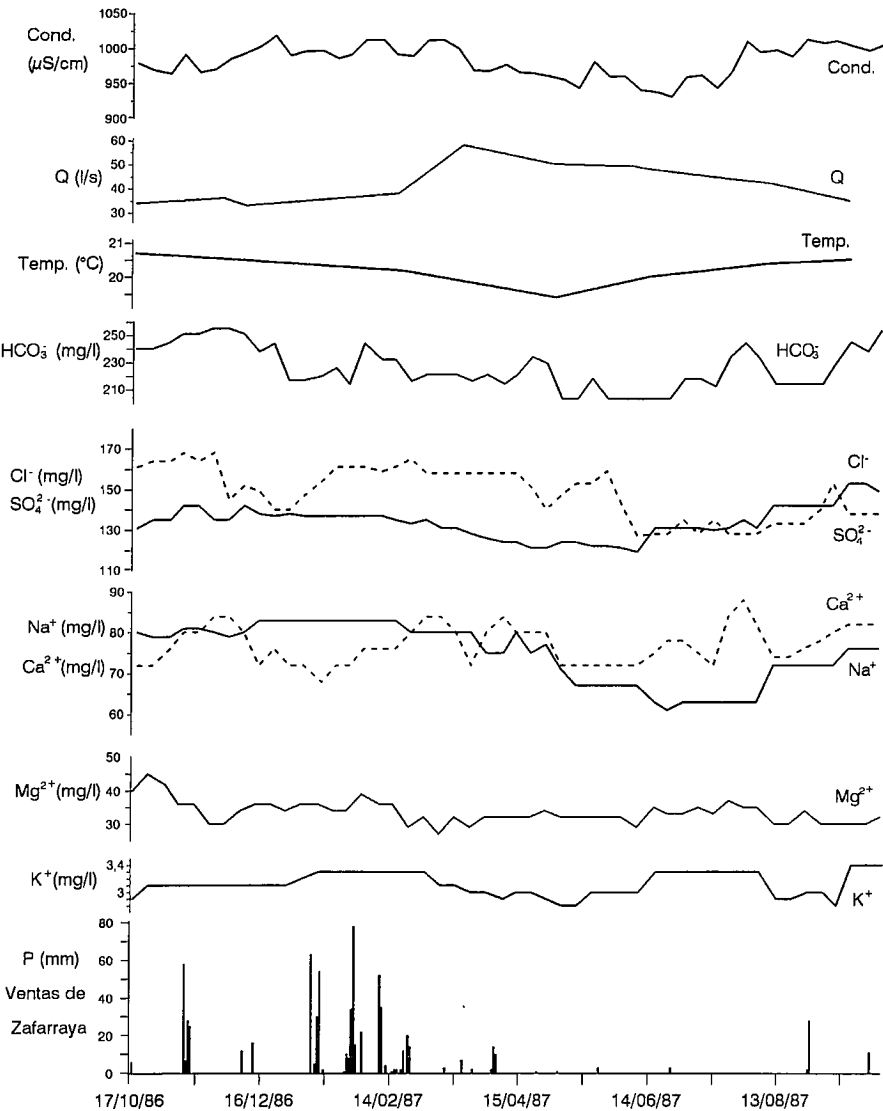


Fig. 4.-Evolución hidroquímica del manantial del Bañuelo durante el ciclo 1986-87.

Fig. 4.-Hydrochemical evolution of the Bañuelo spring for the 1986-87 cycle.

los resultados obtenidos en algunas de las principales surgencias del sector Loja-Riofrío, salvo quizás el $\delta^{18}\text{O}$, cuyo valor en Bañuelo, aunque ligeramente menos negativo, parece sugerir un área de alimentación no excesivamente diferente al resto de los manantiales. Otro aspecto interesante de destacar es el bajo contenido en tritio de éste manantial, por debajo del límite de detección, lo que lleva a la conclusión de que la mayor parte del agua que surge en el sector de Salar es agua infiltrada con anterioridad a 1954.

Evolución hidroquímica

El manantial del Bañuelo fue muestreado a nivel semanal durante los ciclos hidrológicos 1986-87 y 1987-88. La figura 4 ilustra sobre el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos determinados y el caudal durante el ciclo hidrológico 1986-87 en este manantial. Las conclusiones básicas que pueden extraerse del análisis individual de la evolución de las variables en cada ciclo no difieren esencialmente. Como apoyo a la interpretación, la tabla 2 recoge algunos parámetros estadísticos calculados para los datos del mismo período.

Respecto al caudal, se observa un desfase importante entre los máximos valores alcanzados en el año y el período de lluvias más importante, lo que es indicativo del comportamiento inercial del sistema frente a los impulsos de entrada. Los coeficientes de agotamiento que pueden estimarse para los hidrogramas de este manantial rondan el valor 0.005 días-1 (López Chicano, 1992), reflejo del gran poder regulador del acuífero. Se observa una cierta periodicidad en la evolución de la conductividad, que se traduce en valores más altos hacia el final del verano y hasta bien entrado el invierno. Los valores más bajos se obtienen siempre tras los periodos de máxima frecuencia pluviométrica, con un importante desfase y con un descenso muy suave. El comienzo de este descenso en la mineralización coincide con la punta de crecida estacional de la surgencia.

Los valores del coeficiente de variación de la conductividad (Tabla 2) es muy bajo, como cabría esperar de una surgencia termomineral, que drena aguas relativamente homogeneizadas en las partes más profundas del acuífero. Este valor (2,4 %) es aún más bajo para el ciclo 1987-88 (1,7 %).

No obstante, la curva de distribución de frecuencias de la conductividad (Fig. 5) muestra un carácter bimodal acusado, especialmente en el ciclo 1986-87, observándose dos poblaciones distintas de aguas en el período 1986-87, más próximas entre sí y

PARÁMETROS ISOTÓPICOS	BAÑUELO	OTROS MANANTIALES DE LOJA
$\delta_{13}\text{C}(\text{‰})[\text{PDB}]$	-5.39	-82.32 a -9.65
$\delta_{14}\text{C}(\text{‰})$	-762±4	-350 a -460
pMC(‰)	23.6	54 a 64.1
$\delta_3\text{H}(\text{TU})$	<1	6.7 a 8.7
$\delta_{18}\text{O}(\text{‰})[\text{SMOW}]$	-7.71	-7.99 a -8.43
Rn-222(Bq/l)	19.8	4.3 a 10.6
Ra-226(Bq/l)	0.0013	0.0076 a 0.0123

Tabla 1.-Valores de concentraciones isotópicas en las aguas del manantial del Bañuelo y rangos de variación en otras surgencias del sector de Loja (Junio de 1993).

Table 1.-Values for the isotope concentrations in the spring water of Bañuelo and ranges of variation for other springs in the Loja sector (June 1993).

Las concentraciones isotópicas registradas en el manantial del Bañuelo, en un muestreo realizado en Junio de 1993, confirman la originalidad hidro-

geológica del área de descarga de Salar (Tabla 1). Todos los parámetros isotópicos analizados en las muestras de Bañuelo difieren notablemente respecto a

	Q (l/s)	Temp (°C)	pH	Cond. (μ S/cm)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Na ₊ (mg/l)	Mg ₂₊ (mg/l)	Ca ₂₊ (mg/l)	K ₊ (mg/l)
Muestra (n)	11	6	5	51	51	51	51	51	51	51	51
Media	44	20,2	7,25	982	134	148	227	75	33	77	3,1
Mínimo	33	19,4	7,10	930	119	127	203	61	27	68	2,8
Máximo	58	20,7	7,41	1018	153	168	205	83	45	88	3,4
Desv. típica	9,15	0,46	0,12	23,19	8,25	12,84	16,02	7,18	3,40	4,72	0,17
Coef. Var. (%)	20,7	2,3	1,7	2,4	6,2	8,7	7,1	9,6	10,2	6,1	5,6

Tabla 2.- Parámetros estadísticos de las variables fisicoquímicas determinadas en el manantial del Bañuelo, para el ciclo 1986-87.

Table 2.- Statistical parameters of the physico-chemical variables determined in the spring of Bañuelo, for the 1986-87 cycle.

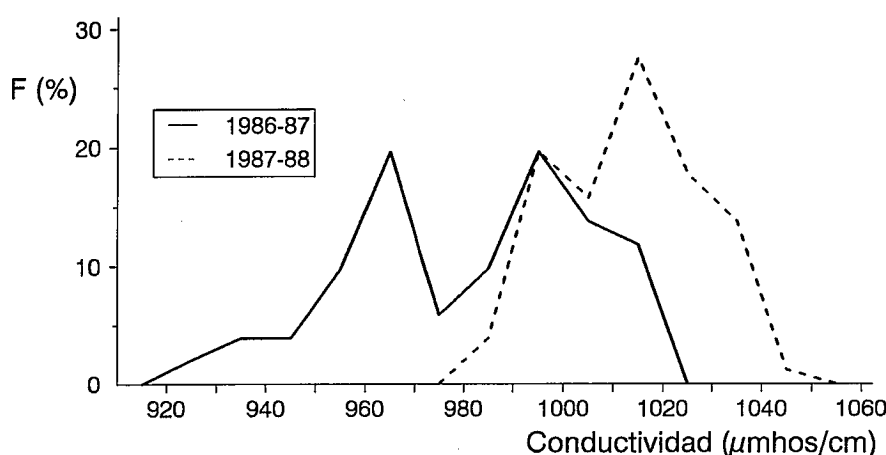


Fig. 5.- Curva de distribución de frecuencias relativas de la conductividad en el manantial del Bañuelo.

Fig. 5.- Distribution curve of relative frequencies for conductivity in the Bañuelo spring.

menos identificables en el ciclo 1987-88. Este hecho sugiere la existencia de dos familias distintas de aguas que alcanzan la surgencia, con diferente grado de mineralización, aunque, eso sí, alta en ambos casos. La dualidad hidroquímica puede responder, bien a un desarrollo importante de la karstificación en el acuífero, que permite la llegada de aguas menos mineralizadas provocando una cierta dilución de las aguas propias del mismo, o bien -y ello parece más razonable- a una mezcla de las aguas termominerales con las aguas menos salinas de otro acuífero en conexión, cuya identificación hasta el momento no ha sido posible realizar, aunque bien podría tratarse de los conglomerados y calcarenitas del Mioceno, en contacto físico con el afloramiento de calizas.

La temperatura (con oscilaciones que sobrepasan 1 °C), los bicarbonatos y el calcio parecen seguir *grasso modo* la misma evolución de la conductividad, pese a que este último no muestra un alto coeficiente de correlación con la misma. Sin embargo, es el ión Cl⁻ el que muestra mayor parecido en sus variaciones de contenido con respec-

to a la conductividad ($r = 0,95$), poniendo en evidencia su gran peso en la mineralización total de las aguas de la surgencia. Los sulfatos y el magnesio registran oscilaciones más difíciles de interpretar.

Si se admite la noción de régimen permanente, desde el punto de vista hidrodinámico, hidrogeoquímico y térmico, para los circuitos termales profundos -al menos a escala de tiempo reducida, como es el caso- las variaciones en los parámetros fisicoquímicos comentados sólo podrían estar ligadas a una mezcla de proporciones variables entre el agua termomineral y un agua más superficial, posiblemente bicarbonatada o sulfatada (habida cuenta de las oscilaciones de estos parámetros), más fría y menos mineralizada en conjunto, que circula a una velocidad lenta y con un importante desfase respecto a las lluvias que originan la recarga.

Conclusiones

Al catálogo de las manifestaciones hidrotermales de la Depresión de Granada es

necesario añadir el grupo de manantiales de Salar, teniendo en cuenta que el criterio decisivo es la anomalía hidroquímica más que la térmica. La posición hidrogeológica de estos manantiales, junto a su originalidad hidrodinámica, hidroquímica e isotópica, liga a estos manantiales inevitablemente con la descarga del acuífero de Sierra Gorda, cuya estructura en este sector es favorable a la existencia de un flujo relativamente profundo impuesto por el confinamiento del acuífero. La evolución hidrogeoquímica de estos manantiales pone de manifiesto que existe cierta mezcla de aguas en profundidad, cuya naturaleza aún no puede ser precisada.

Agradecimientos

Al Dr. E. Hertelendi y colaboradores del Instituto de Investigación Nuclear de la Academia de Ciencias Húngara por las determinaciones isotópicas de las muestras. Trabajo subvencionado por el proyecto AMB92-0211 CICYT y realizado en el marco de la Acción COST-65 CEE.

Referencias

- Benavente, J. y Pulido Bosch, A. (1979): *Hidrogeol. y Recur. Hidrául.*, 5: 569-588.
- Cruz-Sanjulián, J. (1976): *Tecniterrae*, 12, 45-54.
- Diputación Provincial de Granada - ITGE (1990): *Dip. Prov. Granada - ITGE*, 107 p.
- López Chicano (1989): *Tesis de Licenciatura* Univ. Granada (Inéd.), 77 p.
- López Chicano (1992): *Tesis Doctoral* Univ. Granada, 429 p.
- Schoeller, H. (1962): *Masson et Cie.*, 642 p. París.
- Sokolov, D.S. (1965): *Act. Coll. Dubrovnik AIHS-UNESCO*, 1:204-207.
- Vera, J.A. (1966): *Tesis Doctoral* Univ. Granada, 191 p.