

Estudio comparativo de la respuesta hidrodinámica de varios acuíferos carbonáticos del Sur de España a partir del análisis correlatorio y espectral

Comparative study of the hydrodynamic response of several carbonate aquifers systems in southern Spain using correlation and spectral analysis

Pablo Jiménez Gavilán y Bartolomé Andreo Navarro

Departamento de Geología, Centro de Hidrogeología (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga, España.
pgavilan@uma.es, andreo@uma.es

ABSTRACT

The application of correlation and spectral analysis to compare the hydrodynamic response of seven carbonate aquifer systems distributed over Andalusia, in which have been monitored during the same time period (1999/2000-2002/2003) has permitted to characterize and to compare the different types of hydrogeological behavior of carbonate aquifers in the Betic Cordillera, as well as to evaluate the degree of applicability of this methodology to study carbonate aquifers. The results show that this methodology allows to differentiate variable regulation capacity of these aquifers, especially by using time regulation parameter and the need to extend the hydrodynamic classification of karstic aquifers proposed by Mangin (1984) with new types of behavior, including the most inertia (hyperannual regulation capacity).

Key-words: Correlation and spectral analysis, hydrodynamic, carbonate aquifers, southern Spain.

RESUMEN

La utilización del análisis correlatorio y espectral para comparar la respuesta hidrodinámica de siete sistemas acuíferos carbonáticos distribuidos por la geografía andaluz, para un mismo intervalo de tiempo (1999/2000-2002/2003) ha permitido caracterizar y comparar los diversos tipos de funcionamiento hidrogeológico que presentan acuíferos carbonáticos representativos de la Cordillera Bética, así como evaluar el grado de aplicabilidad de esta metodología para el estudio de los acuíferos carbonáticos. Los resultados obtenidos muestran que esta metodología permite diferenciar el mayor o menor poder regulador de estos acuíferos, sobre todo mediante el uso del parámetro tiempo de regulación, así como la necesidad de ampliar la clasificación hidrodinámica de los acuíferos kársticos propuesta por Mangin (1984), con nuevos tipos de comportamiento, entre otros el de mayor inercia (poder regulador hiperanual).

Palabras clave: Análisis correlatorio y espectral, hidrodinámica, acuíferos carbonáticos, Sur de España.

Geogaceta, 52 (2012), 133-136.
ISSN 2173-6545

Fecha de recepción: 9 de febrero de 2012
Fecha de revisión: 26 de abril de 2012
Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2012

Introducción

En el marco de la tesis doctoral de Jiménez (2011), se ha realizado una investigación hidrogeológica en siete acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, durante un mismo periodo de tiempo (1999/2000-2002/2003), con objeto de caracterizar el funcionamiento hidrogeológico que presentan y establecer una clasificación de los acuíferos carbonáticos a escala regional.

En el presente trabajo, que recoge parte de los resultados de la tesis, se caracteriza y compara la respuesta hidrodinámica de los siete acuíferos, mediante la aplicación del análisis correlatorio y espectral (ACE) de las series de datos caudal, correspondien-

tes a los principales manantiales de estos sistemas. Además, se evalúa el grado de aplicabilidad del ACE para el estudio de los acuíferos carbonáticos del Sur de España.

Este tema ha sido tratado en investigaciones previas (Padilla, 1990; Padilla y Pulido, 1995), aunque nunca antes se habían considerado conjuntamente siete acuíferos, de diferentes contextos climáticos, geológicos y geomorfológicos (Fig. 1), durante un mismo periodo de tiempo (Tabla I). A continuación se describen, de oeste a este, los macizos carbonáticos seleccionados.

La Sierra de las Cabras (Fig. 1) está situada en la parte central de la provincia de Cádiz, su principal punto de descarga (manantial de El Tempul) ha constituido históri-

camente la fuente de abastecimiento de agua a Jerez de la Frontera.

El macizo carbonático de la Sierra de Líbar (Fig. 1), entre las provincias de Málaga y Cádiz, incluye el segundo acuífero estudiado. En este caso, se ha caracterizado la descarga del sector nororiental (manantiales de Benaolán y Cueva del Gato).

Inmediatamente al E de la Sierra de Líbar, se encuentran los macizos de la Sierra de las Nieves y de las Sierras Prieta-Bonela-Alcaparain (Fig. 1), que constituyen dos sistemas acuíferos cuya descarga se produce por los manantiales de cabecera de los ríos Grande, Verde y Genal (Sierra de las Nieves) y río Jorox (Sierras Prieta-Bonela-Alcaparain).

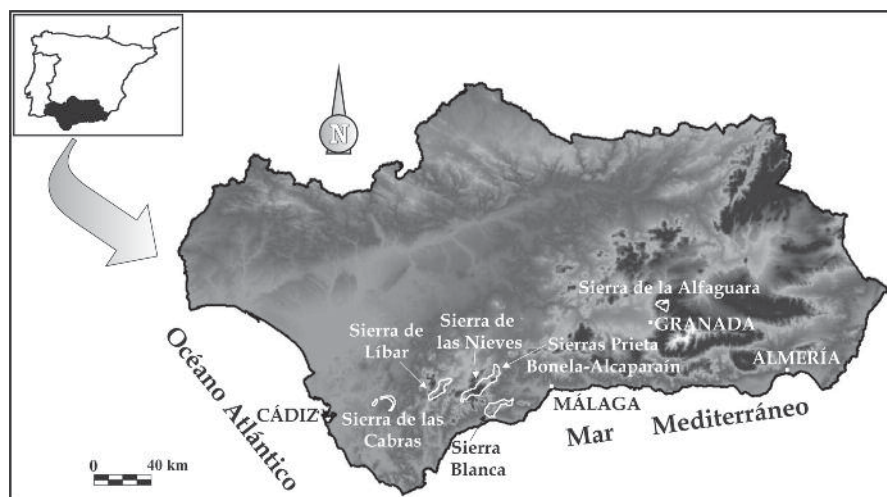


Fig. 1.- Localización geográfica de los relieves donde se encuentran los acuíferos carbonáticos estudiados.

Fig. 1.- Geographical location of mountains where the studied carbonate aquifers are situated.

Al S-SE de la Sierra de las Nieves se sitúa Sierra Blanca (Fig. 1). En esta investigación se ha abordado el estudio de los sistemas de Marbella y Ojén, mediante el control de las surgencias de Nagüeles y Ojén, respectivamente. Por último, en el centro geográfico de la provincia de Granada y al NE de la capital, se encuentra la Sierra de la Alfaguara (Fig. 1). Este macizo se drena por manantiales situados en sus bordes meridional y occidental, el más caudaloso de los cuales es la Fuente Grande de Alfacar.

Metodología

El análisis de series temporales fue desarrollado por Jenkins y Watts (1968) y posteriormente aplicado por Mangin (1981a, 1981b, 1984) al estudio de sistemas kársticos. Durante las tres últimas décadas, son muchos los acuíferos carbonáticos en los que se ha aplicado esta metodología: en el País Vasco (Cruz *et al.*, 1987; Morales, 1991), en la Cordillera Bética (Mangin y Pulido, 1983, Benavente *et al.*, 1985; Padilla, 1990; Padilla y Pulido, 1995; Andreo *et al.*, 1996; Jiménez *et al.*, 2004), por citar sólo algunos ejemplos.

El tratamiento de las series de caudal se ha llevado a cabo con paso de tiempo de 1 día y ventana de observación de 125 días, mediante el programa informático *Stochastos*, elaborado por el Dr. D'Ulst, del Laboratorio Subterráneo del CNRS en Moulis (Francia).

Los correlogramas generados con el ACE permiten hacer interpretaciones sobre el funcionamiento de los acuíferos carbonáticos (Mangin, 1981a, 1981b, 1984). Así,

cuando un correlograma decrece lentamente, se interpreta que corresponde a un sistema inercial, con escaso desarrollo del drenaje kárstico y poco jerarquizado. Según Mangin (1981a y b) estos sistemas presentan importantes reservas reguladoras. Para intentar cuantificar esta observación, Mangin (1981a) definió el efecto memoria (E.M.) como el valor de k (días) para $r=0, 1-0, 2$.

Del espectro de densidad de varianza se pueden estimar dos nuevos parámetros (Mangin, 1984): la frecuencia de corte (F.C.), a partir de la cual el espectro es despreciable, y el tiempo de regulación (T.R.), que se calcula como $S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro para $f=0$. Este valor define la duración de la influencia de la señal de entrada en el sistema y está ligada a la importancia de las reservas reguladoras.

Es conveniente realizar el análisis cruzado de las variables precipitación (causa) y caudal (efecto). Así, el correlograma cruzado refleja la respuesta impulsional del sistema, es decir, el hidrograma unitario (Mangin, 1984).

Resultados

En los correlogramas simples obtenidos (Fig. 2A) se diferencian un primer grupo, con forma claramente tendida (El Tempul y Fuente Grande), un segundo grupo (Benaoljén, Cueva del Gato y Ojén) cuyo correlograma presenta mayor pendiente, debido a un decrecimiento más rápido durante la primera parte del mismo, y el resto de surgencias (Río Genal, Río Grande, Río Verde, Río Jorox y Nagüeles), que muestran un corre-

lograma muy verticalizado hasta $k=5$ días, con un rápido descenso de los valores de correlación. La mitad de los manantiales presenta un valor relativamente alto del efecto memoria (E.M. en Tabla I), sobre todo los manantiales de Fuente Grande y El Tempul, mientras que las surgencias del sistema de las Nieves y de Prieta-Bonela presentan valores (10-23 días) característicos de sistemas escasamente inerciales.

Los tiempos de regulación obtenidos (T.R. en Tabla I) a partir del espectro de densidad de varianza (Fig. 2B) muestran valores relativamente altos para los mismos manantiales que presentan un elevado efecto memoria (Tabla I): El Tempul y Fuente Grande. Asimismo, los sistemas con reducido efecto memoria presentan también valores bajos del tiempo de regulación, excepto en el caso de los manantiales del Río Genal y Río Verde que, comparativamente, muestran valores más altos del tiempo de regulación que del efecto memoria. Este resultado es consecuencia de que el valor del efecto memoria puede considerarse como un valor semicuantitativo, que depende de la forma del correlograma y, por tanto, del valor del correlograma que se tome para el intervalo del coeficiente de correlación entre 0,1 y 0,2.

En cuanto a la frecuencia de corte (F.C. en Tabla I), los valores más bajos se obtienen en los manantiales de Fuente Grande y El Tempul (0,04-0,03), mientras que las surgencias del sistema de las Nieves y de Prieta-Bonela presentan valores característicos de sistemas muy karstificados (0,18-0,20). Ahora bien, conviene tener presente que la frecuencia de corte se obtiene directamente del espectro de densidad de varianza y presenta el problema de establecer a partir de qué valor de frecuencia se puede considerar que el espectro es despreciable (Fig. 2B).

En el análisis cruzado (Figs. 2C y D) se diferencia un primer grupo de manantiales (El Tempul y Fuente Grande) que presentan el correlograma cruzado de forma extendida y poco puntiaguda, sobre todo el primero, con valores máximos del coeficiente de correlación (R_{max}) del orden de 0,20-0,25 (Tabla I). Los correlogramas cruzados obtenidos para el resto de manantiales presentan una forma puntiaguada (Figs. 2C y D), con valores de R_{max} que varían entre 0,38 (Ojén) y 0,54 (Río Genal).

Dentro del segundo grupo, los hidrogramas unitarios del acuífero de la Sierra de

	Manantial (Sistema Acuífero)	P (mm)	S (km ²)	Geología	Geomorfología Formas de absorción activas	E.M. (días)	T.R. (días)	F.C.	R _{max}
Sierra de Líbar	Benaoján (Sistema Nororiental)	1492	67	Calizas y dolomías Pliegues en cofre	Exokarst y Endokarst muy desarrollado Muy abundantes	79	57	0,08	0,50
	Cueva del Gato (Sistema Nororiental)	1492	67			70	46	0,08	0,43
Sierra de las Nieves	Río Genal (Sistema de las Nieves)	971	103	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst desarrollado Abundantes	10	17	0,2	0,54
	Río Grande (Sistema de las Nieves)	971	103			12	16	0,2	0,52
	Río Verde (Sistema de las Nieves)	971	103			23	22	0,18	0,50
Sierras Prieta-Bonela-Alcaparain	Río Jorox (Sistema Prieta-Bonela-Alcaparain)	578	44	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Poco abundantes	10	8	0,18	0,43
Sierra Blanca	Ojén (Sistema de Ojén)	898	13	Mármoles dolomíticos y calizos Interferencia de pliegues	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Poco abundantes	71	41	0,13	0,38
	Nagüeles (Sistema de Nagüeles)	898	24	Mármoles calizos Interferencia de pliegues	Exokarst poco desarrollado y Endokarst desarrollado Poco abundantes	35	30	0,13	0,52
Sierra de la Alagüara	Fuente Grande (Sistema de Alfacar)	482	20	Calizas y dolomías Escamas tectónicas	Exokarst poco desarrollado y Endokarst desarrollado Poco abundantes	80	68	0,04	0,25
Sierra de las Cabras	El Tempul (Sierra de las Cabras)	815	34	Calizas y dolomías Estructura anticlinal	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Escasas	95	84	0,03	0,20

Tabla I.- Principales características de los acuíferos investigados y parámetros determinados a partir del análisis correlatorio y espectral. Leyenda: P precipitación media anual (1999/2000-2002/2003), S superficie, E.M. efecto memoria, T.R. tiempo de regulación, F.C. frecuencia de corte, R_{max} valor máximo del coeficiente de correlación cruzada

Table I.- Main characteristics of the investigated aquifers and parameters deduced from correlatory and spectral analysis. Legend: P average annual rainfall (1999/2000-2002/2003), S surface, E.M. memory effect, T.R. regulation time, F.C. cutting frequency, R_{max} maximum value of cross-correlation coefficient.

Líbar (manantiales de Benaoján y Cueva del Gato) y de los acuíferos de Sierra Blanca (surgencias de Ojén y Nagüeles) reflejan un descenso rápido de los valores de correlación, seguidos de un decrecimiento más lento a partir de un determinado valor de k. En cambio, los hidrogramas unitarios de los sistemas de Sierra de las Nieves y de Prieta-Bonela, muestran un descenso mucho más rápido de los valores de correlación y la disminución lenta posterior de dichos valores es menos marcada. Además, aunque el parámetro R_{max} presenta una variabilidad importante dentro del conjunto de manantiales estudiados (Tabla I), la representatividad de éste depende del valor de k (paso de tiempo) para el que se produce. Así, en la mayor parte de los manantiales considerados, el valor de R_{max} se detecta para un valor k de 1-2 días, mientras que en los manantiales más inerciales se observan dos valores muy desiguales: k=3 días para la Fuente Grande de Alfacar y k=28 días para El Tempul.

Discusión

El análisis correlatorio y espectral se ha llevado a cabo para el mismo periodo de tiempo (1999/2000-2002/2003) en todos

los manantiales, con objeto de evitar aspectos relacionados con la duración de la serie de datos de la función de entrada (cantidad y distribución de las precipitaciones) que pudieran afectar a los parámetros deducidos. No obstante, el tiempo de regulación, por su propia definición ($S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro de densidad de varianza para $f=0$), es el parámetro más preciso, desde el punto de vista cuantitativo, para la comparación de los diversos tipos de funcionamiento hidrogeológico.

El análisis conjunto de todos los resultados obtenidos (Tabla I) permite concluir que los manantiales de El Tempul y Fuente Grande drenan acuíferos con gran poder regulador, mientras que los manantiales de la Sierra de las Nieves, de las Sierras Prieta-Bonela y del sistema de Marbella presentan valores característicos de acuíferos con un flujo de tipo kárstico *sensu stricto*. Finalmente, los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato (Sierra de Líbar) y el manantial de Ojén (sistema de Ojén) presentan valores intermedios entre los dos grupos anteriores (Tabla I).

Por otro lado, del conjunto de resultados (Tabla I), también se deduce que sistemas localizados en el Sur de España y con un importante grado de karstificación, como

el acuífero de la Sierra de Líbar, presentan valores de los parámetros característicos similares a los que se obtienen en los más inerciales del Pirineo francés (Mangin, 1984). Este hecho se debe a que la irregularidad en la distribución pluviométrica en el sur de España (marca climática) provoca que los manantiales estén mucho tiempo en régimen de agotamiento ("inercia añadida"), en comparación con otras zonas de precipitación más regular.

En el caso de sistemas poco karstificados (Sierra de las Cabras y acuífero de la Alagüara) se obtienen valores de dichos parámetros que no se contemplan en la clasificación hidrodinámica de los acuíferos kársticos propuesta por Mangin (cuatro clases, representadas por los manantiales de Aliou, Baget, Fontestorbes y Torcal).

Conclusiones

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a las series de caudal de los principales manantiales de siete sistemas acuíferos, para un mismo intervalo temporal (igual régimen de precipitaciones –distribución temporal-), ha resultado una herramienta muy interesante para diferenciar el mayor o menor poder regulador de estos acuíferos.

La aplicación de esta metodología en la presente investigación también ha puesto de manifiesto que la mayoría de parámetros obtenidos son semicuantitativos o su estimación no siempre es precisa (efecto memoria, frecuencia de corte), o es necesario combinarlos con otros para que tengan significado (valor máximo del coeficiente de correlación cruzada combinado con el valor de k –días- para el que se produce), de manera que el tiempo de regulación, por su propia definición, es el parámetro definido con mayor precisión para la caracterización y comparación de los resultados obtenidos.

Además, los resultados obtenidos para surgencias de sistemas poco karstificados (Sierra de las Cabras y acuífero de la Alagüara) plantean la necesidad de ampliar la clasificación hidrodinámica de los acuíferos kársticos propuesta por Mangin (1984), con nuevos tipos de comportamiento, entre otros el de mayor inercia (poder regulador hiperanual).

Por último, se ha constatado que la irregularidad en la distribución pluviométrica en el sur de España (marca climática) provoca que los manantiales estén mucho

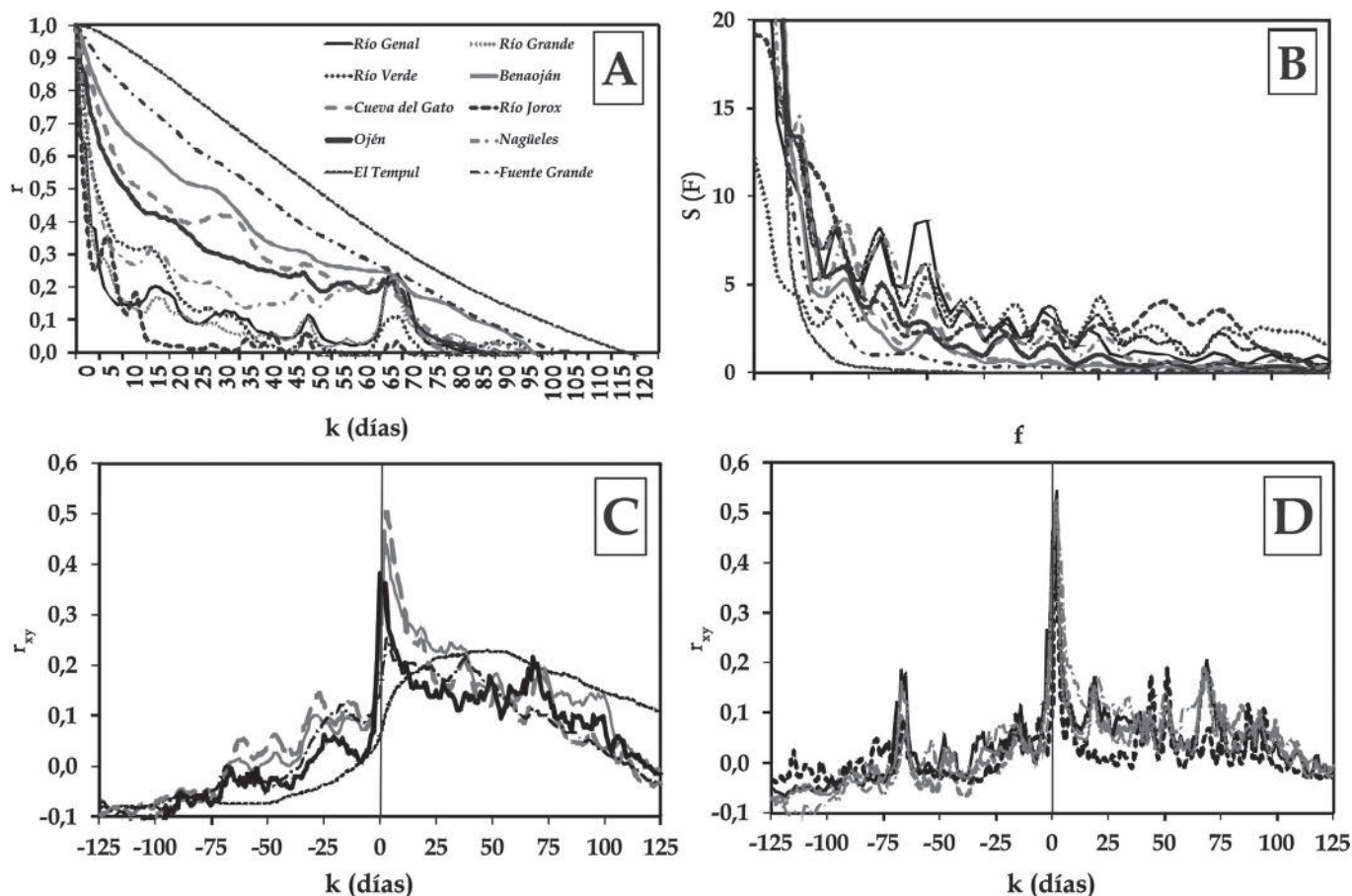


Fig. 2.- Correlogramas simples (A), espectros de frecuencia (B) y correlogramas cruzados lluvia-caudal (C, D) de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia y r_{xy} coeficiente de correlación cruzada.

Fig. 2.- Correlograms (A), density spectrums (B) and cross-correlograms rainfall-outflow (C, D) of the studied springs with a window of 125 days and lag of 1 day. Legend: r correlation coefficient, $S(f)$ frequency spectrum, f frequency and r_{xy} cross-correlation coefficient.

tiempo en régimen de agotamiento en comparación con otras zonas de precipitación más continuada, dando lugar a una "inercia adicional", de manera que sistemas acuíferos con un importante grado de karstificación, endo y exokárstica (Sierra de Líbar) presentan valores de los parámetros característicos (E.M, T.R, F.C.) similares a los que se obtienen en los sistemas más inerciales del Pirineo francés (Mangin, 1984).

Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución a los proyectos CGL2008-06158 BTE de la DGICYT e IGCP-598 de la UNESCO y a la Acción Integrada GE-2009-0060, así como al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

Referencias

Andreo, B., Carrasco, F., Mangin, A., Antigüedad, I. y Vadillo, I. (1996). En: I Jornadas. Rec. Hídr. Kárst., Vitoria, 233-247.
 Benavente, J., Pulido Bosch, A. y Mangin, A. (1985). En: *Karst Water Resources*. IAHS Publ., 161, 67-75.
 Cruz, J.J., Ibarra, V. y Morales, T. (1987). *Geolis*, 1, 50-61.
 Jenkins, G.M. y Watts, D.G. (1968). *Spectral analysis and its applications*. Holden Day. 525 p.
 Jiménez, P. (2011). *Los acuíferos carbonáticos del Sur de España. Caracterización y clasificación a partir de sus respuestas naturales*. Académica Española – Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 384 p.
 Jiménez, P., Carrasco, F., Durán, J.J., Andreo, B. y

López-Geta, J.A. (2004). *Boletín Geológico y Minero*, 115, 187-197.
 Mangin, A. (1981a). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 293, 401-404.
 Mangin, A. (1981b). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 293, 1011-1014.
 Mangin, A. (1984). *Journal of Hydrology*, 67, 25-43.
 Mangin, A. y Pulido-Bosch, A. (1983). *Tecniterrae*, 51, 53-65.
 Morales, T. (1991). *Estudio hidrogeológico de la Zona Norte de Vizcaya*. Tesis Doctoral, Univ. del País Vasco, 503 p.
 Padilla, A. (1990). *Modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 267 p.
 Padilla, A. y Pulido-Bosch, A. (1995). *Journal of Hydrology*, 168: 73-89.