

Observaciones hidrogeológicas en el área urbana de Granada

Hydrogeological observations in the urban area of Granada

J. Benavente ⁽¹⁾, L. Sánchez-Díaz ⁽¹⁾ y A. Castillo ^(1,2)

⁽¹⁾ Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Ramón y Cajal, 4. 18071 Granada. E. mail: jbenaven@ugr.es
⁽²⁾ Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ABSTRACT

A number of hydraulic tests, as well as monitoring of groundwater level and physico-chemical variables, have been carried out –since their construction in August 2000– in two adjacent wells located inside the urban area of Granada, which extends over the eastern border of the Vega de Granada alluvial aquifer. Other nearby wells out of the urban area were also monitored. The results indicate a phreatic ($S=0,25$), transmissive ($T=3000 \text{ m}^2/\text{d}$) aquifer, with flow velocity values of around 4 m/d. Clayey levels, relatively abundant in this sedimentary environment, induce the presence of a perched groundwater level that seems to leak into a deeper one through the gravel pack of one of the boreholes. Groundwater in the studied area has electrical conductivity in the range 600-1300 mS/cm, and bicarbonate-sulfate calcium-magnesium type. The recharge from the main stream is characterized by low mineralization values (300 mS/cm). The infiltration of urban wastewater must account for the relatively high nitrate contents –as well as for some microbiological indices– found in the water of the studied wells.

Key words: urban hydrogeology, alluvial aquifer, perched phreatic level, groundwater monitoring, hydraulic tests, Granada

Geogaceta, 36 (2004), 119-122
 ISSN:0213683X

Introducción. Objetivos y antecedentes

Los estudios hidrogeológicos en relación con ámbitos urbanos están adquiriendo cada día mayor trascendencia científica. Por una parte, interesan las modificaciones en el régimen hidrológico y en la calidad de las aguas subterráneas que puedan estar asociadas al desarrollo urbanístico. Así, especialmente en climas áridos, la infiltración de aguas residuales es a menudo un componente mayoritario de la recarga total de acuíferos ubicados en torno a zonas urbanas, y –como señalan Foster y Chilton (2004)– puede que los efluentes urbanos sean el único recurso natural cuya disponibilidad global esté aumentando. Por otra parte, las aglomeraciones urbanas constituyen enclaves donde la demanda de agua se concentra, por lo que son susceptibles de ofrecer buenas condiciones de observación hidrogeológica a partir de sondeos de captación o de piezómetros de control convenientemente equipados.

Este trabajo se centra en los resultados obtenidos en diferentes controles hidrodinámicos e hidroquímicos efectuados a lo largo de más de tres años en un sondeo de explotación y en un sondeo piezométrico distante aproximadamente

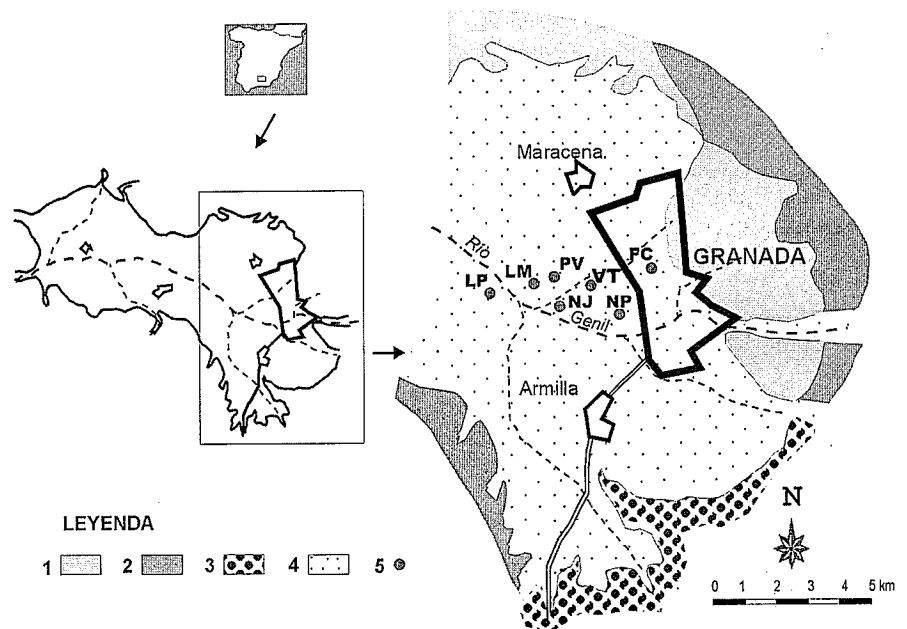


Fig. 1.- Izquierda: contorno del acuífero de la Vega de Granada, con indicación de los principales cursos de agua y núcleos urbanos. Derecha: detalle del área urbana de Granada y sectores adyacentes. 1: conglomerados (Plioceno-Pleistoceno); acuífero. 2: turbiditas, yesos, limos, lignitos y calizas (Messiniense); acuífero. 3: conglomerados (Pleistoceno); acuífero. 4: gravas, arenas y arcillas (Pleistoceno-Holoceno); acuífero. 5: puntos de control.

Fig. 1.- Left: contours of the Vega de Granada aquifer, showing the main streams and the major populations. Right: detail of the urban area and adjacent sectors. 1: conglomerates (Pliocene-Pleistocene); aquifer. 2: turbidites, gypsum, silt, lignite and limestones (Messinian); aquifer. 3: conglomerates (Pleistocene); aquifer. 4: gravels, sands and clays (Pleistocene-Holocene); aquifer. 5: monitoring points.

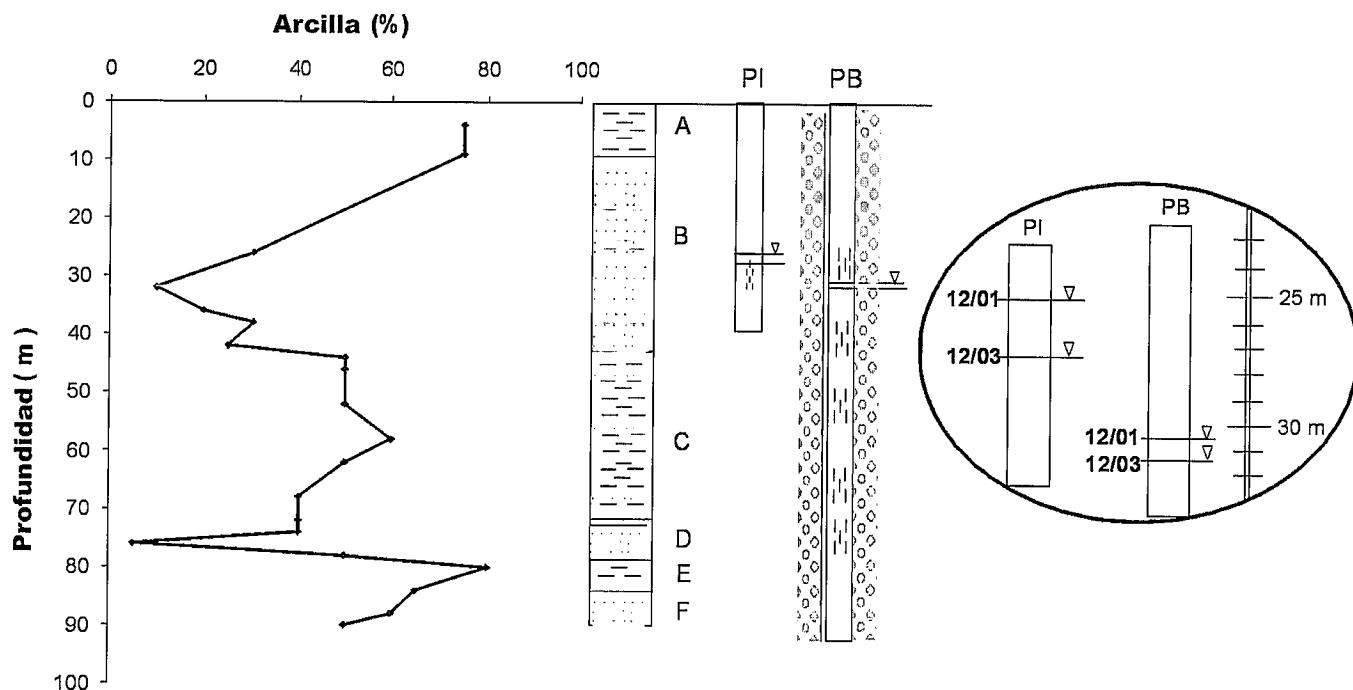


Fig. 2.- Esquema de los dos sondeos de la Facultad de Ciencias (punto FC, Fig. 1): sondeo de explotación (PB) y sondeo piezométrico (PI), con indicación de la columna litológica identificada (ver descripción en el texto) y de la variación del porcentaje de arcilla con la profundidad. Derecha: detalle de los valores extremos registrados de profundidad del nivel de agua y sus fechas de medida.

Fig. 2.- Sketch of the two boreholes in the Faculty of Sciences (point FC, Fig. 1): pumping well (PB) and observation well (PI), showing the main lithological features (see description in text) as well as the clay percentage versus depth. Right: detail of the extreme values recorded of the water level depth and their measuring dates.

ocho metros. Ambos están situados en el casco urbano de Granada capital, y, más concretamente, en el jardín de la Facultad de Ciencias de la Universidad, a una cota aproximada de 660 m. También se incluyen datos hidroquímicos recientes correspondientes a una serie de captaciones situadas a poca distancia del casco urbano.

La ciudad de Granada y su área metropolitana ocupan una superficie significativa del borde oriental del acuífero de la vega de Granada. Este es un acuífero detrítico cuaternario, integrado mayoritariamente por los aluviones del río Genil y sus principales tributarios (Fig. 1). Tanto su geometría, como su funcionamiento hidrogeológico y sus rasgos hidroquímicos generales son aceptablemente conocidos (FAO-IGME, 1972; Jerez, 1983; Castillo, 1986 y 1995; ITGE, 1989).

En la figura 1 se presenta un esquema geológico de la zona de estudio, junto con la situación de las citadas instalaciones de la Facultad de Ciencias (FC) y otros puntos de control.

El mapa hidrogeológico del acuífero de la Vega de Granada más detallado publicado (Castillo, 1989) apenas incluye puntos de control en el área urbana. De las líneas isopiezas que presenta, se desprende que en el tramo Granada-Maracena, es decir, en el extremo noreste del área urbana, el flujo se produce con

componente general de NE a SO y se caracteriza por valores del gradiente hidráulico comprendidos entre el 2 % y el 3 %. El citado documento gráfico también incluye rangos de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas. La zona septentrional del casco urbano corresponde aproximadamente al límite entre el rango de valores 1.250-2.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al norte, y el de 750-1.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al sur.

Labores realizadas

Durante la fase de perforación, realizada en agosto de 2000, se controló la litología de los materiales atravesados y se tomaron muestras en las que se determinó el porcentaje de fracción arcillosa. A continuación, las perforaciones se equiparon con tubería de chapa. En el sondeo de explotación, de 93 m de profundidad, se instaló filtro de puentecillo de 300 mm de diámetro, en diferentes tramos, bajo 30 m de tubo ciego. El anular, de 75 a 125 mm de espesor, se rellenó de grava dolomítica y en él se instaló un tubo piezométrico de 1,5 pulgadas. Más adelante se dispuso en su interior una bomba eléctrica sumergida. El sondeo piezométrico, de 40 m de profundidad, se revistió con tubería rajada de 300 mm.

En diciembre de 2001 se realizó un ensayo de bombeo, de 70 minutos de duración, con caudal de 6 l/s, seguido de un

control de la recuperación de niveles en el piezómetro a lo largo de 5 horas.

En diciembre de 2003 se realizó un ensayo de dilución en el sondeo piezométrico. Se marcó la columna de agua con una disolución de cloruro sódico comercial de 50 litros, que alcanzó una conductividad eléctrica de unos 150 mS/cm. La conductividad eléctrica de la mezcla teórica entre el agua del piezómetro (aproximadamente 1 m³ con 1,20 mS/cm) y la disolución de trazador era de 8,5 mS/cm. La dilución del trazador se controló a lo largo de 2,5 horas mediante medidas de la conductividad eléctrica del agua a diferentes profundidades.

En diferentes ocasiones desde la terminación de las perforaciones se ha medido en ellas la profundidad del nivel piezométrico y la conductividad eléctrica del agua, tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

Desde junio de 2003 se mide mensualmente la conductividad eléctrica del agua en el sondeo de explotación y en otros cercanos, como los de Neptuno y La Presilla (NP y LP en Fig. 1). En septiembre de 2003 se tomaron muestras de agua para análisis químico en los tres sondeos citados, junto con otros de las inmediaciones: Naujar, Viveros Taboada, Las Mimbres y Puleva (NJ, VT, LM y PV, Fig. 1). En el agua del sondeo de la Facultad se realizó, además, un análisis microbiológico.

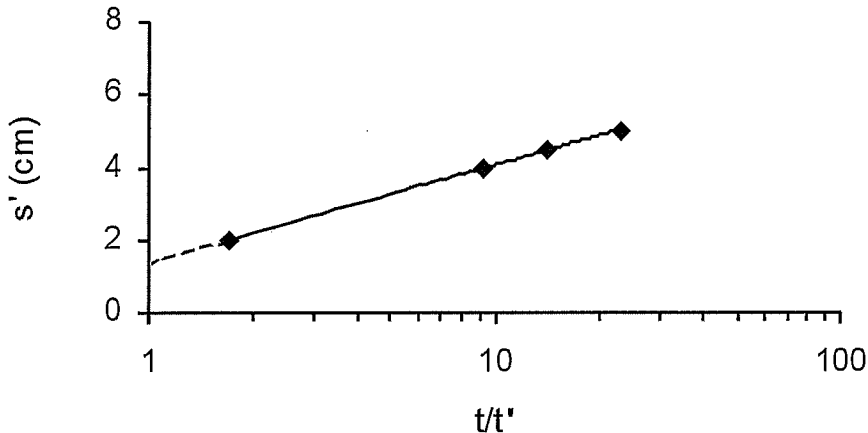


Fig. 3.- Representación gráfica de los resultados del ensayo de recuperación en el dispositivo FC.

Fig. 3.- Graph of the recovery test results in the FC site.

Resultados

En la figura 2 se esquematizan las características litológicas de las perforaciones y se sintetizan los niveles medidos. A partir de los controles del contenido arcilloso y de los materiales atravesados, en dicha figura se distinguen, de techo a muro, seis tramos litológicos: arcillas con intercalaciones de gravas (A); gravas con algún nivel de arcilla intercalado (B); niveles de arcilla y arena (C); nivel de arena (D); nivel de arcilla (E) y niveles de arena y arcilla (F). En cuanto a los niveles piezométricos en cada perforación, en la figura 2 se indican los valores extremos registrados en cada punto y las fechas de medida.

La interpretación de los datos del ensayo de bombeo por el método gráfico de Jacob-Cooper ha sido satisfactoria y ha conducido a valores de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento del acuífero de aproximadamente $T=3.000 \text{ m}^2/\text{d}$ y $S=0,25$. El gráfico correspondiente al ensayo de recuperación se presenta en la figura 3, donde se aprecia que, aunque el ajuste lineal es aceptable, la recta de ajuste no pasa por el punto (1,0), lo cual indica una anomalía respecto a las condiciones del modelo teórico. A partir de este gráfico, no obstante, se deducen valores de los parámetros del acuífero sensiblemente similares a los antes citados. Habida cuenta del espesor saturado captado, la conductividad hidráulica que resulta a partir de estos ensayos es de unos 50 m/d.

El método de interpretación del ensayo de dilución se expone en Baonza *et al.* (1970). Se ha considerado la disminución en el tiempo de la conductividad media a lo largo del sondeo tras la inyección del trazador (Fig. 4). En la gráfica aparecen dos tramos ajustables a sendas rectas, de

los que el segundo puede reflejar el efecto del trazador acumulado en la base del sondeo. De acuerdo con el tramo primero y más representativo, resulta una velocidad horizontal de flujo de aproximadamente 4 m/d. Para una porosidad efectiva de 0,25 y un gradiente del 2 %, el valor de conductividad hidráulica que resulta es de 50 m/d, similar, pues, al estimado anteriormente.

En la figura 5 se representan gráficamente las evoluciones temporales disponibles de dos variables en el sondeo de explotación FC: la profundidad del nivel y la conductividad eléctrica del agua bombeada. En el año 2003 el nivel más alto se ha medido a final de primavera y el más bajo a final de otoño. La conductividad más baja, de unos 1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se ha medido a comienzos del verano, para luego seguir una tendencia general ascendente hasta valores superiores a 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El valor medio es de 1.270 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En otros puntos próximos

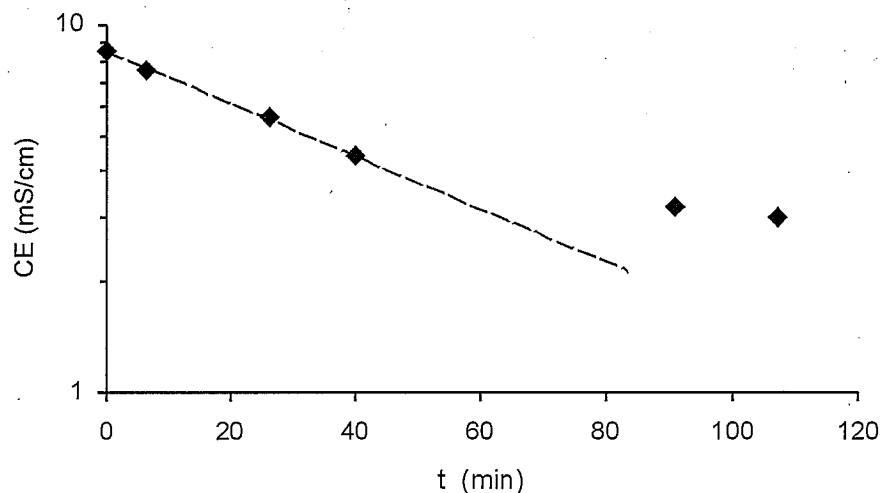


Fig. 4.- Representación gráfica del ensayo de dilución en el sondeo piezométrico de FC.

Fig. 4.- Graph of the borehole dilution test results in the observation well of FC.

con control periódico de la conductividad se han obtenido valores medios diferentes: aproximadamente 850 y 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos NP y LP, respectivamente, aunque las evoluciones temporales muestran pocas diferencias.

En el muestreo hidroquímico general de septiembre de 2003 se han medido valores de conductividad comprendidos entre algo más de 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punto NP) y casi 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (punto LM). El sondeo de la Facultad de Ciencias registró un valor próximo al máximo. El agua de riego precedente del Genil tenía en ese muestreo una conductividad de algo menos de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Todas las muestras indican una notable homogeneidad en su facies hidroquímica: bicarbonatada cálcica, con porcentajes elevados (dominantes en algún caso) de sulfatos y magnesio. Es de resaltar el contenido en nitratos, que en el sondeo de la Facultad de Ciencias fue de 64 mg/l, cifra sólo superada por el punto LM, en el cual prácticamente se duplica dicha concentración. Por último, el reconocimiento microbiológico del agua del punto FC indica una presencia importante de estreptococos fecales (40 ufc/100 ml) y bacterias aerobias a 28° C (410 ufc/ml).

Discusión

Los valores obtenidos en los sondeos de la Facultad de Ciencias por medio de diferentes ensayos hidrogeológicos para los parámetros T, S y K (del orden de 3.000 m^2/d , 0,25 y 50 m/d, respectivamente) son coherentes con los indicados en trabajos previos para los sectores próximos al borde oriental del acuífero de la Vega de Granada (FAO-IGME, 1972; ITGE, 1989).

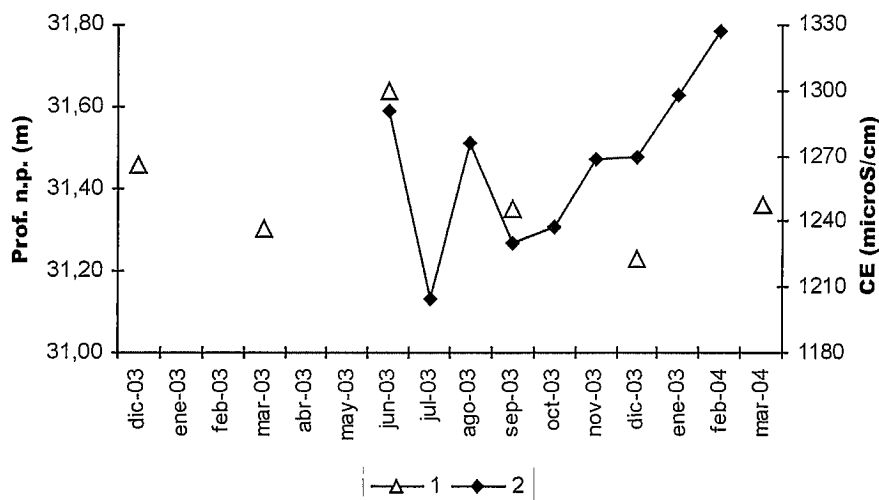


Fig. 5.- Evolución temporal del nivel (1) y de la conductividad eléctrica (2) en el sondeo de explotación de FC.

Fig. 5.- Temporal evolution of water level (1) and of electrical conductivity of the water (2) in the pumping well of FC.

Merece destacarse la diferencia en la cota piezométrica entre los dos sondeos de la Facultad de Ciencias: entre 4 y 6 m, para dos puntos distantes tan sólo 8 m. Esto sugiere que el PI está en un acuífero colgado respecto al inferior, captado por el PB. Debajo del PI la fracción arcillosa se incrementa respecto a los tramos superior e inferior (Fig. 2), lo cual podría ser la causa de dicha situación. Aunque el acuífero de la Vega de Granada siempre se ha considerado, a rasgos generales, como un acuífero libre, hacia sus bordes esta situación se complica por la existencia de niveles arcillosos intercalados en las series más groseras, lo que lo convierte en un acuífero multicapa, hecho que complica las interpretaciones hidrodinámicas e hidroquímicas realizadas.

En el emplazamiento captado (Facultad de Ciencias), el acuífero colgado debe drenar hacia el inferior, de menor cota piezométrica, verosímelmente de forma difusa. Es probable que a través del PB, especialmente de su empaque de grava, se produzca una descarga localizada del acuífero superior hacia el inferior. Se

mide así en el tubo piezométrico del anular del PB un nivel intermedio entre los de ambos.

Estas circunstancias pueden ser la causa de la anomalía encontrada en el ensayo de recuperación (Fig. 3), la cual indica un efecto de vaciado del acuífero, el superior en este caso, o un descenso en el nivel de referencia.

La situación del área urbana estudiada, próxima a un borde del acuífero en el que existen yesos condiciona la abundancia relativa de sulfato y calcio en disolución, circunstancia que se pone de manifiesto de manera más patente en otros límites del acuífero (Castillo, 1986; Castillo y Sánchez, 1993). Los valores más bajos de salinidad que se advierten en puntos próximos deben reflejar condiciones locales que favorecen la recarga, directa o indirecta, a partir de aguas del río Genil y el efecto de dilución que esto conlleva.

Los valores elevados de nitratos que se identifican en los puntos considerados deben obedecer fundamentalmente a la fuga de aguas residuales proceden-

tes de la red de saneamiento, lo que también está apoyado por las determinaciones microbiológicas realizadas y, es causa, además del incremento del gradiente hidráulico bajo el casco urbano (Castillo, 1986). Especialmente elocuente, al respecto, es la contaminación microbiológica detectada en el entorno estudiado, señalada ya en trabajos anteriores (Castillo y Ramos-Cormenzana, 2002). Al aporte nitrogenado citado, habría que añadir el de los fertilizantes químicos para los puntos situados en el límite oeste del casco urbano.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó al amparo de diversas ayudas y contratos, y, en especial, del proyecto CICYT BTE2002-00152 y de un proyecto suscrito entre la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía y la Universidad de Granada.

Referencias

- Baonza, E., Plata, A. y Piles, E. (1970): *Isotope Hydrology (Proc. Symp. Vienna)*, 695-711.
- Castillo, A. (1986): *Tesis Doctoral*. Serv. Publ. Univ. Granada. 658 p
- Castillo, A. (1989): *Mapa hidrogeológico del acuífero de la Vega de Granada, 1:25.000*. IGME. Madrid.
- Castillo, A. (1995): *Tierra y Tecnología*, 9, 51-57
- Castillo, A. y Ramos-Cormenzana, A. (2002): *Geogaceta*, 32, 191-194
- Castillo, A. y Sánchez, P. (1993): *Geogaceta*, 14, 13-14
- FAO-IGME (1972): *Inf. rest. AGL:SF/SPA*, 16. Madrid, 218 p
- Foster, S.S. y Chilton, P.J. (2004): *Hydrogeology Journal*, 12, 115-120.
- ITGE (1989): *Vega de Granada*. Serie manuales de utilización de acuíferos. Madrid
- Jerez, F. (1983): *El uso conjunto en la Vega de Granada*. Curso Valencia. 1-13