

62683
III

ESTUDIOS METODOLÓGICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN DIFERENTES TIPOS DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS: APLICACIÓN A LA CORDILLERA BÉTICA



VOLUMEN III:
ESTUDIO DE LA DESCARGA



Grupo de Hidrogeología de la
Universidad de Málaga (GHUMA)



Ministerio
de Ciencia
y Tecnología



Instituto Geológico y
Minero de España

62683
[11]

**ESTUDIOS METODOLÓGICOS PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN DIFERENTES
TIPOS DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS:
APLICACIÓN A LA CORDILLERA BÉTICA**

VOLUMEN III:

ESTUDIO DE LA DESCARGA

Análisis de la descarga natural de acuíferos kársticos en áreas piloto (8.06/44.1865)

**Caracterización del funcionamiento de acuíferos carbonáticos del Sur de España
(8.06/44.1978)**

DIRECCIÓN Y SUPERVISIÓN DEL ESTUDIO:

Juan Antonio López Geta

Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España.

Juan José Durán Valsero

Jefe del Servicio de Investigación y Desarrollo Hidrogeológico de la Dirección de Aguas Subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España.

EQUIPO DE TRABAJO:

Francisco Carrasco Cantos (Coordinador)

Profesor Titular de Geodinámica Externa. Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga.

Bartolomé Andreo Navarro

Profesor Titular de Geodinámica Externa. Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga.

Iñaki Vadillo Pérez

Profesor Asociado de Geodinámica Externa. Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga.

Pablo Jiménez Gavilán

Becario F.P.I. Departamento de Ecología y Geología de la Universidad de Málaga.

ÍNDICE

I PARTE

ANÁLISIS DE LA DESCARGA NATURAL DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. METODOLOGÍA	4
1.3.1. Análisis correlatorio y espectral	4
1.3.2. Análisis de la curva de recesión	5

2. ACUÍFEROS CARBONÁTICOS SELECCIONADOS

2.1. GENERALIDADES SOBRE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS	11
--	----

3. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA SIERRA DE LÍBAR

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA SIERRA DE LÍBAR	15
3.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE LA CUEVA DEL GATO	15
3.2.1. Recopilación de los datos de caudal	15
3.2.2. Análisis correlatorio y espectral	18
3.2.3. Análisis de la curva de recesión	20
3.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de la Cueva del Gato	23

4. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA SIERRA DE LAS CABRAS

4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA SIERRA DE LAS CABRAS	25
4.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE EL TEMPUL	25
4.2.1. Recopilación de los datos de caudal	25
4.2.2. Análisis correlatorio y espectral	27
4.2.3. Análisis de la curva de recesión	29
4.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de El Tempul	32

5. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL TORCAL DE ANTEQUERA

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL TORCAL DE ANTEQUERA	35
5.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE LA VILLA	37

5.2.1. Recopilación de los datos de caudal	37
5.2.2. Análisis de la curva de recesión	39
5.2.3. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de la Villa	42
6. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LAS CABRAS–CAMAROS-SAN JORGE	
6.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LAS SIERRAS DE LAS CABRAS-CAMAROS-SAN JORGE	45
6.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE VILLANUEVA DEL ROSARIO	47
6.2.1. Recopilación de los datos de caudal	47
6.2.2. Análisis correlatorio y espectral	49
6.2.3. Análisis de la curva de recesión	51
6.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de Villanueva del Rosario	54
7. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS: EL SISTEMA DE OJÉN Y EL SISTEMA DE TORREMOLINOS	
7.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS: EL SISTEMA DE OJÉN Y EL SISTEMA DE TORREMOLINOS	56
7.2. EL SISTEMA DE OJÉN	56
7.3. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE OJÉN	57
7.3.1. Recopilación de los datos de caudal	57
7.3.2. Análisis correlatorio y espectral	59
7.3.3. Análisis de la curva de recesión	61
7.3.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de Ojén	63
7.4. EL SISTEMA DE TORREMOLINOS	65
7.5. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DE LOS MANANTIALES DE TORREMOLINOS	66
7.5.1. Recopilación de los datos de caudal	66
7.5.2. Análisis correlatorio y espectral	68
7.5.3. Análisis de la curva de recesión	70
7.5.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal de los manantiales de Torremolinos	72
8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CRITERIOS BÁSICOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS	
8.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	75
8.2. CRITERIOS BÁSICOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS	78

II PARTE

CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA

1. INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	86
1.2. OBJETIVOS	86
1.3. METODOLOGÍA	87
2. ACUÍFEROS CARBONÁTICOS SELECCIONADOS	
2.1. GENERALIDADES SOBRE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS	90
3. EL SISTEMA DE MARO (SECTOR MERIDIONAL DE SIERRA ALMIJARA)	
3.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	93
3.2. EL MANANTIAL DE MARO	95
3.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial	96
3.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial de Maro	97
3.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002	99
4. LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA SIERRA DE LÍBAR	
4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	105
4.2. EL MANANTIAL DE BENAJOJÁN	105
4.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial	106
4.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial de Benaoján	108
4.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002	111
5. EL SISTEMA DE LAS NIEVES	
5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	115
5.2. EL MANANTIAL DEL RÍO GENAL	117
5.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial	118
5.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial del río Genal	119
5.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002	123
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	127
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	130
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

ANEXOS

ANEXO 1. HIDROGRAMAS ANALIZADOS DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DEL MANANTIAL DE LA CUEVA DEL GATO

ANEXO 2. HIDROGRAMAS ANALIZADOS DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DEL MANANTIAL DE EL TEMPUL

ANEXO 3. HIDROGRAMAS ANALIZADOS DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DEL MANANTIAL DE LA VILLA

ANEXO 4. HIDROGRAMAS ANALIZADOS DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DEL MANANTIAL DE VILLANUEVA DEL ROSARIO

ANEXO 5. HIDROGRAMAS ANALIZADOS DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DEL MANANTIAL DE OJÉN

ANEXO 6. HIDROGRAMA ANALIZADO DE LA SERIE DE CAUDALES DIARIOS DE LOS MANANTIALES DE TORREMOLINOS

ANEXO 7. ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LAS MUESTRAS HORARIAS DEL MANANTIAL DE MARO

ANEXO 8. ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LAS MUESTRAS DIARIAS DEL MANANTIAL DE BENAJOJÁN

ANEXO 9. ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LAS MUESTRAS HORARIAS DEL MANANTIAL DE BENAJOJÁN

ANEXO 10. ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LAS MUESTRAS DIARIAS DEL MANANTIAL DEL RÍO GENAL

ANEXO 11. ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE LAS MUESTRAS HORARIAS DEL MANANTIAL DEL RÍO GENAL

I PARTE

**ANÁLISIS DE LA DESCARGA NATURAL DE
ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA**

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Como ya se ha puesto de manifiesto en el volumen I de este estudio, el IGME aprobó en el año 2001 la realización de un Proyecto de Investigación para el desarrollo de metodologías para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos, tomando como áreas de trabajo diferentes acuíferos de la Cordillera Bética.

En el primer volumen se ha realizado una caracterización de acuíferos carbonáticos en función de su recarga y se ha desarrollado una metodología que permite determinar la recarga y su zonificación espacial. Debido a que el estudio de la descarga contribuye al conocimiento, en relación a como se produce la recarga y la cantidad de agua que participa en este proceso, se ha realizado un análisis de la descarga natural de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (contrato 8.06/44.1865), que constituye la primera parte de este volumen y posteriormente una caracterización de su funcionamiento que se especifica en la segunda parte (contrato 8.06/44.1978).

En esta primera parte se estudian seis acuíferos escogidos en base a los datos previos existentes, a su litología y a sus diferentes condiciones de recarga. En estos acuíferos existen series de datos temporales de los principales manantiales que los drenan, principalmente gracias a la labor desempeñada por varios organismos y entidades privadas. La longitud o duración de estas series de datos abarca varias años, en algún caso varias décadas en las que la periodicidad de medida ha sido diaria. Se dispone, así, de series de datos, excepcionalmente largas en algunos casos, que son susceptibles de ser tratadas mediante diferentes técnicas o métodos de análisis de series temporales, cuya aplicación en el estudio del funcionamiento de acuíferos carbonáticos se conoce desde hace tiempo, aunque no por ello han sido aplicados con mucha frecuencia en acuíferos españoles.

El estudio como ya se ha indicado anteriormente en el volumen I se ha realizado en colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universidad de Málaga (UMA), y se ha llevado a cabo por un equipo de trabajo compuesto por personal del Grupo de Hidrogeología de la UMA (GHUMA) y de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de la primera parte de este volumen consiste en analizar la descarga natural de acuíferos carbonáticos a partir de los datos de caudal de manantiales de diferentes acuíferos seleccionados del Sur de España mediante la aplicación de métodos de análisis de series de datos temporales (análisis correlatorio y análisis espectral simple) y también con otro método más específico de estudio de la descarga de acuíferos carbonáticos (análisis de hidrogramas). Todo ello ha permitido conocer mejor el funcionamiento hidrogeológico de los diferentes acuíferos carbonáticos, y ha contribuido a establecer los criterios básicos para una clasificación de estos acuíferos utilizable de modo generalizado por las comunidades científica y técnica.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo aplicada ha constado de dos etapas. La primera ha consistido en la búsqueda y recopilación de la bibliografía geológica e hidrogeológica previamente publicada acerca de las diferentes áreas de estudio y, sobre todo, una importante labor de búsqueda y recopilación de las series hidrogeológicas existentes. La información recopilada se ha contrastado con el oportuno reconocimiento geológico e hidrogeológico de campo en las áreas de trabajo.

La segunda etapa de trabajo se ha centrado en el análisis, tratamiento y aplicación de dos metodologías a las series de datos previamente recopiladas.

1.3.1. Análisis correlatorio y espectral

Esta metodología considera la totalidad de la serie de datos disponible y se puede aplicar en el dominio temporal (análisis correlatorio) y en el dominio de las frecuencias (análisis espectral). El análisis correlatorio y espectral ha sido puesto a punto y utilizado para el estudio de los sistemas kársticos por Mangin (1981a y b). La aplicación de este método a series de datos de caudales de forma simple, permite

identificar la estructura y componentes de dichas series de datos. A partir de aquí, se obtiene información del comportamiento del sistema carbonático estudiado, es decir, del efecto modulador producido por éste sobre la señal de entrada.

Fundamentos del método

El análisis correlatorio (en el dominio temporal) y espectral (en el dominio frecuencial) simple de los datos de caudal y cruzado con los datos de precipitaciones permite conocer el papel modulador del sistema sobre la señal de entrada y, por consiguiente, la estructura y funcionamiento del acuífero investigado.

De acuerdo con Mangin (1981 a y b), los sistemas kársticos mal drenados atenúan todas las variaciones de la lluvia a corto plazo en favor de fuertes variaciones estacionales. Se trata de sistemas que filtran fuertemente la señal de entrada mostrando por tanto una gran inercia y, según el mismo autor, pueden contener reservas importantes debido a su gran poder regulador. Por ello, presentan un correlograma de caudales tendido, con efecto memoria y tiempo de regulación elevados; en el dominio frecuencial se filtran las variaciones a corto plazo (altas frecuencias) y son amplificadas las producidas a largo plazo (bajas frecuencias), mostrando la banda espectral estrecha.

Por el contrario los sistemas con un drenaje bien organizado, y siempre según el mismo autor, son sistemas que apenas filtran la señal de entrada, es decir, no muestran comportamiento inercial ni memoria, por lo que suelen presentar escasas reservas. Por ello, presentan correlogramas que decrecen rápidamente, con tiempos de regulación muy cortos y banda espectral ancha.

1.3.2. Análisis de la curva de recesión

El hidrograma de manantiales que drenan acuíferos carbonáticos ofrece la posibilidad de estimar la importancia relativa de la red kárstica y de los bloques capacitivos en el acuífero drenado. Aunque la forma del hidrograma resulta en

ocasiones suficientemente expresiva, un método de trabajo más riguroso aconsejaría utilizar alguno de los diversos modelos disponibles. Esto exige verificar previamente que el hidrograma en cuestión se ajusta al modelo elegido, de modo que los parámetros obtenidos experimentalmente cumplen las expresiones matemáticas en que tales modelos se basan. El método de Mangin (1975) es el más aceptado, porque fue desarrollado específicamente para acuíferos kársticos y porque tiene en cuenta toda la curva de recesión, es decir, la parte decreciente del hidrograma comprendida entre la punta de la crecida y el final del agotamiento. Este método se basa en la distinción de dos subsistemas dentro del sistema kárstico: el subsistema infiltración, correspondiente al drenaje de la zona no saturada y de la zona saturada durante la decrecida (infiltración modulada por su transferencia a través de la zona saturada) y el subsistema saturado, correspondiente al drenaje de la zona saturada en régimen no influenciado (agotamiento).

Fundamentos metodológicos

El estudio de la curva de recesión, es decir aquella que se extiende desde la punta de la crecida hasta el comienzo de la crecida siguiente, presenta un gran interés en el estudio de acuíferos carbonáticos. La curva de recesión se puede descomponer en dos partes: una primera, la decrecida propiamente dicha, en la que el caudal disminuye de manera más o menos rápida en función del modo con que se lleve a cabo la infiltración; y otra segunda, el agotamiento, en la que el caudal decrece de manera más o menos lenta en función del estado de la zona saturada.

En este estudio se aplica el modelo propuesto por Mangin (1975), que se basa en la caracterización de ambas partes mediante unos parámetros que permiten conocer el funcionamiento y la estructura del acuífero estudiado.

La parte decreciente del hidrograma puede expresarse mediante la expresión:

$$Q(t) = \psi(t) + \phi(t)$$

La función $\psi(t)$ traduce el efecto de la infiltración en el acuífero y en la descarga del manantial (Fig. 1), modulada por su transferencia a través de la zona saturada y, además, tiene en cuenta el comportamiento propio de la zona saturada durante la decrecida.

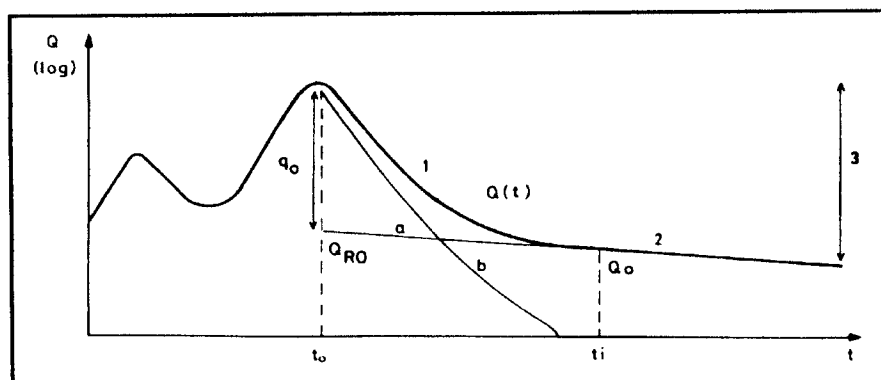


Fig 1. Descomposición de la curva de recesión, según Mangin (1975). 1. Decrecida propiamente dicha 2. Agotamiento 3. Curva de recesión a. $\phi(t)$ b. $\psi(t)$

Según Mangin (1975), la expresión matemática que se ajusta a la mayoría de las decrecidas observada por él, es una función dada por la siguiente expresión

$$\psi(t) = q_0(1 - \eta t) / (1 + \epsilon t), \text{ definida entre } t_0 = 0 \text{ y } t_i = 1/\eta \text{ (duración de la decrecida).}$$

Por consiguiente, la decrecida está caracterizada por los parámetros η y ϵ , ambos de dimensiones T^{-1} , donde T es el tiempo. El primero es el coeficiente de velocidad de infiltración, que indica la duración de la transferencia de la infiltración hasta el manantial, y se calcula a partir de la expresión $\eta = 1/t_i$. El segundo es el coeficiente de heterogeneidad, que traduce la importancia de la concavidad de la gráfica correspondiente a la función $y = \psi(t)/q_0$, siendo q_0 el caudal aportado por la zona no saturada en la punta de la crecida; ϵ se calcula a partir de la expresión $\epsilon = (1/t) - 2\eta$, considerando t como el tiempo que debe transcurrir para que $q = q_0/2$.

La función $\phi(t)$ se refiere fundamentalmente a la descarga del karst saturado y, por tanto, informa sobre la situación durante el agotamiento (Fig. 1). La expresión matemática que mejor se ajusta a esta parte de la curva para la mayoría de los

manantiales es la dada por Maillet, según la cual, durante el agotamiento se produce una relación exponencial entre el caudal de salida y la carga hidráulica:

$Q(t) = Q_{R0}e^{-\alpha t}$, siendo Q_{R0} el caudal obtenido por extrapolación del agotamiento hasta la vertical de la punta del hidrograma, α el coeficiente de agotamiento y t el tiempo transcurrido desde el inicio del agotamiento.

A partir de estos datos, se puede calcular el volumen dinámico $V_d = Q_{R0}/\alpha$, es decir, el volumen almacenado en la zona saturada, cuya variación determina las variaciones del caudal en la surgencia durante el agotamiento.

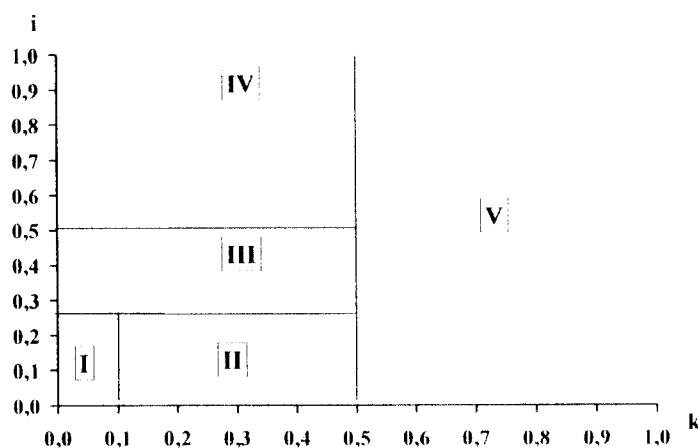


Tabla 1. Clasificación de acuíferos kársticos de Mangin (1975) a partir del análisis de la curva de recesión

Mangin (1975) propone utilizar dos parámetros como criterios de clasificación y comparación de sistemas kársticos: “i” y “k”. El parámetro “i”, cuyo valor es el de la función “y” para $t=2$ días, caracteriza la forma de la decrecida. Los sistemas cuyo valor de i está comprendido entre 0.5 y 1 son complejos y de grandes dimensiones; si $0.25 < i < 0.5$, el sistema sufre retrasos en los aportes y, si $i < 0.25$, la red de drenaje está muy desarrollada. El parámetro “k” es el cociente entre el volumen dinámico (V_d) y el volumen de tránsito o volumen emitido en un ciclo medio (V_t). Dicho parámetro está relacionado con la capacidad de regulación y la importancia de la zona saturada; así, cuando $0.5 < k < 1$, el sistema es de tipo poroso, si $k < 0.5$ el sistema es de tipo kárstico y, dentro de éste, si $k < 0.1$ el poder regulador es escaso.

Los datos anteriores permiten calcular el valor de los parámetros **k** e **i** (Mangin, 1975), que informan respectivamente sobre la capacidad de regulación del sistema y sobre la forma de la decrecida. Se establece así un principio de clasificación, en el que según Mangin se pueden individualizar 5 dominios (Tabla 1).

2. ACUÍFEROS CARBONÁTICOS
SELECCIONADOS

2.1. GENERALIDADES SOBRE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS

Los diferentes acuíferos seleccionados en este estudio son (Fig. 2):

- Unidad Hidrogeológica de Líbar: está situado al Oeste de la localidad de Ronda (Málaga), con una superficie de 103 km². El acuífero está constituido por dolomías y calizas jurásicas que presentan una estructura geológica de pliegues anticlinales en cofre. La Sierra de Líbar es uno de los máximos exponentes del modelado kárstico en la Cordillera Bética, dada la gran cantidad de formas que presenta, tanto exokársticas (poljes, dolinas y lapiaz) como endokársticas (simas y cuevas).
- Unidad Hidrogeológica de las Cabras: está situada en la parte central de la provincia de Cádiz. Presenta una superficie de 45 km² y está constituida por un conjunto calcáreo-dolomítico jurásico que presenta una estructura en pliegues anticlinales y sinclinales afectados por una tectónica de fractura posterior. El principal punto de descarga del acuífero lo constituye el manantial de El Tempul.
- Unidad Hidrogeológica de El Torcal: se encuentra al sureste de la ciudad de Antequera. Presenta una extensión de materiales carbonáticos jurásicos de unos 35 km², con una estructura geológica de pliegue anticlinal en cofre. Se trata de uno de los acuíferos carbonáticos con un mayor grado de morfologías exokársticas, que hacen de este macizo uno de los más conocidos del país por la espectacularidad de su morfología. El principal punto de descarga del acuífero es el manantial de la Villa, a partir del cual tiene lugar el abastecimiento a la ciudad de Antequera.
- Unidad Hidrogeológica de las Cabras-Camarolos-San Jorge: está situada al este del Torcal de Antequera y constituye la segunda unidad en extensión dentro de la Cadena de los Torcales. Presenta una superficie aproximada de 63 km², siendo sin duda el área de mayor complejidad estructural dentro de toda la cadena de los Torcales. Su descarga se produce fundamentalmente por los manantiales de Villanueva del Rosario y el Parroso.

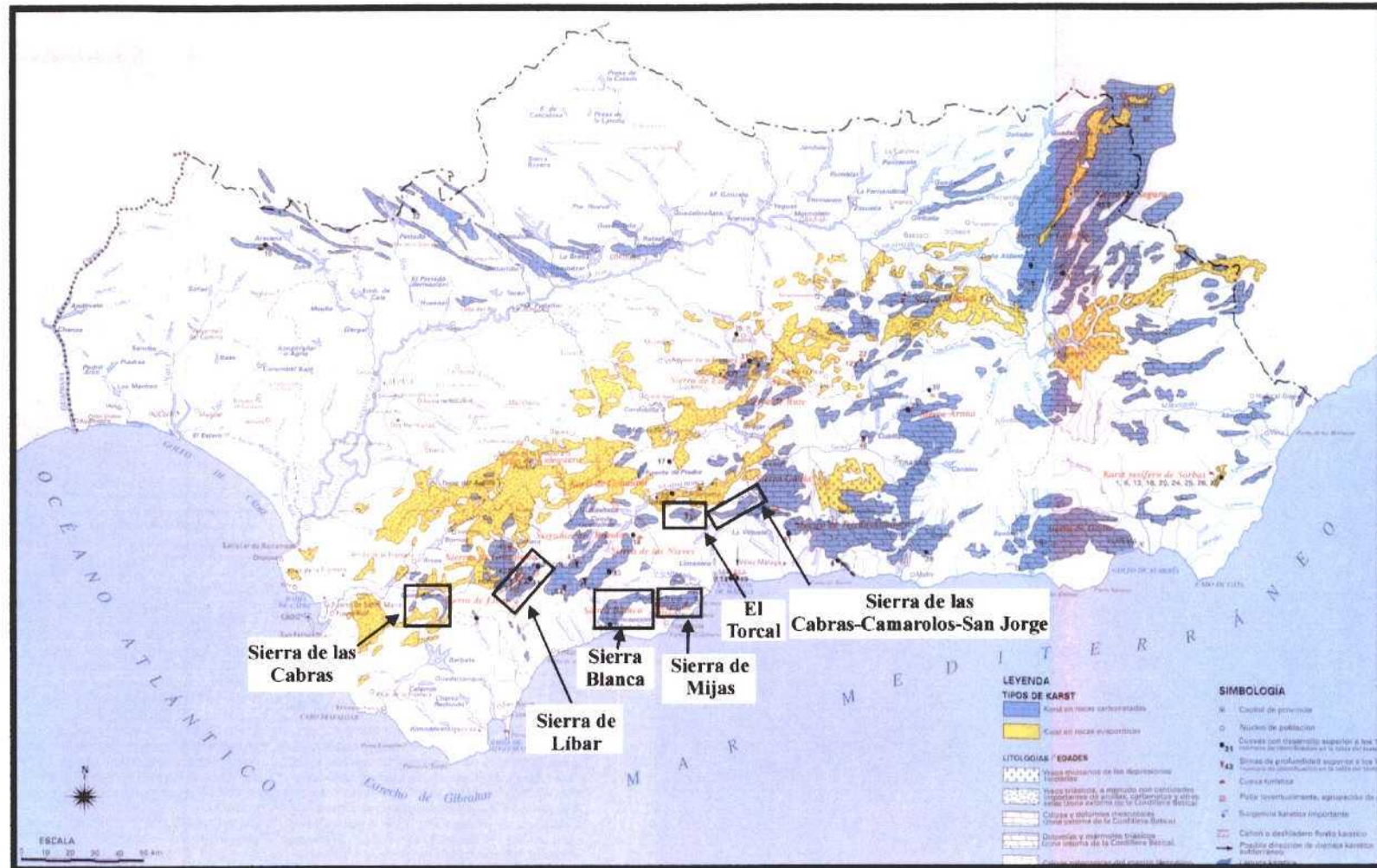


Fig. 2. Situación geográfica de los acuíferos seleccionados

- Sistema de Ojén: se encuentra al noroeste de la localidad que le da nombre, en la vertiente meridional de Sierra Blanca. Presenta una superficie próxima a 13 km² y está formado por mármoles calizos de edad Trías Superior, afectados por una interferencia de pliegues. Las formas endokársticas son relativamente frecuentes, mientras que las exokársticas son bastante escasas.
- Sistema de Torremolinos: está situado al oeste de la localidad de Torremolinos en la Sierra de Mijas. En este sistema afloran principalmente mármoles dolomíticos-triásicos de tonos blanquecinos, presentando el sistema una extensión aproximada de 45 km². La descarga se realiza fundamentalmente por cinco manantiales (San José, Pellejera, Albercón del Rey, Inca y Rojas) situados en la parte oriental del sistema y denominados históricamente como los manantiales de Torremolinos.

3. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA SIERRA DE LÍBAR

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA SIERRA DE LÍBAR

Las principales características geológicas e hidrogeológicas de la Sierra de Líbar, aparecen ya descritas en el apartado 2.4. del Volumen I de este estudio.

3.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE LA CUEVA DEL GATO

3.2.1. Recopilación de los datos de caudal

La serie de datos relativa a la descarga del manantial de la Cueva del Gato ha sido proporcionada por la Confederación Hidrográfica del Sur, y se corresponde con una serie de valores diarios de la altura de agua en el vertedero principal de la estación de aforos, y por tanto de caudal diario mediante la aplicación de la curva de gasto de esta estación.

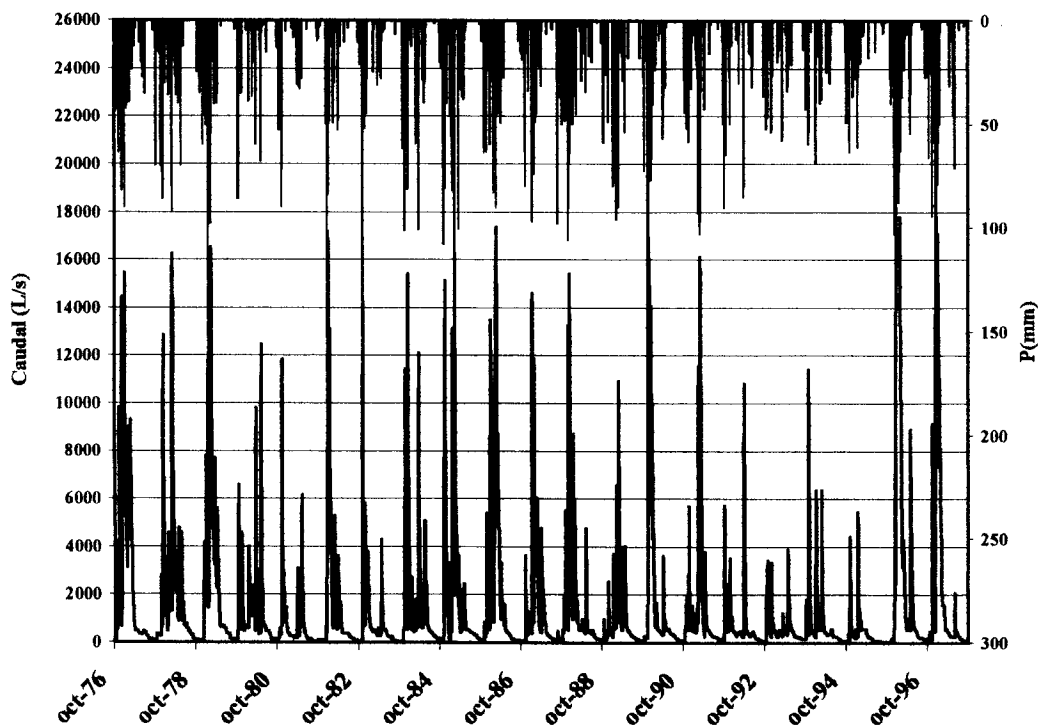


Fig. 3. Hidrograma del manantial de la Cueva del Gato entre 1976-1997 (Datos de CHSE).

La serie de caudales diarios comprende desde Octubre de 1976 hasta Septiembre de 1997, mostrando un caudal medio del manantial para este periodo de 1537 L/s. En la figura 3 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos recopilada, junto con las precipitaciones en la estación de la Cueva de la Pileta.

El análisis de la evolución de los caudales en la surgencia de la Cueva del Gato para un año "tipo" (Fig. 4), permite observar que episodios lluviosos aislados, inferiores a 25 mm/día, no producen aumento de caudal en el manantial. Sin embargo, en época de aguas altas, precipitaciones inferiores a dicho valor producen una respuesta de mayor magnitud, que la que se produce en el caso que dicha precipitación se registrara a principios de un año hidrológico. En cualquier caso, los tiempos de respuesta son muy rápidos, ya que generalmente, desde el momento que se produce la precipitación hasta que empieza a aumentar el caudal del manantial no transcurre más de un día, en parte debido a que la recarga se produce por la escorrentía generada en la cuenca endorreica del río Gaduares.

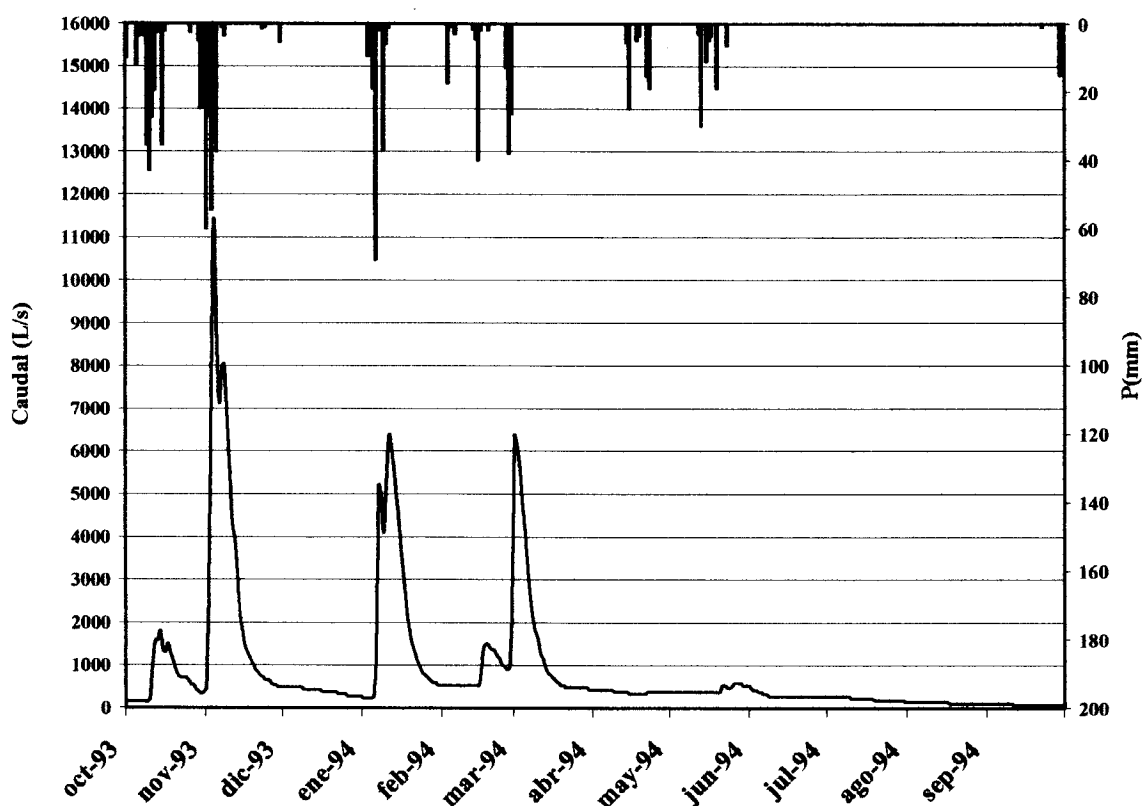


Fig. 4. Hidrograma del manantial de la Cueva del Gato para un año tipo (1993-1994)

	Q_{max}	Q_{min}
1976-77	15412	71
1977-78	16244	71
1978-79	16524	41
1979-80	12465	144
1980-81	6136	41
1981-82	17088	41
1982-83	14052	41
1983-84	15412	41
1984-85	16244	106
1985-86	17372	41
1986-87	14592	41
1987-88	15412	71
1988-89	10849	71
1989-90	16947	71
1990-91	16105	41
1991-92	10805	71
1992-93	3900	41
1993-94	11436	71
1994-95	5395	41
1995-96	17800	16
1996-97	17800	71
<i>media</i>	<i>13714</i>	<i>59</i>

Q_{max}/Q_{min} 231,5

Tabla 2. Relación de caudales máximos y mínimos para el manantial de la Cueva del Gato (Datos en L/s)

Además, hay que destacar que en un mismo año hidrológico se suelen registrar, al menos, dos o tres crecidas importantes con un hidrograma agudo y estrecho, que generalmente suelen ir acompañadas de su correspondiente decrecida y agotamiento.

En la tabla 2 se indican los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años analizados en el manantial de la Cueva del Gato. A partir de ellos obtenemos la relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$) para todo el periodo estudiado. Este parámetro se utilizará para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los diferentes acuíferos investigados.

El manantial de la Cueva del Gato es el que presenta el valor más elevado para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ con respecto al resto de surgencias analizadas, poniendo de manifiesto un comportamiento marcadamente kárstico.

3.2.2. Análisis correlatorio y espectral

Análisis simple

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie de caudales medios diarios en la estación de aforos del manantial de la Cueva del Gato, para el periodo comprendido entre las fechas 01/10/1976 y 30/09/1997. Teniendo en cuenta los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser analizados. El tratamiento se realiza a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga duración (ventana de observación de 1250 días y paso de 10 días).

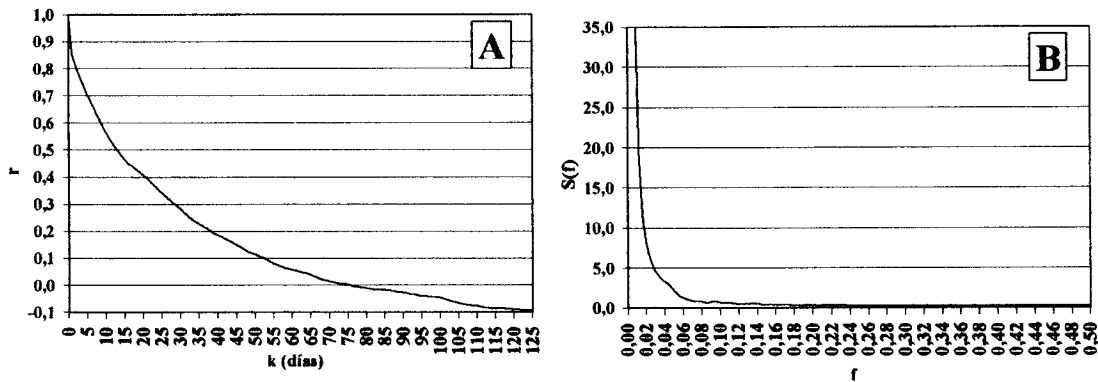


Fig. 5. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de la Cueva del Gato entre 1976 y 1997, para una ventana de 125 días y paso de 1 día.

El tratamiento de las series de caudales diarios del manantial de la Cueva del Gato da lugar a un correlograma no muy tendido (Fig. 5A). Así para el análisis de corta duración, el efecto memoria, que según Mangin (1981 a y b) se define como el valor de

k (días) para $r = 0'1-0'2$ y el cual se relaciona con el papel regulador de las reservas, presenta en este caso un valor de 45 días.

En el dominio frecuencial, a partir de la anchura de la banda espectral o frecuencia de corte permite conocer desde un punto de vista cuantitativo la capacidad de filtro del sistema, mostrando en este caso un valor de 0'06 (Fig. 5B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 17 días, y por tanto, teóricamente, si se analiza el sistema con una periodicidad menor a ésta no se obtendrá información significativa.

El espectro de densidad de varianza permite calcular, además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema a partir del parámetro denominado tiempo de regulación, que se define por $S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro para $f=0$, y que en el caso del manantial de la Cueva del Gato es de 37 días. Este dato refleja la escasa importancia en relación a la capacidad de regulación del sistema.

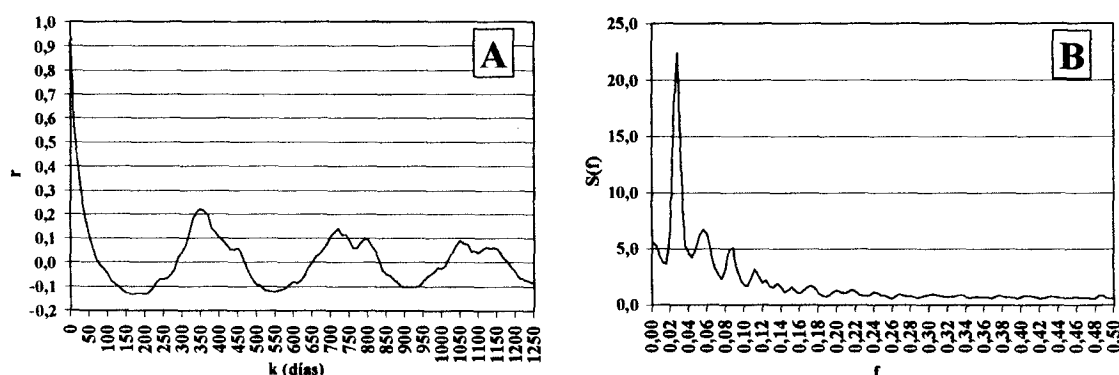


Fig 6. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de la Cueva del Gato entre 1976 y 1997, para una ventana de 1250 días y paso de 10 días.

El análisis a largo término ha permitido obtener un correlograma que refleja la existencia de ciclos anuales bien marcados (Fig. 6A). El espectro, para el análisis de larga duración (Fig. 6B), muestra la presencia de un marcado ciclo anual, además se observan al menos dos picos claramente marcados que indican ciclicidades semestrales y trimestrales.

3.2.3. Análisis de la curva de recesión

Análisis de la curva de recesión para la serie de caudales diarios del manantial de la Cueva del Gato

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial de la Cueva del Gato se ha llevado a cabo el estudio de cuatro curvas de recesión. En el anexo 1 se muestran los hidrogramas seleccionados y en la tabla 3 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis. Es preciso indicar que en casi todos los casos se trata de hidrogramas unitarios; no se han tenido en cuenta hidrogramas en los que se han producido crecidas durante la decrecida o el agotamiento.

MANANTIAL DE LA CUEVA DEL GATO	D_d (días)	η (días ⁻¹)	Q_0 (L/s)	q_0 (L/s)	$q_0/2$ (L/s)	$t_{q_0/2}$ (días)	ε (días ⁻¹)	i
1989/90	15	0,06667	3996,0	3278,1	1639,1	4,0	0,11667	0,70
1991/92	18	0,05556	3806,0	3044,5	1522,2	5,0	0,08889	0,75
1993/94	18	0,05556	3618,0	2915,2	1457,6	4,0	0,13889	0,70
1996/97	31	0,03226	8854,0	7870,2	3935,1	9,0	0,04659	0,86
								0,75

MANANTIAL DE LA CUEVA DEL GATO	Q_i (L/s)	Q_f (L/s)	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Q_{R0} (L/s)	V_d (m ³)	V_t (m ³)	k
1989/90	586,0	71,0	156	1,35E-02	717,9	4.584.211	48.912.336	0,09
1991/92	586,0	71,0	145	1,46E-02	761,5	4.520.214	48.912.336	0,09
1993/94	586,0	144,0	139	1,01E-02	702,8	6.013.798	48.912.336	0,12
1996/97	644,0	106,0	132	1,37E-02	983,8	6.218.709	48.912.336	0,13
				1,30E-02				0,11

Tabla 3. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión (arriba agotamiento y abajo decrecida) correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de la Cueva del Gato.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media de ésta es aproximadamente de 21 días (D_d), variando poco de unos ciclos a otros, excepto en el caso del año hidrológico 1996/97, que presenta una duración de 31 días. De este modo los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre 0'067 días⁻¹ (año 1989/90) y 0'030 días⁻¹ (1996/97), con un valor medio de 0'053 días⁻¹. Todos estos valores son claramente indicativos de que la velocidad de infiltración

es bastante rápida, probablemente debido al alto grado de karstificación funcional y a la elevada jerarquización de los conductos kársticos.

Del mismo modo, el coeficiente de heterogeneidad (ϵ) varía entre 0'047 (1996/97) y 0'139 días⁻¹ (1993/94). Estos valores reflejan una concavidad poco marcada para las diferentes curvas (Fig. 7) y, por tanto, muestran que la disminución de caudal en la surgencia se produce de manera lenta y gradual durante la decrecida.

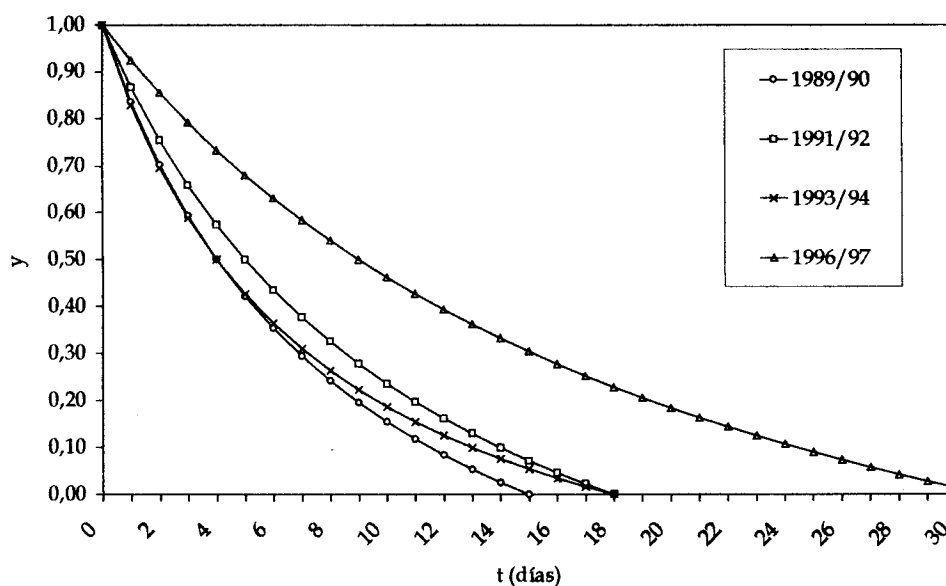


Fig. 7. Representación gráfica de la función "y" correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de la Cueva del Gato

Los valores de los coeficientes η y ϵ permiten calcular el valor del parámetro i para cada uno de las curvas analizadas, que en todos los casos ha dado valores superiores o iguales a 0'70. Según los criterios de Mangin (1975), estos datos indican que se trata de un sistema complejo y de grandes dimensiones, lo cual parece reflejarse claramente en la realidad, ya que el sistema presenta una extensión de 103 km² por lo que puede catalogarse perfectamente como de grandes dimensiones.

La duración del agotamiento (D_a) para cada una de las curvas estudiadas, varía entre 132 (1996/97) y 156 días (1989/90). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores entre $1,01 \times 10^{-2}$ días⁻¹ (1993/94) y $1,46 \times 10^{-2}$ días⁻¹ (1991/92), con un valor

medio de $1,30 \times 10^{-2}$ días⁻¹. Todos estos valores indican que el agotamiento se produce de forma rápida como corresponde a un acuífero con un flujo de tipo kárstico.

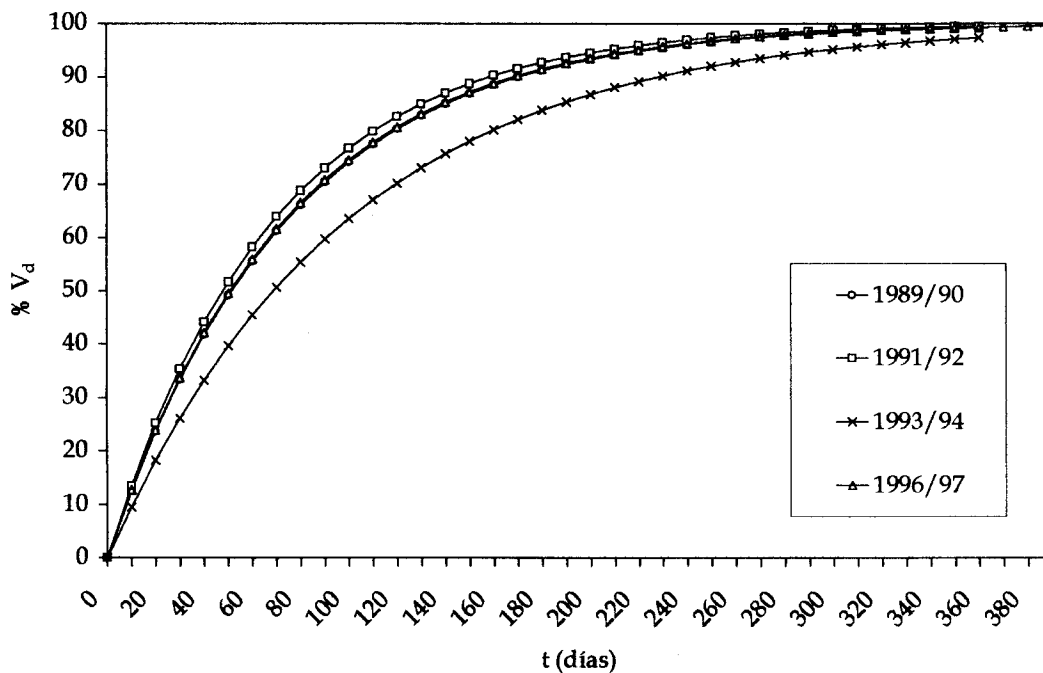


Fig. 8. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de la Cueva del Gato.

Los volúmenes dinámicos (V_d) calculados para los agotamientos estudiados varían entre $4,6 \text{ hm}^3$ (1989/90) y $6,2 \text{ hm}^3$ (1996/97); el valor medio es de $5,3 \text{ hm}^3$. Al representar el porcentaje del volumen dinámico drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Fig. 8), se observa que al cabo de medio año sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), normalmente, se drena más del 80% de dicho volumen. Estos valores son indicativos de la escasa capacidad de filtro del sistema y poder regulador del mismo. El volumen de tránsito anual (V_t), calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de 49 hm^3 . Así, estos dos volúmenes permiten calcular el valor del parámetro k , cuyos valores extremos para el período estudiado son 0,09 (1989/90 y 1991/92) y 0,13 (1996/97), con un valor medio de $k=0,11$. Estos resultados muestran un acuífero de tipo kárstico con escaso poder regulador.

3.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de la Cueva del Gato

Los parámetros característicos del manantial de la Cueva del Gato obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral son los siguientes:

- Correlograma poco tendido (variaciones relativamente rápidas de los caudales), con un efecto memoria no muy importante, ya que presenta un valor del orden de los 45 días.
- Espectro de frecuencia; en él se refleja que la frecuencia de corte es de 0'06, por lo que sería suficiente estudiar el manantial con una periodicidad inferior a 17 días; el tiempo de regulación es de 37 días.

Estos parámetros anteriores ponen de manifiesto que el acuífero de la Sierra de Libar tiene una escasa inercia y un poder regulador igualmente bajo, mostrando así, un comportamiento global muy próximo al de un sistema kárstico bien jerarquizado.

Los resultados del análisis de los hidrogramas unitarios del manantial de la Cueva del Gato permiten concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se produce de forma muy rápida y que la curva de decrecida presenta una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios con escasa capacidad de filtro de las precipitaciones, en los que la decrecida en el manantial se produce de forma muy rápida (menos de 30 días), debido al alto grado de conexión y jeraquización de los conductos presentes en la misma.

El agotamiento del manantial comienza con un caudal aproximado de 600 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden de $1,3 \times 10^{-2}$ días⁻¹, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma rápida. Tal es así que durante los agotamientos normales, de menos de 150 días de duración, se drenan casi el 75% del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial.

4. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE LA SIERRA DE LAS CABRAS

4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA SIERRA DE LAS CABRAS

Las principales características geológicas e hidrogeológicas de la Sierra de las Cabras, aparecen ya descritas en el apartado 2.3. del Volumen I de este estudio.

4.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE EL TEMPUL

4.2.1. Recopilación de los datos de caudal

La serie de datos relativa a la descarga del manantial de El Tempul ha sido proporcionada por la empresa de Aguas de Jerez (AJEMSA), y se corresponde con una serie de valores diarios de la altura de agua en el vertedero principal de la estación de aforos y en la entrada del acueducto, y por tanto del caudal diario mediante la aplicación de la curva de gasto de la estación de aforos. Esta serie de caudales diarios comprende desde enero de 1985 hasta noviembre de 1999. El caudal medio del manantial durante este periodo es de 255 L/s. En la figura 9 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos recopilada.

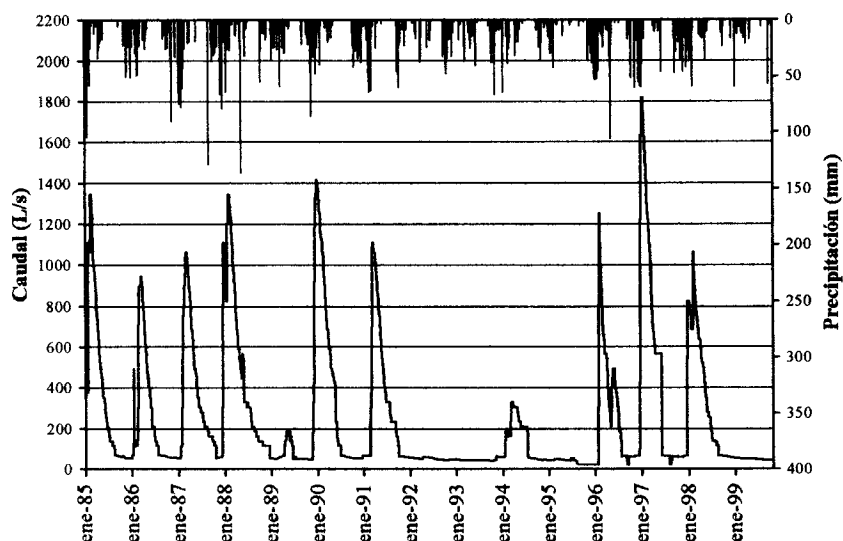


Fig. 9. Hidrograma del manantial de El Tempul entre 1985-1999 (datos proporcionados por AJEMSA)

El análisis de la evolución de los caudales para un año “tipo” (1989/90) permite observar que tan sólo se registra una crecida importante por cada año hidrológico (Figuras 9 y 10). Además, el hidrograma presenta una anchura excepcional, lo que parece reflejar un drenaje relativamente lento de la zona no saturada (Fig. 10).

La única crecida producida para cada ciclo hidrológico va seguida de su correspondiente decrecida y agotamiento, claramente diferenciadas en el hidrograma para un año tipo (Fig. 10).

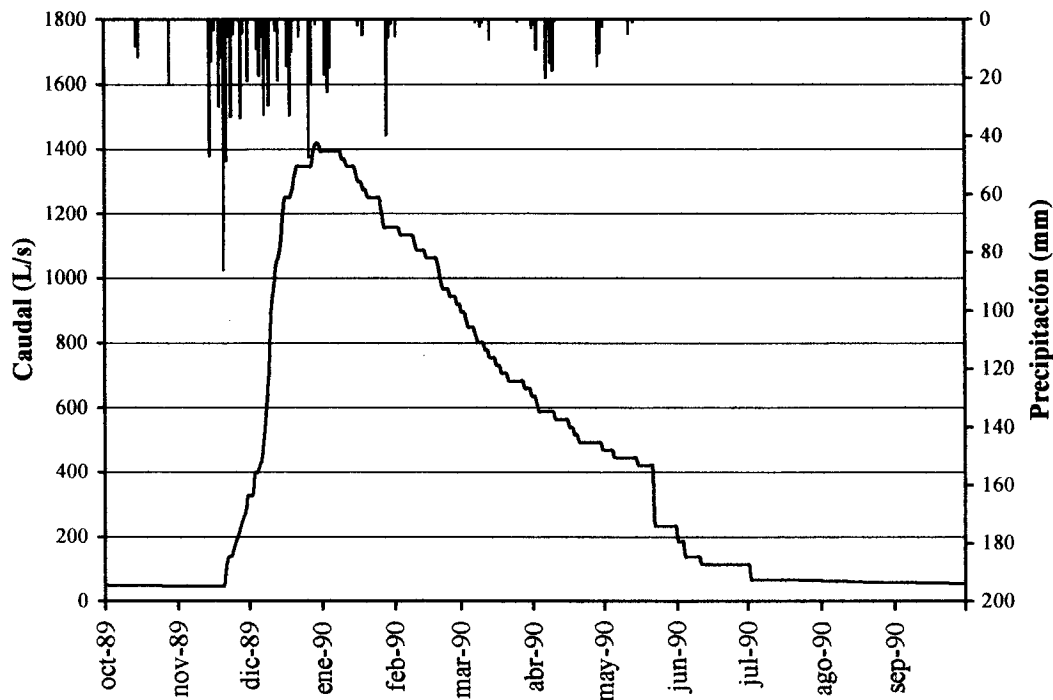


Fig. 10. Hidrograma del manantial de El Tempul para un año tipo (1989-1990)

El resultado obtenido en el cálculo de la relación $\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$ para el manantial de El Tempul (Tabla 4), nos permite extraer una idea preliminar en relación al funcionamiento hidrodinámico del acuífero de la Sierra de las Cabras, el cuál refleja, desde el punto de vista hidrodinámico, un comportamiento bastante inercial, característico de un sistema acuífero de tipo fisurado.

	Q_{max}	Q_{min}
1985-86	943	61
1986-87	1062	53
1987-88	1346	54
1988-89	138	50
1989-90	1417	55
1990-91	1109	52
1991-92	62	44
1992-93	47	41
1993-94	328	48
1994-95	53	43
1995-96	1251	61
1996-97	1819	58
1997-98	1062	57
<i>media</i>	818	52

Q_{max}/Q_{min} 15,7

Tabla 4. Relación de caudales máximos y mínimos para el manantial de El Tempul. (Datos en L/s)

4.2.2. Análisis correlatorio y espectral

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie cronológica de caudales medios diarios en la estación de aforos del manantial de El Tempul para el período comprendido entre las fechas 01/01/1985 y 30/11/1995. Teniendo en cuenta los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser analizados. Al igual que para el análisis de los demás sistemas, el tratamiento se realiza a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga duración (ventana de observación de 1250 días y paso de 10 días).

Análisis simple

El tratamiento de las series de caudales diarios del manantial de El Tempul da lugar a un correlograma bastante tendido (Fig. 11A). Así para el análisis de corta duración, el efecto memoria presenta un valor de 95 días, valor bastante elevado que sugiere la existencia de importantes reservas reguladoras.

En el dominio frecuencial, la frecuencia de corte presenta un valor de 0'03 (Fig. 11B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 33 días, y por tanto, teóricamente, si se analiza el sistema con una periodicidad menor a ésta no se obtendrá información significativa. Además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema en el caso del manantial de El Tempul es de 85 días. Este dato corrobora la interpretación efectuada anteriormente y refleja la importante capacidad de regulación del acuífero.

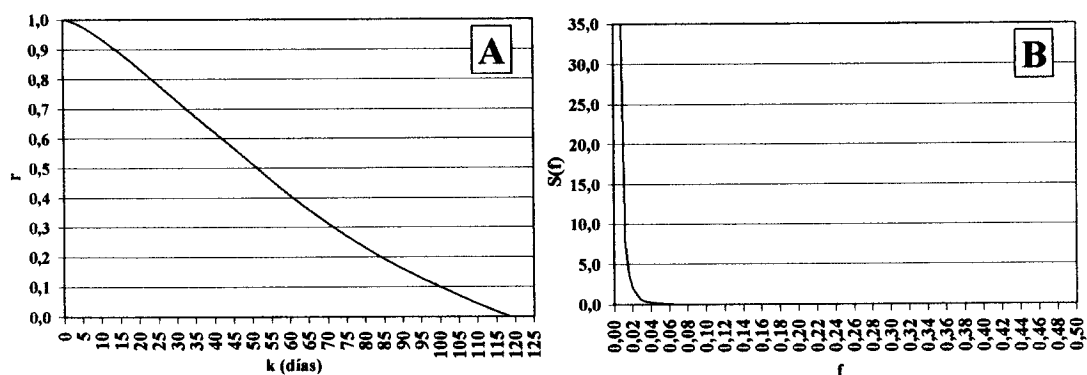


Fig 11. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 1999, para una ventana de 125 días y paso de 1 día

El análisis a largo término ha permitido obtener un correlograma que refleja la existencia de ciclos anuales bien marcados (Fig. 12A). El espectro, para el análisis de larga duración (Fig. 12B), muestra la presencia de un marcado ciclo anual. Además se observan dos picos claramente marcados que indican ciclicidades de 227 y 178 días.

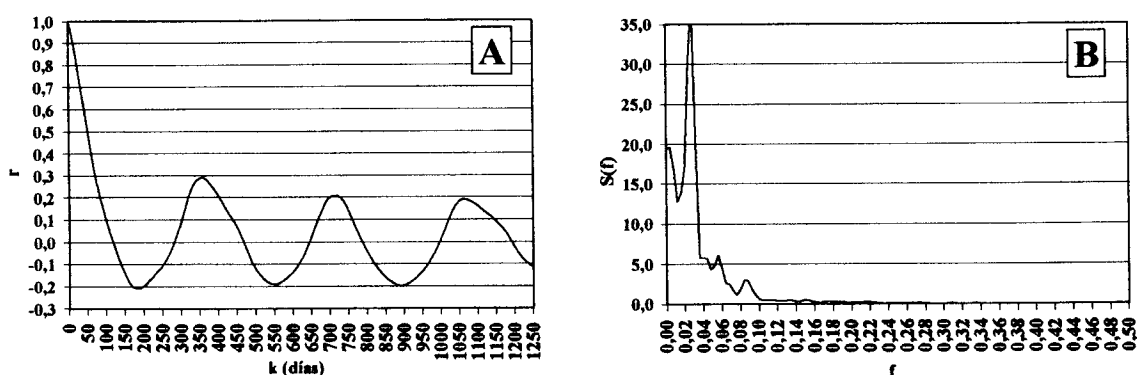


Fig 12. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 1999, para una ventana de 1250 días y paso de 10 días

4.2.3. Análisis de la curva de recesión

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial de El Tempul se ha llevado a cabo el estudio de cinco curvas de recesión. En el anexo 2 se muestran los hidrogramas seleccionados y en la tabla 5 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis. Es preciso indicar que en todos los casos se ha trabajado con hidrogramas unitarios.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media (D_d) de ésta es aproximadamente de 170 días, variando poco de unos ciclos a otros, excepto en el caso del año hidrológico 1986/87, que presenta una duración de 132 días. De este modo los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre $0'008 \text{ días}^{-1}$ (año 1986/87) y $0'005 \text{ días}^{-1}$ (1998/99), con un valor medio de $0'006 \text{ días}^{-1}$. Todos estos valores son claramente indicativos de que la velocidad de infiltración es muy lenta y que la decrecida es prolongada en el tiempo, probablemente debido al bajo grado de karstificación funcional, a la escasa jeraquización de los conductos y a la potente zona no saturada del mismo.

MANANTIAL DEL TEMPUL	D _a (días)	η (días ⁻¹)	Q ₀ (l/s)	q ₀ (l/s)	q ₀ /2 (l/s)	t _{q0/2} (días)	ε (días ⁻¹)	i
Hidrograma 1 (84/85)	177	0,00565	1346,0	1246,3	623,1	47,0	0,00998	0,97
Hidrograma 2 (86/87)	132	0,00758	943,0	857,4	428,7	34,0	0,01426	0,96
Hidrograma 5 (89/90)	183	0,00546	1417,0	1328,7	664,4	88,0	0,01136	0,97
Hidrograma 7 (96/97)	167	0,00599	1251,0	1170,4	585,2	28,0	0,02374	0,94
Hidrograma 9 (98/99)	186	0,00538	1062,0	981,3	490,7	56,0	0,00710	0,98
								0,96

MANANTIAL DEL TEMPUL	Q _i (l/s)	Q _f (l/s)	D _a (días)	α (días ⁻¹)	Q _{R0} (l/s)	V _d (m ³)	V _t (m ³)	k
Hidrograma 1 (84/85)	69,0	52,0	136	2,08E-03	99,7	4.141.995	8.010.144	0,52
Hidrograma 2 (86/87)	69,0	52,0	173	1,64E-03	85,6	4.524.488	8.010.144	0,56
Hidrograma 5 (89/90)	66,0	52,0	150	1,59E-03	88,3	4.798.948	8.010.144	0,60
Hidrograma 7 (96/97)	65,0	57,0	102	1,29E-03	80,6	5.407.971	8.010.144	0,68
Hidrograma 9 (98/99)	63,0	50,0	174	1,33E-03	80,7	5.246.605	8.010.144	0,65
				1,58E-03				0,60

Tabla 5. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión (arriba decrecida y abajo agotamiento) correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de El Tempul.

Del mismo modo, el coeficiente de heterogeneidad (ε) varía entre 0'007 (1998/99) y 0'024 días⁻¹ (1996/97). Estos valores producen una escasa concavidad de la curva de la función y (Fig. 13) y, por tanto, muestran que la disminución de caudal en la surgencia se produce de manera lenta y gradual durante la decrecida

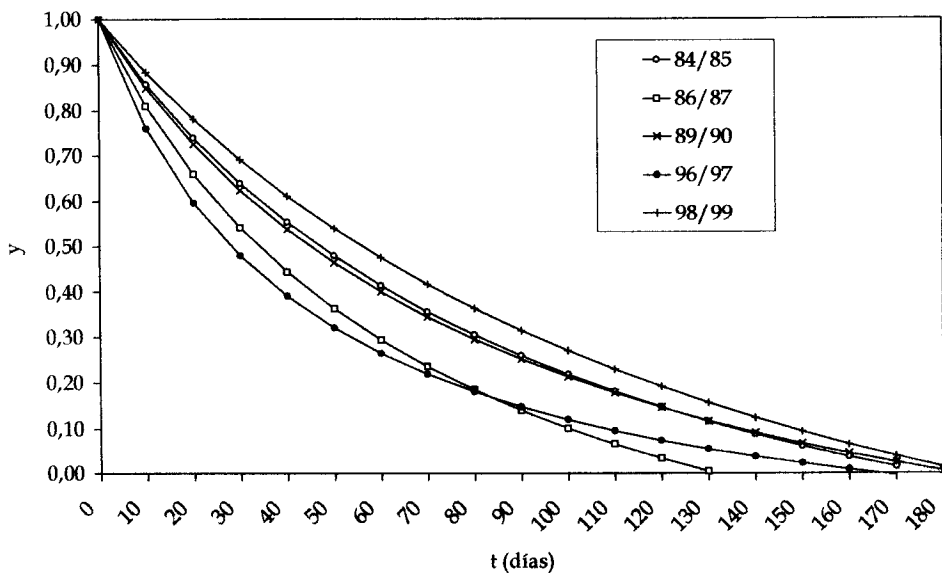


Fig. 13. Representación gráfica de la función "y" correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de El Tempul

Los valores de los coeficientes η y ε permiten calcular el valor del parámetro i para cada uno de las curvas analizadas, que en todos los casos ha dado valores superiores a $0,90$. Según los criterios de Mangin (1975), estos datos indican que se trata de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Sin embargo, el sistema abarca una extensión de 40 km^2 por lo que no puede catalogarse, precisamente, como de grandes dimensiones y la razón del valor tan alto de i no es otra que la duración prolongada de la decrecida, por la escasa jerarquización de la zona no saturada.

A diferencia de la decrecida, la duración del agotamiento es más desigual para cada una de las curvas estudiadas, varía entre 102 (1996/97) y 174 días (1998/99). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores entre $1,29 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$ (1996/97) y $2,08 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$ (1984/85), con un valor medio de $1,58 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$. Todos estos valores indican que el agotamiento se produce de forma lenta como corresponde a un sistema de flujo difuso.

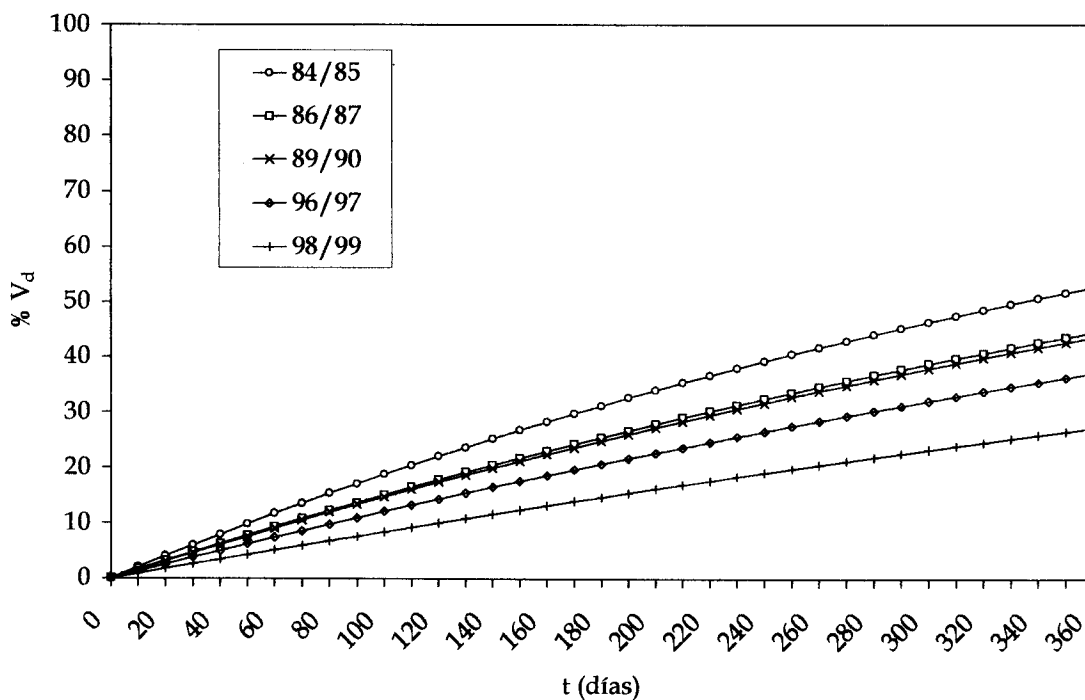


Fig 14. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de El Tempul.

Los volúmenes dinámicos calculados para los agotamientos estudiados varían entre $4,1 \text{ hm}^3$ (1984/85) y $5,4 \text{ hm}^3$ (1996/97); el valor medio es de $4,8 \text{ hm}^3$. Al

representar el porcentaje del volumen dinámico drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Fig. 14), se observa que al cabo de un año sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), normalmente, se drena menos del 50% de dicho volumen. Estos valores son indicativos de la gran capacidad de filtro del sistema y del importante papel regulador del mismo. El volumen de tránsito anual, calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de 8 hm³. Así, estos dos volúmenes permiten calcular el valor del parámetro k, cuyos valores extremos para el período estudiado son 0,52 (1984/85) y 0,68 (1996/97), con un valor medio de k=0'60, que según Mangin (1975) corresponde a un sistema de tipo poroso. Estos resultados traducen la importancia de la zona saturada y el importante poder regulador que presenta este acuífero.

4.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de El Tempul

Los parámetros característicos del manantial de El Tempul obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral son los siguientes:

- Correlograma muy tendido (variaciones lentas de los caudales), con un efecto memoria muy considerable del orden de 100 días. Esto significa que el sistema es muy inercial y, según Mangin (1981 a y b), este dato sería indicativo de la existencia de abundantes reservas, aunque otros autores (Sahuquillo *et al.*, 1987) indican que es preciso tener en cuenta otros factores adicionales al hidrograma, como la geometría o los parámetros hidráulicos del acuífero, para poder precisar la abundancia de reservas.
- Espectro de frecuencia en el que queda reflejada, prácticamente de forma exclusiva, la componente anual de las precipitaciones; es decir, las precipitaciones distintas del periodo invernal tienen poca trascendencia en el hidrograma del manantial. La banda espectral es muy estrecha (frecuencia de corte=0,03) por lo que, teóricamente, sería suficiente con estudiar el manantial con una periodicidad de 33 días; el tiempo de regulación (duración

media de la influencia de la señal de entrada en el sistema) es de 85 días. Estos datos ponen de manifiesto la gran capacidad de filtro del sistema ante la entrada de las precipitaciones.

Todos los parámetros anteriores indican que el acuífero de Sierra de las Cabras tiene una gran inercia o capacidad de filtro, en definitiva de amortiguación de las precipitaciones, y un poder regulador igualmente elevado. Los valores de los parámetros característicos antes comentados son propios de un acuífero de flujo difuso, con un comportamiento global más próximo al de un acuífero carbonático fisurado que al de un acuífero kárstico bien jerarquizado.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de El Tempul, permite concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se produce de forma muy lenta y que la curva de decrecida presenta una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios con gran capacidad de filtro de las precipitaciones, en los que la decrecida en el manantial se produce de forma muy lenta (más de 100 días), lo cual debe estar favorecido por la gran potencia media de la zona no saturada (centenares de metros) y el bajo grado de conexión y jerarquización de los conductos presentes en la misma.

El agotamiento del manantial comienza con un caudal de 75 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden de $2 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma lenta. Tal es así que durante los agotamientos normales, de menos de 200 días de duración, no se drena más que una pequeña parte del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial. El valor del volumen dinámico disminuye muy lentamente en el tiempo, pues al cabo de un año sin llover sólo habría drenado la mitad del mismo. Estos datos son especialmente interesantes a la hora de gestionar los recursos hídricos del acuífero, porque permiten establecer previsiones de caudales en condiciones de agotamiento.

**5. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD
HIDROGEOLÓGICA DEL TORCAL DE ANTEQUERA**

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL TORCAL DE ANTEQUERA

Constituye el sistema hidrogeológico más extenso, importante y mejor definido de la denominada Cadena de los Torcales (Fig. 15), situada en la parte central de la provincia de Málaga.

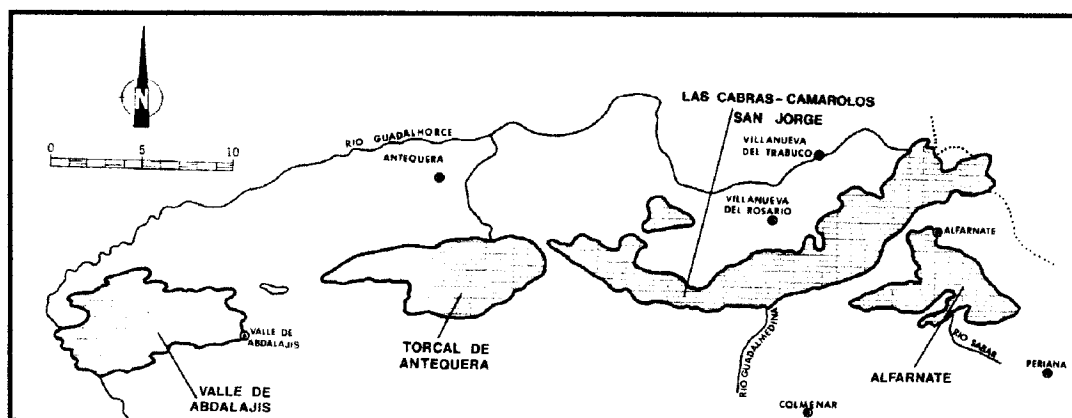


Fig. 15. Localización geográfica de la Cadena de los Torcales

El sistema acuífero se aloja en materiales carbonáticos jurásicos del Penibético (Martín-Algarra, 1987), que en su sector central presentan una disposición fundamentalmente tabular afectada por numerosas fracturas. En los bordes del macizo la complejidad tectónica es mucho mayor, poniéndose en contacto con unidades y elementos estructurales muy diversos, de posición y origen controvertidos. Desde el punto de vista hidrogeológico, merece la pena destacar el hecho de que se trata de un acuífero carbonático con un gran desarrollo de los fenómenos kársticos, que hacen de este macizo uno de los más conocidos del país por la espectacularidad de su morfología.

El sistema hidrogeológico se halla bastante bien definido geoméricamente en sus límites (Fig. 16), ya que a grandes rasgos puede decirse que el acuífero carbonático "flota" sobre materiales impermeables, encontrándose bien separado hidrogeológicamente de otros acuíferos cercanos. La alimentación que recibe es sólo la procedente de las precipitaciones y la descarga tiene lugar, casi en su totalidad, a través del manantial de La Villa.

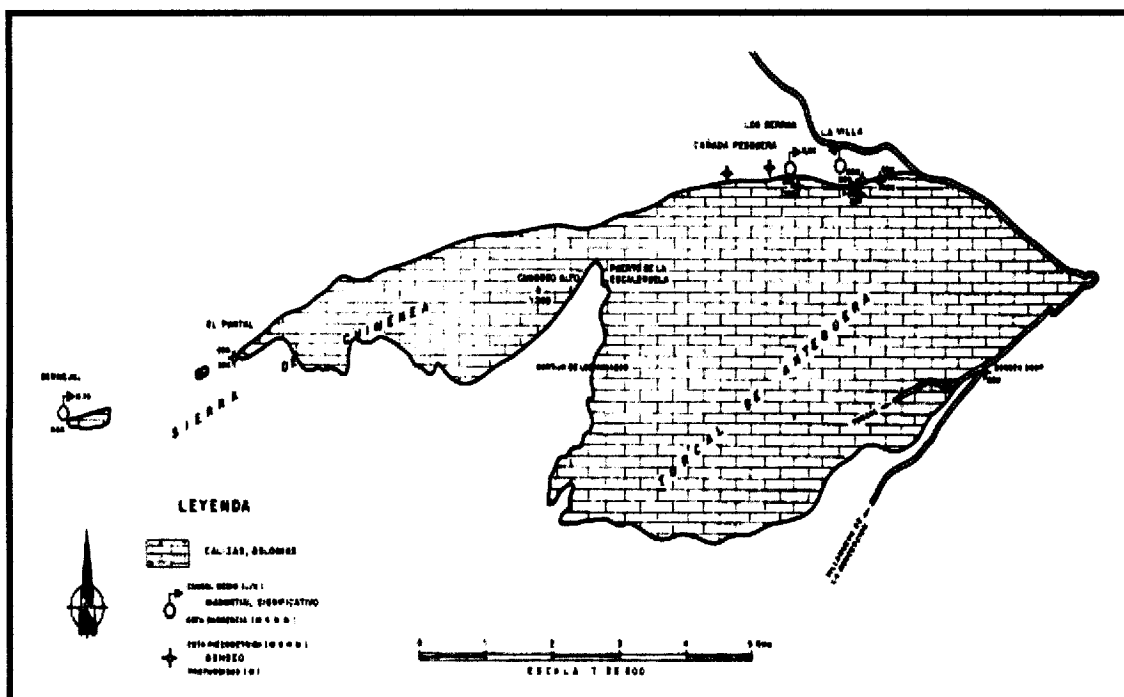


Fig. 16. Mapa hidrogeológico del sistema acuífero del Torcal de Antequera

Presenta una extensión de materiales carbonáticos de unos 35 km² y unos recursos aproximados de 12,5 hm³/año, la mayor parte de los cuales (unos 10 hm³/año) descargan a través del referido manantial de La Villa, su principal punto de drenaje. Dicho manantial, con un caudal medio de unos 314 L/s y con variaciones entre 0 y casi 2000 L/s, se halla en la actualidad parcialmente regulado por varias captaciones que permiten atender de modo continuo, conjunta o separadamente, junto con la descarga más o menos afectada del propio manantial de la Villa, la demanda del abastecimiento urbano de Antequera (aproximadamente 170 L/s) y una parte de la dotación de riegos.

5.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE LA VILLA

5.2.1. Recopilación de los datos de caudal

La serie de datos relativa a la descarga del manantial de La Villa ha sido proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España, y se corresponde con una serie de valores diarios de la altura de agua en el vertedero de la estación de aforos, y por tanto de caudal diario mediante la aplicación de la curva de gasto de la estación de aforos. Esta serie de caudales diarios comprende desde Octubre de 1974 hasta Septiembre de 1982, mostrando un caudal medio del manantial para este periodo de 314 L/s. En la figura 17 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos recopilada, junto con las precipitaciones en la estación del Torcal.

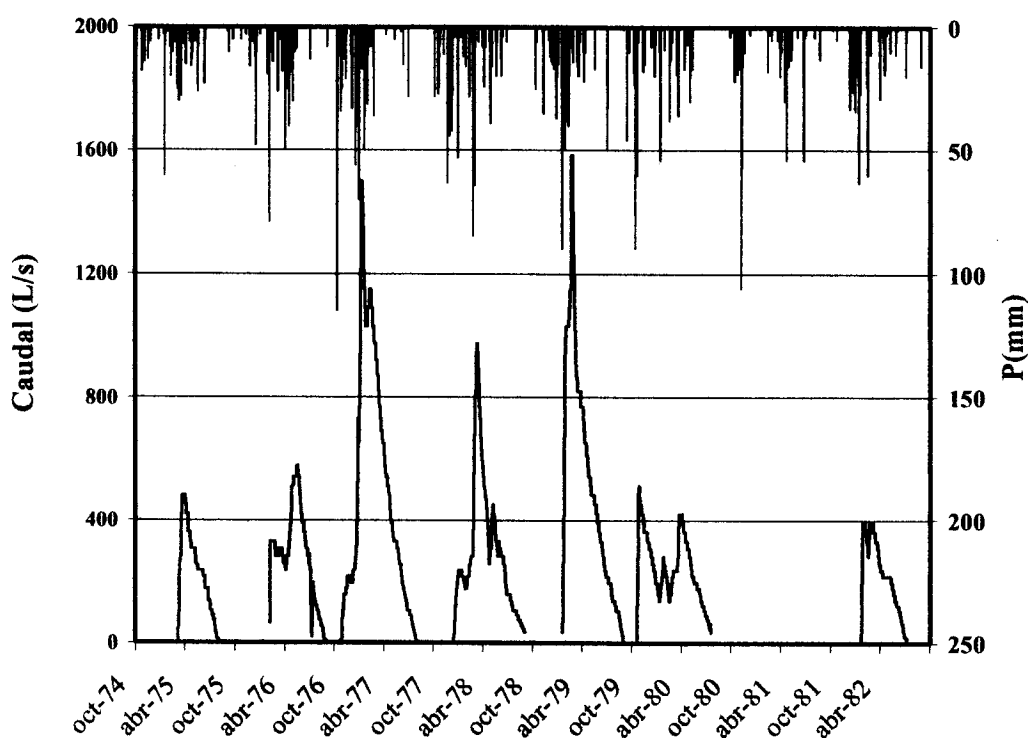


Fig. 17. Hidrograma del manantial de la Villa para el período 1974-1982 (datos proporcionados por el IGME)

El manantial de la Villa, desde hace varias décadas, se encuentra parcialmente regulado para el abastecimiento a Antequera. Esta regulación parcial se produce

mediante bombes durante los períodos de estiaje: los bombes se realizan desde el año 1974 en el mismo manantial y, desde el año 1977, en unos sondeos ejecutados por el IGME en las proximidades del mismo. Este régimen de bombeo provoca cortes en la serie de caudales diarios, claramente reflejados en el hidrograma del manantial (Fig. 18), por lo que no ha sido posible aplicar el análisis correlatorio y espectral a tan excepcional serie de datos. En cuanto al análisis de la curva de recesión, se ha considerado que, al producirse los bombes únicamente durante los períodos de estiaje, los efectos de éstos eran patentes tan sólo durante la crecida siguiente.

El hidrograma del manantial de la Villa (Fig. 17), permite constatar que la respuesta de la surgencia a un episodio lluvioso es del orden de 1 a 2 días. Además, dicha surgencia responde frente a eventos pluviométricos del orden de 15-20 mm. Sin embargo, precipitaciones inferiores a dichos valores durante varios días (2-3 días) producen también un incremento del caudal de descarga en el manantial.

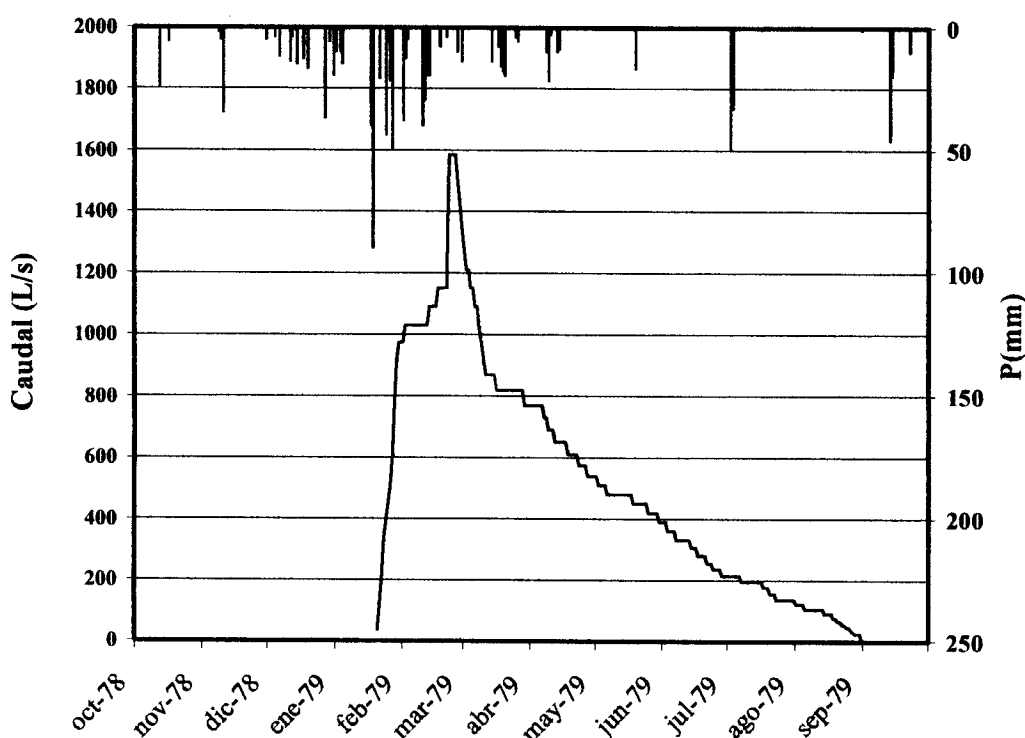


Fig. 18. Hidrograma del manantial de la Villa para para un año tipo (1978-1979)

El análisis de un año “tipo” para el manantial de La Villa (Fig. 18), permite observar que en la mayoría de años hidrológicos se suele registrar una sola crecida con un hidrograma agudo en las proximidades de la punta y más ancho en su base.

	Q_{max}	Q_{min}
1974-75	480	75
1975-76	575	45
1976-77	1500	45
1977-78	975	45
1978-79	1585	45
1979-80	510	35
1980-81	0	0
1981-82	390	35
<i>media</i>	859	46

Q_{max}/Q_{min} 18,5

Tabla 6. Relación de caudales máximos y mínimos para el manantial de la Villa (Datos en L/s)

La relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos es relativamente baja (tabla 6), característica de un sistema de tipo fisurado, no demasiado kárstico, aunque este parámetro debe estar influenciado por los bombeos realizados en su entorno, en época estival. En caso de no producirse bombeos los caudales máximos podrían ser mejores y los mínimos que se ha tomado el caudal del manantial antes del comienzo de los bombeos, serían más bajos, con lo cual el índice sería mayor.

5.2.2. Análisis de la curva de recesión

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial de la Villa se ha llevado a cabo el estudio de dos curvas de recesión. En el anexo 3 se muestran los hidrogramas seleccionados y en la tabla 7 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis. Es preciso indicar que no en todos los casos se ha podido trabajar con hidrogramas unitarios, debido a que en uno de los hidrogramas parciales analizados (1978/79) se produce una pequeña crecida.

MANANTIAL DE LA VILLA	D_a (días)	η (días ⁻¹)	Q_0 (L/s)	q_0 (L/s)	$q_0/2$ (L/s)	$t_{q_0/2}$ (días)	ϵ (días ⁻¹)	i
1978/79	27	0,03704	975,0	281,9	140,9	6,0	0,09259	0,78
1979/80	19	0,05263	1585,0	521,2	260,6	4,0	0,14474	0,69
								0,74

MANANTIAL DE LA VILLA	Q_i (L/s)	Q_f (L/s)	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Q_{R0} (L/s)	V_d (m ³)	V_t (m ³)	k
1978/79	480,0	90,0	123	1,36E-02	693,1	4.400.473	13.402.800	0,33
1979/80	820,0	105,0	150	1,37E-02	1063,8	6.708.172	13.402.800	0,50
				1,37E-02				0,41

Tabla 7. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión (arriba agotamiento y abajo decrecida) correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de La Villa.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media (D_a) de ésta es aproximadamente de 23 días, variando poco de unos ciclos a otros. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre 0'037 días⁻¹ (año 1978/79) y 0'053 días⁻¹ (1979/80), con un valor medio de 0'049 días⁻¹, indicativo de una velocidad de infiltración rápida, probablemente ligada a un alto grado de karstificación funcional.

En el caso del coeficiente de heterogeneidad (ϵ) presenta valores comprendidos entre 0'093 (1978/79) y 0'145 días⁻¹ (1979/80). En cuanto al coeficiente de heterogeneidad, éste produce una escasa concavidad para las dos curvas de la función "y" (Fig. 19).

El valor del parámetro i , calculado a partir de los coeficientes η y ϵ , para cada uno de las curvas analizadas ha dado valores superiores a 0'65. Estos datos reflejan, según Mangin (1975), que se trata de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Al igual que para algunos de los sistemas anteriormente tratados, el sistema del Torcal abarca una extensión aproximada de 35 km² por lo que tampoco puede catalogarse como un sistema de grandes dimensiones.

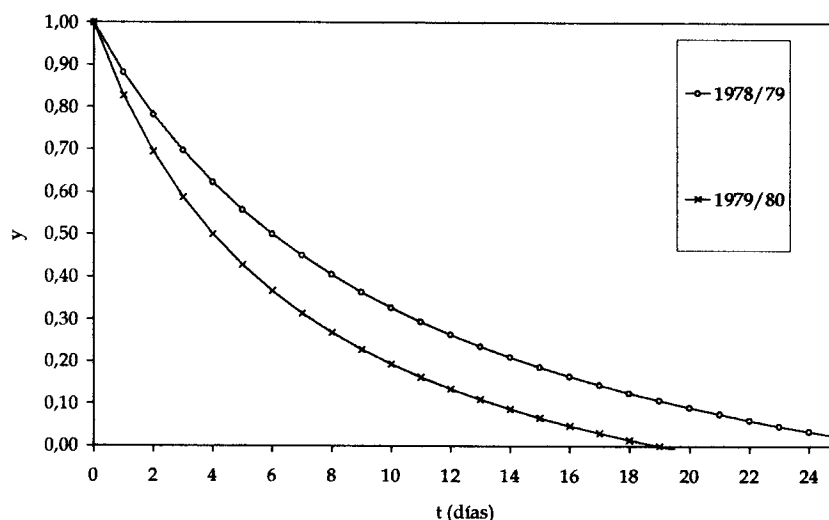


Fig. 19. Representación gráfica de la función "y" correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de la Villa

El análisis del agotamiento permite observar que la duración (D_a) del mismo presenta valores similares para las dos curvas estudiadas, variando entre 123 (1978/79) y 150 días (1979/80). El coeficiente de agotamiento (α) es prácticamente igual para cada hidrograma parcial analizado, puesto que varía entre $1,36 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$ (1978/79) y $1,37 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$ (1979/80), con un valor medio de $1,37 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$, que refleja agotamientos rápidos característicos de sistemas con un flujo de tipo *kárstico*. Hay que destacar que sea tan similar dicho coeficiente, a pesar de la variabilidad de los regímenes de descarga entre los dos hidrogramas parciales analizados.

Los volúmenes dinámicos calculados para los agotamientos estudiados varían entre $4,4 \text{ hm}^3$ (1978/79) y $6,7 \text{ hm}^3$ (1979/80); el valor medio es de $5,6 \text{ hm}^3$. La representación gráfica del porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo para cada uno de los hidrogramas (Fig. 20), refleja que al cabo de cuatro meses sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se drena el 80% de dicho volumen. Esta circunstancia es imputable a una escasa capacidad de filtro del sistema y, por ello, a un reducido poder regulador del mismo. El volumen de tránsito anual, presenta un valor de $13,4 \text{ hm}^3$. Así, el valor del parámetro k , presenta valores extremos para el período estudiado entre 0,33 (1978/79) y 0,50 (1979/80), con un valor medio de $k = 0,41$. Según Mangin (1975), el parámetro k obtenido es característico de un sistema de tipo *kárstico*. Este resultado, relativo al carácter escasamente inercial del sistema del

Torcal, había ya sido puesto de manifiesto por Thauvin (1981). Posteriormente, Pulido y Mangin (1983) aplican el análisis correlatorio y espectral a la precipitación y descarga, mostrando que el sistema posee una gran inercia y un alto grado de memoria, aspectos estos confirmados por Pulido *et al.* (1987) y Pulido Bosch (1993).

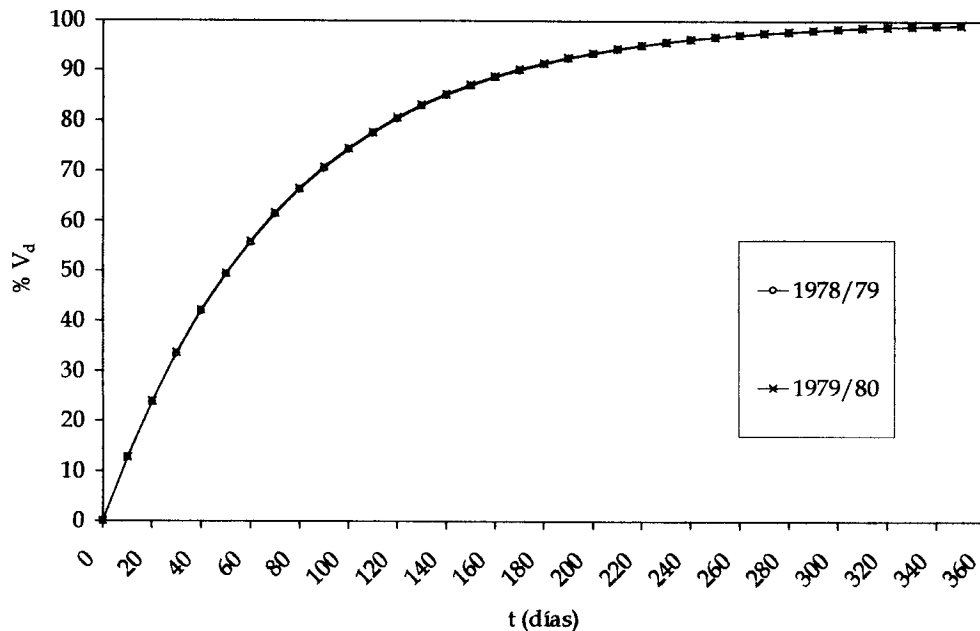


Fig. 20. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de La Villa.

5.2.3. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de la Villa

En el apartado de recopilación de datos de caudal se indica que no ha sido posible realizar el análisis correlatorio y espectral debido a que la serie es discontinua por los bombeos que se realizan para la regulación de la descarga del manantial de la Villa. De todos modos, otros autores (Mangin y Pulido, 1983; Padilla, 1990) si han aplicado esta metodología estimando el caudal que no se mide en la estación de aforos. Los resultados en cuanto a los parámetros más significativos (efecto memoria, tiempo de regulación y frecuencia de corte) han sido tenidos en cuenta en el capítulo sobre discusión de los resultados.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de la Villa, permiten concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se

produce de forma relativamente rápida y que la curva de decrecida presenta una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios en los que la decrecida en el manantial se produce de forma rápida (menos de 25 días), probablemente debido a un alto grado de jeraquización de los conductos presentes en la misma.

El agotamiento del manantial comienza con un caudal aproximado de 650 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden de $1,37 \times 10^{-2}$ días⁻¹, indicativo de que también el agotamiento se realiza de forma rápida. Tal es así que durante los agotamientos normales, aproximadamente de 120 días de duración, se drena el 80% del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial.

**6. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA UNIDAD
HIDROGEOLÓGICA DE LAS
CABRAS – CAMAROS-SAN JORGE**

6.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LAS SIERRAS DE LAS CABRAS-CAMAROLoS-SAN JORGE

Se trata de la segunda unidad en extensión (63 km²), de todas aquellas que constituyen la denominada Cadena de los Torcales (Fig. 15).

En esta Unidad se incluyen la totalidad de los relieves carbonáticos jurásicos que se extienden sin solución de continuidad desde el puerto de la Boca del Asno, en la carretera de Antequera al Torcal, hasta el de Los Alazores, en la antigua carretera de Málaga a Granada (Fig. 21). También se integran en ella otros relieves jurásicos aislados pero cercanos (sierras del Co y Buitreras) y el de Sierra Prieta.

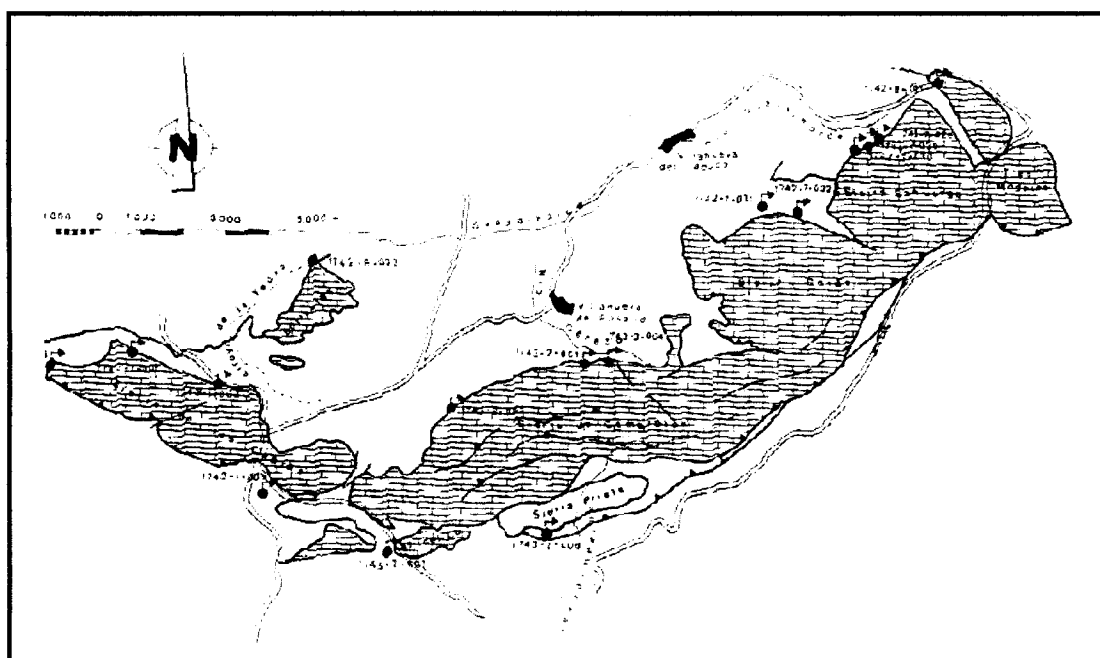


Fig. 21. Mapa hidrogeológico del sistema de Cabras-Camarolos-San Jorge

Las formaciones acuíferas son dolomías y calizas del Jurásico inferior y medio, cuyo espesor total supera los 1.000 metros. Desde el punto de vista estructural el conjunto tiene una disposición arqueada, convexa hacia el sur, y se caracteriza por presentar pliegues más o menos apretados en los extremos y pliegues-fallas o escamas con vergencia hacia el Sur en su sector central. Una serie de fracturas transversales

desplazan lateralmente este conjunto, actuando en ocasiones también como fallas con desplazamiento vertical.

La hidrogeología de esta Unidad está condicionada por la intensa y compleja tectonización interna de los materiales carbonáticos jurásicos que constituyen su acuífero fundamental. Este hecho da lugar a la compartimentación en sistemas hidrogeológicos de morfología complicada, cuyo número, dimensiones e interrelaciones son difíciles de establecer en detalle. Por el contrario, los límites de la Unidad en su conjunto están bien definidos por el contacto de las formaciones carbonáticas acuíferas con materiales de baja permeabilidad, en su mayor parte cretácicos y terciarios. Estos materiales delimitan los bordes de la cadena montañosa y presumiblemente, también la base de la misma.

La zona central (Sierra de Camarolos) es sin duda el área de mayor complejidad estructural de toda la Unidad y se halla mal definida en su extremo oriental, donde se pone en contacto con la Sierra de San Jorge. Su descarga se produce fundamentalmente por los manantiales de Villanueva del Rosario y el Parroso, los más caudalosos de la Unidad. El manantial de Villanueva del Rosario presenta un caudal medio de 330 L/s con mínimos inferiores a los 25 L/s y máximos superiores a los 1900 L/s. El manantial de El Parroso presenta un caudal medio de 56 L/s y un régimen de descarga más homogéneo.

Se trata, por tanto, de una Unidad bien aislada que no recibe más alimentación que la procedente de las precipitaciones y cuya descarga tiene lugar en sus bordes, coincidiendo con los límites impermeables. La mayor parte del drenaje tiene lugar en la vertiente norte de la cadena hacia la cuenca alta del Guadalhorce. mientras que sólo algunos pequeños manantiales drenan en la vertiente meridional.

6.2. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DEL MANANTIAL DE VILLANUEVA DEL ROSARIO

6.2.1. Recopilación de los datos de caudal

La serie de datos relativa a la descarga del manantial de Villanueva del Rosario ha sido proporcionada por el Instituto Geológico y Minero de España, y está constituida por valores diarios de la altura de agua en el vertedero de la estación de aforos, y por tanto de caudal diario mediante la aplicación de la curva de gasto. Esta serie de caudales diarios comprende desde Marzo de 1976 hasta Julio de 1980, mostrando un caudal medio del manantial para este periodo de 330 L/s. En la figura 22 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos recopilada, junto con las precipitaciones en la estación del El Torcal.

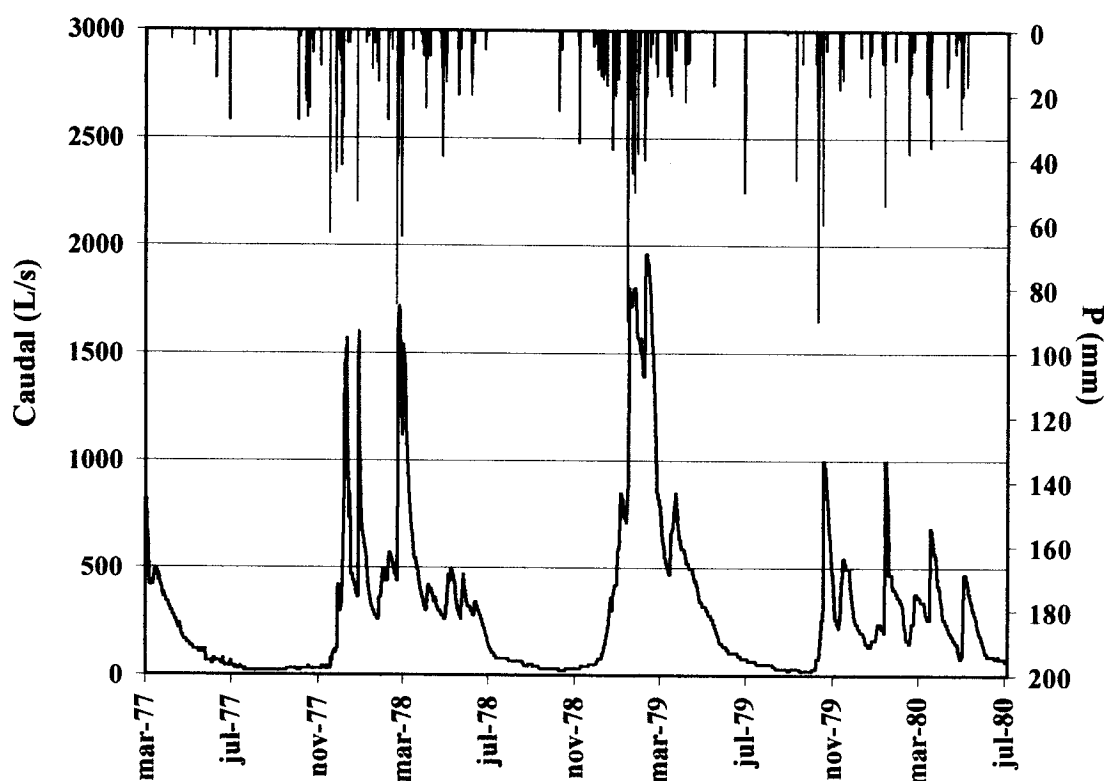


Fig. 22. Hidrograma del manantial de Villanueva del Rosario entre 1977-1980

El hidrograma general del manantial de Villanueva del Rosario permite advertir que episodios lluviosos aislados, superiores a 25 mm/día, producen aumento del caudal en la surgencia (Fig. 22). Sin embargo, en época de aguas altas, precipitaciones inferiores a dicho valor producen una importante respuesta en el manantial. Además, se constata que, generalmente, suele transcurrir de 1 a 2 días, desde el momento que se produce la precipitación hasta que empieza a aumentar el caudal del manantial. De manera preliminar, y tras el análisis de todos estos datos, se evidencia un comportamiento kárstico del sistema.

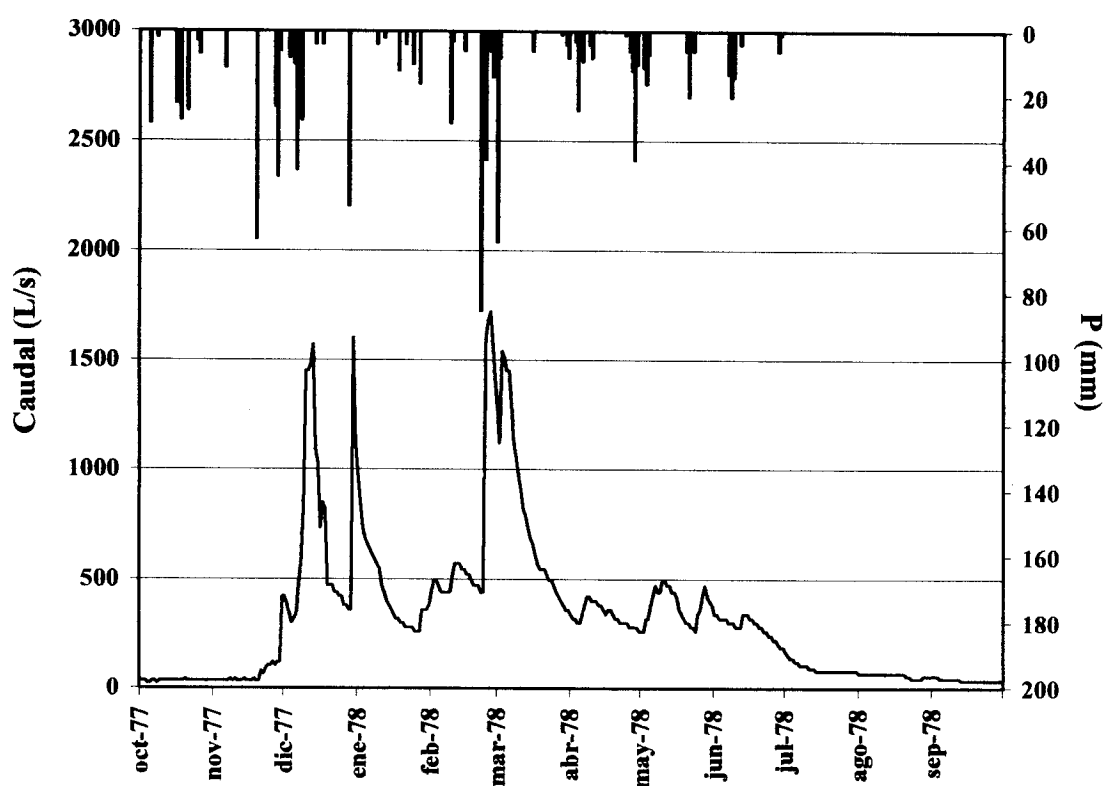


Fig. 23. Hidrograma del manantial de Villanueva del Rosario para un año tipo (1977-1978)

El análisis de la evolución de los caudales para un año “tipo” (Fig. 23) permite constatar que en un mismo año hidrológico se suelen registrar dos o tres crecidas importantes con hidrogramas agudos y estrechos, lo que de manera preliminar evidencia un comportamiento kárstico del sistema, en el que la decrecida se produce de manera rápida.

El alto valor obtenido en el cálculo de la relación $\overline{Q_{max}/Q_{min}}$ para el manantial de Villanueva del Rosario (Tabla 8), refleja el comportamiento característico de un acuífero de tipo kárstico.

	Q_{max}	Q_{min}
1977-78	1720	23
1978-79	1960	23
1979-80	1000	23
<i>media</i>	1560	23

Q_{max}/Q_{min} 67,8

Tabla 8. Relación de caudales máximos y mínimos para el manantial de Villanueva del Rosario (Datos en L/s)

6.2.2. Análisis correlatorio y espectral

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie de caudales medios diarios registrados en la estación de aforos de el manantial de Villanueva del Rosario, para el período comprendido entre las fechas 03/03/1977 y 06/07/1980. Teniendo en cuenta los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser analizados. El tratamiento se realiza a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga duración (ventana de observación de 475 días y paso de 10 días).

Análisis simple

El tratamiento de las series de caudales diarios del manantial de Villanueva del Rosario da lugar a un correlograma que decrece de manera suave (Fig. 24A). Así para el análisis de corta duración, el efecto memoria presenta un valor de 65 días.

El análisis en el dominio frecuencial, muestra una frecuencia de corte de 0'06 (Fig. 24B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de

aproximadamente 17 días, y por tanto, teóricamente, si se analiza el sistema con una periodicidad menor a ésta no se obtendrá información significativa.

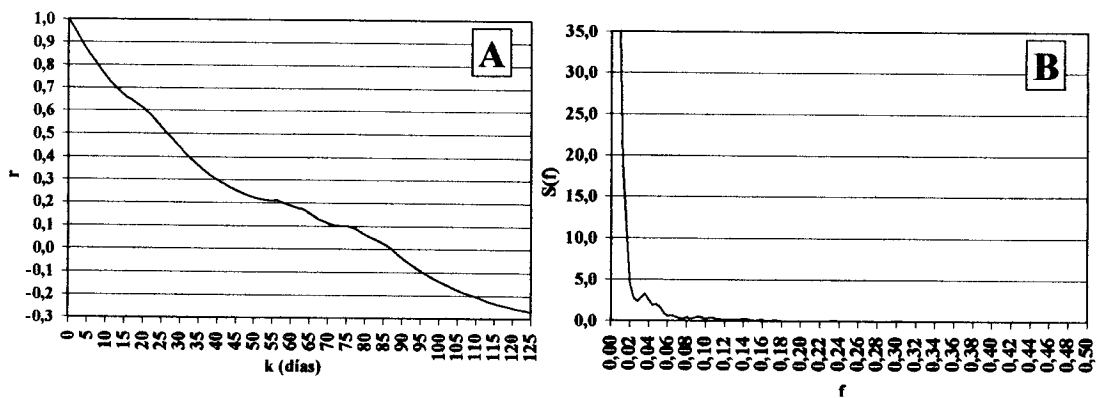


Fig. 24. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de Villanueva del Rosario entre 1977 y 1980, para una ventana de 125 días y paso de 1 día.

Además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema (tiempo de regulación), en el caso del manantial de Villanueva del Rosario es de 54 días. Este dato refleja la importante capacidad de regulación del sistema.

El correlograma de larga duración (Fig. 25A), señala la existencia de ciclos anuales. Las inestabilidades que aparecen para $k = 365$ días deben ser consecuencia de errores de medida en los datos manejados.

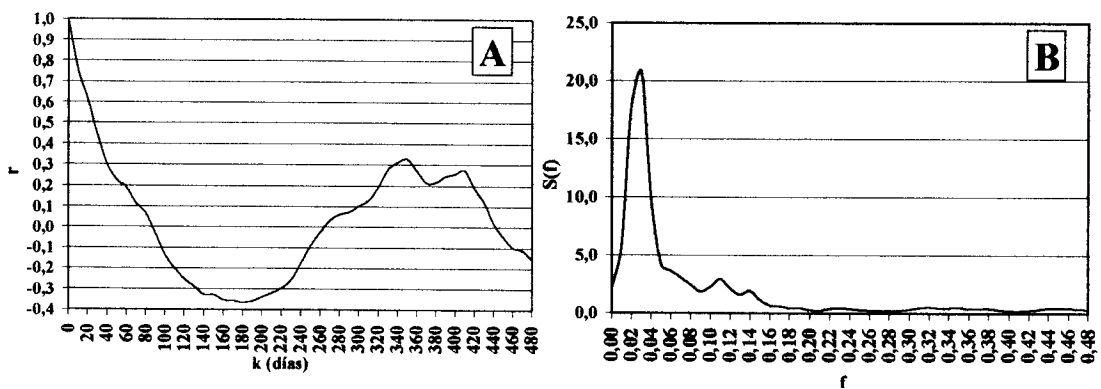


Fig. 25. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por el manantial de Villanueva del Rosario entre 1977 y 1980, para una ventana de 475 días y paso de 10 días.

El espectro de densidad de varianza, para el análisis de larga duración (Fig. 26B), constata la existencia de un marcado ciclo anual, junto con dos picos bastante menos marcados que indican ciclicidades de 89 y 43 días.

6.2.3. Análisis de la curva de recesión

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial de Villanueva del Rosario se ha llevado a cabo el estudio de tres curvas de recesión. En el anexo 4 se muestran los hidrogramas seleccionados y en la tabla 9 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis. También en este caso, todos los hidrogramas analizados son hidrogramas unitarios.

MANANTIAL DE VILLANUEVA DEL ROSARIO	D_d (días)	η (días ⁻¹)	Q_0 (L/s)	q_0 (L/s)	$q_0/2$ (L/s)	$t_{q_0/2}$ (días)	ε (días ⁻¹)	i
1977/78	43	0,02326	495,0	88,6	44,3	6,0	0,12016	0,77
1978/79	29	0,03448	340,0	227,2	113,6	12,0	0,01437	0,91
1979/80	76	0,01316	850,0	570,8	285,4	14,0	0,04511	0,89
								0,86

MANANTIAL DE VILLANUEVA DEL ROSARIO	Q_i (L/s)	Q_f (L/s)	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Q_{R0} (L/s)	V_d (m ³)	V_t (m ³)	k
1977/78	165,0	23,0	94	2,10E-02	406,4	1.675.033	9.460.800	0,18
1978/79	78,0	23,0	96	1,27E-02	112,8	766.136	9.460.800	0,08
1979/80	105,0	23,0	118	1,29E-02	279,2	1.874.640	9.460.800	0,20
				1,55E-02				0,15

Tabla 9. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión (arriba agotamiento y abajo decrecida) correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de Villanueva del Rosario.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media (D_d) de ésta es aproximadamente de 50 días, variando en cierta medida de unos ciclos a otros. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre 0'035 días⁻¹ (año 1978/79) y 0'013 días⁻¹ (1979/80), con un valor medio de 0'023 días⁻¹, indicativo de una velocidad de infiltración relativamente lenta, probablemente ligada a un escaso desarrollo del grado de karstificación funcional.

Del mismo modo, el coeficiente de heterogeneidad (ϵ) varía claramente de unos ciclos a otros, presentando en este caso valores comprendidos entre $0'014$ (1978/79) y $0'120$ días⁻¹ (1977/78). Aunque, esta variabilidad en cuanto al coeficiente de heterogeneidad no se refleja en la concavidad de la curva de la función “y”, estando muy poco marcada para las diferentes curvas (Fig. 26).

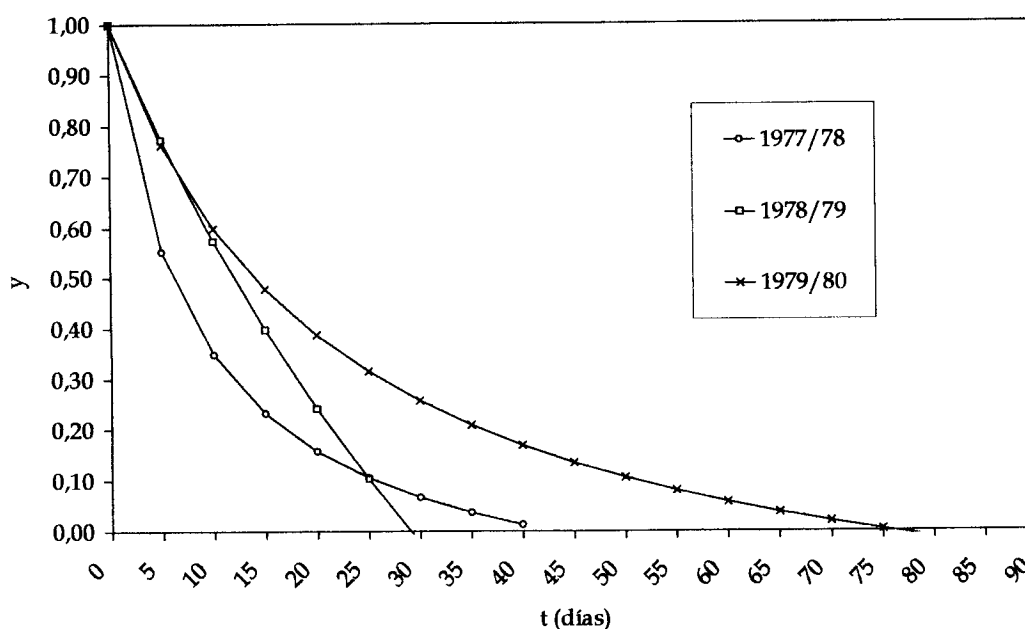


Fig. 26. Representación gráfica de la función “y” correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de Villanueva del Rosario

El valor del parámetro i , calculado a partir de los coeficientes η y ϵ , para cada una de las curvas analizadas ha dado valores superiores a $0'75$. Estos datos reflejan, según Mangin (1975), que se trata de un sistema complejo y de grandes dimensiones.

A diferencia de la decrecida, la duración del agotamiento (D_a) es muy similar para cada una de las curvas estudiadas, variando entre 94 (1977/78) y 118 días (1979/80). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores entre $1,27 \times 10^{-2}$ días⁻¹ (1978/79) y $2,10 \times 10^{-2}$ días⁻¹ (1977/78), con un valor medio de $1,55 \times 10^{-2}$ días⁻¹, que refleja agotamientos rápidos característicos de sistemas con un flujo de tipo kárstico.

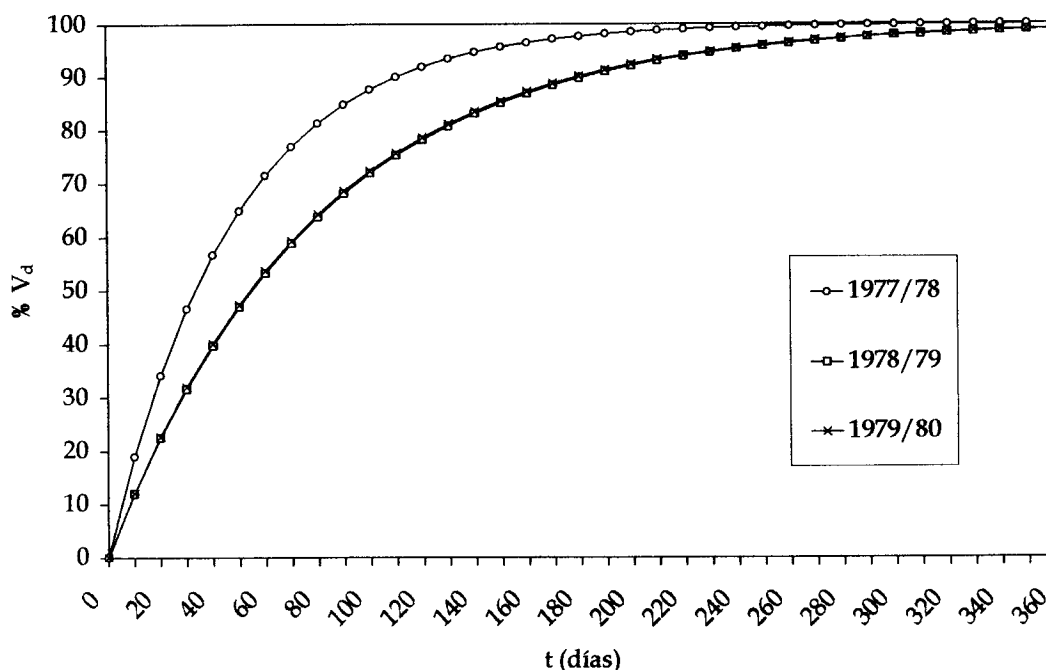


Fig. 27. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie diaria del manantial de Villanueva del Rosario.

Los volúmenes dinámicos calculados para los agotamientos estudiados varían entre $0,8 \text{ hm}^3$ (1984/85) y $1,9 \text{ hm}^3$ (1996/97); el valor medio es de $1,4 \text{ hm}^3$. La representación gráfica del porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo para cada uno de los hidrogramas (Fig. 27), refleja que al cabo de cuatro meses sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se drena más del 70% de dicho volumen. Esta circunstancia es imputable a una escasa capacidad de filtro del sistema y, por ello, a un reducido poder regulador del mismo. El valor del parámetro k , presenta valores extremos para el período estudiado entre 0,08 (1978/79) y 0,20 (1979/80), con un valor medio de $k=0,15$. Estos resultados son característicos de un sistema de tipo kárstico con un escaso poder regulador.

6.2.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de Villanueva del Rosario

El análisis correlatorio y espectral de los caudales diarios del manantial de Villanueva del Rosario permite obtener los siguientes parámetros característicos:

- Correlograma poco tendido, con un efecto memoria del orden de los 65 días.
- Espectro de frecuencia, en él se refleja que la frecuencia de corte es de 0'06, por lo que sería suficiente estudiar el manantial con una periodicidad inferior a 17 días; el tiempo de regulación es de 54 días, lo que pone de manifiesto cierta capacidad de filtro del sistema ante la entrada de las precipitaciones.

Estos parámetros anteriores ponen de manifiesto que el sistema de Villanueva del Rosario presenta un cierto comportamiento inercial y poder regulador, característico de un sistema kárstico poco jerarquizado.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de Villanueva del Rosario, permite concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se produce de forma relativamente rápida y que la curva de decrecida presenta una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios en los que la decrecida en el manantial se produce de forma relativamente rápida (más de 40 días), probablemente debido al bajo grado de jeraquización de los conductos presentes en la misma.

El agotamiento del manantial comienza con un caudal aproximado de 110 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden de $1,55 \times 10^{-2}$ días⁻¹, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma rápida. Tal es así que durante los agotamientos normales, de menos de 160 días de duración, se drenan casi el 75% del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial.

**7. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE LA
UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS:
EL SISTEMA DE OJÉN Y EL SISTEMA DE TORREMOLINOS**

7.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS: EL SISTEMA DE OJÉN Y EL SISTEMA DE TORREMOLINOS

Las principales características geológicas e hidrogeológicas de la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas, aparecen ya descritas en el apartado 2.6. del Volumen I de este estudio.

7.2. EL SISTEMA DE OJÉN

El sistema de Ojén ocupa una superficie de 13,1 km² (Fig. 28). Queda limitado, al Norte, por un anticlinal de dirección E-W, cuyo núcleo está constituido por materiales metapelíticos en el área de Juanar. El límite Sur, se interpreta que puede coincidir, en la parte más occidental, con el anticlinal de dirección de E-W existente al Sur de los llanos de Juanar. Al Este queda limitado por el contacto estratigráfico existente entre los mármoles acuíferos y las metapelitas de la base. El límite Oeste se define por la alineación anticlinal de Sierra Canucha, que lo separa de otro de los sistemas de Sierra Blanca, el sistema de Istán (Andreo, 1997).

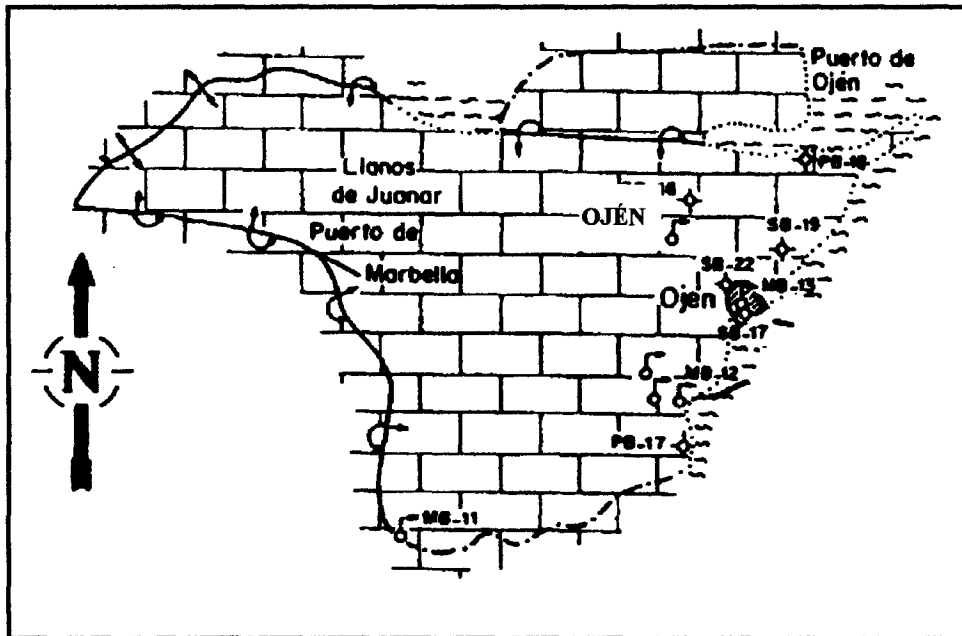


Fig. 28. El sistema de Ojén (tomado de Andreo, 1997)

(desde el comienzo del agotamiento), normalmente, se drena más del 75% de dicho volumen. El volumen de tránsito anual, calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de $1,6 \text{ hm}^3$. Así, estos dos volúmenes permiten calcular el valor del parámetro k , cuyos valores extremos para el período estudiado son 0,16 (1993/94) y 0,47 (1996/97), con un valor medio de $k=0,30$. Estos resultados muestran un comportamiento característico de un sistema kárstico, según Mangin (1975).

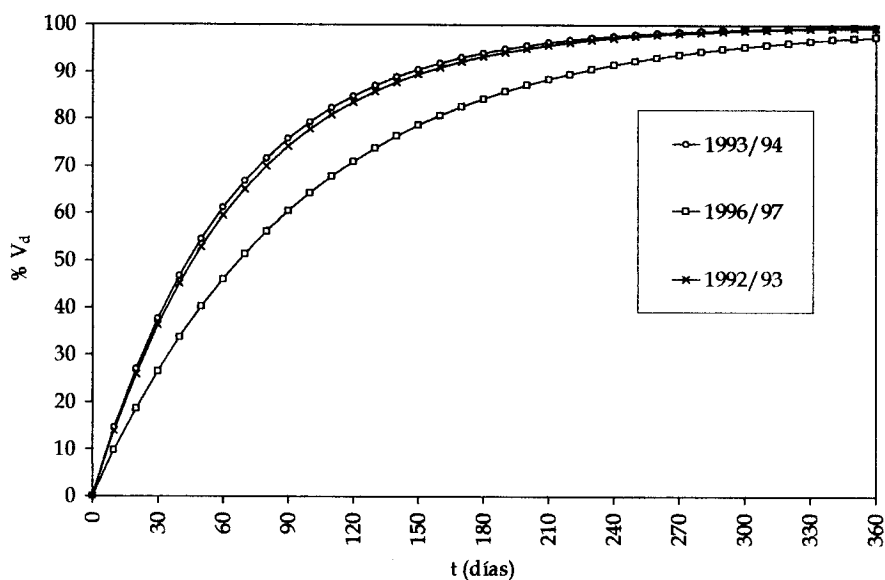


Fig 34. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente a los hidrogramas de la serie de caudales diarios en el manantial de Ojén.

7.3.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal del manantial de Ojén

Los parámetros característicos del manantial de Ojén obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral son los siguientes:

- Correlograma tendido, con un efecto memoria muy considerable del orden de 94 días. Esto significa que el sistema presenta un comportamiento bastante inercial.
- En el espectro de frecuencia, el valor de la frecuencia de corte muestra un valor de 0,09 por lo que, teóricamente, sería suficiente con estudiar el

manantial con una periodicidad de 11 días; el tiempo de regulación (duración media de la influencia de la señal de entrada en el sistema) es de 68 días. Estos datos reflejan cierta capacidad de filtro del sistema ante la entrada de las precipitaciones.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de Ojén, permite concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se produce de forma rápida y que la curva de decrecida presenta una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios con escasa capacidad de filtro de las precipitaciones, en los que la decrecida en el manantial se produce de forma muy rápida (menos de 25 días), debido al alto grado de conexión y jeraquización de los conductos presentes en la misma.

El agotamiento del manantial comienza con un caudal aproximado de 60 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden de $1,4 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma rápida. Tal es así que durante los agotamientos normales, de menos de 180 días de duración, se drena más del 75% del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial.

Todos estos parámetros anteriores, correspondientes tanto al análisis de hidrogramas como al análisis correlatorio y espectral, ponen de manifiesto que el sistema de Ojén tiene una escasa inercia y un poder regulador igualmente bajo, mostrando así, un comportamiento global muy próximo al de un sistema kárstico bien desarrollado. No obstante, los parámetros característicos deducibles del correlograma simple de caudales, muestran un comportamiento más próximo al de un acuífero de tipo fisurado, aunque la relación $\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$ es característica de un sistema de tipo kárstico.

7.4. EL SISTEMA DE TORREMOLINOS

El sistema de Torremolinos ocupa una superficie de 45 km² (Fig. 35), donde afloran principalmente mármoles blancos dolomíticos, aunque también hay mármoles azules calizos en extremo Noreste. En cualquier caso, ambos tipos de mármoles presentan un aspecto sacaroideo. Las cavidades kársticas son escasas y muestran un claro condicionante tectónico.

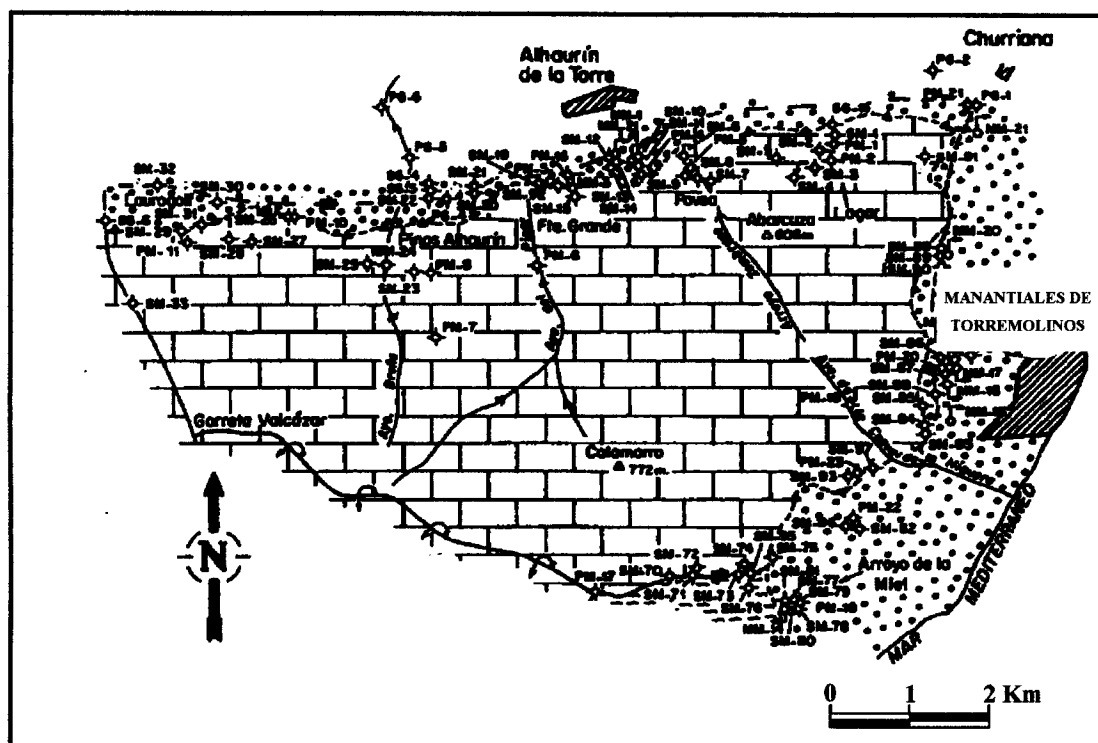


Fig. 35. El sistema de Torremolinos (tomado de Andreo, 1997)

La geometría del sistema hidrogeológico de Torremolinos está determinada por pliegues isoclinales de dirección ESE-WNW. Está limitado, al Norte, Este y Oeste por fallas que ponen en contacto los mármoles acuíferos con los sedimentos pliocenos y cuaternarios de la cuenca del Bajo Guadalhorce y, al Sur, por las metapelitas que ocupan el núcleo anticlinal que pasa por Gorreta de Válcazar (Fig. 35).

Los manantiales más importantes de Torremolinos son los siguientes: San José, Pellejera, Albarcón del Rey, Inca y Rojas. Presentaban un caudal medio conjunto de 462 L/s en régimen de descarga natural. A partir de 1973 los manantiales muestran

afecciones de los bombeos, de tal manera que a partir de Agosto de 1986 (Andreo, 1997) los manantiales quedaron agotados, “saliendo” agua de manera esporádica en periodos posteriores a fuertes lluvias.

7.5. ANÁLISIS DE SERIES DE DATOS DE CAUDAL DE LOS MANANTIALES DE TORREMOLINOS

7.5.1. Recopilación de los datos de caudal

La serie de datos relativa a la descarga de los manantiales de Torremolinos ha sido proporcionada por la Empresa Municipal de Aguas de Málaga (EMASA), y se corresponde con la suma de los caudales de los cinco manantiales, tomados cada siete días. Posteriormente esta serie de valores semanales de caudal se ha convertido en una serie de valores diarios suponiendo que la medida de cada semana se repite durante los seis días restantes de cada semana. Esta serie de caudales “diarios” comprende desde Octubre de 1962 hasta Septiembre de 1972. El caudal medio de los manantiales durante este periodo es de 462 L/s. En la figura 36 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos recopilada, junto con las precipitaciones en la estación de Torremolinos.

El hidrograma general de los manantiales de Torremolinos para toda la serie analizada (Fig. 36) permite constatar que los manantiales aumentan de caudal sólo en respuesta a lluvias continuadas y de cierta inportancia (superiores a 200 mm/mes). Generalmente, la punta de caudal se produce un mes después del máximo de precipitación.

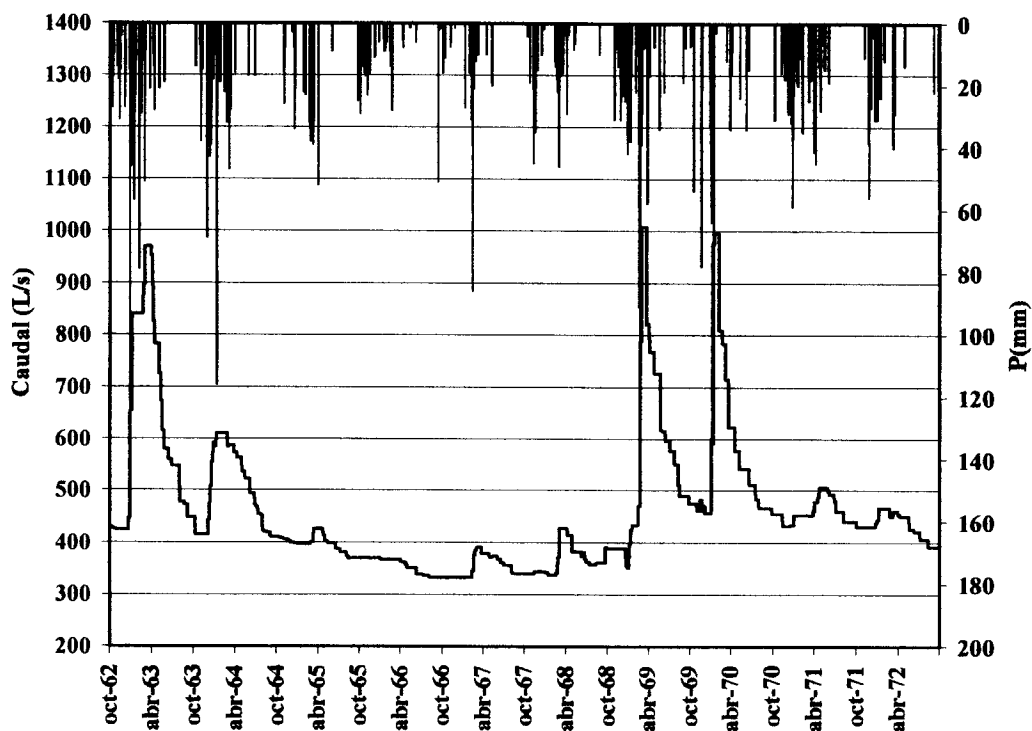


Fig. 36. Hidrograma de los manantiales de Torremolinos entre 1962-1972

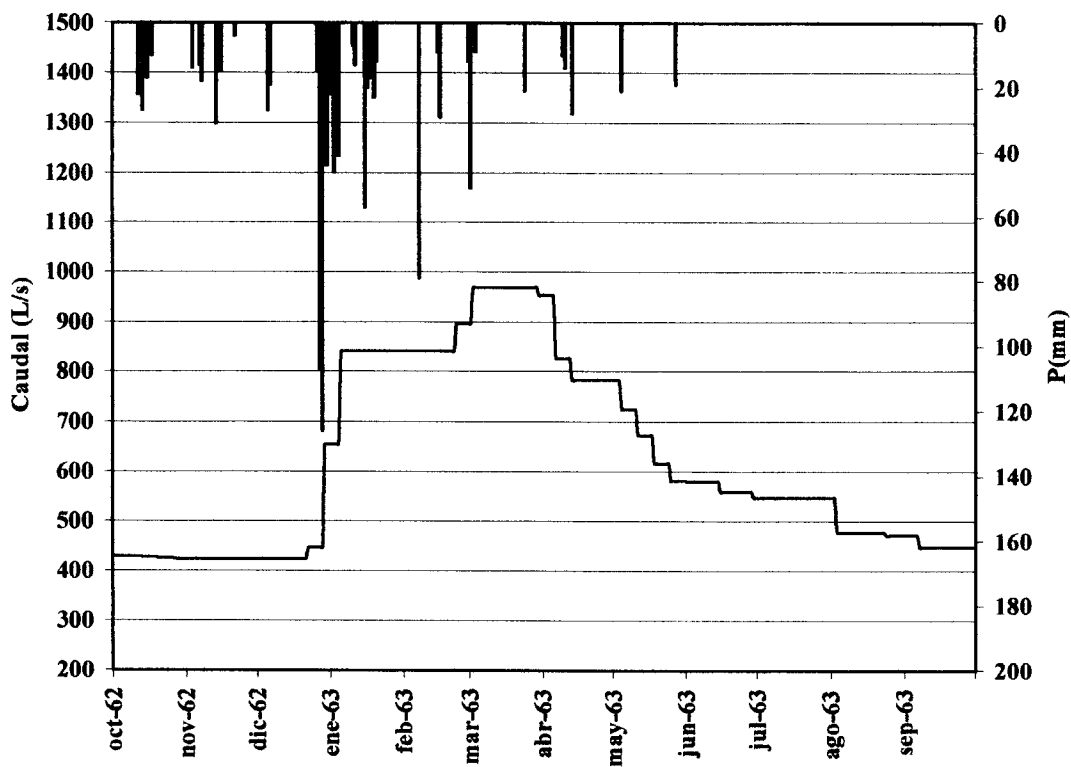


Fig. 37. Hidrograma de los manantiales de Torremolinos para un año tipo (1962-1963)

El análisis de la evolución de los caudales en los manantiales de Torremolinos para un año “tipo” (Fig. 37) muestra un sola crecida al año con una punta muy “amesetada” y una gran anchura característica de un sistema fisurado, puesto también de manifiesto por la relación entre $\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$ (Tabla 12).

	Q_{max}	Q_{min}
1962-63	969	425
1963-64	969	448
1964-65	610	407
1965-66	426	368
1966-67	369	332
1967-68	427	337
1968-69	1008	351
1969-70	996	457
1970-71	506	433
1971-72	466	391
<i>media</i>	675	395

Q_{max}/Q_{min} 1,7

Tabla 12. Relación de caudales máximos y mínimos para los manantiales de Torremolinos (Datos en L/s)

7.5.2. Análisis correlatorio y espectral

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie cronológica comprendida entre las fechas 01/10/1962 y 30/09/1972. Teniendo en cuenta los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser analizados. El tratamiento se realiza a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga duración (ventana de observación de 500 días y paso de 10 días).

Análisis simple

El análisis de corta duración de la serie de caudales diarios correspondientes a los manantiales de Torremolinos da lugar a un correlograma muy tendido (Fig. 38A). Así para el análisis de corta duración, el efecto memoria, que según Mangin (1981 a y b) se define como el valor de k (días) para $r = 0'1-0'2$ no se puede determinar ya que el correlograma de corta duración no decrece hasta valores de r cercanos, aunque son superiores a 125 días. Por ello, el correlograma obtenido para análisis de larga duración, muestra un efecto memoria de aproximadamente 160 días (Fig. 39A), valor ciertamente muy elevado que sugiere la existencia de importantes reservas reguladoras.

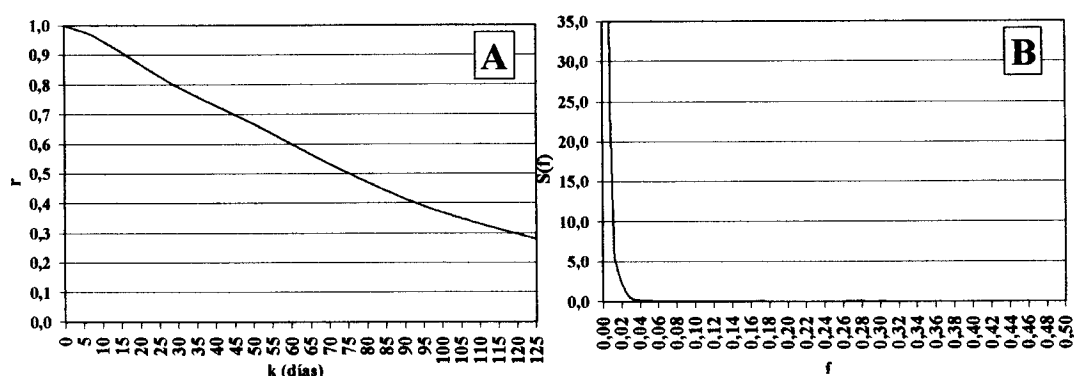


Fig 38. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por los manantiales de Torremolinos entre 1962 y 1972, para una ventana de 125 días y paso de 1 día

El análisis espectral de corta duración muestra una banda espectral muy estrecha (Fig. 38B), con un valor de $0'03$, lo cual pone de manifiesto que la información proporcionada por un evento pluviométrico es totalmente filtrada al cabo de aproximadamente 33 días. Además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre el sistema (tiempo de regulación) en el caso de los manantiales de Torremolinos es de 94 días. Este dato corrobora la interpretación efectuada anteriormente y refleja la elevada capacidad de regulación del sistema.

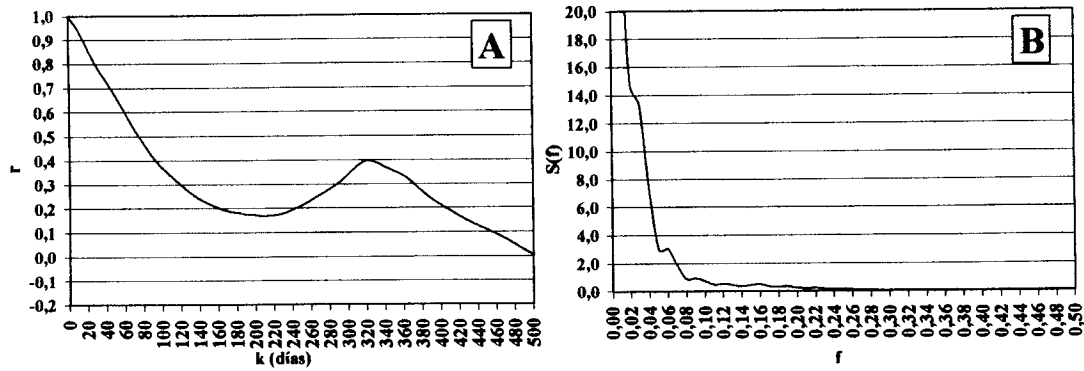


Fig 39. Resultados del análisis correlatorio y espectral de la serie de caudales drenados por los manantiales de Torremolinos entre 1962 y 1972, para una ventana de 500 días y paso de 10 días

El espectro, para el análisis de larga duración (Fig. 39B), muestra una importante tendencia que enmascara el pico anual, además se observa al menos otro pico que indica una ciclicidad semestral.

7.5.3. Análisis de la curva de recesión

El análisis de la curva de recesión se ha efectuado para el total de los manantiales (San José, Pellejera, Albercón del Rey, Inca y Rojas), como si se tratara de una única de surgencia, ya que todos ellos constituyen el principal punto de descarga del sistema de Torremolinos. De toda la serie de datos, se ha llevado a cabo el estudio de una única curva de recesión que engloba el período comprendido entre Marzo de 1963 y Febrero de 1967. En el anexo 6 se muestran el hidrograma seleccionado y en la tabla 13 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis.

El análisis de la decrecida permite observar que la duración de ésta es de 170 días, por lo que η presenta un valor de $0'006 \text{ días}^{-1}$. Estos dos valores son claramente indicativos de que la velocidad de infiltración es muy lenta, mostrando una decrecida muy prolongada en el tiempo.

MANANTIALES DE TORREMOLINOS	Qi (L/s)	Qf (L/s)	D _a (días)	α (días ⁻¹)	Q _{RO} (L/s)	Vd (m ³)	Vt (m ³)	k
Marzo 1963-Febrero 1967	447,9	332,2	1236	2,42E-04	466,7	167.778.669	14.386.723	11,59

MANANTIALES DE TORREMOLINOS	D _d (días)	η (días ⁻¹)	Q ₀ (l/s)	q ₀ (l/s)	q ₀ /2 (l/s)	t _{q0/2} (días)	ε (días ⁻¹)	i
Marzo 1963-Febrero 1967	170	0,00588	968,8	502,1	251,1	28,0	0,02395	0,94

Tabla 13. Resultados obtenidos a partir del análisis de la curva de recesión (arriba agotamiento y abajo decrecida) correspondiente a la serie de caudales diarios en los manantiales de Torremolinos.

Del mismo modo, el coeficiente de heterogeneidad (ε) presenta un valor de 0'024 días⁻¹, valor este que da lugar a la escasa concavidad de la curva de la función “y” (Fig. 40), por lo que la disminución de caudal en los manantiales se produce de manera lenta y gradual durante la decrecida.

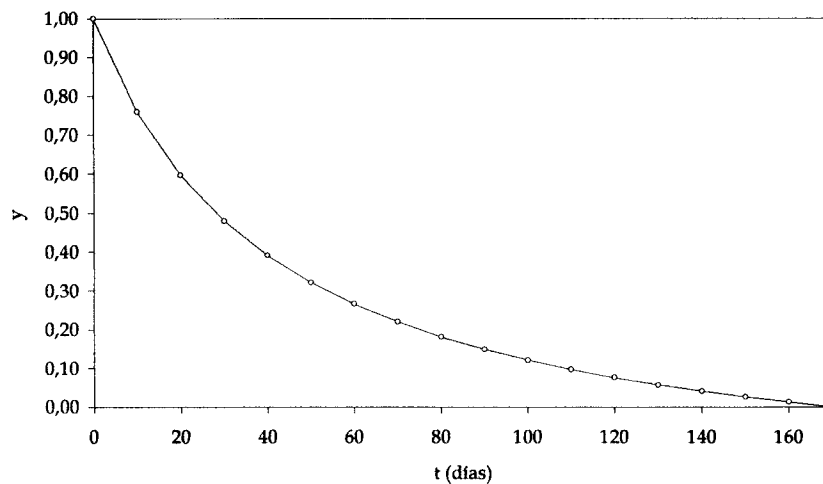


Fig. 40. Representación gráfica de la función “y” correspondiente al hidrograma de la serie de caudales diarios en los manantiales de Torremolinos.

El valor del parámetro i para el caso analizado muestra un valor de 0'94, que según Mangin (1975) es propio de sistemas complejos y de grandes dimensiones.

El análisis del agotamiento permite contemplar que la duración de éste es extremadamente prolongada en el tiempo (1236 días), además este agotamiento está caracterizado por un coeficiente de agotamiento = $2,42 \times 10^{-4}$ días⁻¹. Todos estos valores indican que el agotamiento se produce de manera muy lenta, y pone de manifiesto que

el sistema de Torremolinos es el más inercial de todos los sistemas incluidos en este estudio.

El volumen dinámico calculado, para el conjunto de los manantiales de Torremolinos, presenta un valor de $166,8 \text{ hm}^3$. Así, al representar el porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo (Fig. 41), se observa que al cabo de un año se drena menos del 25% de dicho volumen. El volumen de tránsito anual, calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de $14,4 \text{ hm}^3$, así para los manantiales de Torremolinos $k = 11,6$. Este último resultado traduce el enorme poder regulador del sistema de Torremolinos, aunque hay que tener en cuenta que el valor de k obtenido es totalmente inusual, ya que incluso este valor no tiene cabida en la clasificación de Mangin (1975), para quien dicho parámetro no puede ser superior a 1.

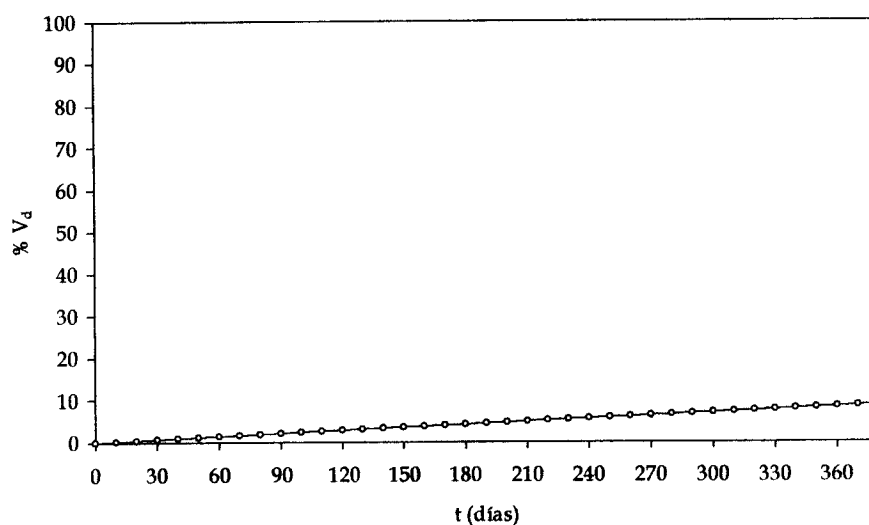


Fig. 41. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo correspondiente al hidrograma de la serie de caudales diarios en los manantiales de Torremolinos.

7.5.4. Síntesis de los resultados obtenidos a partir del análisis de series de datos de caudal de los manantiales de Torremolinos

Los parámetros característicos de los manantiales de Torremolinos obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral son los siguientes:

- Correlograma muy tendido, con un efecto memoria del orden de 160 días. Esto significa que el sistema presenta un comportamiento muy inercial.
- En el espectro de frecuencia, el valor de la frecuencia de corte muestra un valor de 0,03 por lo que, teóricamente, sería suficiente con estudiar el manantial con una periodicidad de 33 días; el tiempo de regulación (duración media de la influencia de la señal de entrada en el sistema) es de 94 días. Estos datos reflejan una elevada capacidad de filtro del sistema ante la entrada de las precipitaciones.

Los resultados del análisis del hidrograma de los manantiales de Torremolinos, permite concluir que la infiltración a través de la zona no saturada del acuífero se realiza de manera muy lenta, además, la curva de decrecida muestra una concavidad poco marcada. Estas características son propias de medios con una elevada capacidad de filtro de las precipitaciones, en los que la decrecida en el manantial se produce de forma muy lenta (170 días).

El agotamiento del manantial comienza con un caudal aproximado de 450 L/s. El coeficiente que caracteriza este tramo del hidrograma es del orden 10^{-4} días⁻¹, indicativo de que el agotamiento se realiza de manera muy lenta. Tal es así, que al cabo de un año, apenas se drena el 25% del volumen dinámico susceptible de ser drenado por el manantial.

Todos estos parámetros anteriores, correspondientes tanto al análisis de hidrogramas como al análisis correlatorio y espectral, ponen de manifiesto que el sistema de Torremolinos tiene una elevada inercia y un poder regulador igualmente alto. Por ello, todas estas características reflejan un comportamiento global propio de un acuífero de flujo difuso, más próximo al de un acuífero carbonático fisurado que al de un acuífero kárstico bien jerarquizado.

**8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CRITERIOS
BÁSICOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE
ACUÍFEROS CARBONÁTICOS**

8.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los trabajos realizados para cada uno de los acuíferos analizados se han obtenido una serie resultados, que en gran parte se encuentran resumidos en la tabla 14:

	Q_{max}/Q_{min}	Efecto Memoria (días)	Poder Regulador k	Capacidad de Filtro ($S_0/2$)	Grado de jerarquización de los conductos	Karstificación Funcional
Sierra de Libar (Cueva del Gato)	231,5	BAJO 45	BAJO 0,11	BAJA 37	ALTO	ALTA
Sierra de las Cabras (El Tempul)	14,9	ALTO 95	ALTO 0,60	ALTA 85	BAJO	BAJA
El Torcal (La Villa)	18,5	MEDIO 74	BAJO 0,41	BAJA 73	ALTO	ALTA
Cabras-Camarolos-San Jorge (Villanueva del Rosario)	67,8	MEDIO 65	BAJO 0,15	BAJA 54	BAJO	BAJA
Sierra Blanca (Ojén)	89,5	ALTO 94	BAJO 0,29	MEDIA 68	ALTO	MEDIA-ALTA
Sierra de Mijas (Torremolinos)	1,7	MUY ALTO 160	MUY ALTO 11,59	ALTA 94	BAJO	BAJA

	Velocidad Infiltración (Decreída) η (días ⁻¹)	Duración de la decreída (días)	Agotamiento α	% V_D 100 días	Tipo de Flujo
Sierra de Libar (Cueva del Gato)	RÁPIDA 0,0525	BAJA 21	RÁPIDO 1,30E-02	70%	Kárstico
Sierra de las Cabras (El Tempul)	MUY LENTA 0,0060	ALTA 169	LENTO 1,58E-03		
El Torcal (La Villa)	RÁPIDA 0,0448	BAJA 23	RÁPIDO 1,37E-02	70%	Kárstico
Cabras-Camarolos-San Jorge (Villanueva del Rosario)	MEDIA 0,0236	MEDIA 49	RÁPIDO 1,55E-02	70%	Kárstico poco jerarquizado
Sierra Blanca (Ojén)	RÁPIDA 0,1202	BAJA 23	RÁPIDO 1,37E-02	80%	Kárstico
Sierra de Mijas (Torremolinos)	MUY LENTA 0,0058	ALTA 170	LENTO 2,42E-04	2%	Difuso

Tabla 14. Resumen de las principales características y parámetros analizados para cada uno de los acuíferos estudiados

El acuífero de la Sierra de Libar presenta un efecto memoria, poder regulador y capacidad de filtro bajos. Además, la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ y la velocidad de infiltración en el sistema son altas, al igual que el grado de karstificación funcional y de jerarquización de los conductos. El agotamiento se produce de manera rápida, por lo que el tanto por ciento de volumen dinámico drenado a los 100 días (valor comparativo tomado para este estudio) se encuentra en torno al 70%. Todos estos parámetros ponen de manifiesto un funcionamiento caracterizado por una elevada karstificación funcional.

El acuífero de Ojén presenta prácticamente las mismas características que el acuífero de Líbar. No obstante, tanto el efecto memoria como el tiempo de regulación presentan valores más próximos al de un acuífero carbonático de tipo fisurado, aunque el resto de parámetros ($\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, y los correspondientes al análisis de la curva de recesión) muestran que el comportamiento de éste es muy próximo al de un sistema kárstico bien desarrollado.

También el acuífero del Torcal presenta prácticamente las mismas características que los dos acuíferos anteriores, tan sólo se diferencian en que la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es relativamente baja, debida probablemente a los bombeos realizados en el entorno del manantial en época estival.

En resumen, la mayor parte de las características que muestran estos tres primeros acuíferos son indicativas de un comportamiento global muy próximo al de un acuífero kárstico bien jerarquizado, aunque con ciertas diferencias en la capacidad de regulación, superior en los dos últimos sistemas.

En cambio, el acuífero de las Cabras y el acuífero de Torremolinos se definen por un efecto memoria, poder regulador y capacidad de filtro altos. También, a diferencia de los tres acuíferos anteriores, la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, así como la velocidad de infiltración es baja, con un grado de karstificación funcional y de jerarquización de los conductos igualmente bajo. En cuanto al agotamiento, éste se produce de manera lenta lo que conduce a que el tanto por ciento de volumen dinámico drenado a los 100 días está situado por debajo del 20%. Todas estas características antes comentadas son propias de un acuífero de flujo difuso, con un comportamiento global próximo al de un acuífero carbonático fisurado con escasa karstificación funcional.

Por último, el acuífero de las Cabras-Camarolos-San Jorge presenta prácticamente las mismas características que los sistemas de Líbar, Ojén y el Torcal. En cambio, el valor obtenido para los parámetros que caracterizan la decrecida difieren en cierta medida de los tres sistemas anteriores (velocidad de infiltración y duración de la decrecida). Todas estas características conducen a pensar que el comportamiento global

de éste es muy próximo al de un acuífero carbonático con moderada karstificación funcional.

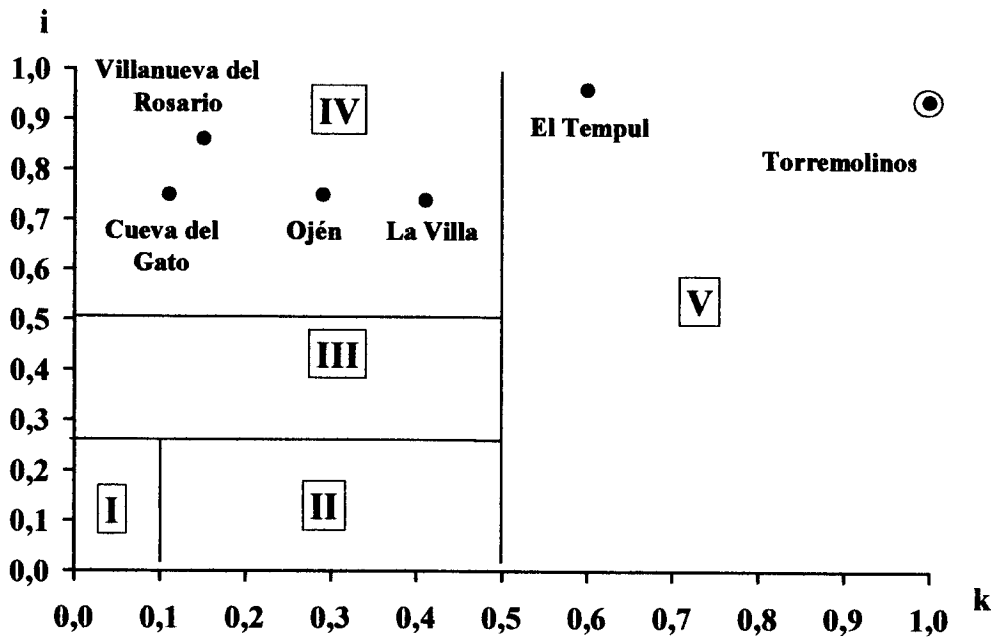


Fig. 42. Clasificación de los manantiales estudiados a partir del análisis de la curva de recesión, siguiendo los criterios de Mangin (1975)

Se han representado en la clasificación de Mangin (1975) los valores de los parámetros k e i obtenidos para cada uno de los diferentes acuíferos estudiados (Fig. 42). La mayoría de las surgencias estudiadas se encuentran dentro del dominio IV, característico de los sistemas kársticos con una compleja organización de drenaje. Hay que destacar que aunque el manantial de La Villa se sitúe dentro del dominio IV, parece estar próximo al dominio V. En cambio, los que se sitúan claramente en los dominios de los sistemas poco karstificados (dominio V) son las surgencias de El Tempul y los manantiales de Torremolinos, aunque estos últimos presentan un valor de k inusual para acuíferos carbonáticos ($K = 11,59$) y que no se contempla en esta clasificación que como máximo alcanza el valor 1.

El hecho de que el valor del parámetro k sea mayor que la unidad se debe a que el volumen almacenado en la zona saturada o volumen dinámico (cuya variación determina los caudales de la surgencia durante el agotamiento) es superior al volumen emitido por los manantiales durante un ciclo medio (volumen de tránsito), aspecto que

ya ha sido puesto de manifiesto por diferentes autores (Cruz-Sanjulián et al., 1990; Moral, 1992 y Andreo, 1997)

8.2. CRITERIOS BÁSICOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS

Es algo laborioso la obtención de los parámetros k e i (en especial este último) para clasificar los diferentes manantiales mediante el criterio de Mangin (1975) y además a veces no se obtienen buenos resultados, principalmente en el Sur de España donde existen importantes diferencias climáticas con la región donde fue puesta a punto esta metodología. Por ello, una de las finalidades de este estudio es la de sugerir unos parámetros fáciles de determinar que permitan hacer una clasificación de los acuíferos carbonáticos.

En primer lugar se considera que una herramienta para diferenciar los distintos sistemas es el correlograma simple del caudal de las surgencias (Fig. 43). Así, los manantiales estudiados presentan un correlograma más o menos tendido, del que se obtiene el efecto memoria, siendo el manantial de la Cueva del Gato el que tienen un menor efecto memoria y los manantiales de Torremolinos los que lo tienen más alto.

Otro criterio diferenciador de los manantiales es el porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo (Fig. 44). En base a este criterio existen cuatro manantiales de igual comportamiento (Cueva del Gato, Ojén, Villanueva del Rosario y la Villa) con un vaciado relativamente rápido mientras que en los otros dos (Tempul y Torremolinos) el vaciado es mucho más lento. De este gráfico se obtiene un parámetro que se va a utilizar para hacer una primera clasificación, el porcentaje de volumen dinámico drenado a los cien días del comienzo del agotamiento.

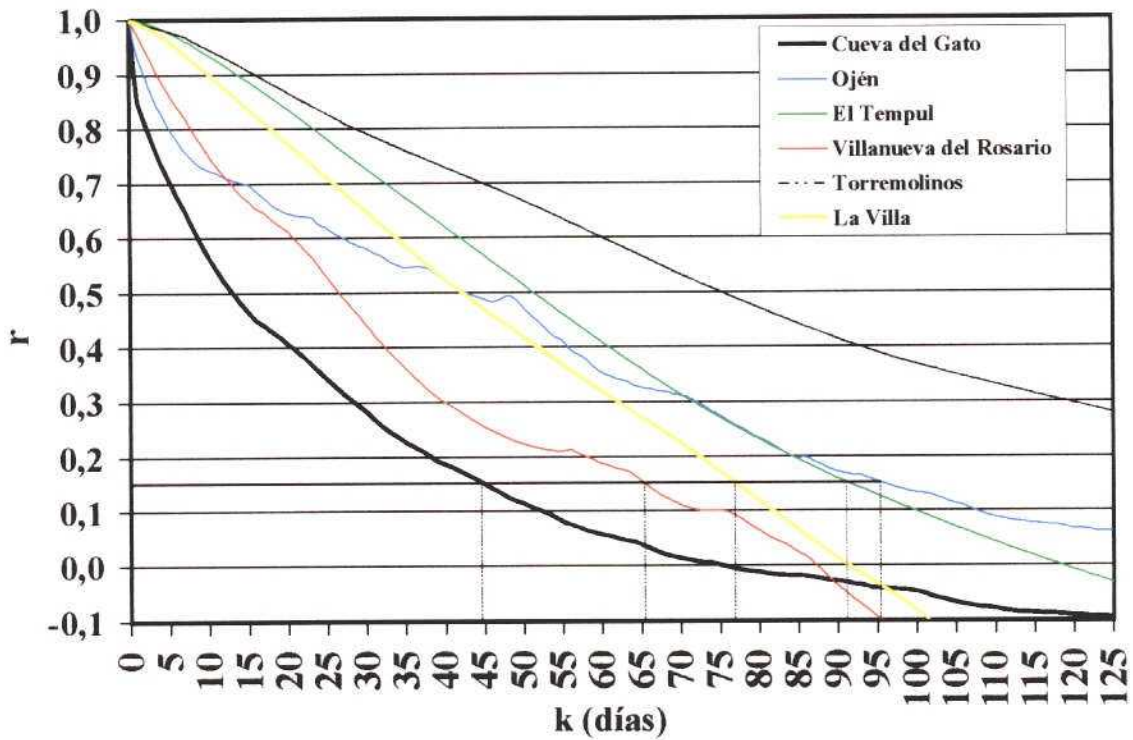


Fig. 43. Correlograma de la serie de caudales para todos los manantiales estudiados.

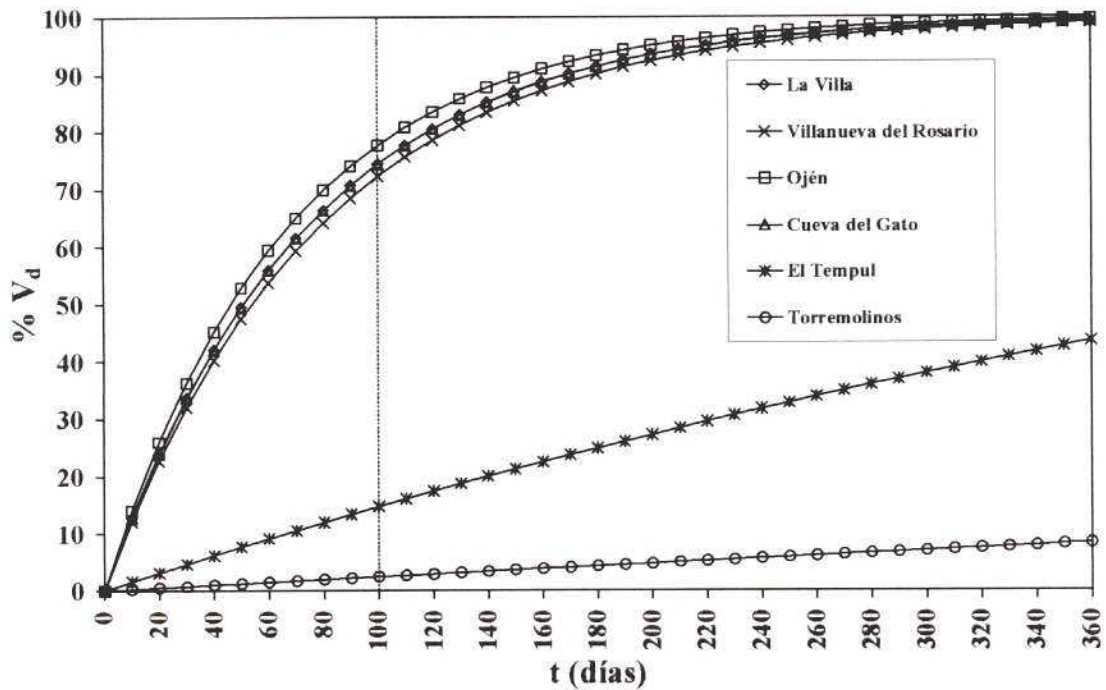


Fig 44. Porcentaje de volumen dinámico drenado en función del tiempo para todos los manantiales estudiados.

De este modo, se han representado los diferentes manantiales en unos ejes de coordenadas tomando como referencias los dos parámetros indicados, el efecto memoria y el volumen dinámico drenado a los 100 días (Fig. 45). Este gráfico, al igual que el gráfico de Mangin, permite diferenciar claramente los sistemas con un comportamiento marcadamente inercial (sistema de las Cabras y de Torremolinos) de aquellos que muestran una marcada karstificación funcional. A su vez, dentro de estos últimos, el sistema de Líbar (manantial de la Cueva del Gato) se muestra como el más claro exponente de un sistema acuífero con elevada karstificación funcional.

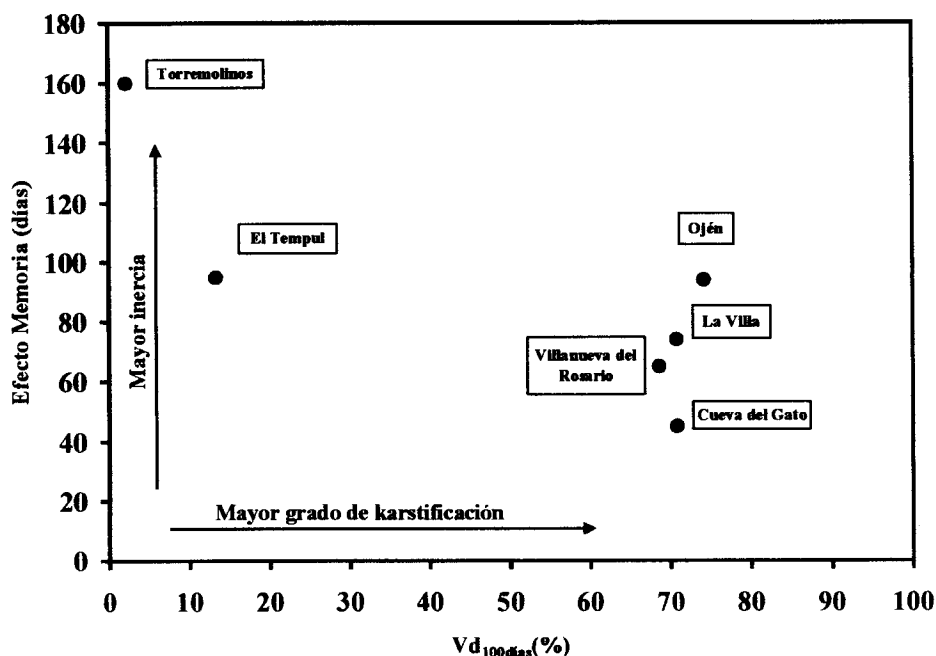


Fig. 45. Situación de los diferentes manantiales estudiados en una representación gráfica del % volumen dinámico drenado a los 100 días frente al efecto memoria.

Similares resultados (Fig. 46) se obtienen si se representa en el eje de abcisas el valor del coeficiente de agotamiento (α) en lugar del porcentaje del volumen drenado al cabo de los cien días de agotamiento, puesto que ambos son interdependientes. Con ello se facilita la tarea de la clasificación de los acuíferos debido a que el coeficiente de agotamiento es un valor más conocido y más fácil de determinar.

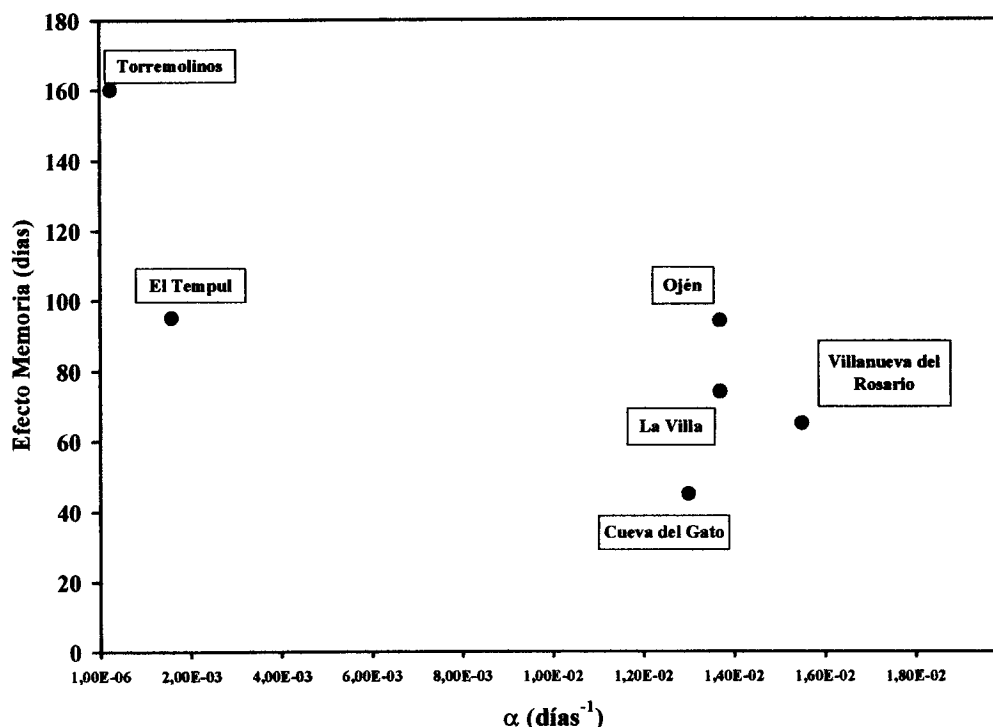


Fig. 46. Situación de los diferentes manantiales estudiados en una representación gráfica del coeficiente de agotamiento(α) frente al efecto memoria

Aunque los gráficos anteriores permiten clasificar los acuíferos carbonáticos, el efecto memoria no es un parámetro lo suficientemente conocido en los distintos acuíferos y su cálculo necesita una serie de caudales diarios para la realización del correlograma. De este modo, se propone finalmente su sustitución por la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, parámetro más fácil de determinar y que es conocido, aunque de manera aproximada, en la mayoría de los manantiales. Así, se obtiene un gráfico en escala logarítmica (Fig. 47) donde se han representado los diferentes manantiales, junto con su hidrograma para un año tipo. En este gráfico se pueden diferenciar de manera preliminar las siguientes agrupaciones:

GRUPO I) Manantiales con una relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ y coeficiente de agotamiento bajos, de hidrograma algo amesetado y base ancha con tan sólo una crecida anual. Corresponden a sistemas carbonáticos fisurados (Acuíferos de Torremolinos y Sierra de las Cabras).

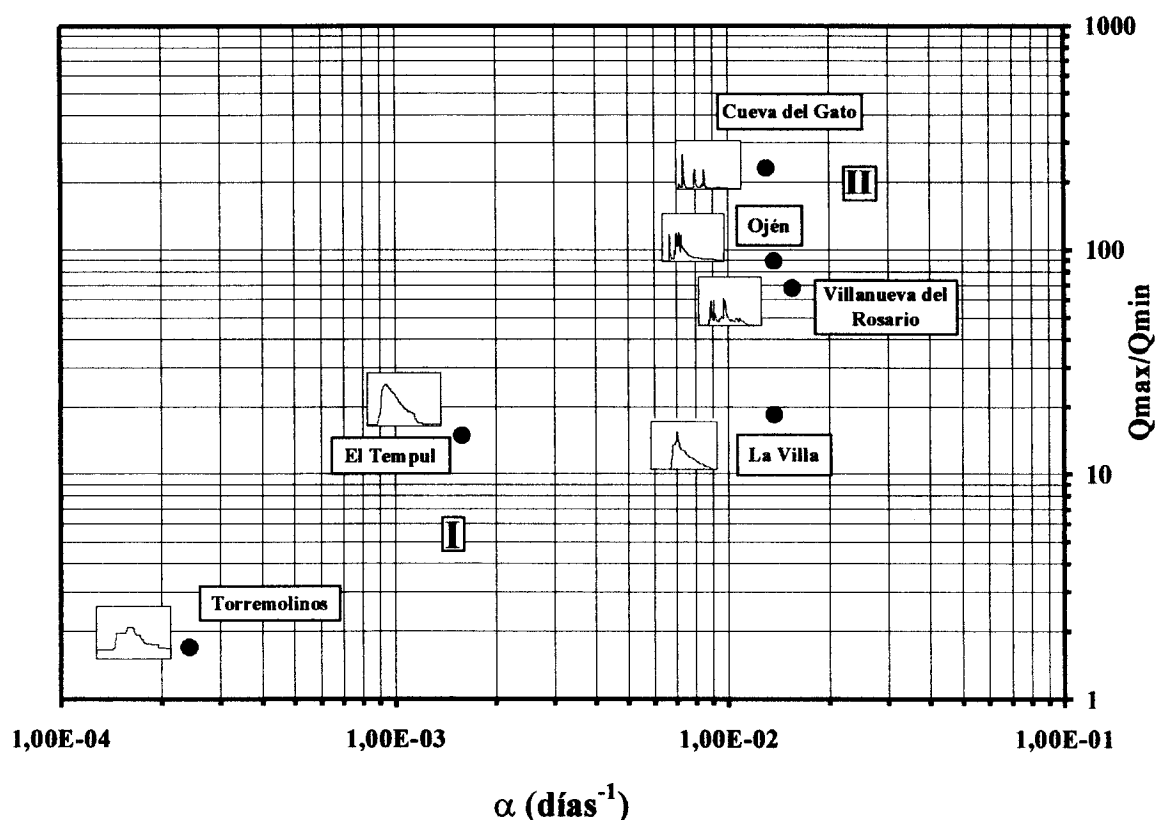


Figura 47. Situación de los diferentes manantiales estudiados en una representación gráfica del coeficiente de agotamiento (α) frente a la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$

GRUPO II) Manantiales con una relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ y coeficiente de agotamiento altos, cuyos hidrogramas son agudos y estrechos con varias crecidas para un año tipo. Corresponden a sistemas carbonáticos con karstificación funcional (Cueva del Gato, Ojén y Villanueva del Rosario). Dentro de este grupo, el acuífero de la Sierra de Líbar se perfila como el más claro exponente de sistema kárstico con escaso poder regulador y un alto grado de jerarquización de los conductos kársticos, correspondiente a un “sistema carbonático con elevada karstificación funcional”, mientras que los restantes corresponderían a “sistemas carbonáticos con moderada karstificación funcional”.

En este primer intento de diferenciación de agrupaciones, el manantial de la Villa ocupa una posición intermedia entre los dos grupos anteriores, por lo que se podría considerar un tercer grupo caracterizado por presentar coeficiente de agotamiento altos, relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ baja e hidrogramas con una única crecida anual cuya punta es aguda

y estrecha, y de base amplia. Representaría a un sistema intermedio entre los dos grupos anteriores.

Esta propuesta preliminar de caracterización de acuíferos carbonáticos, basada en parámetros hidrodinámicos fáciles de obtener, necesita su perfeccionamiento y confirmación a partir de los datos que se pretenden recopilar del mayor número posible de acuíferos carbonáticos de diferentes ámbitos geológicos y climáticos.

II PARTE

**CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE
ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA**

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En la primera parte de este volumen se han estudiado seis acuíferos escogidos en base a los datos previos existentes, a su litología y a sus diferentes condiciones, que han permitido establecer una propuesta de clasificación a partir de una serie de parámetros hidrodinámicos fáciles de obtener. Además, se ha pretendido que dicha aplicación tenga validez desde el punto de vista científico y, al mismo tiempo, tenga utilidad práctica en términos de planificación y gestión de recursos hídricos.

En una segunda etapa, y dentro del mismo contexto de colaboración científica entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA), se ha realizado este estudio cuyo objetivo es analizar los datos hidrodinámicos junto con los datos hidroquímicos de diferentes manantiales, ya que estos últimos también proporcionan información importante sobre el grado de organización del drenaje kárstico, y por tanto, sobre el funcionamiento de los acuíferos. Para ello se ha llevado un control de la respuesta hidrodinámica, hidroquímica e isotópica durante un mismo período de crecida, en los manantiales más importantes de tres acuíferos carbonáticos del Sur de España.

1.2. OBJETIVOS

En el marco del presente estudio se pretende evaluar frente a un mismo período de crecida, y mediante el control y análisis a escala diaria (e incluso horaria), la respuesta hidroquímica, hidrodinámica e isotópica que se produce en los manantiales de diferentes acuíferos seleccionados del Sur de España. Todo ello ha permitido caracterizar mejor el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos analizados.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo aplicada ha constado de dos etapas. La primera ha consistido en la toma de muestras de agua en los diferentes manantiales entre Noviembre y Diciembre de 2002 a nivel diario, y durante los días 23 y 24 de Noviembre a nivel horario. Las intensas lluvias que tuvieron lugar durante la segunda quincena del mes de Noviembre de 2002 (Fig. 48), justifican el hecho de que el muestreo a escala horaria se realizara durante esos dos días. En total se recogieron 168 muestras de agua, en frascos de polietileno, para análisis de los componentes químicos mayoritarios. Además, se muestrearon los manantiales estudiados, para la determinación del isótopo estable ^{18}O .

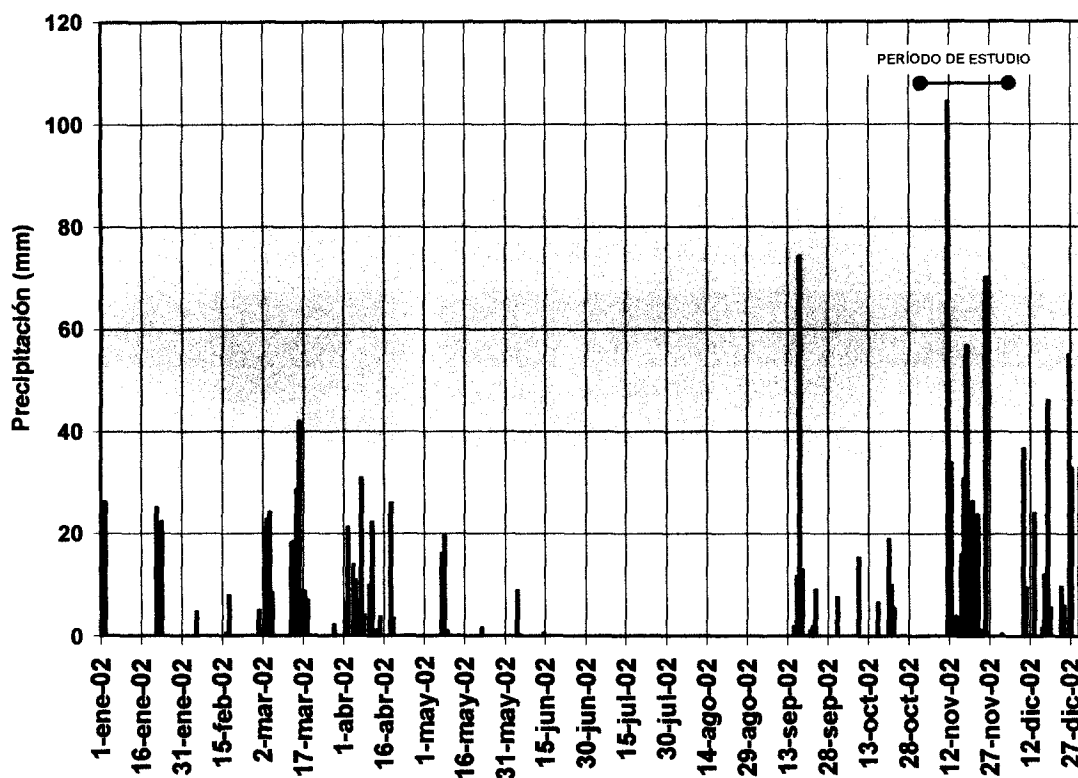


Figura 48. Lluvias diarias registradas durante el año 2002 en la estación pluviométrica de la Cueva de Pileta (Sierra de Líbar, Provincia de Málaga). Datos de CHSE

La segunda etapa de trabajo ha consistido en la determinación de la conductividad eléctrica como parámetro representativo de la mineralización de las aguas, en el análisis químico de los componentes característicos del sistema calcocarbónico, cloruros y sulfatos, junto con el análisis del ^{18}O . El análisis químico se

ha llevado a cabo en el Laboratorio de Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Málaga, mientras que el ^{18}O se ha analizado en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Madrid.

Por último, con todos los datos disponibles, se han estudiado las evoluciones temporales de los distintos componentes de las aguas para tratar de comparar la respuesta hidroquímica e isotópica con la hidrodinámica y poder caracterizar así el funcionamiento hidrogeológico de los diferentes acuíferos. Es conocido que los datos hidroquímicos de una surgencia, conjuntamente con los hidrodinámicos, proporcionan información sobre el grado de organización del drenaje kárstico del sector de acuífero drenado por el manantial, ya que existe una estrecha relación entre la variabilidad temporal de la mineralización y el grado de karstificación funcional del acuífero (Shuster y White, 1971; Bakalowicz, 1979; Antigüedad, 1986; Andreo et al., 2000).

**2. ACUÍFEROS CARBONÁTICOS
SELECCIONADOS**

2.1. GENERALIDADES SOBRE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS

Los diferentes acuíferos seleccionados en este estudio son (Fig. 49):

- Sistema de Maro: corresponde a la vertiente meridional de Sierra Almajara, en el límite entre las provincias de Málaga y Granada. Es un sistema formado por los mármoles triásicos en los que se desarrolla la Cueva de Nerja, la cual constituye el principal exponente en cuanto al desarrollo de formas kársticas en el sector analizado. La descarga en el borde meridional se produce, de modo visible, a través de manantiales, siendo actualmente el manantial de Maro el principal punto de descarga natural.

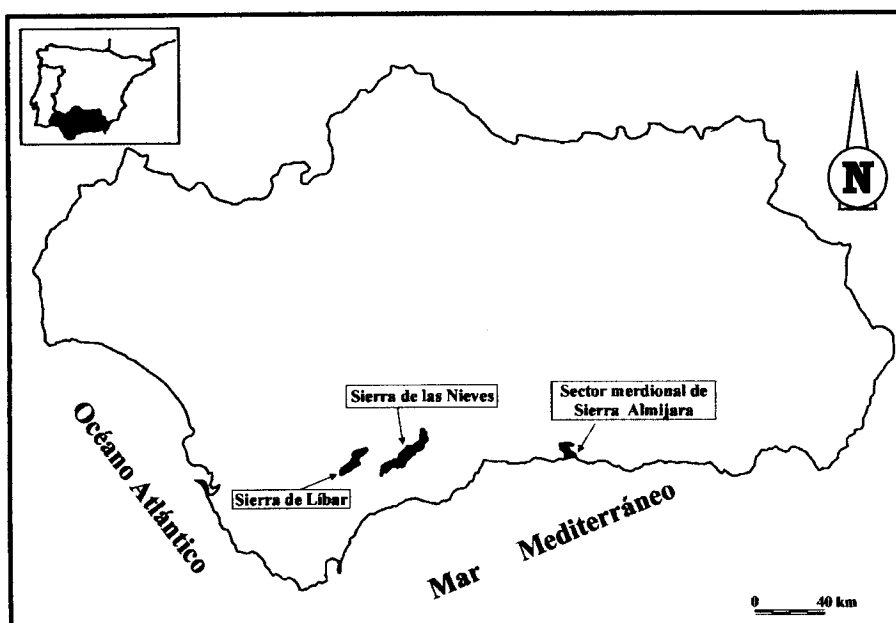


Figura 49. Situación geográfica de los sistemas acuíferos seleccionados

- Acuífero de la Sierra de Libar: está situado al Oeste de la localidad de Ronda (Málaga), con una superficie de 103 km². El sistema está constituido por dolomías y calizas jurásicas que presentan una estructura geológica de pliegues anticlinales en cofre. La Sierra de Libar es uno de los máximos exponentes del modelado kárstico en la Cordillera Bética, dada la gran cantidad de formas que presenta, tanto exokársticas (poljes, dolinas y lapiaz) como endokársticas (simas y cuevas). La descarga se produce principalmente por el borde oriental de dicho macizo,

erigiéndose el manantial de Benaoján junto con el de la Cueva del Gato, como los principales puntos de descarga del sector septentrional. En la primera parte de este volumen se ha caracterizado este sistema mediante la serie de caudales del manantial de la Cueva del Gato.

- Sistema de las Nieves: está situado en el sector occidental de la provincia de Málaga, cerca del límite con la de Cádiz y ocupa una superficie de 100 km². Forma parte de la unidad hidrogeológica Sierra de las Nieves-Sierra de Yunquera. El acuífero está formado por una potente sucesión de dolomías y calizas de edad triásica y liásica. Su estructura geológica es básicamente un sinclinal tumbado, vergente al Noroeste. Presenta abundantes formas kársticas superficiales bien desarrolladas (lapiaz, dolinas) y, en menor medida, formas endokársticas. La descarga se produce por tres manantiales importantes que originan los ríos Verde, Grande y Genal.

**3. EL SISTEMA DE MARO (SECTOR
MERIDIONAL DE SIERRA ALMIJARA)**

3.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

Se encuentra situado en las proximidades del límite provincial entre Málaga y Granada. Desde el punto de vista geológico, el sector meridional de Sierra Almirajara pertenece a la Zona Interna de la Cordillera Bética; en él afloran materiales metamórficos pertenecientes al Complejo Alpujárride (Fig. 50).

La serie estratigráfica alpujárride comienza por una secuencia metapelítica, de gran espesor, constituida por esquistos oscuros en la base y claros hacia el techo atribuidos al Paleozoico y al Trías inferior, respectivamente. Esta secuencia pasa gradualmente hacia arriba, a través de unos niveles de transición de calcoesquistos y cuarcitas, a una potente serie marmórea en cuya base se encuentran mármoles dolomíticos del Trías medio, con unos 400 m de espesor. Por encima de éstos existe un tramo constituido por mármoles calizos con niveles de calcoesquistos, atribuidos al Trías superior (Sanz de Galdeano, 1986, 1989 y 1990 y Andreo *et al.*, 1993).

Por el sur los materiales alpujárrides están cubiertos discordantemente por sedimentos neógeno-cuaternarios.

En cuanto a la estructura geológica del complejo Alpujárride, está constituida por un conjunto de unidades tectónicas superpuestas plegadas y falladas. En el sector del manantial de Maro, el manto de Almirajara presenta una geometría relativamente sencilla, casi tabular, buzando unos 20° hacia el sur. Esta estructura queda truncada por la existencia de fallas de dirección WNW-ESE y NW-SE, como la de Frigiliana-Nerja o la del río de la Miel, que han jugado un papel muy importante en la estructuración de la región. Dichas fallas son las responsables del levantamiento de la Sierra Almirajara durante el Plioceno y el Cuaternario.

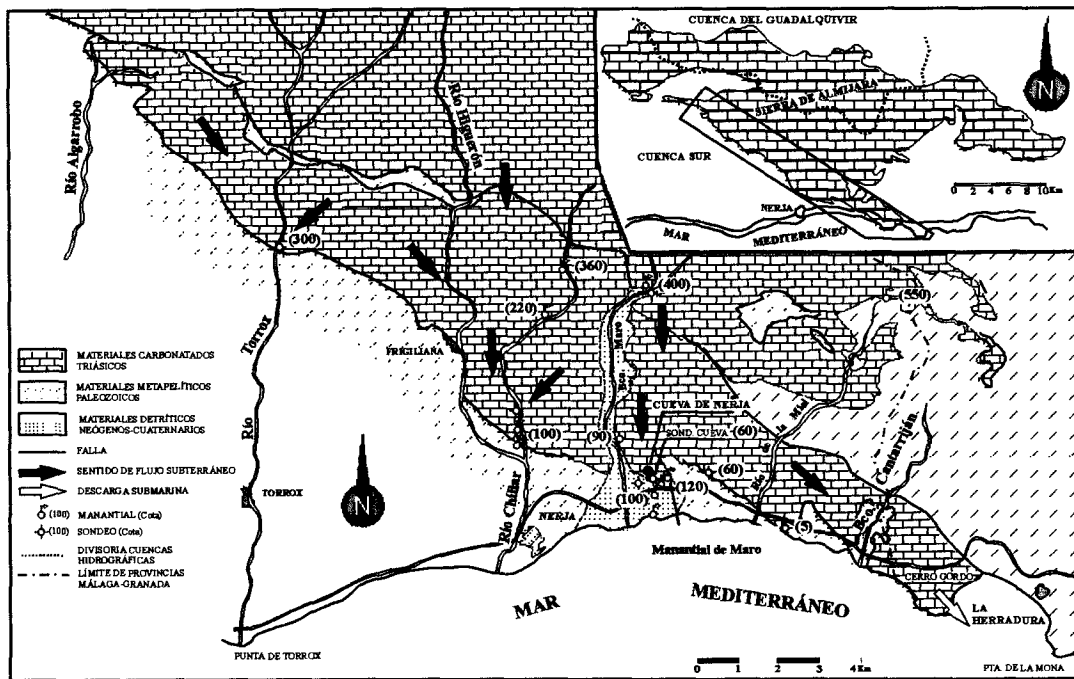


Figura 50. Mapa hidrogeológico del borde meridional de la Sierra Almjara (modificada de Andreo y Carrasco, 1993).

Los mármoles del manto de Almjara que se encuentran en esta región pertenecen a una importante Unidad Hidrogeológica, Tejeda-Almjara-Guájares, que tiene una extensión de 542 km² y ocupan parte de las provincias de Málaga y Granada (IGME, 1983; SGOP, 1991, Andreo y Carrasco, 1993; Castillo y Carmona, 2000).

Su límite meridional está definido por los sistemas de fallas ya mencionados, que delimitan los mármoles y los ponen en contacto con esquistos, materiales que suponen una barrera impermeable que determina la ubicación de los principales puntos de drenaje natural.

En superficie, los mármoles presentan un bajo grado de karstificación, con escaso desarrollo del modelado kárstico. Las formas exokársticas se limitan a pequeñas depresiones situadas en las partes altas y a un lapiaz cubierto y poco desarrollado. Las formas endokársticas son poco conocidas, constituyendo la Cueva de Nerja la gran excepción.

La alimentación del acuífero se produce, principalmente por la infiltración del agua de lluvia caída directamente sobre el afloramiento de los materiales permeables y, en menor medida, por la infiltración de la escorrentía superficial, en el curso medio de

los ríos que lo atraviesan. El sentido del flujo es básicamente de norte a sur, aunque en su parte meridional existe un flujo hacia el sureste dirigido en dirección del paraje de la Herradura donde el acuífero conecta con el mar.

La descarga en el borde meridional se produce, de modo visible, a través de manantiales, entre los que destaca el de Maro, y de surgencias difusas en el curso bajo de los ríos y de forma oculta, hacia el mar o hacia los materiales detríticos neógeno-cuaternarios. También se producen bombeos en las perforaciones existentes.

3.2. EL MANANTIAL DE MARO

Está situado a la cota 120 m s.n.m. (Fig. 50), y su caudal medio es próximo a 250 L/s, con caudales máximos superiores a los 1500 L/s. El hidrograma del manantial presenta bruscos aumentos de caudal como respuesta a las precipitaciones, lo cual pone de manifiesto un importante grado de karstificación funcional del sistema (Andreo y Carrasco, 1993; Carrasco *et al.*, 1996 y Liñán *et al.*, 2000).

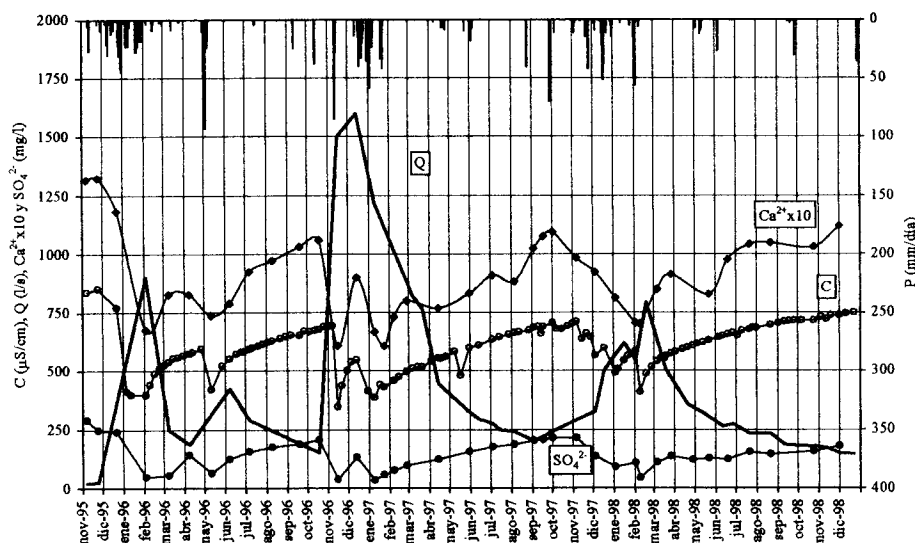


Figura 51. Hidrograma del manantial de Maro y evolución temporal de parámetros físico-químicos (tomado de Liñán *et al.*, 2000).

La respuesta hidroquímica de esta surgencia frente a la precipitaciones, con importantes procesos de dilución (Fig. 51) pone de manifiesto el comportamiento típicamente kárstico de dicha surgencia (Liñan *et al.*, 2000).

3.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial

Los datos de precipitación en el sector de Maro corresponden a los registrados en los exteriores de la Cueva de Nerja y han sido proporcionados por su Instituto de Investigación.

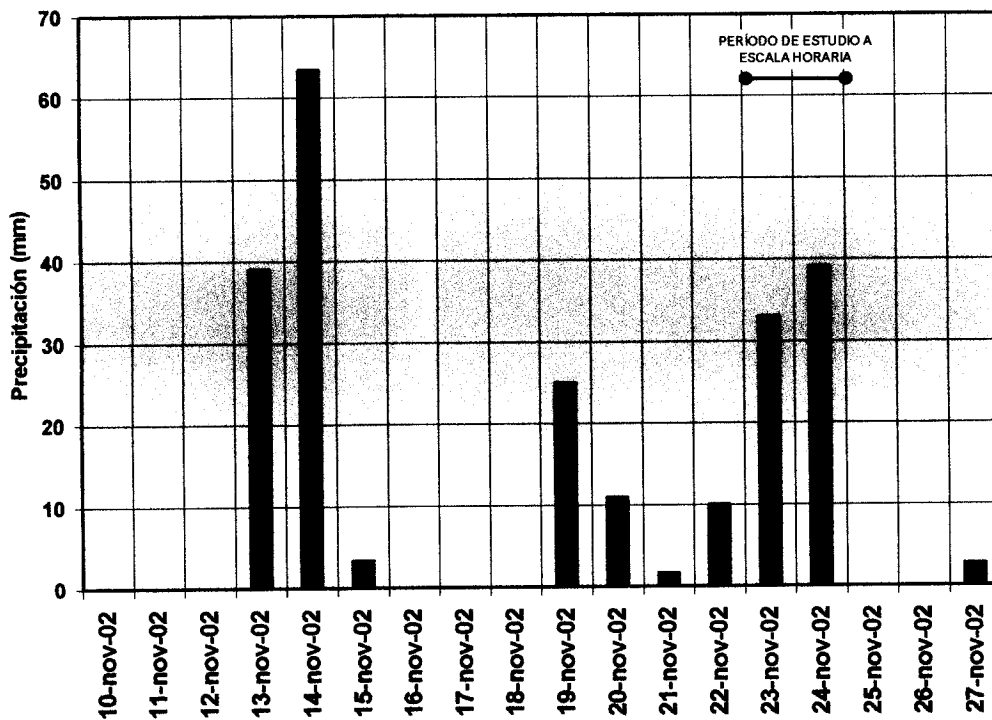


Figura 52. Evolución temporal de las precipitaciones durante el periodo de estudio en la estación pluviométrica de la Cueva de Nerja (Provincia de Málaga). Datos proporcionados por el Instituto de Investigación Cueva de Nerja

Durante el periodo de estudio se diferencian dos eventos pluviométricos (Fig. 52), el primero de ellos tuvo lugar principalmente durante los días 13 y 14 de Noviembre (102 mm), mientras que el segundo, con un valor total de precipitación de 120 mm, se distribuyó entre el 19 y el 24 de Noviembre. No obstante, casi el 60% del

total de precipitación recogida correspondiente a este segundo evento se concentra durante los días 23 y 24 de Noviembre, coincidiendo con el periodo de estudio a escala horaria.

En cuanto a los datos de caudal, no ha sido posible obtener los datos de altura de lámina de agua en la estación de aforos controlada por la Confederación Hidrográfica del Sur de España, aunque se dispone de datos de aforos puntuales (Fig. 53). A partir de esta escasa información podemos resaltar que parte del periodo de estudio se sitúa dentro de una importante crecida hidrodinámica del manantial, producida ésta como respuesta al segundo evento pluviométrico anteriormente comentado. El caudal máximo aforado fue de 1150 L/s correspondiente al día 26 de Noviembre.

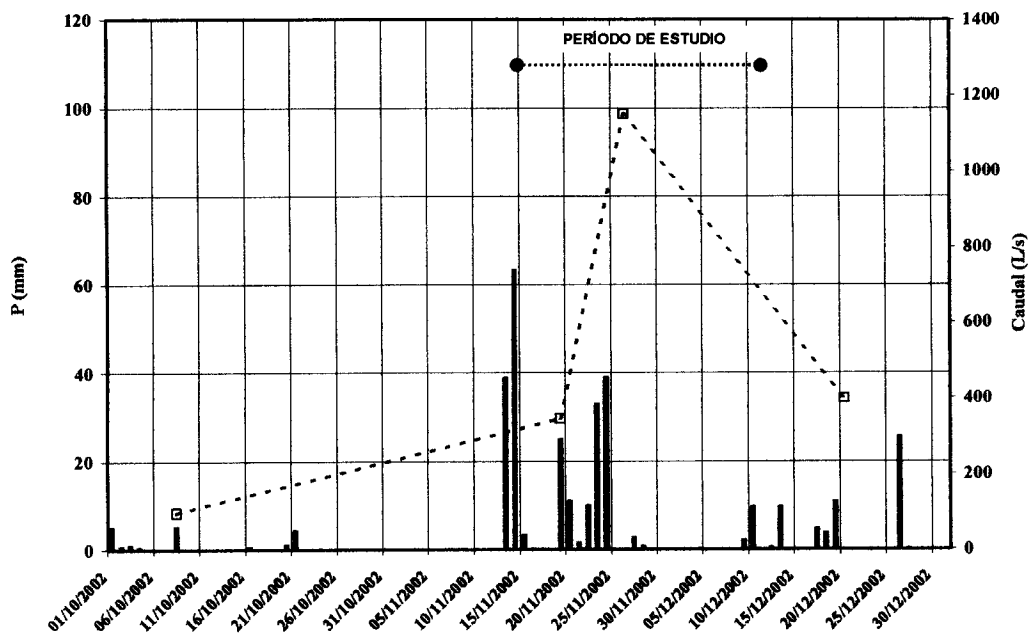


Figura 53. Evolución del caudal del manantial de Maro y de las lluvias en la estación de la Cueva de Nerja durante todo el periodo de estudio

3.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial de Maro

En el manantial de Maro se han realizado muestreos, a paso de tiempo diario, entre el 14 de Noviembre y el 11 de Diciembre de 2002 para determinar la variación hidroquímica de sus aguas y poder así estudiar su evolución temporal con respecto a una importante variación de caudal producida durante una crecida. En este período, los días

23 y 24 de Noviembre se tomaron muestras horarias para determinación de la composición química e isotópica del agua (Anexo 7), que corresponden a un periodo de crecida que tuvo lugar como respuesta a importantes precipitaciones en las áreas de recarga del sistema acuífero (Fig. 53).

Desde el 19 de Noviembre hasta el 11 de Diciembre de 2002 se dispone, además, de datos horarios de conductividad eléctrica del agua de la surgencia.

Evolución del quimismo del agua durante el período de estudio

El agua drenada por el manantial de Maro durante el período de estudio presenta una conductividad media diaria comprendida entre 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al final del estiaje, y de 379 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en los momentos de mayor dilución (Fig. 54).

La evolución temporal de este parámetro refleja una disminución en la conductividad eléctrica del agua asociada a un importante episodio lluvioso que también originó un aumento de caudal. Posteriormente, y tras los mínimos registrados durante la crecida, los valores de conductividad eléctrica muestra una tendencia ascendente hasta alcanzar prácticamente los mismos valores que el de las aguas drenadas antes de registrarse las lluvias, al cabo de 15 días aproximadamente. Esta evolución se explica por una dilución del agua almacenada en el acuífero debido a la mezcla con la procedente de la infiltración rápida de la lluvia.

El proceso de dilución lleva consigo un aumento de la composición isotópica del agua de la surgencia lo que nos indica que el agua almacenada en la zona saturada del acuífero es más ligera que el agua de lluvia que ha originado la recarga (Fig. 54).

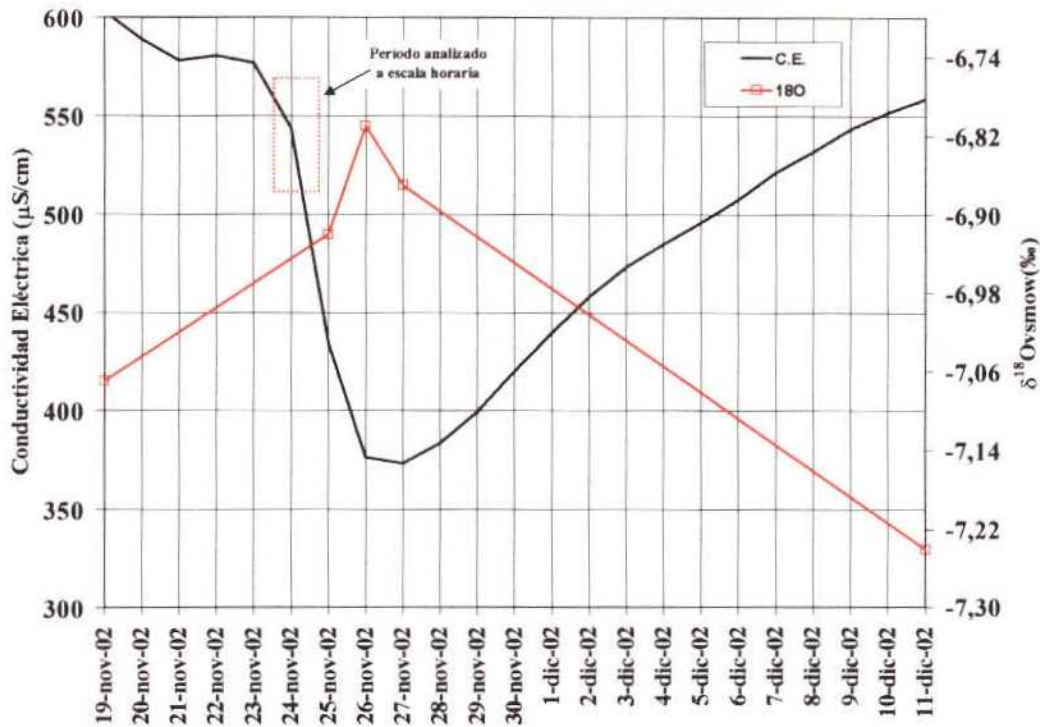


Figura 54. Evolución de la conductividad eléctrica del agua drenada por el manantial de Maro a nivel diario y del $\delta^{18}\text{O}$ durante todo el periodo de estudio

Los valores de dilución máxima que se alcanzan son del orden del 40 %, lo que pone de manifiesto la existencia de una red kárstica bien desarrollada, que permite la rápida mezcla del agua de lluvia, menos mineralizada, con el agua existente dentro del acuífero. Además, el hecho de que esta dilución se produzca en poco tiempo refleja que el volumen de agua de lluvia que se mezcla con la de la zona saturada transita de manera muy rápida, lo que confirma la existencia de un importante grado de karstificación funcional.

3.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002.

En la figura 55 se muestra la evolución, a escala horaria, de la conductividad eléctrica en el manantial de Maro durante los días 23 y 24 de Noviembre, con objeto de mostrar las respuesta de esta surgencia frente a las precipitaciones de los días anteriores.

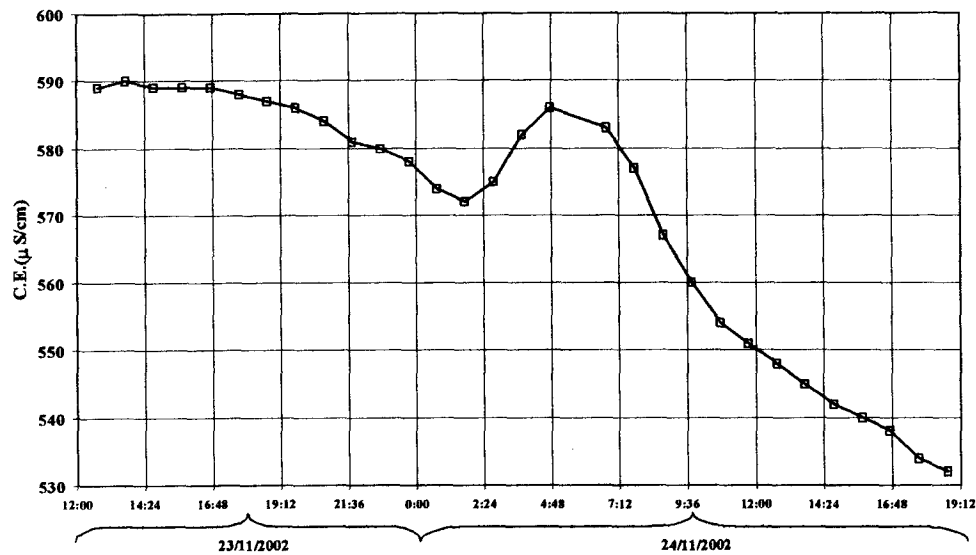


Figura 55. Evolución de la conductividad del agua a nivel horario drenada por el manantial de Maro durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

Durante este período el agua drenada por esta surgencia presenta una conductividad variable entre $589 \mu\text{S/cm}$, en las primeras horas de muestreo del día 23, y de $532 \mu\text{S/cm}$, al final del período de observación (Fig. 55). Así, tras las precipitaciones producidas durante los dos días anteriores se observa una primera dilución por mezcla del agua subterránea con el agua de lluvia, menos mineralizada. Esta pequeña dilución va seguida de un aumento de la mineralización (Fig. 55), que debe estar originado por un pequeño efecto pistón producido por las reservas existentes en el acuífero, alcanzando casi los mismos valores que los registrados a principios de este muestreo a escala horaria. La tendencia ligeramente ascendente de la conductividad eléctrica, que se produce tras la primera dilución puede reflejar el papel de las reservas existentes dentro de esta parte del acuífero que presenta un menor contenido isotópico que el resto del agua de infiltración rápida. Posteriormente, se observa un claro descenso en los valores de conductividad eléctrica, lo que pone de manifiesto que el volumen de agua de lluvia que se mezcla con el agua subterránea es mucho mayor durante este período que durante la primera dilución.

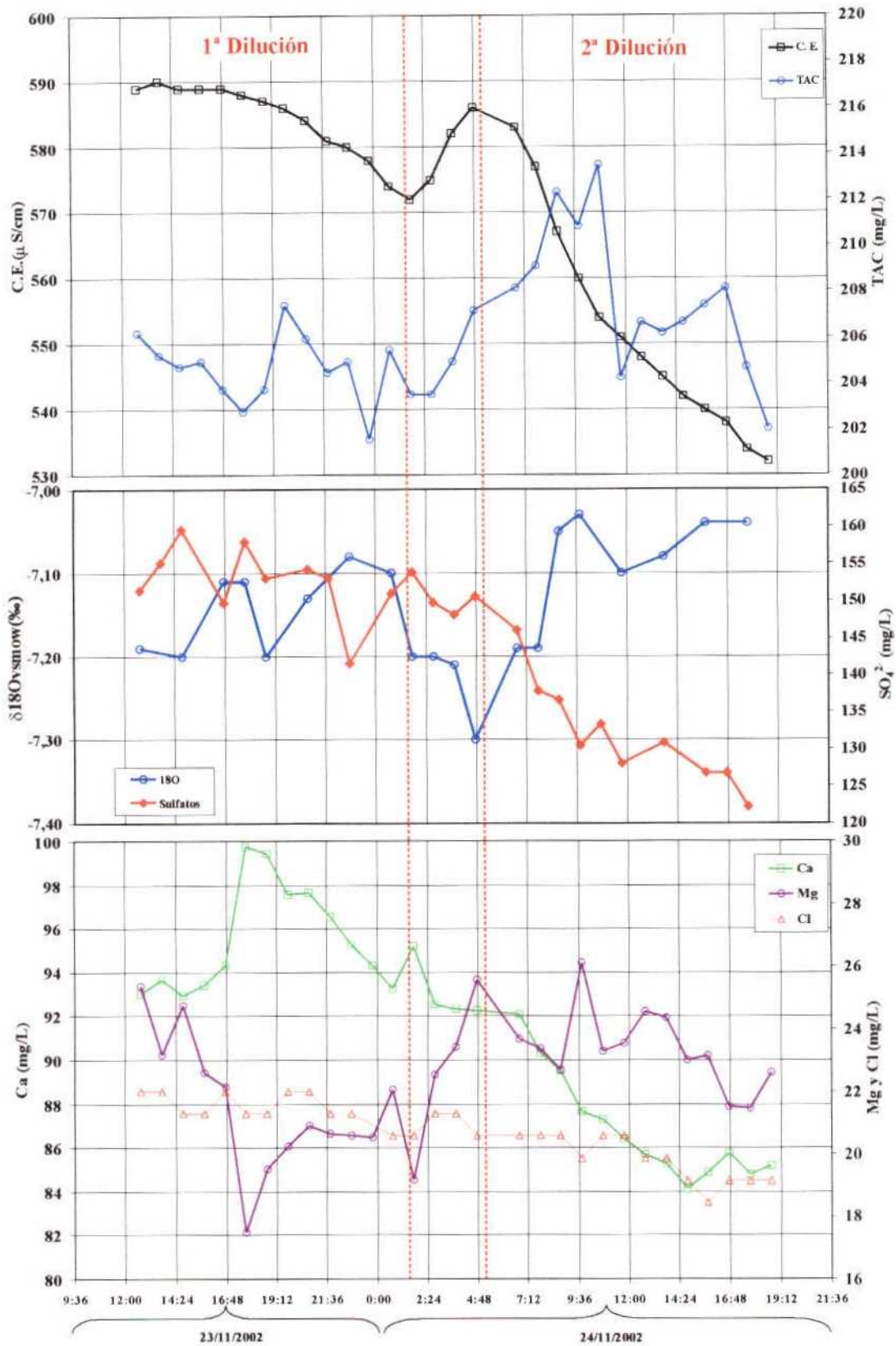


Figura 56. Evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico, de los cloruros y de la conductividad del agua drenada por el manantial de Maro durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

La evolución de los parámetros químicos analizados para todo el muestreo horario (Fig. 56) pone de manifiesto una evolución paralela para el Ca^{2+} , SO_4^{2-} y la conductividad eléctrica, mientras que tanto los cloruros como la TAC (equivalente al contenido en bicarbonatos) no presentan variaciones importantes durante dicho período. Por ello, el descenso progresivo de la conductividad eléctrica, y por tanto de la mineralización, está controlado por una disminución de la concentración de sulfato cálcico en el agua drenada por la surgencia.

Un análisis detallado de la evolución de la alcalinidad (TAC) y de los contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} reflejan que:

- Durante la primera dilución la TAC se mantiene prácticamente constante, se observa un pico de Ca^{2+} y una disminución de Mg^{2+} , además el análisis de la evolución de la relación $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ (Fig. 57) muestra igualmente una disminución importante de esta relación, lo que pone de manifiesto que se trataría de aguas con escaso tiempo de residencia dentro del acuífero.

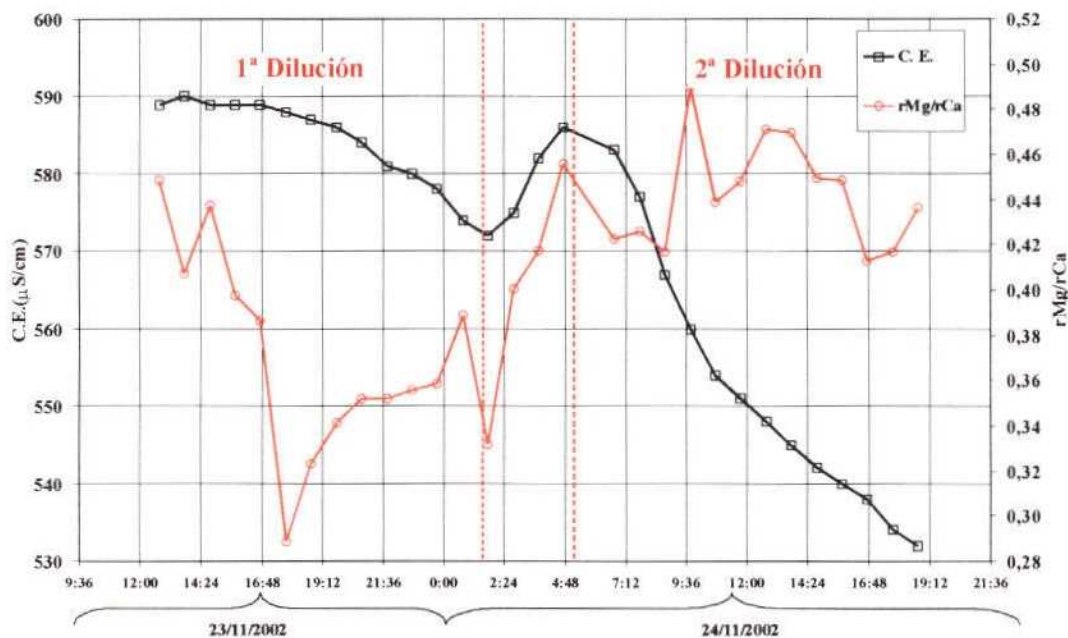


Figura 57. Evolución de la relación $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ y de la conductividad eléctrica del agua drenada por el manantial de Maro durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

- Durante el tramo ascendente de la conductividad eléctrica, posterior a la primera dilución, la TAC aumenta ligeramente, los valores de Ca^{2+} se mantienen mientras que para el Mg^{2+} se observa un aumento. El aumento en la relación rMg/rCa también refleja este hecho (Fig. 57), por lo que se trataría entonces de aguas con mayor tiempo de residencia y, por lo tanto, más mineralizadas procedentes de las reservas acumuladas en el acuífero.

- Durante la segunda dilución, al principio la TAC sigue aumentando, manteniéndose prácticamente constante para el resto del periodo. En cambio los valores de Mg^{2+} se mantienen mientras que para el Ca^{2+} se observa una disminución progresiva, originada por el descenso en la aportación de sulfato cálcico.

**4. LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE
LA SIERRA DE LÍBAR**

4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

Las principales características geológicas e hidrogeológicas de la Sierra de Libar, aparecen ya descritas en el apartado 2.4. del Volumen I de este estudio.

4.2. EL MANANTIAL DE BENAJOJÁN

A dos kilómetros al sudoeste de la Cueva del Gato (manantial analizado en la primera parte de este Volumen) está situado el manantial de Benaoján (Fig. 58), también llamado de El Ejío o del Molino del Santo (450 m s.n.m). El emplazamiento de este manantial surge en las calizas jurásicas a favor de un contacto mecánico en los materiales cretácicos suprayacentes. Se trata de una surgencia que suele registrar, en un mismo año hidrológico, dos o tres crecidas importantes con hidrogramas agudos y estrechos y caudales máximos superiores a los 8000 L/s (Fig. 59), lo que de manera preliminar evidencia una elevada karstificación funcional, en el que la decrecida se produce de manera rápida, tal como ya se ha puesto anteriormente de manifiesto.

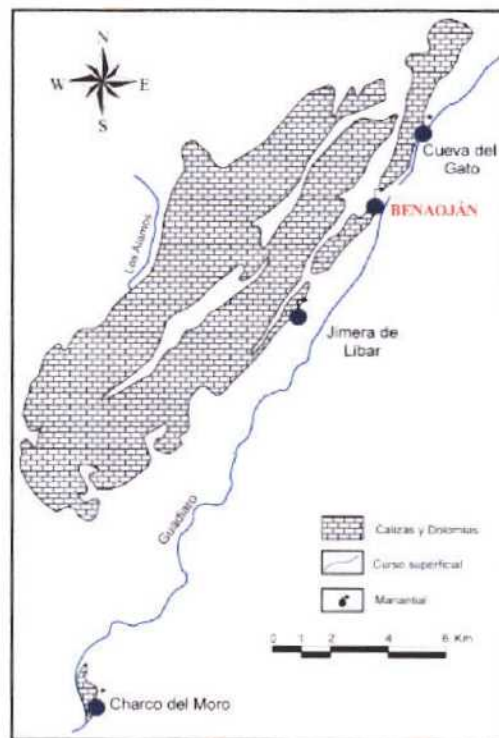


Figura 58. Situación geográfica del manantial de Benaoján

El coeficiente que caracteriza el agotamiento de los hidrogramas de esta surgencia es del orden de 10^{-2} días⁻¹, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma rápida, además, la infiltración rápida del agua de lluvia origina disminuciones de la temperatura del agua almacenada en el acuífero, así como procesos de dilución importante (Jiménez, 2002).

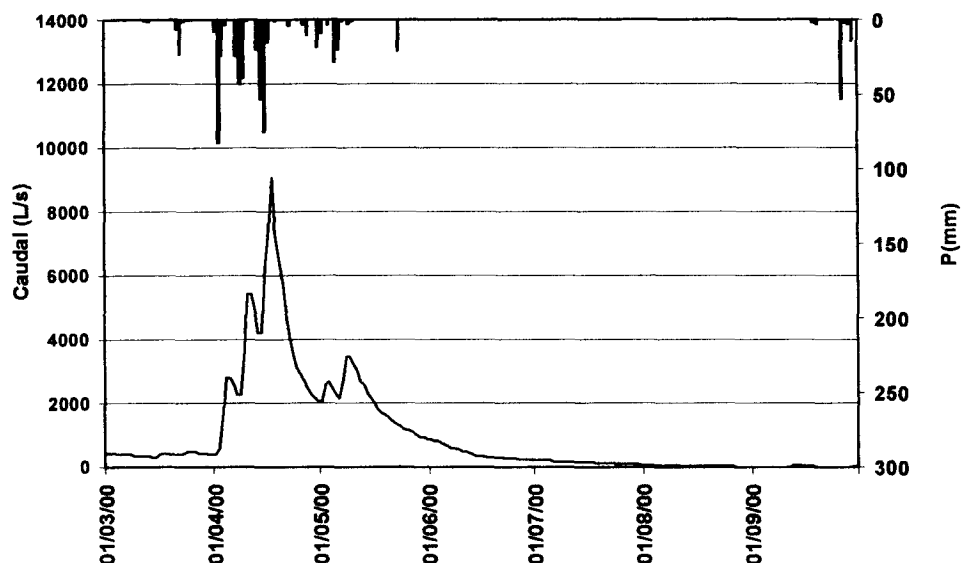


Figura 59. Hidrograma del manantial de Benaoján (tomado de Jiménez, 2002)

4.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial

Los datos de precipitación en el sector nororiental de la sierra de Líbar corresponden a los registrados en la estación de la Cueva de la Pileta y han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Sur de España.

Durante el periodo de estudio se diferencian dos eventos pluviométricos importantes (Fig. 60), el primero de ellos tuvo lugar principalmente durante los días 11 y 12 de Noviembre (140 mm), mientras que el segundo, con un valor total de precipitación aproximado de 180 mm se distribuyó entre los días 16 y 22 de Noviembre.

En cuanto a la composición isotópica del agua de lluvia se observa que existe una clara influencia entre la cantidad de precipitación caída y el contenido isotópico de las mismas. Así, las lluvias de poca intensidad, < 20 mm/día, correspondientes al día 9

de octubre de 2002, son de mayor contenido isotópico, es decir más pesadas ($\delta^{18}\text{O} = -2,85$). En cambio, las aguas de lluvia intensas, >100 mm/día (11/11/2002), son mucho más ligeras, con menos contenido isotópico ($\delta^{18}\text{O} = -8,04$). Los eventos pluviométricos con valores totales de precipitación medios (20-22/11/2002) también presentan valores isotópicos intermedios ($\delta^{18}\text{O} = -6,20$).

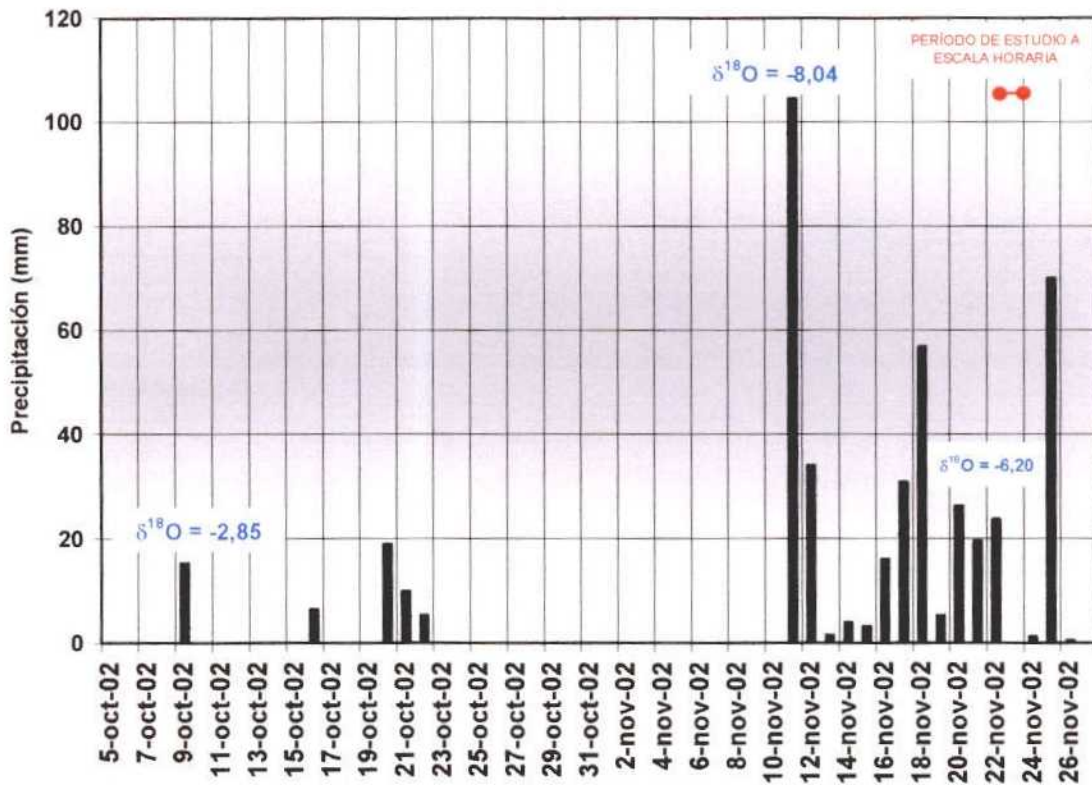


Figura 60. Evolución temporal de las precipitaciones junto con su $\delta^{18}\text{O}$ durante el periodo de estudio en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta (Sierra de Libar, Provincia de Málaga).

Al igual que los datos de precipitación, los datos de caudal han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Sur de España (Fig. 61). A partir de esta información se pone de manifiesto que existe un cierto desfase (1 o 2 días) entre las primeras precipitaciones de noviembre de 2002 y el aumento de caudal en la surgencia. Además resaltar que tanto el periodo de estudio a escala diaria como el periodo de estudio a escala horaria se engloba en un contexto de una importante crecida hidrodinámica del manantial.

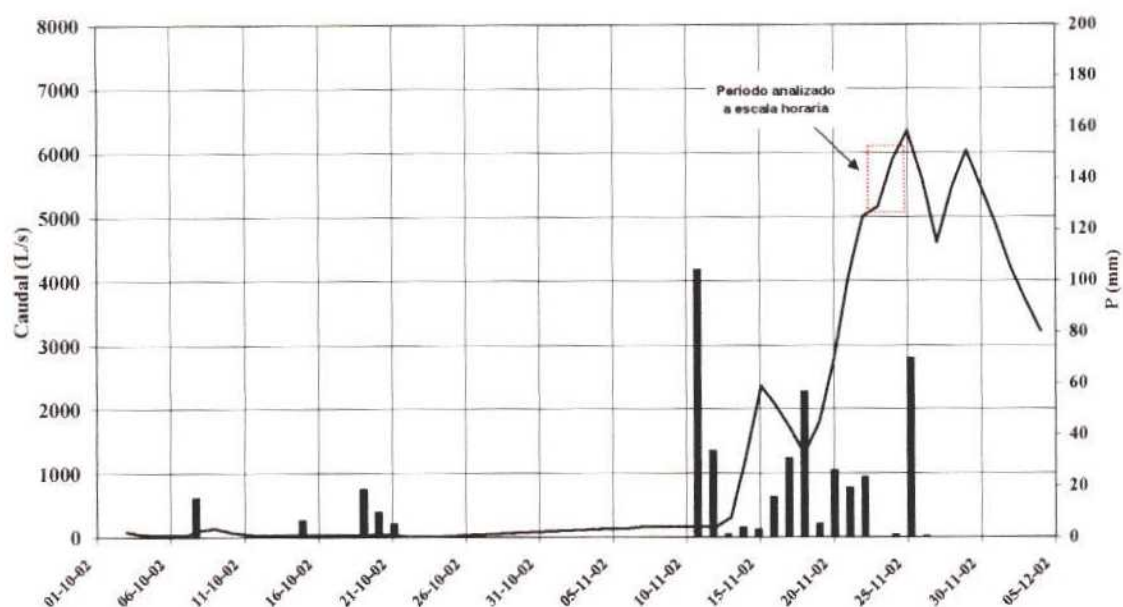


Figura 61. Evolución del caudal del manantial de Benaoján y de las lluvias en la estación de la Cueva de la Pileta durante todo el periodo de estudio. (Datos proporcionados por la CHSE)

4.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial de Benaoján

Durante este estudio, en el manantial de Benaoján se han realizado muestreos, a paso de tiempo diario (Anexo 8), entre el 3 de Octubre y el 4 de Diciembre de 2002 para determinar la variación hidroquímica de sus aguas y poder así estudiar su evolución temporal con respecto a una importante variación de caudal producida durante una crecida. Además se dispone de muestras horarias para determinación de la composición química durante los días 23 y 24 de Noviembre (Anexo 9), que corresponden a los días posteriores a un importante período de precipitaciones en las áreas de recarga del acuífero.

Evolución del quimismo del agua durante el periodo de estudio

El agua drenada por el manantial de Benaoján durante el periodo de estudio presenta una conductividad diaria entre 320 y 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, anterior al importante episodio lluvioso, y de 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$, casi al final del periodo de estudio (Fig. 62).

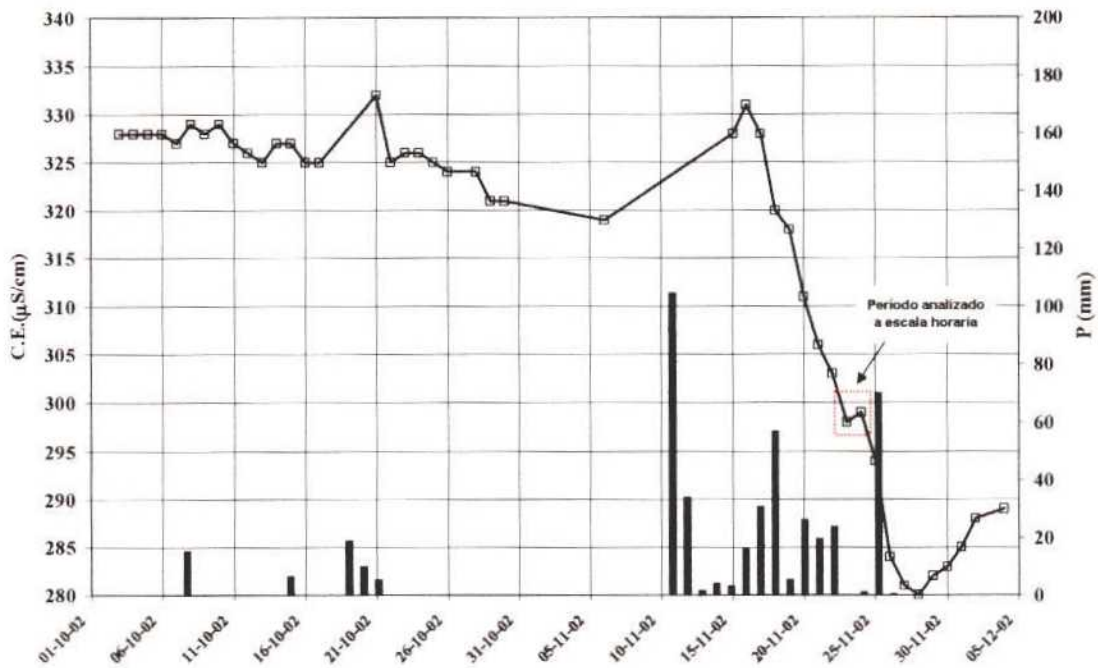


Figura 62. Evolución de la conductividad eléctrica del agua drenada por el manantial de Benaoján durante todo el periodo de estudio

Al igual que para el manantial de Maro, la evolución temporal de este parámetro refleja una disminución en la conductividad eléctrica del agua asociada a un importante episodio lluvioso que originó varias crecidas hidrodinámicas consecutivas (Figs. 61 y 62). Esta evolución pone de manifiesto un aumento progresivo del volumen de agua de infiltración rápida que se mezcla con las reservas procedentes del agua almacenada dentro del acuífero. Ahora bien, la primera respuesta hidroquímica frente a las precipitaciones de Noviembre de 2002 consistió en descargar las aguas algo más mineralizadas (Fig. 62), lo que se puede atribuir a un pequeño efecto pistón.

Los valores de dilución máxima que se alcanzan son del orden del 15 %, lo que pone de manifiesto la existencia de una red kárstica bien desarrollada. La dilución se produce de manera rápida, indicativo de que el agua de precipitación que se mezcla con la de la zona saturada transita a una alta velocidad, lo que confirma la existencia de un importante grado de karstificación funcional.

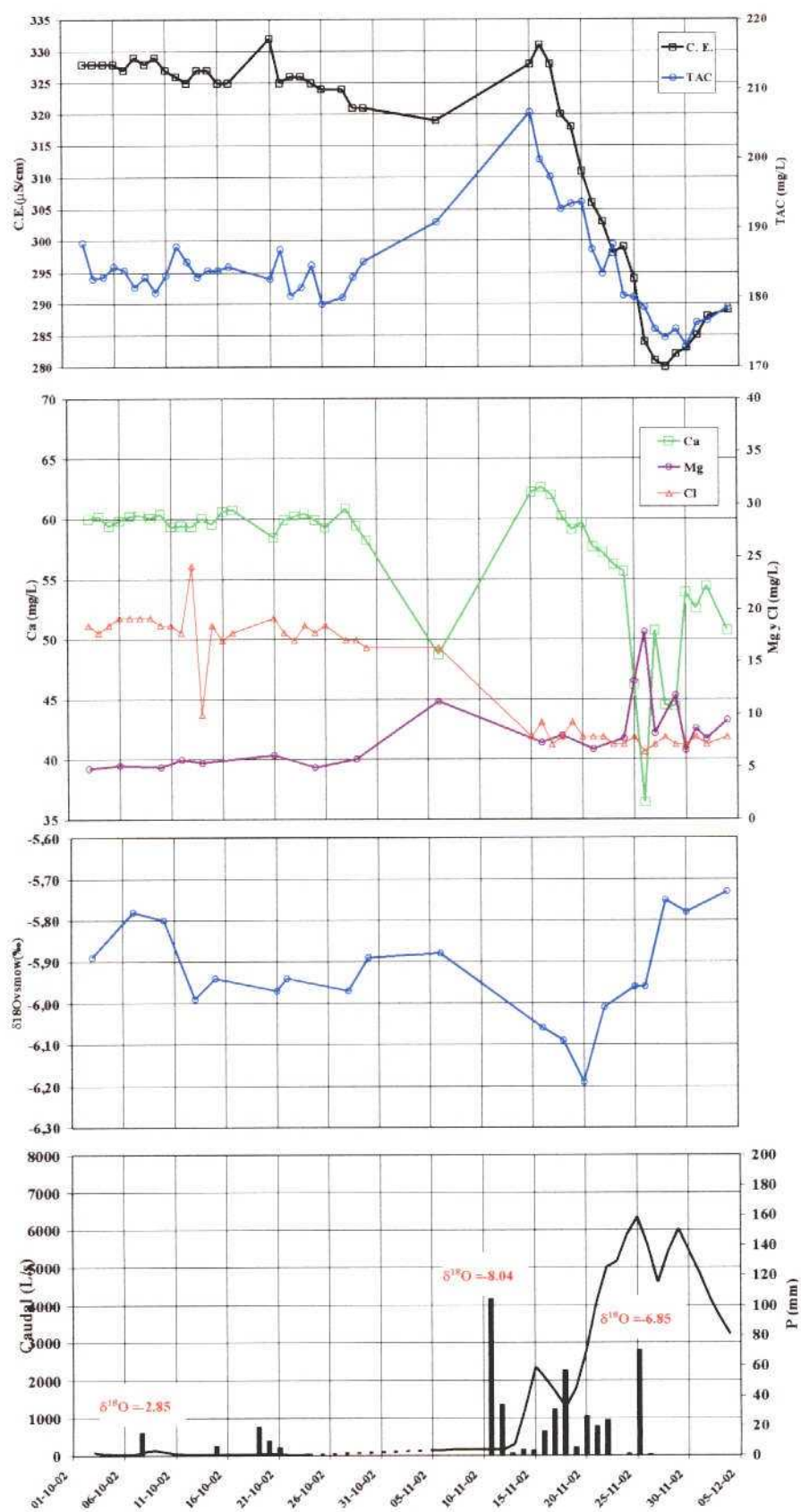


Figura 63. Evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico, cloruros, $\delta^{18}O$, conductividad eléctrica y caudal drenado por el manantial de Benaoján

La evolución de los parámetros químicos e isotópicos analizados para todo el muestreo diario (Fig. 63) pone de manifiesto una evolución paralela de la conductividad eléctrica, TAC y Ca^{2+} , mientras que el Mg^{2+} no presenta variaciones importantes durante dicho período, lo que nos indica que la mineralización de las aguas está controlada por la disolución de la calcita, componente mayoritario de las calizas que constituyen el acuífero. Así como consecuencia de un importante episodio de recarga, se produce una circulación rápida hacia el manantial, lo que provoca en un primer momento un empuje hacia la surgencia de las aguas que han estado almacenadas en el acuífero y que presentan una mayor mineralización, apareciendo posteriormente las aguas de infiltración rápida menos mineralizadas. En cuanto a los cloruros, cabe destacar el descenso que experimenta durante el periodo de crecida, indicativo de que las aguas han estado menos tiempo en el epikarst y que corresponden a una infiltración rápida.

El análisis isotópico nos indica que tanto las aguas características del efecto pistón como las drenadas durante los primeros días de la decrecida hidroquímica muestran menores contenidos isotópicos (Fig. 63). Estos valores de $\delta^{18}\text{O}$ son claramente correlacionables con los valores más negativos correspondientes al evento pluviométrico del día 11/11/2002 ($\delta^{18}\text{O} = -8.04$), reflejando que esta recarga provoca una respuesta isotópica en las aguas drenadas por el manantial, al menos durante los 10 días siguientes a dicho evento pluviométrico. Posteriormente, durante la crecida hidrodinámica hay un aumento en la composición isotópica de las aguas drenadas por el manantial en consonancia con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del periodo lluvioso que produce la recarga principal del acuífero.

4.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002.

En la figura 64 se muestra la evolución, a escala horaria, de la conductividad eléctrica en el manantial de Benaoján durante los días 23 y 24 de Noviembre, con objeto de mostrar las respuesta de esta surgencia frente a las precipitaciones de los días anteriores.

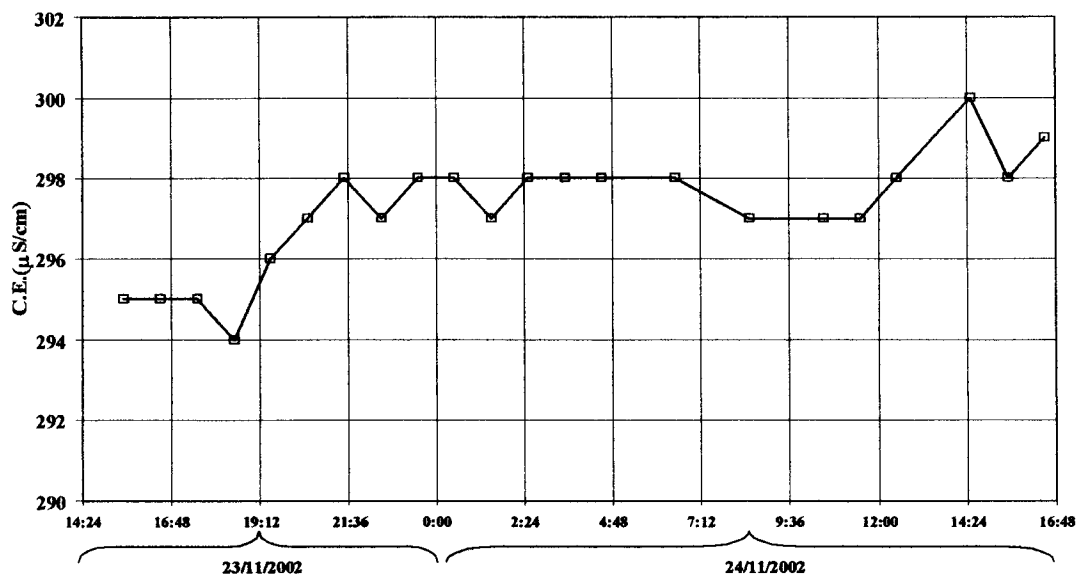


Figura 64. Evolución de la conductividad del agua drenada por el manantial de Benaoján durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

Durante este período el agua drenada por esta surgencia presenta una conductividad entre 295 $\mu\text{S/cm}$, en las primeras horas de muestreo del día 23, y de 299 $\mu\text{S/cm}$, al final del período de observación (Fig. 64). Tal como se pone de manifiesto en la figura 62 el muestreo corresponde a un periodo de “estabilidad hidroquímica” dentro de un proceso de descenso de la mineralización, por lo que con este muestreo horario no se observa ningún proceso de dilución por mezcla del agua subterránea con el agua de lluvia, menos mineralizada.

La evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico (TAC, Ca^{2+} y Mg^{2+}) muestran una evolución paralela a la conductividad, al igual que los cloruros y $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 65). Por tanto, se trata de aguas características de una importante respuesta hidrodinámica en las que no se vería reflejada ninguna respuesta hidroquímica.

Un análisis de la evolución de la conductividad eléctrica para todo el período de estudio (Fig. 62) pone de manifiesto que cualquier otro período seleccionado durante la crecida del manantial, para llevar a cabo un muestreo horario, hubiera aportado mayor información sobre el comportamiento hidrogeológico de este sistema acuífero.

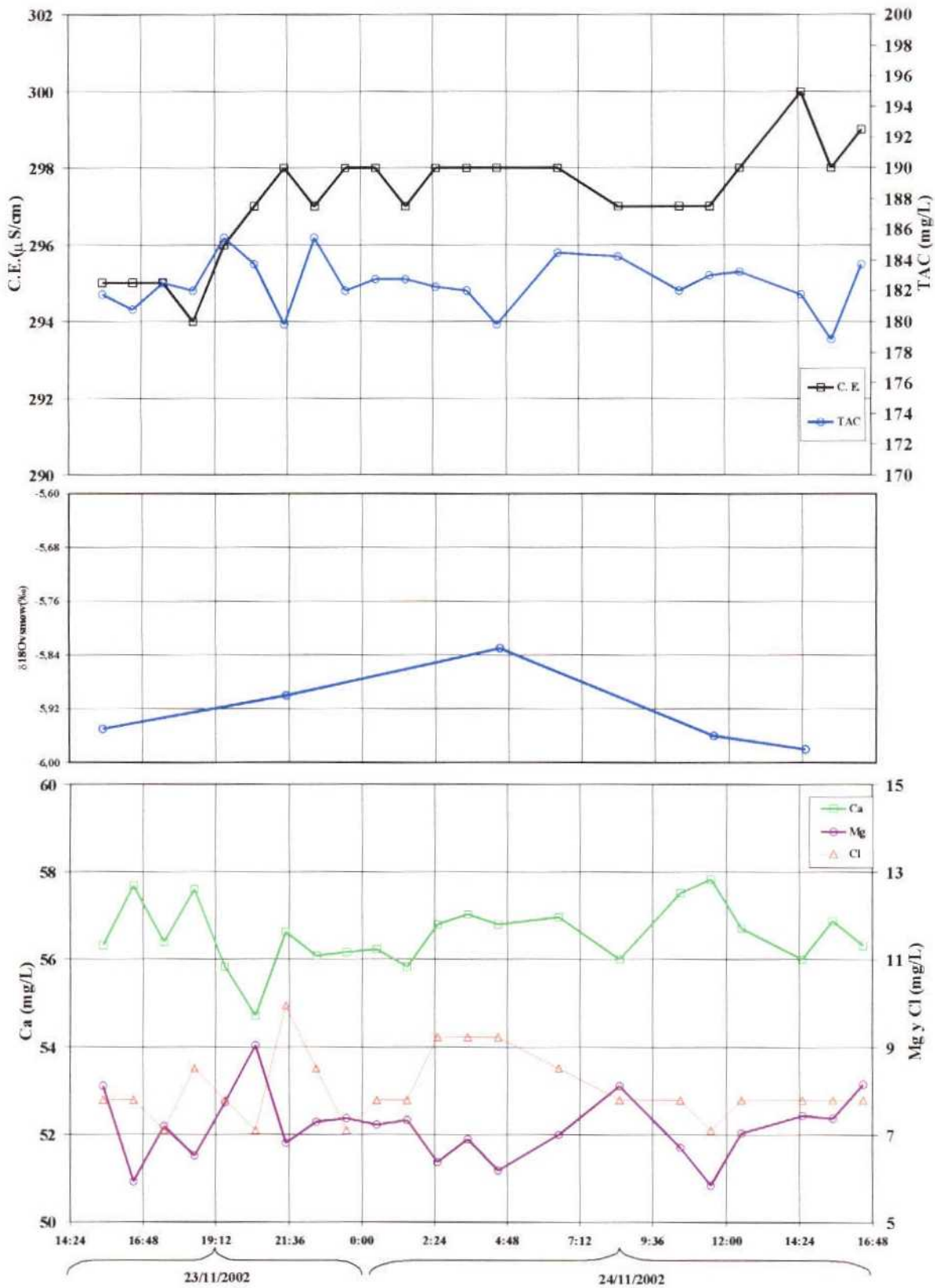


Figura 65. Evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico, de los cloruros, $\delta^{18}\text{O}$ y de la conductividad del agua drenada por el manantial de Benaoján durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

5. EL SISTEMA DE LAS NIEVES

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

El sistema acuífero de la Sierra de las Nieves (Fig. 66), con una superficie aproximada de 100 km², constituye el extremo occidental de una de las Unidades Hidrogeológicas más importantes de la provincia de Málaga: la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves, que se ubica en el interior de un enclave natural de primera importancia, declarado Parque Natural y Reserva de la Biosfera de la UNESCO.

El sistema acuífero toma su nombre del macizo más elevado de la zona, la Sierra de las Nieves, con picos que superan los 1.700 m de altitud, entre los que destaca el vértice Torrecilla (1.919 m), el más alto de la provincia de Málaga.

Desde el punto de vista geológico, el sistema acuífero está formado por materiales dolomíticos y calizos de edad triásica y liásica, pertenecientes a la Unidad de las Nieves (Dürr, 1967), cuya potencia supera en algunos sectores los 1.200 m. Dicha Unidad está situada en el sector occidental de la Cordillera Bética, al frente de la Zona Interna. La estructura geológica corresponde a un sinclinal tumbado, vergente al NW.

Desde el punto de vista geomorfológico, en la Sierra de las Nieves existen abundantes formas exokársticas de absorción como dolinas (especialmente en el sector central, cerca del vértice Torrecilla), polje (Llanos de la Nava) y lapiaz. A menudo, estas formas exokársticas están conectadas con formas endokársticas (simas) de gran desarrollo vertical (Delannoy y Guendon., 1987; Delannoy, 1998), como la sima G.E.S.M., la más profunda del Sur de la península Ibérica, con -1.101 m explorados hasta el momento (Sociedad Excursionista de Málaga, 1990).

El sistema acuífero está limitado, al norte, por el contacto de cabalgamiento entre la Unidad de las Nieves y materiales del flysch del Campo de Gibraltar, que constituyen el sustrato del acuífero carbonático. Al sur, está limitado por el cabalgamiento que pone en contacto los materiales acuíferos con materiales alpujárrides de baja permeabilidad (fundamentalmente peridotitas, metapelitas y gneises de la Unidad de los Reales). Al este, queda limitado por el sistema de fallas de dirección N130E, que discurren entre las poblaciones de Tolox y Yunquera. El límite oeste lo constituye el estrechamiento de la unidad tectónica de las Nieves a la altura de la

población de Cartajima, sector en el que los materiales acuíferos pierden continuidad por la existencia de una serie de fracturas transversales y por el cabalgamiento de materiales alpujárrides de baja permeabilidad (Liñan *et al.*, 2001).

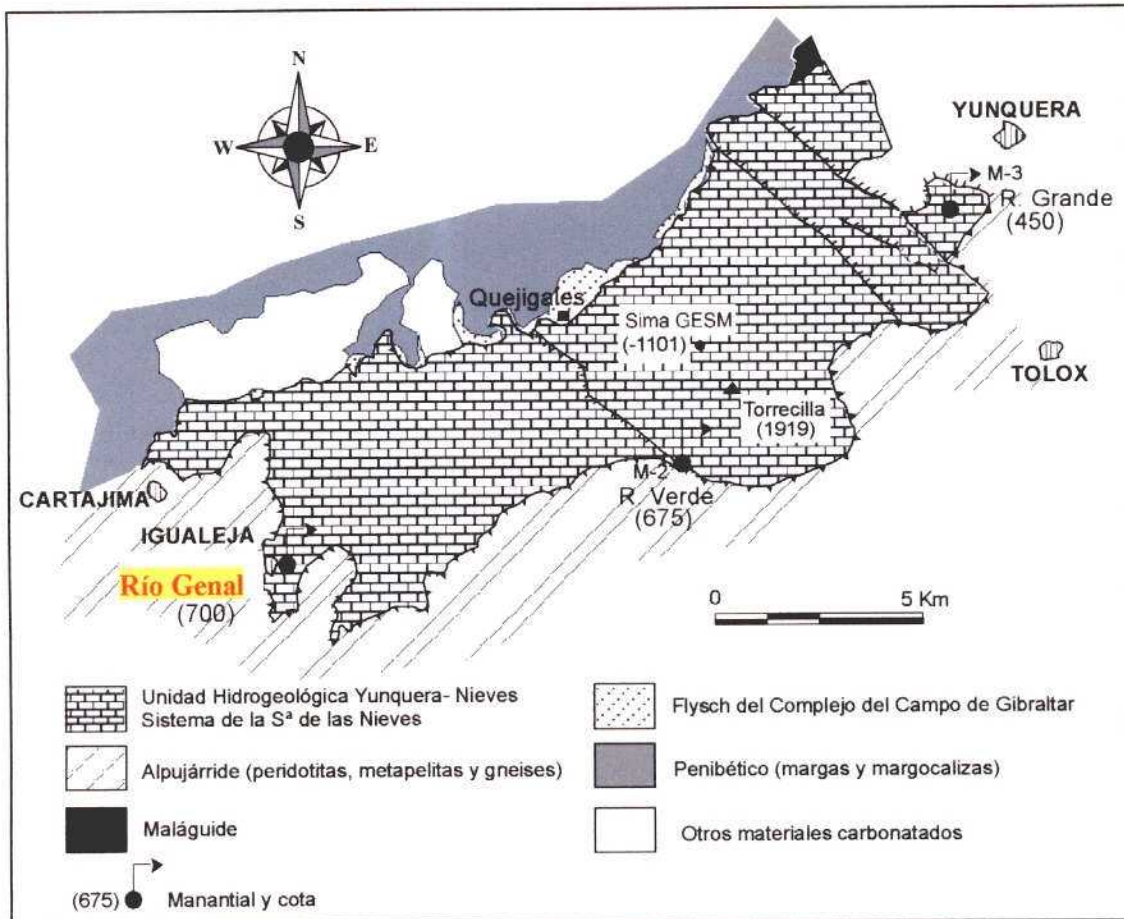


Figura 66. El sistema de la Sierra de las Nieves (tomada de Liñan *et al.*, 2001)

La recarga del sistema se produce por infiltración del agua de lluvia y, ocasionalmente, de nieve. La descarga se realiza, fundamentalmente, a través de tres manantiales: Río Grande, Río Verde y Río Genal. El primero, con un caudal medio de unos 625 L/s, surge en el extremo NE del sistema, a cota 450 m s.n.m., ligado a una importante fractura plurikilométrica de dirección NW-SE. La surgencia de Río Verde, a cota 675 m s.n.m. y con un caudal medio de 550 L/s, se localiza en el borde meridional, en el contacto con las peridotitas alpujárrides y está ligado a otra importante fractura plurikilométrica de dirección NW-SE, la falla de las Turquillas. El nacimiento de Río

Genal, con un caudal medio de 380 L/s, se localiza en el extremo SW del sistema, a una cota de 700 m s.n.m. (Fig. 66).

5.2. EL MANANTIAL DEL RÍO GENAL

Está situado en el límite suroccidental del sistema de las Nieves, a una cota de 700 m s.n.m. Se trata de una surgencia que suele registrar, en un mismo año hidrológico, una crecida importante, además de otras crecidas de menor entidad (Liñan *et al.*, 2001). Las crecidas son rápidas y de forma puntiaguda (Fig. 67), con caudales máximos superiores a 4 m³/s. Además, existe una clara relación entre los eventos lluviosos registrados y el aumento de caudal en el manantial, proporcional a la magnitud de la precipitación, y que se produce el mismo día o un día después de la caída de una lluvia, lo que evidencia una infiltración rápida del agua de precipitación (Liñan *et al.*, 2001). Esta infiltración rápida del agua de lluvia origina claros descensos en los valores de conductividad eléctrica. Estos descensos son de menor magnitud que los producidos en otras surgencias del sistema.

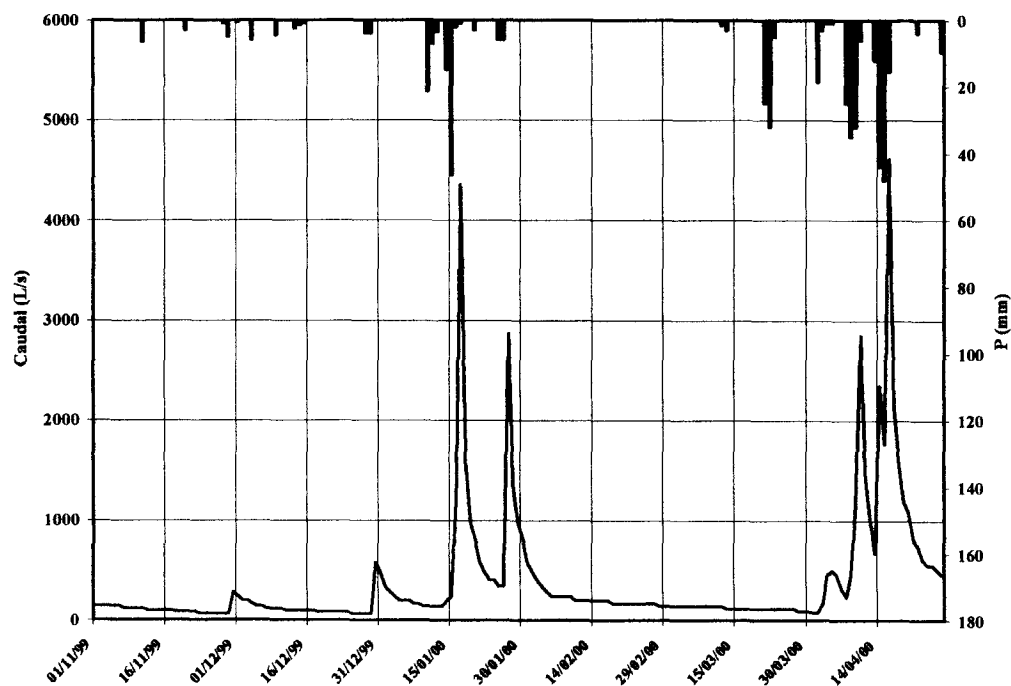


Figura 67. Hidrograma del manantial del río Genal (GHUMA y CHSE)

5.2.1. Análisis de la lluvia y del caudal del manantial

Los datos de precipitación en el sector de las Nieves corresponden a los registrados en la estación pluviométrica de Cartajima y han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Sur de España.

Durante el periodo de estudio se diferencian dos eventos pluviométricos importantes (Fig. 68), el primero de ellos tuvo lugar principalmente durante los días 13, 14 y 15 de Noviembre (75 mm), mientras que el segundo, con un valor total de precipitación de aproximado de 120 mm, se distribuyó entre los días 17 y 25 de Noviembre.

En cuanto a la composición isotópica del agua de lluvia se observa que las primeras lluvias del año hidrológico (21/11/2002) y de escasa precipitación total, presentan un mayor contenido isotópico ($\delta^{18}\text{O} = -3,70$), a diferencia de las aguas correspondientes a lluvias continuadas, más ligeras ($\delta^{18}\text{O} = -6,74$).

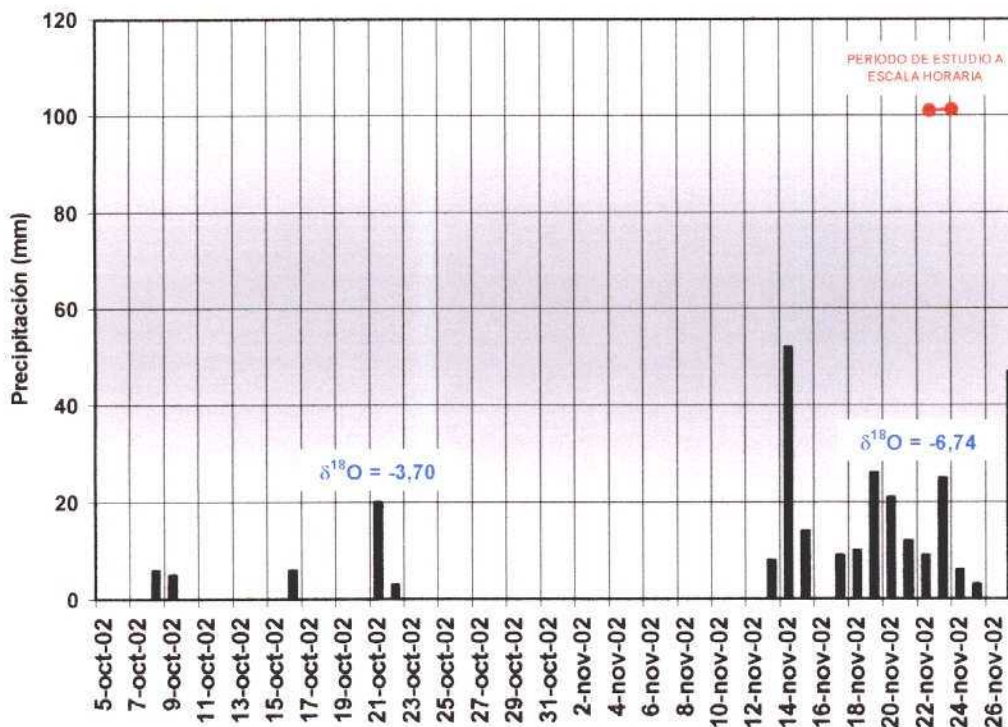


Figura 68. Evolución temporal de las precipitaciones junto con el contenido en $\delta^{18}\text{O}$ durante el periodo de estudio en la estación de Cartajima (Sierra de las Nieves, Provincia de Málaga).

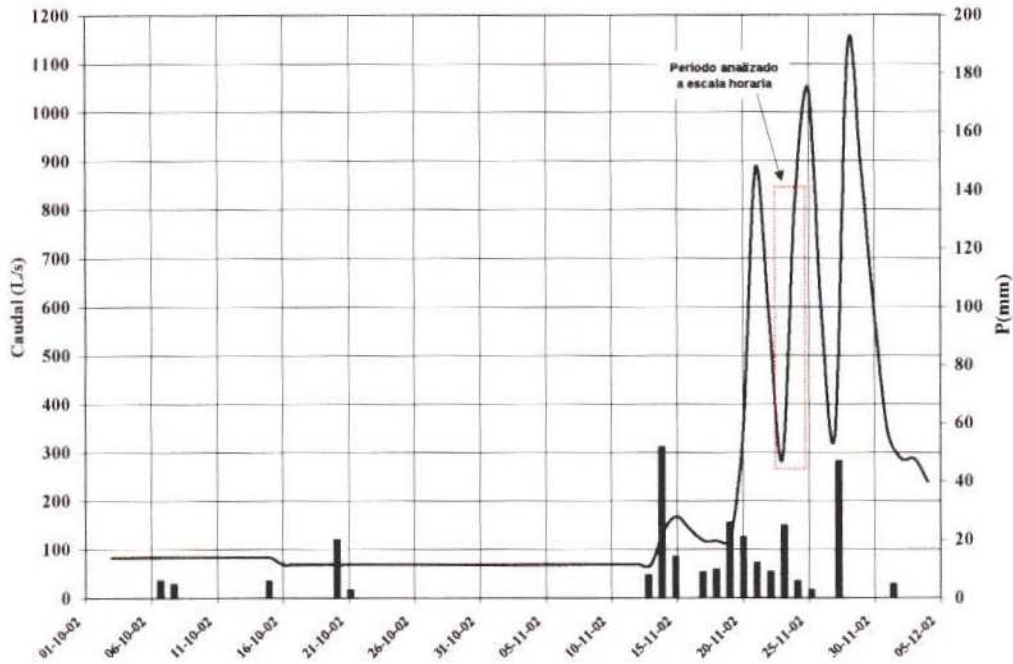


Figura 69. Evolución del caudal del manantial del río Genal y de las lluvias en la estación de Cartajima durante todo el período de estudio. Datos de precipitación proporcionados por la CHSE

En cuanto a los datos de caudal (Fig. 69) se pone de manifiesto que las primeras precipitaciones del año hidrológico no producen aumentos de caudal en la surgencia. No obstante, las importantes precipitaciones de noviembre de 2002 producen un rápido aumento de caudal (menos de 1 día de desfase). Además resaltar que, al igual para el manantial de Benaoján, tanto el periodo de estudio a escala diaria como el periodo de estudio a escala horaria se engloba en un contexto de una importante crecida hidrodinámica del manantial.

5.2.2. Caracterización de la respuesta hidroquímica del manantial del río Genal

Durante este estudio, en el manantial del río Genal se han realizado muestreos, a paso de tiempo diario (Anexo 10), entre el 3 de Octubre y el 4 de Diciembre de 2002 para determinar la variación hidroquímica de sus aguas y poder así estudiar su evolución temporal con respecto a una importante variación de caudal producida durante una crecida. Además se dispone de muestras horarias para determinación de la composición química durante los días 23 y 24 de Noviembre (Anexo 11), que

corresponden a los últimos días de un importante período de precipitaciones en las áreas de recarga del sistema acuífero.

Evolución del quimismo del agua durante el período de estudio

El agua drenada por el manantial del río Genal durante el período de estudio presenta una conductividad diaria aproximada comprendido entre 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$, al final del estiaje, y de 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$, casi al final del período de estudio (Fig. 70).

Al igual que para los dos surgencias estudiadas anteriormente, la evolución temporal de este parámetro refleja una disminución continuada en los valores de la conductividad eléctrica del agua asociada a un importante episodio lluvioso, lo que pone de manifiesto nuevamente un aumento progresivo del volumen de agua de infiltración rápida que se mezcla con las reservas de agua almacenada en el acuífero.

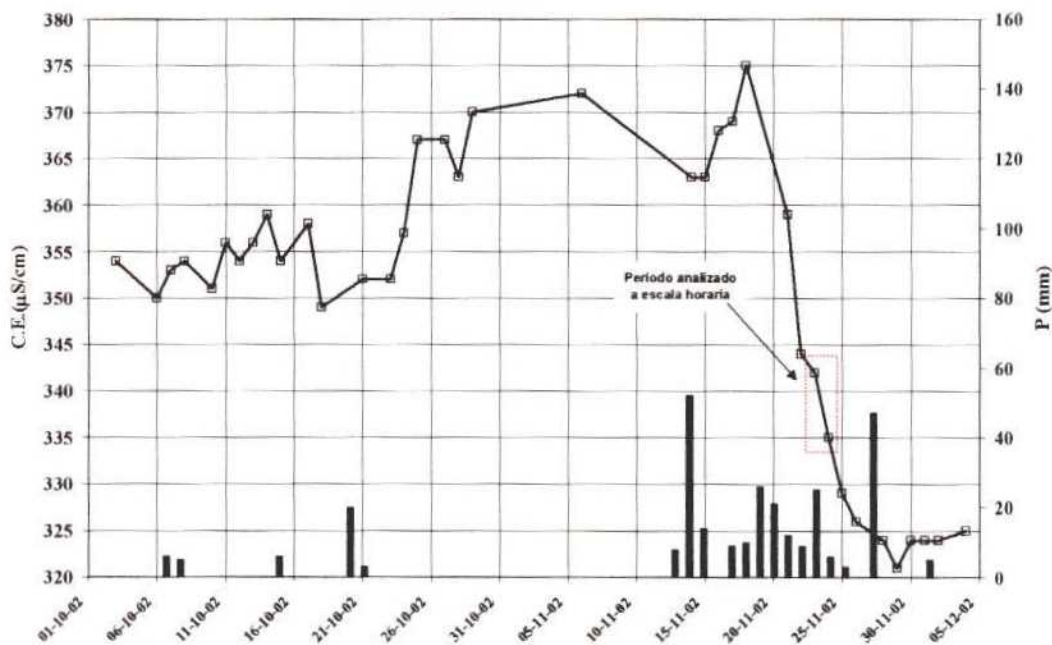


Figura 70. Evolución de la conductividad eléctrica del agua drenada por el manantial del río Genal durante todo el período de estudio

El hecho de que la dilución se produzca en poco tiempo, y ésta sea del orden del 15%, indica que el volumen de agua de precipitación que se mezcla con la de la zona saturada transita de manera muy rápida. Aunque la primera respuesta hidroquímica frente a las precipitaciones consiste en descargar las aguas más mineralizadas (Fig. 70) que al igual que para el manantial de Benaoján, se puede atribuir a un efecto pistón. Este efecto pistón se produce con un pequeño aumento de caudal, mientras que las tres crecidas consecutivas del caudal origina un descenso continuo en la mineralización del agua drenada por la surgencia.

El estudio de los parámetros químicos analizados para todo el muestreo diario (Fig. 71) pone de manifiesto una evolución paralela de la conductividad eléctrica, TAC y Ca^{2+} , mientras que tanto el Mg^{2+} como los cloruros no presentan variaciones importantes durante dicho período. Por tanto, la mineralización de las aguas es debida fundamentalmente a la disolución de los carbonatos. Así, la evolución de los diferentes parámetros fisico-químicos junto con el hecho de que volumen de agua de precipitación que se mezcla con la de la zona saturada circule de manera rápida confirma la existencia de un importante grado de karstificación funcional.

El análisis isotópico pone de manifiesto que las escasas lluvias de finales de octubre ($\delta^{18}\text{O} = -3.70$) produce una clara respuesta isotópica en las aguas drenadas por el manantial a los 15 días de producirse este evento pluviométrico (Fig. 71). Además, al igual que para el manantial de Benaoján, tanto las aguas características del efecto pistón como las drenadas durante los primeros días de la decrecida hidroquímica muestran menores contenidos isotópicos (Fig. 71). En este caso, aunque no tenemos información isotópica sobre el importante evento pluviométrico del día 14/11/2002, los valores isotópicos más negativos registrados en las aguas del manantial parecen reflejar dicha respuesta tan solo a los 2 días de producirse este periodo lluvioso, lo que pone de manifiesto un rápido tránsito del agua de infiltración a través de la zona no saturada del acuífero. Posteriormente, durante la crecida hidrodinámica hay un aumento en la composición isotópica de las aguas drenadas por el manantial en consonancia con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del periodo lluvioso que produce la recarga principal del acuífero.

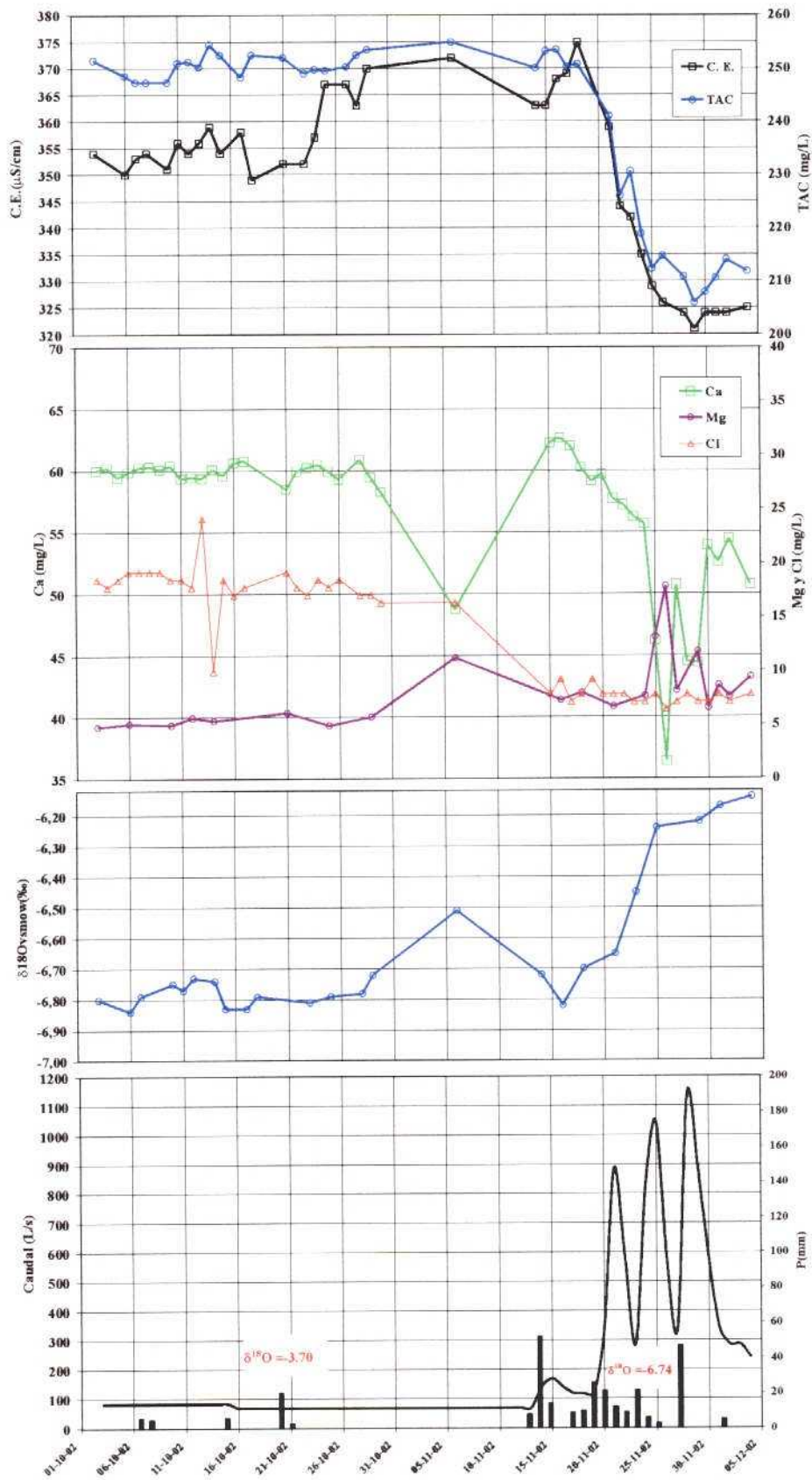


Figura 71. Evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico, cloruros, $\delta^{18}O$, conductividad eléctrica y caudal drenado por el manantial del río Genal

5.2.3. Análisis de la respuesta hidroquímica correspondiente a la crecida durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002.

En la figura 72 se expone la evolución, a escala horaria, de la conductividad eléctrica en el manantial del río Genal durante los días 23 y 24 de Noviembre, con objeto de mostrar la respuesta de esta surgencia frente a las precipitaciones de los días anteriores.

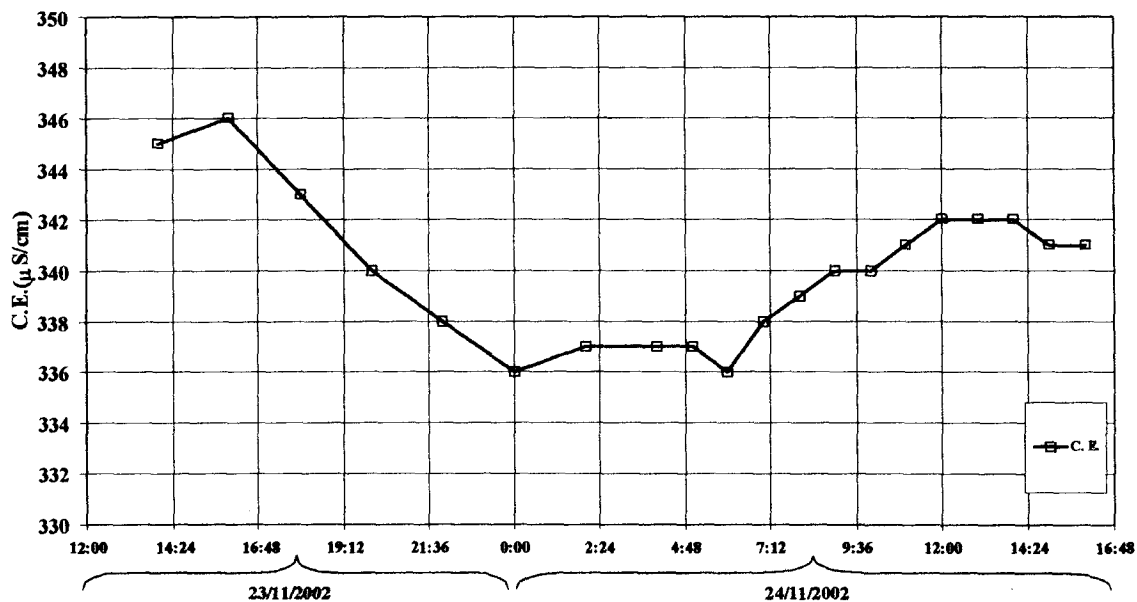


Figura 72. Evolución de la conductividad del agua drenada por el manantial del río Genal durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

Durante este período el agua drenada por esta surgencia presenta una conductividad variable entre 345 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en las primeras horas de muestreo del día 23, y de 336 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a la mitad del período de observación (Fig. 72). Así, tras las precipitaciones producidas durante los días anteriores se observa una pequeña dilución por mezcla del agua subterránea con el agua de lluvia, menos mineralizada. Posteriormente, se observa una clara estabilización en los valores de conductividad eléctrica, lo que pone de manifiesto que el volumen de agua de lluvia que se mezcla con el agua subterránea es constante durante este período. Además, la tendencia ligeramente ascendente de la conductividad eléctrica que se produce tras este último período refleja el papel de las reservas existentes dentro de esta parte del acuífero.

La conductividad eléctrica y la TAC muestran una evolución paralela (Fig. 73) poniendo de manifiesto que es esta última la responsable de la mineralización de las aguas, ya que el resto de componentes químicos analizados, sobre todo los cloruros, no presentan variaciones importantes durante dicho período.

Un análisis más detallado tanto del caudal drenado por la surgencia como de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico permite diferenciar tres tramos:

- Un primer tramo, caracterizado por una pequeña subida de caudal, durante la cual disminuyen de manera paralela tanto la conductividad eléctrica como los parámetros característicos del sistema calcocarbónico (TAC y Ca^{2+}), lo que pone de manifiesto una importante influencia del volumen de agua de infiltración rápida que se mezcla con la de la zona saturada. Además, durante este periodo tiene lugar un aumento de la concentración isotópica del agua de la surgencia.

- Un tramo intermedio, en el que el caudal y los parámetros hidroquímicos e isotópicos se mantienen prácticamente constantes.

- Un tercer tramo ligeramente ascendente de la conductividad eléctrica, asociado a un importante subida de caudal, caracterizado por un aumento de la TAC y Ca^{2+} y un valor prácticamente constante en cuanto al contenido isotópico. En este caso se trataría de aguas características de la zona saturada escasamente influenciadas por aguas de infiltración rápida.

En resumen, este análisis horario se revela como poco representativo, ya que todo el análisis se enmarca dentro de un contexto de descenso generalizado de la conductividad eléctrica, TAC y Ca^{2+} .

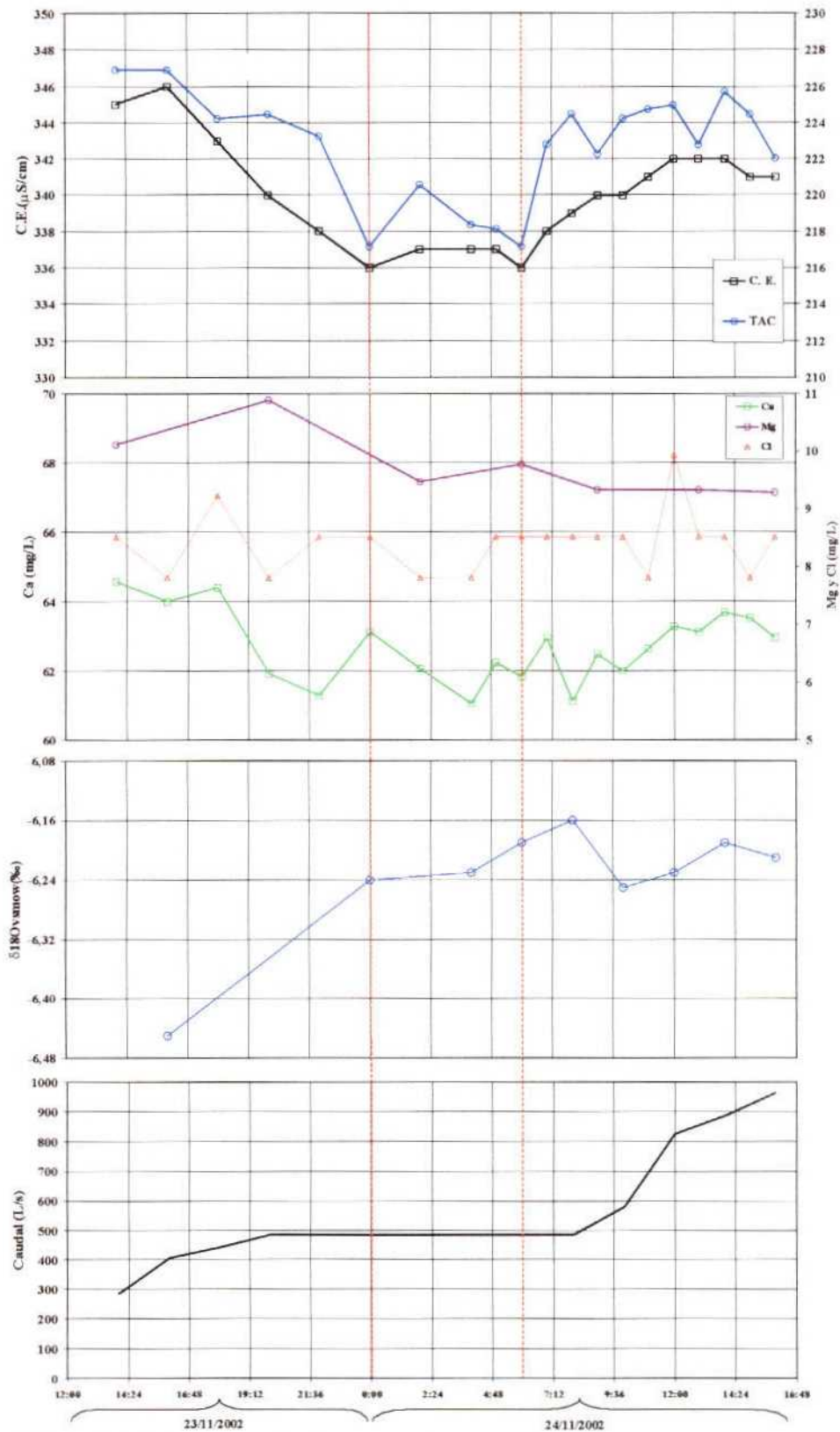


Figura 73. Evolución de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico, cloruros, $\delta^{18}\text{O}$, conductividad del agua y caudal drenada por el manantial del río Genal durante los días 23 y 24 de Noviembre de 2002

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los trabajos realizados y los resultados obtenidos en base al control de las respuestas hidrodinámica, hidroquímica e isotópica, durante un mismo periodo de crecida, de los manantiales más importantes de tres sistemas acuíferos carbonáticos del Sur de España, se ha llegado a las siguientes consideraciones:

El análisis a escala diaria indica que las tres surgencias presentan un comportamiento hidrodinámico e hidroquímico típicamente kárstico frente a las precipitaciones. Este hecho se pone de manifiesto por las importantes variaciones de caudal, que en los casos de las surgencias de Benaoján y Genal se muestran como varias crecidas consecutivas, acompañados de claros procesos de dilución continua. Esta dilución es mucho más acusada para las aguas drenadas por el manantial de Maro, lo que se traduce en que el volumen proporcional de agua procedente de una infiltración rápida que se mezcla con la de la zona saturada es mucho mayor para el caso de esta surgencia en comparación con las surgencias de Benaoján y Genal. Además, el hecho de que esta dilución se produzca de manera rápida en las tres surgencias refleja que el agua de infiltración transita a una elevada velocidad, poniendo de manifiesto la existencia de un importante grado de karstificación funcional en los sistemas acuíferos. Hay que destacar que en los manantiales de Benaoján y Genal, la dilución va precedida de un efecto pistón, apareciendo en las surgencias aguas más mineralizadas.

El análisis hidroquímico a escala horaria de las aguas drenadas por las surgencias de Maro y Genal pone de manifiesto procesos de dilución y de aumento de la mineralización dentro de un contexto de dilución hidroquímica a escala diaria, lo que permite diferenciar aguas con mayor o menor tiempo de residencia dentro del acuífero. Sin embargo, en el manantial de Benaoján, la respuesta hidroquímica a escala horaria en el periodo muestreado no presenta variaciones, aún cuando existe una importante respuesta hidrodinámica. No obstante, muy probablemente cualquier otro período seleccionado durante la crecida de este manantial, para llevar a cabo el muestreo horario, hubiera aportado mayor información.

La evolución de los parámetros químicos analizados para todo el muestreo horario pone de manifiesto que la mineralización de las aguas del manantial de Maro

esta controlado por la variación de la concentración de sulfato cálcico, mientras que la mineralización de las aguas drenadas por Benaoján y Genal dependen fundamentalmente de la disolución de los carbonatos.

A nivel isotópico se ha observado que las crecidas hidrodinámicas que suponen una disminución en la mineralización de las aguas drenadas, originan paralelamente un descenso en la composición isotópica de las mismas.

Reseñar que en el contexto de este estudio se pone de manifiesto que los muestreos diarios han proporcionado mayor información que los realizados a escala horaria.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha caracterizado el funcionamiento hidrogeológico de diferentes acuíferos carbonáticos del Sur de España a partir de las series de caudales diarios de los manantiales que los drenan.

Los acuíferos investigados, situados en el sector occidental de la Cordillera Bética, presentan diferentes características climáticas, litológicas, geomorfológicas, tectónicas y evolutivas lo que ha provocado diferencias en su karstificación funcional, tal como ponen de manifiesto los diferentes parámetros obtenidos a partir del análisis correlatorio y espectral y de las curvas de recesión (decrecida y agotamiento).

Se ha determinado la existencia de un grupo de acuíferos en los que la recarga y el agotamiento se producen de una manera rápida y presentan, además, importantes diferencias entre los máximos y mínimos caudales drenados. Por todo ello su poder regulador es bajo.

Los acuíferos que se incluyen en el grupo anteriormente indicado pertenecen tanto a macizos meridionales de la Zona Externa de la Cordillera (Sierra de Libar, Torcal de Antequera, Sierras de las Cabras-Camarolos-San Jorge), como a macizos alpujárrides de la Zona Interna (sistema de Ojén, Sierra Blanca).

En estos acuíferos la recarga supone un porcentaje relativamente elevado de la precipitación, tal como se ha puesto de manifiesto en el Volumen I de este estudio. Aunque se puede indicar que la recarga producida tiene diferente respuesta en los manantiales según el periodo del año en el que se origine. Así en la mayoría de los acuíferos los episodios lluviosos aislados, generalmente inferiores a 25 mm/día, no producen incrementos de caudal de las surgencias, mientras que los mismos valores de lluvias producidos durante periodos de precipitaciones altas originan en los manantiales mayores incrementos de caudal o un menor tiempo de respuesta. Por lo que, en general, las precipitaciones en periodos diferentes al invernial suelen tener poca transcendencia en los hidrogramas.

Los acuíferos anteriormente citados se pueden definir como “acuíferos carbonáticos con karstificación funcional”. Dentro de este grupo se podrían incluir,

además de los mencionados, otros acuíferos de la Cordillera Bética como la Sierra de las Nieves, Sierra de Grazalema, Sierra de las Nieves, Sistema meridional de Sierra Almajara, Sierras situadas al Este de Ronda (Blanquilla. Merinos) y algunos sectores de la Sierra de Segura.

No obstante, a la vista de los resultados obtenidos, dentro de este grupo existen algunas diferencias; en efecto, todos los acuíferos no presentan igual comportamiento, especialmente en lo que se refiere al efecto memoria o a su capacidad de regulación. Este parámetro es bajo en algunos acuíferos (Sierra de Líbar) que se pueden clasificar como “acuíferos carbonáticos con elevada karstificación funcional” y notablemente mayor en otros, (Torcal de Antequera, Sierra de las Cabras-Camarolos-San Jorge) por lo que se puede identificar un segundo subgrupo de “acuíferos carbonáticos con moderada karstificación funcional”, como se ha establecido en el Volumen I de este estudio.

Existe otro grupo de acuíferos carbonáticos en los que el grado de karstificación funcional y la jerarquización de los conductos son bajas y cuyos ejemplos tipo serían los de Sierra de las Cabras y Sierra de Mijas. En estos acuíferos la recarga y el agotamiento se producen de forma lenta de lo que se deduce que su poder regulador es elevado. Todas estas características son propias de acuíferos con flujo difuso característico de un comportamiento de “acuífero carbonático fisurado con escasa karstificación funcional”.

Este tercer tipo de acuíferos suelen tener una recarga inferior (en porcentaje de la precipitación) a los indicados con anterioridad y suele ser del orden de la tercera parte de las precipitaciones. En este grupo se podrían también incluir, entre otros, los acuíferos de Sierra de María, de la Sierra Cañete y de Sierra Arana.

Con objeto de poder asignar un determinado acuífero carbonático a uno de los grupos antes indicados se han elegido unos parámetros fáciles de obtener y que generalmente son conocidos en los manantiales más representativos que drenan los diferentes acuíferos. Los parámetros que se consideran de mayor interés, después de diferentes ensayos, son la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ y el coeficiente de agotamiento de los manantiales que los drenan (α). Al representar los datos correspondientes a los manantiales estudiados en unos ejes de coordenadas logarítmicas se obtienen unos campos que permiten diferenciar y clasificar los diferentes acuíferos. Por ello, se

propone este diagrama $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}} - \alpha$ como método de clasificación de los acuíferos carbonáticos en uno de los tipos básicos establecidos.

Una vez realizada la caracterización y clasificación de los acuíferos carbonáticos se han elegido tres acuíferos, incluidos en el grupo de “acuíferos carbonáticos con elevada karstificación funcional” para estudiar la respuesta hidroquímica e hidrodinámica en sus manantiales más representativos y conocer el grado de organización del drenaje kárstico.

Se han muestreado a nivel diario y horario los tres manantiales durante un mismo periodo de lluvias que originó importantes crecidas hidrodinámicas. A nivel diario se pone de manifiesto que los incrementos de caudal originan diluciones y variaciones en la composición isotópica de las aguas debido al elevado grado de karstificación funcional. Generalmente al comienzo de la crecida se produce un efecto pistón, de manera que las aguas de recarga empujan a las aguas almacenadas en el acuífero y por ello más mineralizadas.

A veces, durante la crecida se pueden originar variaciones de caudal que producen picos en el hidrograma, debido a la entrada en funcionamiento de drenes que aportan mayor cantidad de agua a la surgencia, tal como es de esperar por la heterogeneidad característica de estos acuíferos.

De la misma forma, durante la crecida hidrodinámica se producen diluciones de las aguas del manantial debido a la mezcla del agua de lluvia, escasamente mineralizada, con el agua almacenada en el acuífero. Se ha comprobado que el porcentaje de dilución en los acuíferos investigados es variable, en función del grado de desarrollo de los conductos kársticos, tanto en la zona no saturada como en la zona saturada.

A escala horaria se pone de manifiesto la heterogeneidad del karst y así, a pesar de corresponder el muestreo a un periodo relativamente pequeño (entre uno y dos días) y dentro de una crecida importante del caudal de los manantiales con descenso generalizado de la mineralización, se ha podido comprobar la existencia de procesos de

dilución y de aumento de la mineralización en función del porcentaje de mezcla de las aguas de recarga, con una infiltración rápida, y las aguas almacenadas en el acuífero.

El análisis isotópico ($\delta^{18}\text{O}$) a nivel diario de las aguas drenadas por las tres surgencias analizadas ha puesto de manifiesto que paralelamente a la decrecida hidroquímica se drenaban aguas con contenidos isotópicos menos negativos. Además, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ han permitido vislumbrar claras correlaciones entre los eventos pluviométricos y las respuestas en los contenidos en isótopos estables de los manantiales, permitiendo así estimar tiempos de tránsito de las aguas de lluvia a través de la zona no saturada del acuífero y pudiendo evaluar la mayor o menor importancia de estas aguas en la recarga principal del acuífero.

Hay que resaltar que en el contexto de este estudio, y tanto en el marco hidroquímico como isotópico, los muestreos diarios han proporcionado mayor información que los realizados a escala horaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreo, B. (1997): Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas. SPUMA-CHS, Málaga, 489 p.
- Andreo B., Carrasco F. y Sanz de Galdeano C. (1993): Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En F. Carrasco (ed) Trabajos sobre la Cueva de Nerja nº 3, 25-50.
- Andreo B. y Carrasco F. (1993): Estudio hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja. En F. Carrasco (ed) Trabajos sobre la Cueva de Nerja nº 3, 163-187.
- Andreo, B.; Carrasco, F.; Jiménez, P. and Vadillo I. (2000): A comparative study of two carbonate aquifers in Southern Spain. International Symposium on present state and future trends of karst studies, Marmaris (Turquía), in press.
- Antigüedad, I. (1986): Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizábal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos. Tesis Doct. Univ. País Vasco, 338 p. y anexos.
- Bakalowicz, M. (1979): Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse Doct. Sci. Nat., Univ. P. et M. Curie, París-VI, Géol. Dyn. et Lab. Souterrain CNRS; 269 p.
- Carrasco F., Andreo B., Liñán C. y Vadillo I. (1996): Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del entorno de la Cueva de Nerja (provincia de Málaga). Jornadas sobre Recursos Hídricos en regiones kársticas, Vitoria, 249-263.
- Carrasco, F.; Jiménez, P.; Andreo, B.; López Chicano, M.; Marín, A.; Liñán, C. y Vadillo, I. (2001): Estudio comparativo preliminar del funcionamiento hidrogeológico de varios acuíferos carbonatados de la Cordillera Bética. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, 23: 381-391.
- Carreras, A. (1996): Investigación y explotación del acuífero de la Sierra de las Cabras (S. José del Valle, Cádiz). Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas, Vitoria, 9-21.
- Castillo, A. y Carmona, J. (2000): Reconocimiento hidrogeológico de la Sierra de la Almirajara meridional (Málaga). Geotemas 1 (2), 63-68.
- Chauve, P (1960-62): Structure Géologique de la Région Centrale de la Province de Cadix (Espagne). Memories hors de série de la Societe Geologique de France.
- Delannoy, J.J. (1998): Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las Serranías de Grazalema y de Ronda. El Karst en Andalucía, p. 93-129; Instituto Tecnológico Geominero de España; Madrid.
- Delannoy, J. y Díaz del Olmo (1987): La Serranía de Grazalema (Málaga-Cádiz). Karstologia Mémoires, 1 :55-70
- Delannoy, J. y Guendon, J.L. (1987): La Sierra de las Nieves (Málaga). La Sima GESM. Etude géomorphologique et spéléologique. 52 Karstologia Memoires, 1, 71-85.
- Diputación Provincial de Málaga (1988): Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga.
- Dürr, S.H. (1967). Geologie der Sierra de Ronda und ihrer Südwestlichen Ausläufer (Andalusien). Tesis Univ. Bonn, 122 p. (Publ. Geologica Romana, 6, 73 p.).
- Fernández Rubio, R. et al. (1981): Bosquejo hidrogeológico de tres sistemas acuíferos kársticos al Norte de Ronda (Málaga). SIAGA, 2, 643-658.
- IGME (1983): Sistema acuífero nº 41, calizas y dolomías triásicas de la Sierra Almirajara-Sierra de Lújar : Informe técnico nº 10.

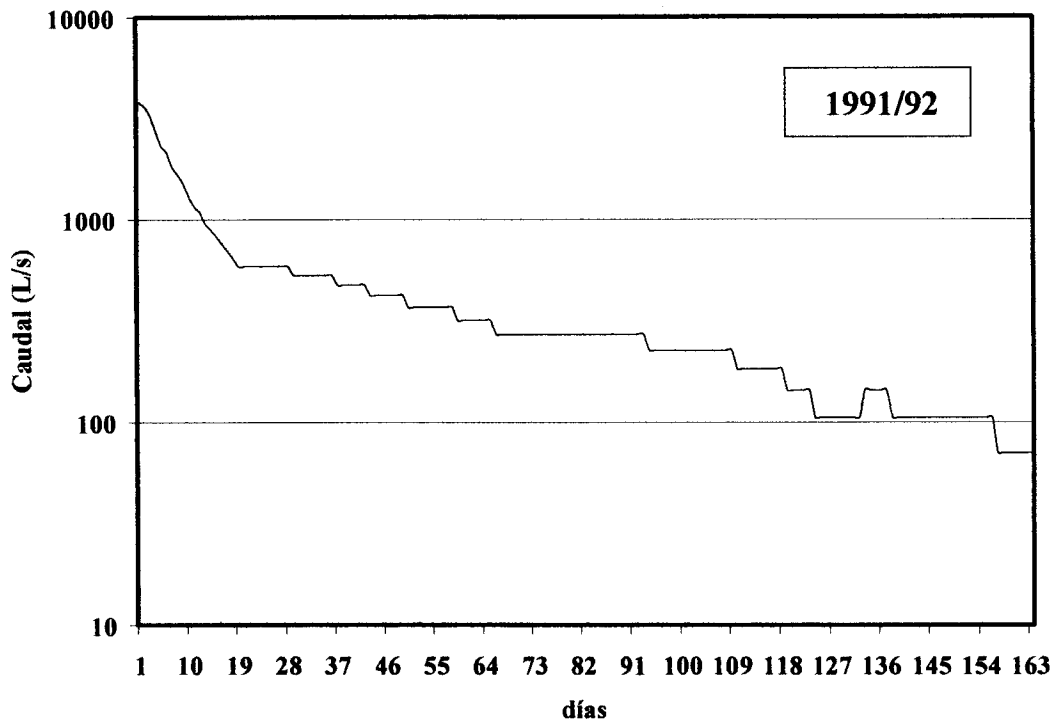
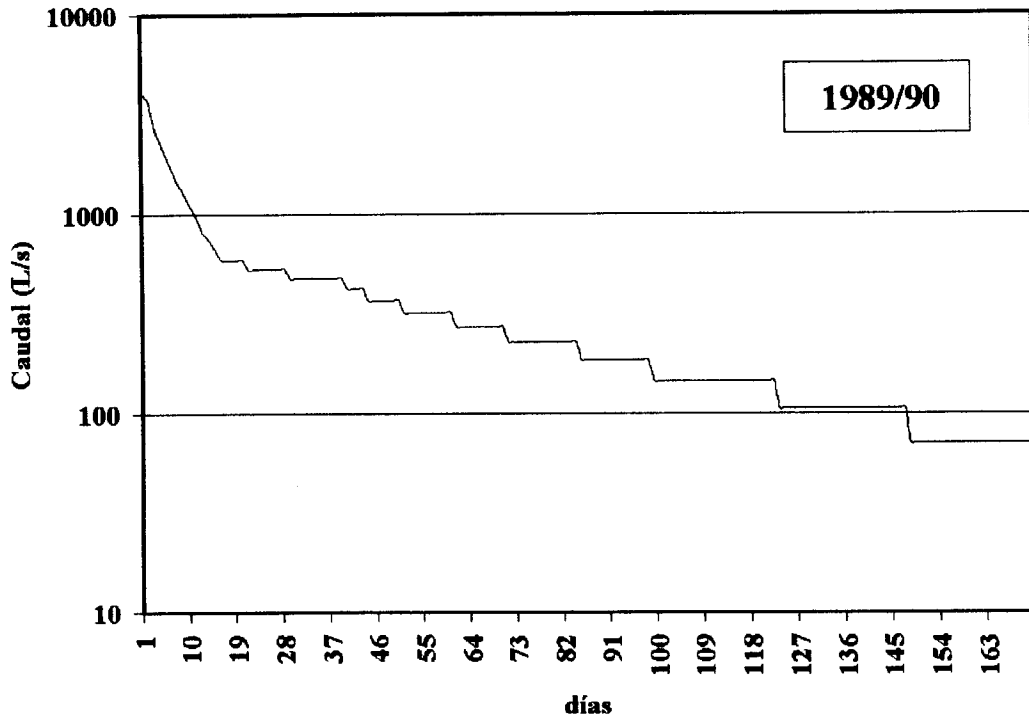
- ITGE (1990): Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 1063. Algar. Madrid.
- ITGE (1996): Funcionamiento hidrodinámico y regulación hidrogeológica del manantial de El Tempul (Cuenca del Guadalquivir, Cádiz). Informe realizado por IDRENA.
- ITGE-Junta de Andalucía (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía. 216 p.
- Jiménez, P. (2002): Caracterización de la descarga del sector nororiental de la Sierra de Líbar. Memoria de Investigación Cursos de Doctorado, Universidad de Granada 102 p. Inédito.
- Jiménez, P. et al. (2001): Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España). Boletín Geológico y Minero, Vol.112, nº2: 85-102 pp.
- Liñán, C., Andreo, B. y Carrasco, F. (2000): Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del manantial de Maro (Sierra Almijara, provincia de Málaga). Geogaceta, 27, 95-98.
- Liñán, C.; Carrasco, F. y Andreo, B. (2001): Consideraciones hidrogeológicas sobre el sistema acuífero de la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). V Simposio sobre el Agua en Andalucía, Almería, 2, 63-72.
- Mangin, A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques (I). Thèse Doctorat Sciences Naturelles, Dijon, France. Annales de Spéléologie, 29 (3): 283-332.
- Mangin, A. (1981 a): Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sci. Paris, 293: 401-404.
- Mangin, A. (1981 b): Apports des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sci. Paris, 293: 1011-1014.
- Mangin, A. (1982): L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Reunión Monográfica Karst Larra. 141-157. Diputación Foral de Navarra, Pamplona.
- Mangin, A. y Pulido, A. (1983): Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de acuíferos kársticos. Tecniterrae, 51, 53-65.
- Martín Algarra, A. (1987): Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 1171p.
- Moral, F. (1992): Estudio hidrogeológico de la Unidad del Espino (Sierra de Segura, Jaén). Tesis Lic. Iniv. Granada, 126p
- Padilla, A. (1990): Modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 267 p.
- Pulido Bosch, A. y Mangin, A. (1983): Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de acuíferos kársticos. Tecniterrae, 51, 53-65.
- Pulido, A. (1986): Le karst dans les gypses de Sorbas (Almería): aspects morphologiques et hydrogéologiques. Karstologia Memoires, 1, 27-35.
- Pulido, A., Padilla, A y López Chicano, M. (1987): Análisis de la descarga del Torcal de Antequera mediante deconvolución. Hidrogeología, 2.
- Pulido, A. (1993): The karstic aquifer of the Torcal de Antequera (Málaga). En A. Pulido Bosch, Ed. Some Spanish karstic aquifers, 37-50. Universidad de Granada. Granada.
- Sahuquillo, A.; Estrela, T y Andreu, J. (1987): Análisis de hidrogramas de manantiales kársticos. IV Simposio de Hidrogeología, 317-330.

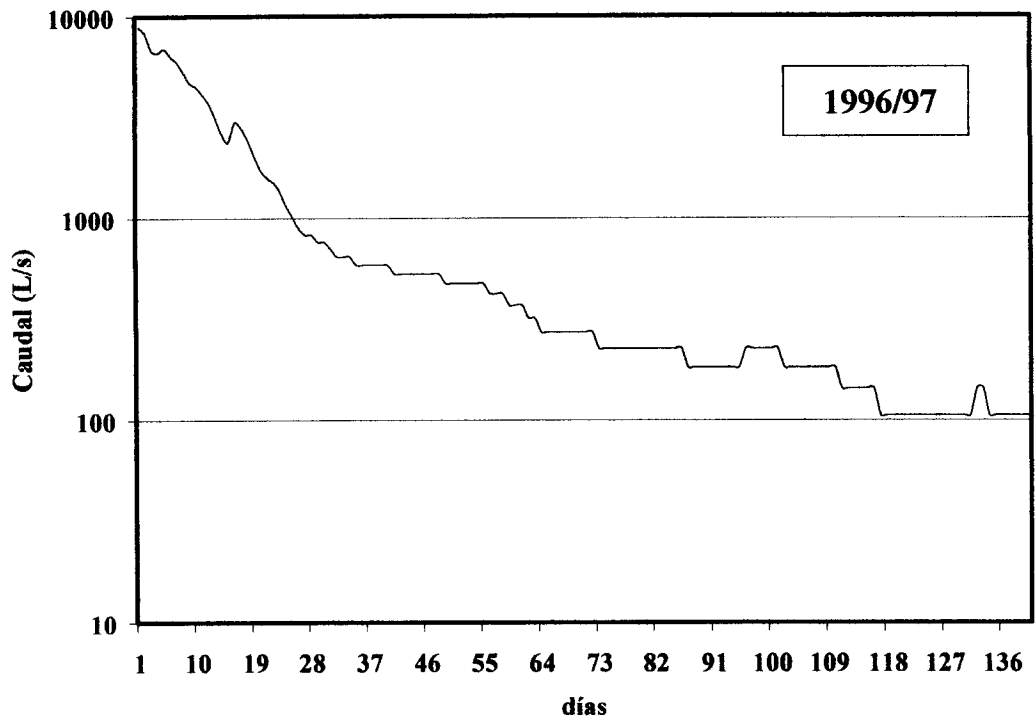
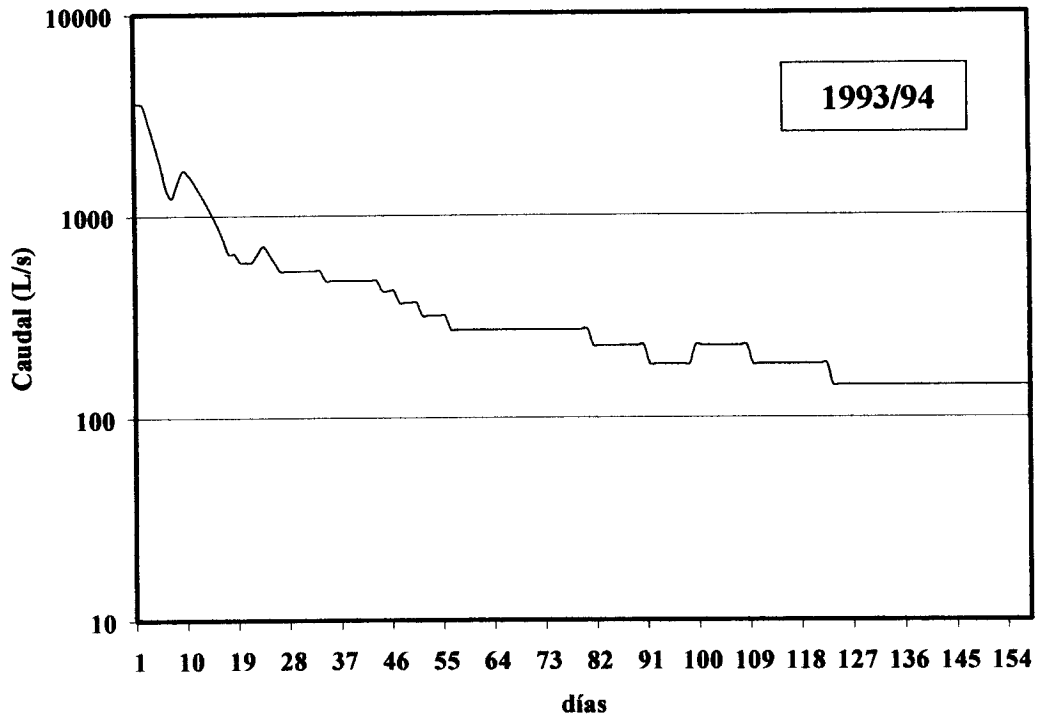
- Sanz de Galdeano, C. (1986): Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almirajara (Zone Alpujarride, Cordillères Bétiques). Estudios geológicos, 42, 281-289.
- Sanz de Galdeano, C. (1989): Estructura de las sierras Tejeda y de Cómpeeta (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). Revista de la Sociedad Geológica de España, 2 (1-2), 77-84.
- Sanz de Galdeano, C. (1990): Estructura y estratigrafía de la Sierra de los Guájares y sectores próximos (Conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). Estudios Geológicos 46, 123-134.
- S.G.O.P. (1991): Estudio hidrogeológico de las Sierras Tejeda, Almirajara y Guájares (Málaga y Granada); 2 tomos.
- Shuster, E.T. y White, W.B. (1971): Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. J. Hydrology, 14: 93-128.
- Sociedad Excursionista de Málaga (1990). Sima GESM 90. Boletín Informativo, nº especial. Málaga.
- Thauvin, J.P (1981): Alimentación y descarga del macizo kárstico del Torcal de Antequera (Málaga). I Simposio del Agua en Andalucía, 379-386.

ANEXOS

ANEXO 1

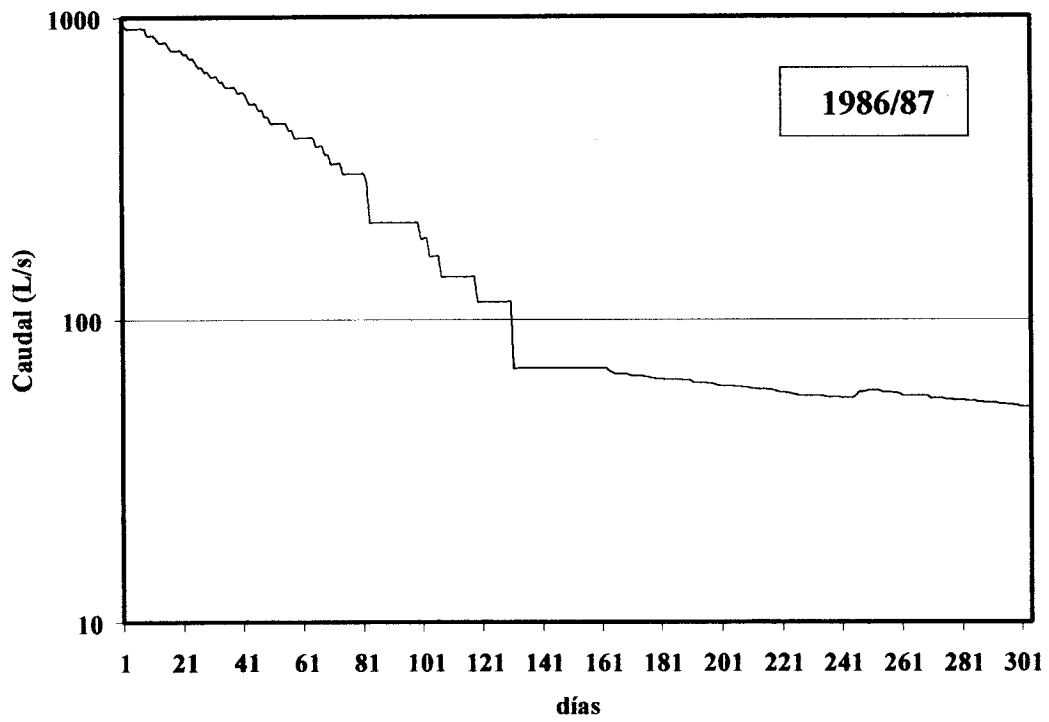
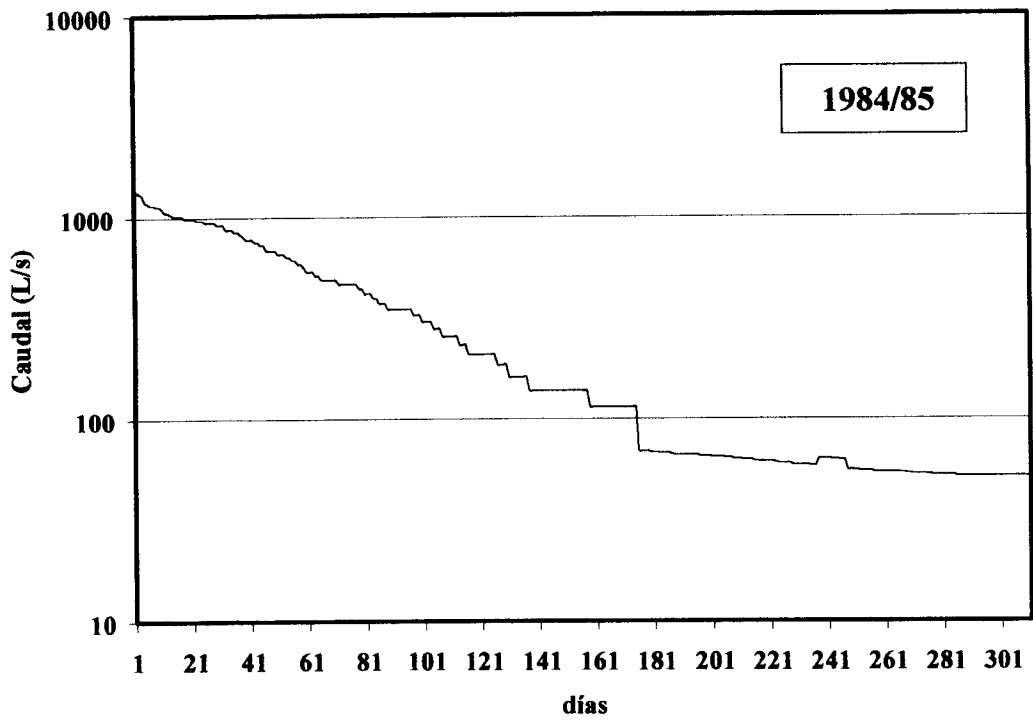
**Hidrogramas analizados de la serie de caudales diarios del manantial
de la Cueva del Gato**

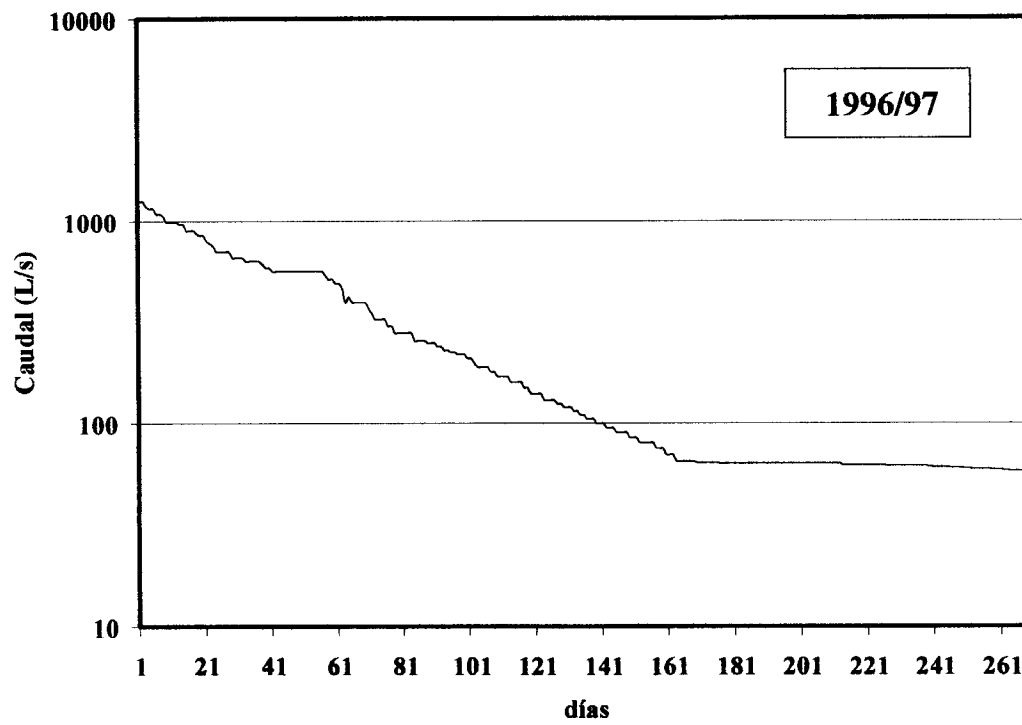
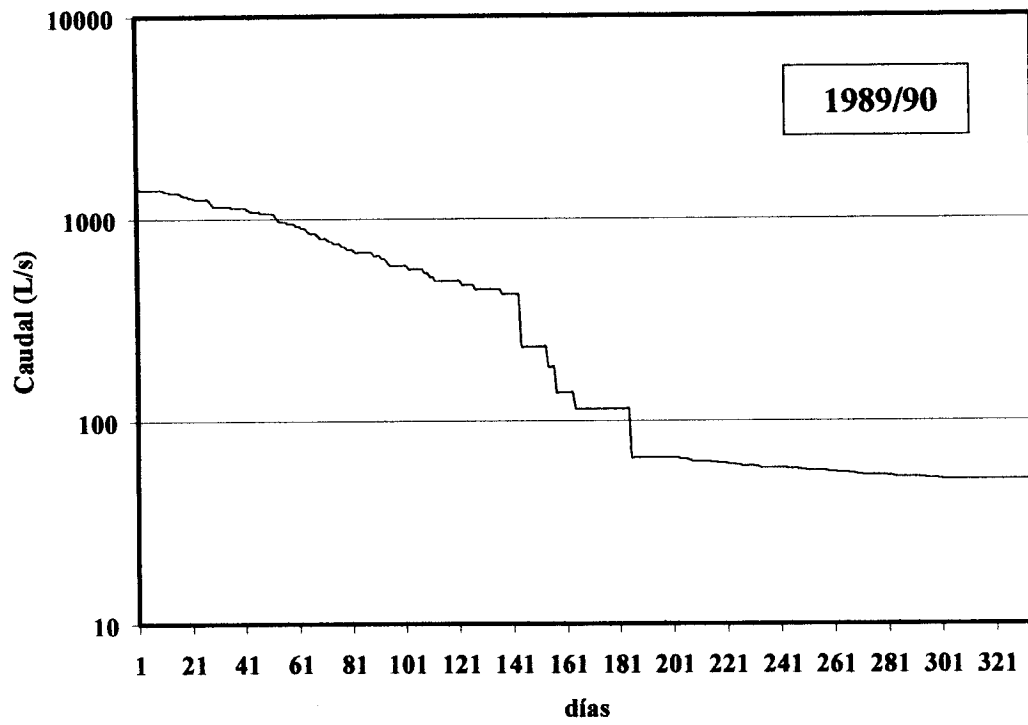


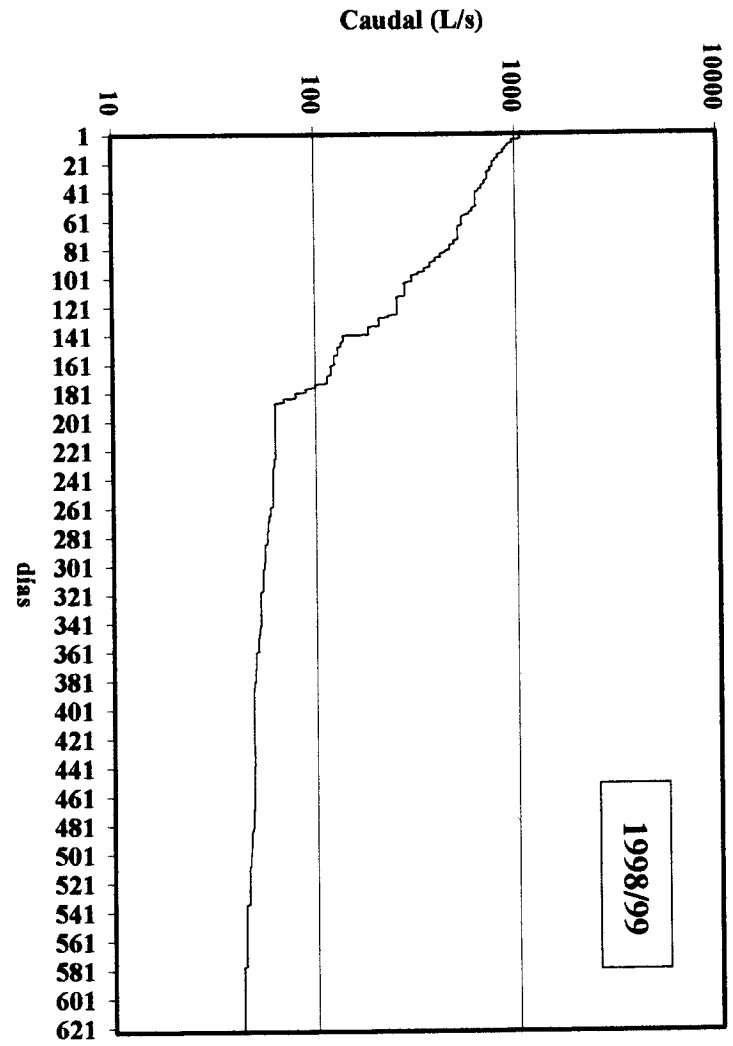


ANEXO 2

**Hidrogramas analizados de la serie de caudales diarios del manantial
de El Tempul**

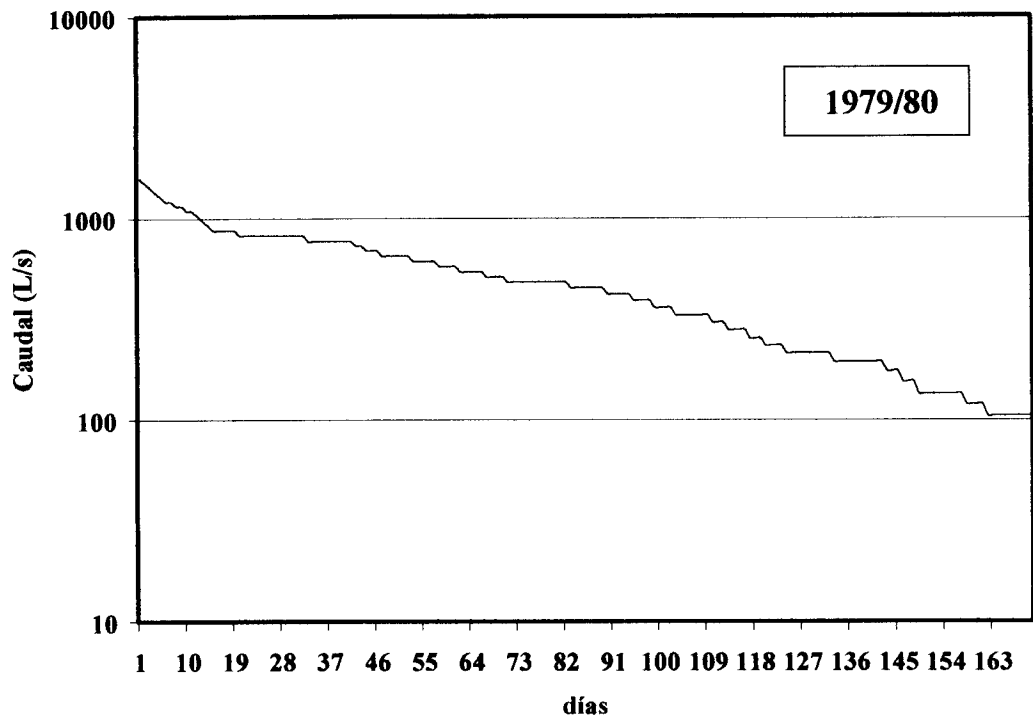
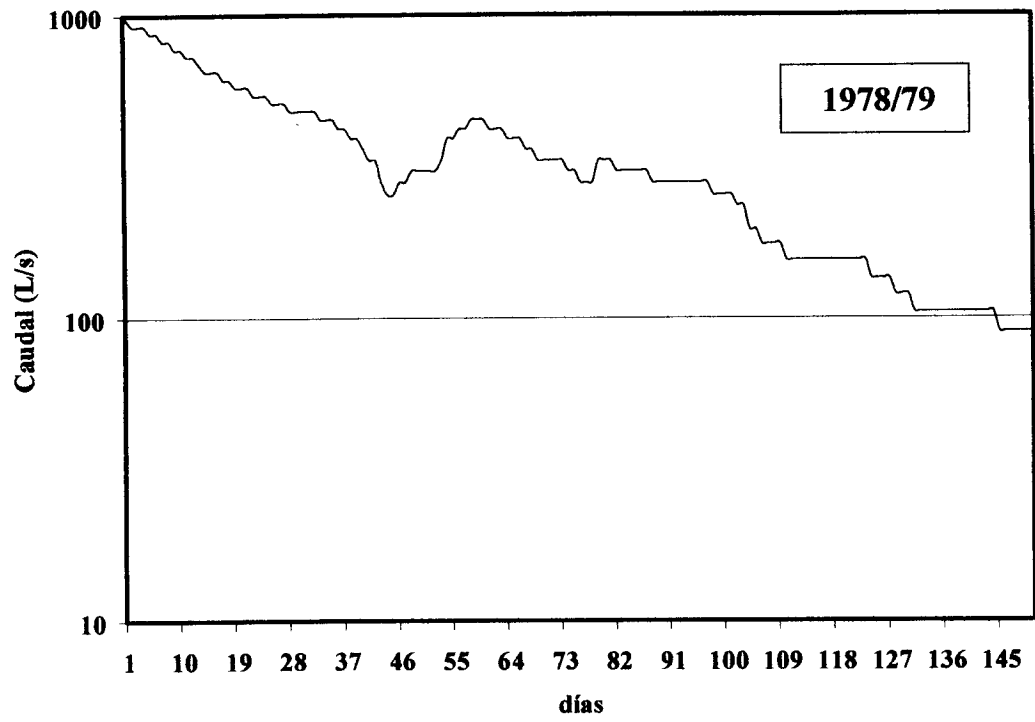






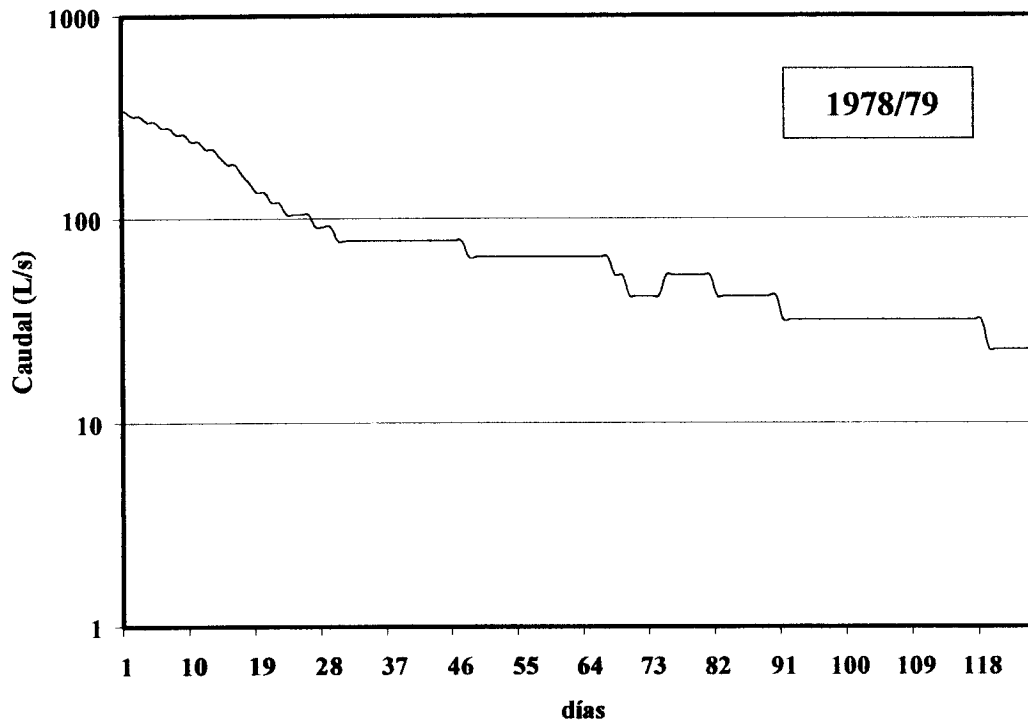
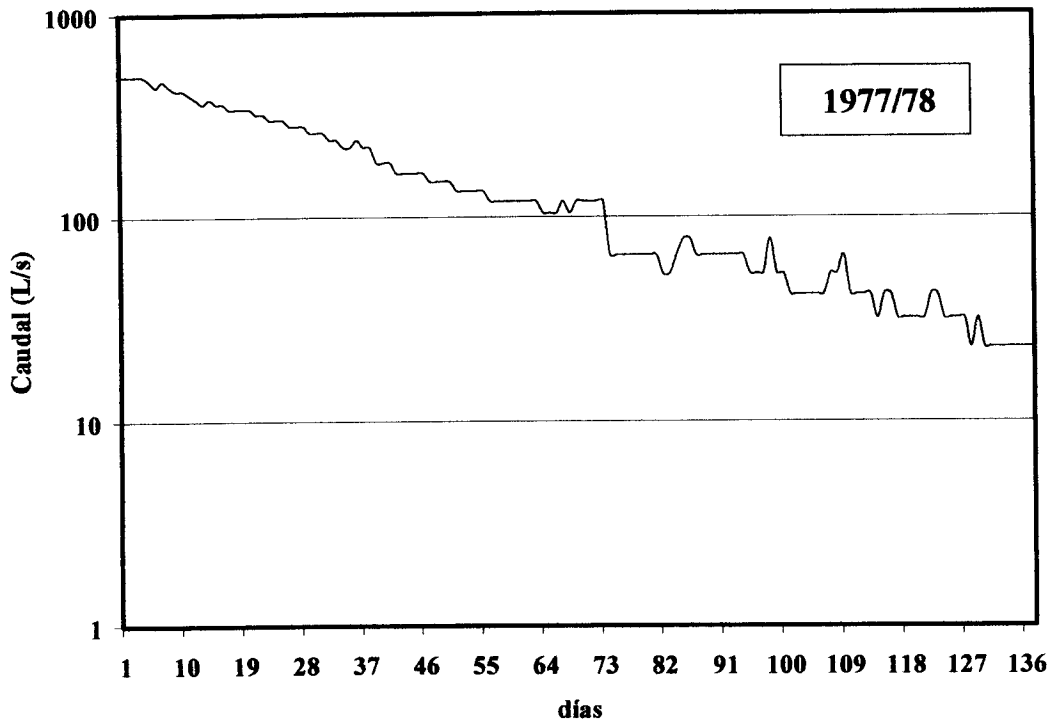
ANEXO 3

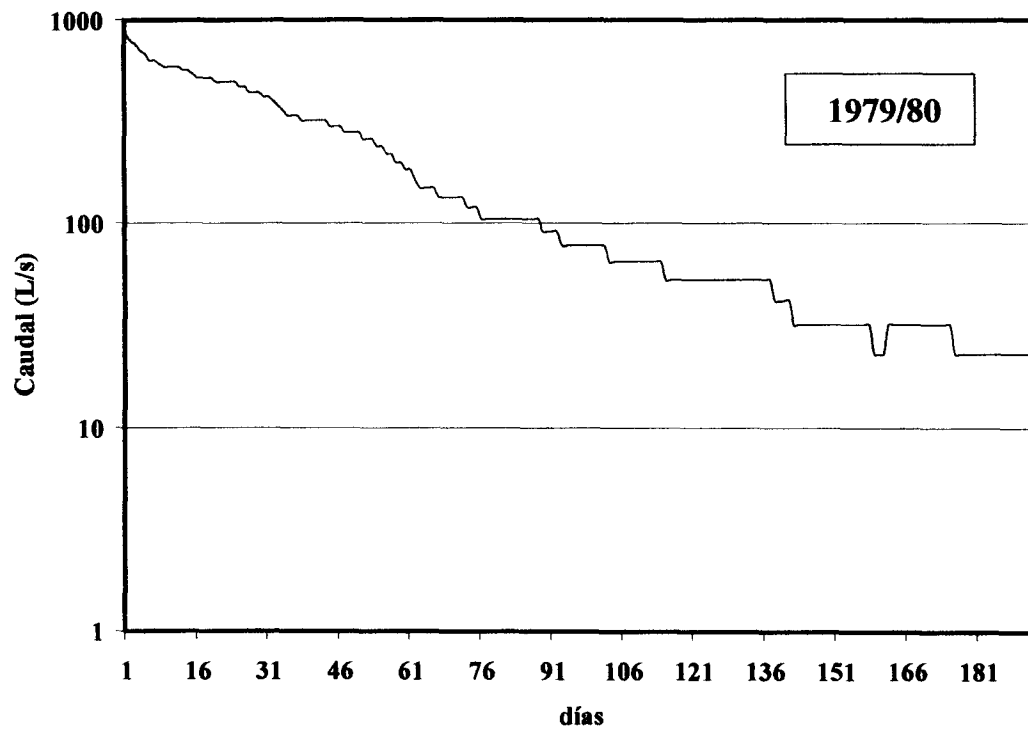
**Hidrogramas analizados de la serie de caudales diarios del manantial
de La Villa**



ANEXO 4

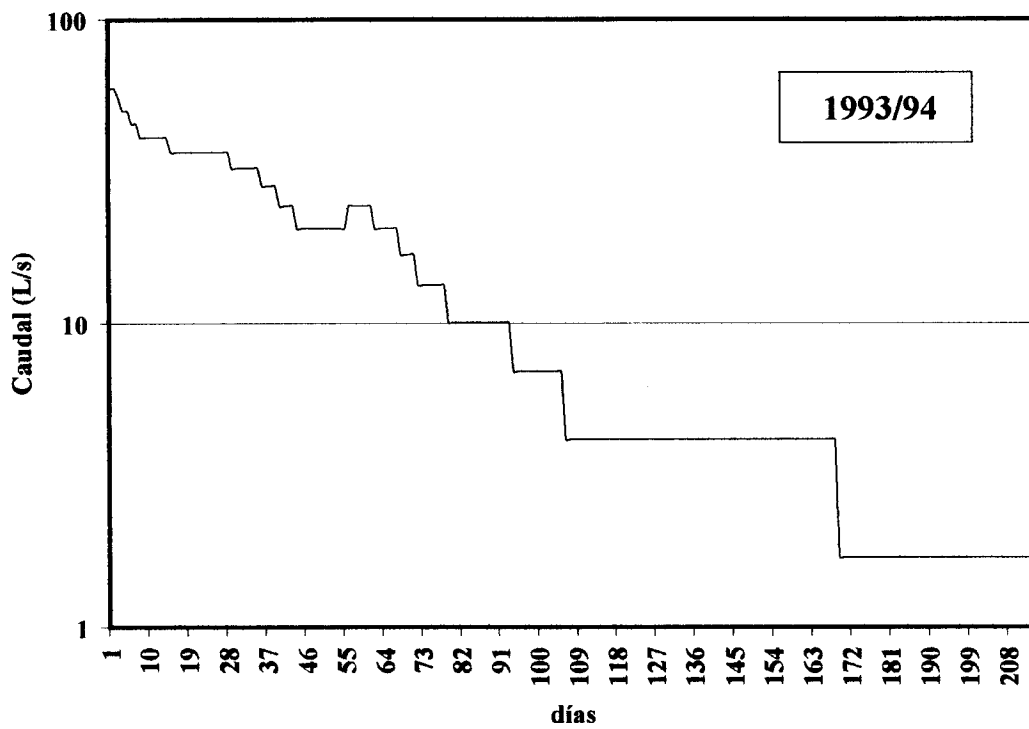
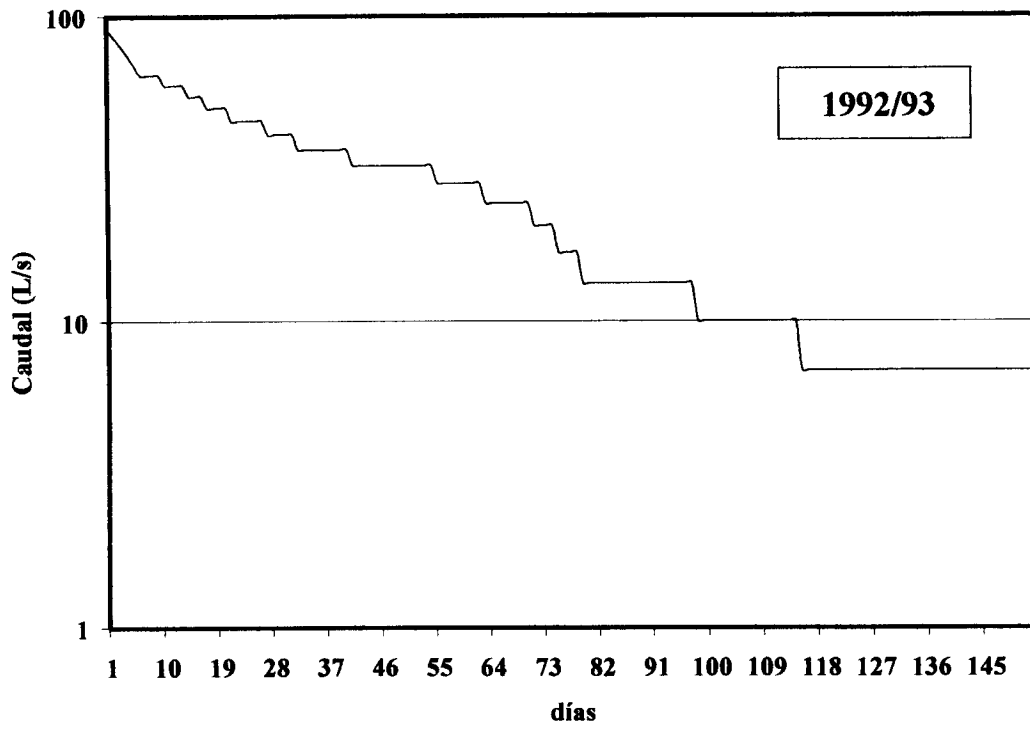
**Hidrogramas analizados de la serie de caudales diarios del manantial
de Villanueva del Rosario**

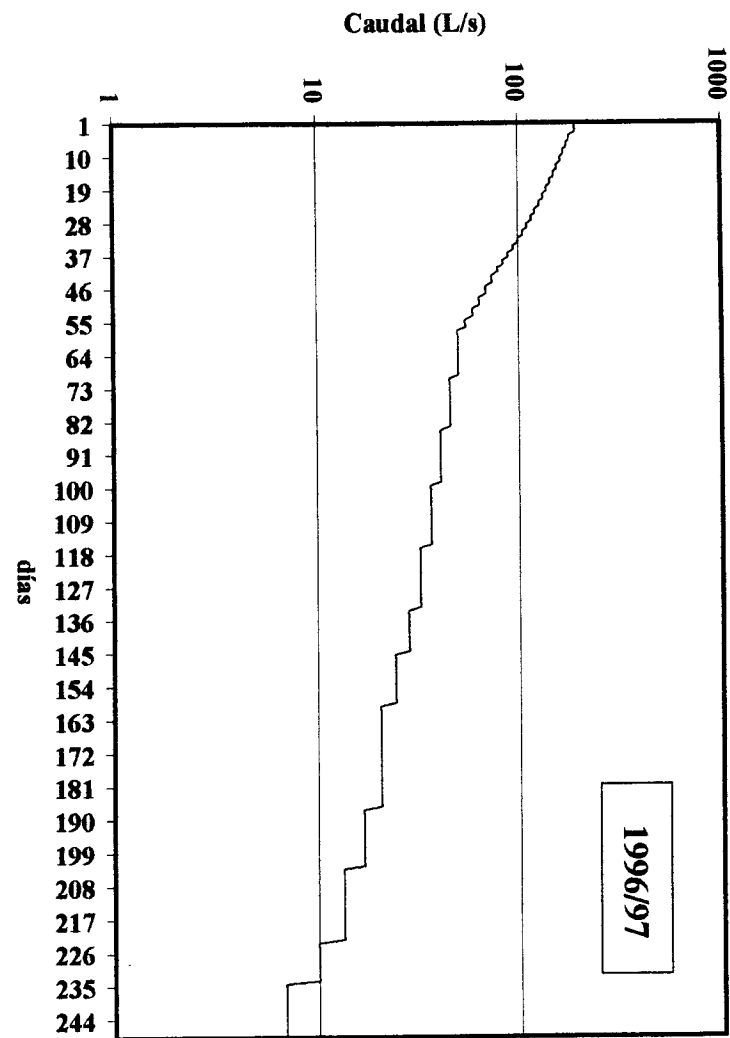




ANEXO 5

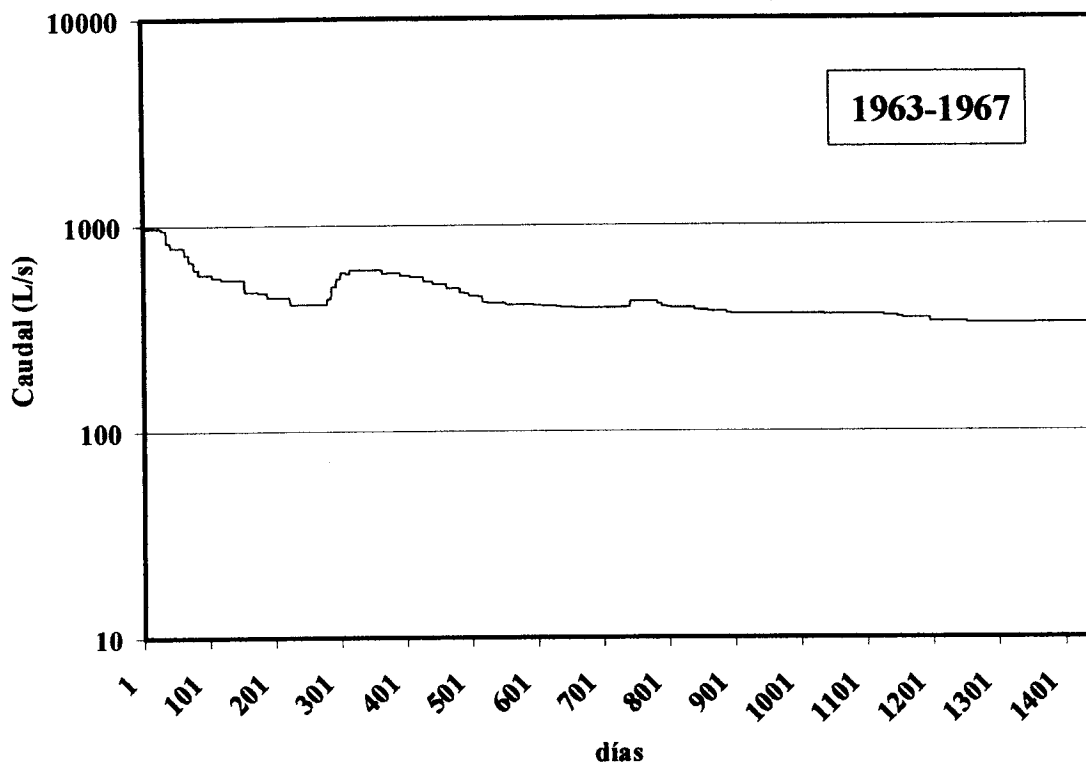
Hidrogramas analizados de la serie de caudales diarios del manantial de Ojén





ANEXO 6

Hidrograma analizado de la serie de caudales diarios de los manantiales de Torremolinos



ANEXO 7

Análisis químicos e isotópicos de las muestras horarias del manantial de Maro

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	δ ¹⁸ O _{vsmow} (‰)
M-1	23-11-02 12:45	589	206	93	25	22	151	-7,19
M-2	23-11-02 13:45	590	205	94	23	22	155	
M-3	23-11-02 14:45	589	205	93	25	21	160	-7,20
M-4	23-11-02 15:45	589	205	93	23	21		
M-5	23-11-02 16:45	589	204	94	22	22	150	-7,11
M-6	23-11-02 17:45	588	203	100	17	21	158	-7,11
M-7	23-11-02 18:45	587	204	99	20	21	153	-7,20
M-8	23-11-02 19:45	586	207	98	20	22		
M-9	23-11-02 20:45	584	206	98	21	22	154	-7,13
M-10	23-11-02 21:45	581	204	97	21	21	153	
M-11	23-11-02 22:45	580	205	95	21	21	142	-7,08
M-12	23-11-02 23:45	578	202	94	21			
M-13	24-11-02 0:45	574	205	93	22	21	151	-7,10
M-14	24-11-02 1:45	572	203	95	19	21	154	-7,20
M-15	24-11-02 2:45	575	203	93	23	21	150	-7,20
M-16	24-11-02 3:45	582	205	92	23	21	148	-7,21
M-17	24-11-02 4:45	586	207	92	26	21	151	-7,30
M-18	24-11-02 6:45	583	208	92	24	21	146	-7,19
M-19	24-11-02 7:45	577	209	90	23	21	138	-7,19
M-20	24-11-02 8:45	567	212	90	23	21	137	-7,05
M-21	24-11-02 9:45	560	211	88	26	20	130	-7,03
M-22	24-11-02 10:45	554	214	87	23	21	133	
M-23	24-11-02 11:45	551	204	86	24	21	128	-7,10
M-24	24-11-02 12:45	548	207	86	25	20		
M-25	24-11-02 13:45	545	206	85	24	20	131	-7,08
M-26	24-11-02 14:45	542	207	84	23	19		
M-27	24-11-02 15:45	540	207	85	23	18	127	-7,04
M-28	24-11-02 16:45	538	208	86	22	19	127	
M-29	24-11-02 17:45	534	205	85	21	19	122	-7,04
M-30	24-11-02 18:45	532	202	85	23	19		

ANEXO 8

Análisis químicos e isotópicos de las muestras diarias del manantial de Benaoján

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ (‰)
BEN-1	3-oct-02	328	188	60	5	18	-5,89
BEN-2	4-oct-02	328	183	60		18	
BEN-3	5-oct-02	328	183	59		18	
BEN-4	6-oct-02	328	184	60	5	19	
BEN-5	7-oct-02	327	184	60		19	-5,78
BEN-6	8-oct-02	329	182	60		19	
BEN-7	9-oct-02	328	183	60		19	
BEN-8	10-oct-02	329	181	60	5	18	-5,80
BEN-9	11-oct-02	327	183	59		18	
BEN-10	12-oct-02	326	187	59	6	18	
BEN-11	13-oct-02	325	185	59		24	-5,99
BEN-12	14-oct-02	327	183	60	5	10	
BEN-13	15-oct-02	327	184	60		18	-5,94
BEN-14	16-oct-02	325	184	61		17	
BEN-15	17-oct-02	325	184	61		18	
BEN-16	21-oct-02	332	183	58	6	19	-5,97
BEN-17	22-oct-02	325	187	60		18	-5,94
BEN-18	23-oct-02	326	180	60		17	
BEN-19	24-oct-02	326	182	60		18	
BEN-20	25-oct-02	325	185	60	5	18	
BEN-21	26-oct-02	324	179	59		18	
BEN-22	28-oct-02	324	180	61		17	-5,97
BEN-23	29-oct-02	321	183	59	6	17	
BEN-24	30-oct-02	321	185	58		16	-5,89
BEN-25	15-nov-02	328	207	62		8	
BEN-26	16-nov-02	331	200	63	7	9	-6,06
BEN-27	17-nov-02	328	197	62		7	
BEN-28	18-nov-02	320	193	60	8	8	-6,09
BEN-29	19-nov-02	318	193	59		9	
BEN-30	20-nov-02	311	194	60		8	-6,19

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	δ ¹⁸ O _{vsmow} (‰)
BEN-31	21-nov-02	306	187	58	7	8	
BEN-32	22-nov-02	303	183	57		8	-6,01
BEN-33	23-nov-02	298	188	56		7	
BEN-34	24-nov-02	299	180	56	8	7	
BEN-35	25-nov-02	294	180	46	13	8	-5,96
BEN-36	26-nov-02	284	179	36	18	6	-5,96
BEN-37	27-nov-02	281	175	51	8	7	
BEN-38	28-nov-02	280	174	44		8	-5,75
BEN-39	29-nov-02	282	175	44	12	7	
BEN-40	30-nov-02	283	173	54	7	7	-5,78
BEN-41	1-dic-02	285	176	53	9	8	
BEN-42	2-dic-02	288	177	54	8	7	
BEN-43	4-dic-02	289	179	51	9	8	-5,73

ANEXO 9

Análisis químicos e isotópicos de las muestras horarias del manantial de Benaoján

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ (‰)
B-1	23-11-02 15:30	295	182	56	8	8	-5,95
B-2	23-11-02 16:30	295	181	58	6	8	
B-3	23-11-02 17:30	295	183	56	7	7	
B-4	23-11-02 18:30	294	182	58	7	9	
B-5	23-11-02 19:30	296	185	56	8	8	
B-6	23-11-02 20:30	297	184	55	9	7	
B-7	23-11-02 21:30	298	180	57	7	10	-5,90
B-8	23-11-02 22:30	297	185	56	7	9	
B-9	23-11-02 23:30	298	182	56	7	7	
B-10	24-11-02 0:30	298	183	56	7	8	
B-11	24-11-02 1:30	297	183	56	7	8	
B-12	24-11-02 2:30	298	182	57	6	9	
B-13	24-11-02 3:30	298	182	57	7	9	
B-14	24-11-02 4:30	298	180	57	6	9	-5,83
B-15	24-11-02 6:30	298	184	57	7	9	
B-16	24-11-02 8:30	297	184	56	8	8	
B-17	24-11-02 10:30	297	182	58	7	8	
B-18	24-11-02 11:30	297	183	58	6	7	-5,96
B-19	24-11-02 12:30	298	183	57	7	8	
B-20	24-11-02 14:30	300	182	56	7	8	-5,98
B-21	24-11-02 15:30	298	179	57	7	8	
B-22	24-11-02 16:30	299	184	56	8	8	

ANEXO 10

Análisis químicos e isotópicos de las muestras diarias del manantial del río Genal

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	δ ¹⁸ O _{vsmow} (‰)
IGU-1	03-oct-02	354	252	70	10	9	-6,80
IGU-2	06-oct-02	350	249	69		9	-6,84
IGU-3	07-oct-02	353	247	69		8	-6,79
IGU-4	08-oct-02	354	247	70	10	9	
IGU-5	10-oct-02	351	247	69		8	-6,75
IGU-6	11-oct-02	356	251	70		9	-6,77
IGU-7	12-oct-02	354	251	71		8	-6,73
IGU-8	13-oct-02	356	250	69	11	9	
IGU-9	14-oct-02	359	254	70		9	-6,74
IGU-10	15-oct-02	354	253	70		9	-6,83
IGU-11	17-oct-02	358	248	71	8	9	-6,83
IGU-12	18-oct-02	349	253	70	10	9	-6,79
IGU-13	21-oct-02	352	252	69		9	
IGU-14	23-oct-02	352	249	70	10	9	-6,81
IGU-15	24-oct-02	357	250	70	10	9	
IGU-16	25-oct-02	367	250	71	10	9	-6,79
IGU-17	27-oct-02	367	250	70		9	
IGU-18	28-oct-02	363	253	71		9	-6,78
IGU-19	29-oct-02	370	254	74	11	9	-6,72
IGU-20	14-nov-02	363	250	70		9	-6,72
IGU-21	15-nov-02	363	253	69	11	8	
IGU-22	16-nov-02	368	254	71		9	-6,82
IGU-23	17-nov-02	369	250	71		9	
IGU-24	18-nov-02	375	251	72	10	9	-6,70
IGU-25	21-nov-02	359	241	68		9	-6,65
IGU-26	22-nov-02	344	226	65		8	
IGU-27	23-nov-02	342	231	64	10	9	
IGU-28	24-nov-02	335	219	62		9	
IGU-29	25-nov-02	329	212	59	10	9	-6,24
IGU-30	26-nov-02	326	215	58		8	
IGU-31	28-nov-02	324	211	58		9	
IGU-32	29-nov-02	321	206	58	10	9	-6,22
IGU-33	30-nov-02	324	208	58		8	
IGU-34	01-dic-02	324	211	58	10	9	-6,17
IGU-35	02-dic-02	324	214	58		9	
IGU-36	04-dic-02	325	212	58	9	9	-6,14

ANEXO 11

Análisis químicos e isotópicos de las muestras horarias del manantial del río Genal

Número de muestra		Conductividad (μS/cm)	TAC (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$ (‰)
I-1	23-11-02 14:00	345	227	65	10	9	
I-2	23-11-02 16:00	346	227	64		8	-6,45
I-3	23-11-02 18:00	343	224	64		9	
I-4	23-11-02 20:00	340	224	62	11	8	
I-5	23-11-02 22:00	338	223	61		9	
I-6	24-11-02 0:00	336	217	63		9	-6,24
I-7	24-11-02 2:00	337	221	62	9	8	
I-8	24-11-02 4:00	337	218	61		8	-6,23
I-9	24-11-02 5:00	337	218	62		9	
I-10	24-11-02 6:00	336	217	62	10	9	-6,19
I-11	24-11-02 7:00	338	223	63		9	
I-12	24-11-02 8:00	339	224	61		9	-6,16
I-13	24-11-02 9:00	340	222	62	9	9	
I-14	24-11-02 10:00	340	224	62		9	-6,25
I-15	24-11-02 11:00	341	225	63		8	
I-16	24-11-02 12:00	342	225	63		10	-6,23
I-17	24-11-02 13:00	342	223	63	9	9	
I-18	24-11-02 14:00	342	226	64		9	-6,19
I-19	24-11-02 15:00	341	224	64		8	
I-20	24-11-02 16:00	341	222	63	9	9	-6,21