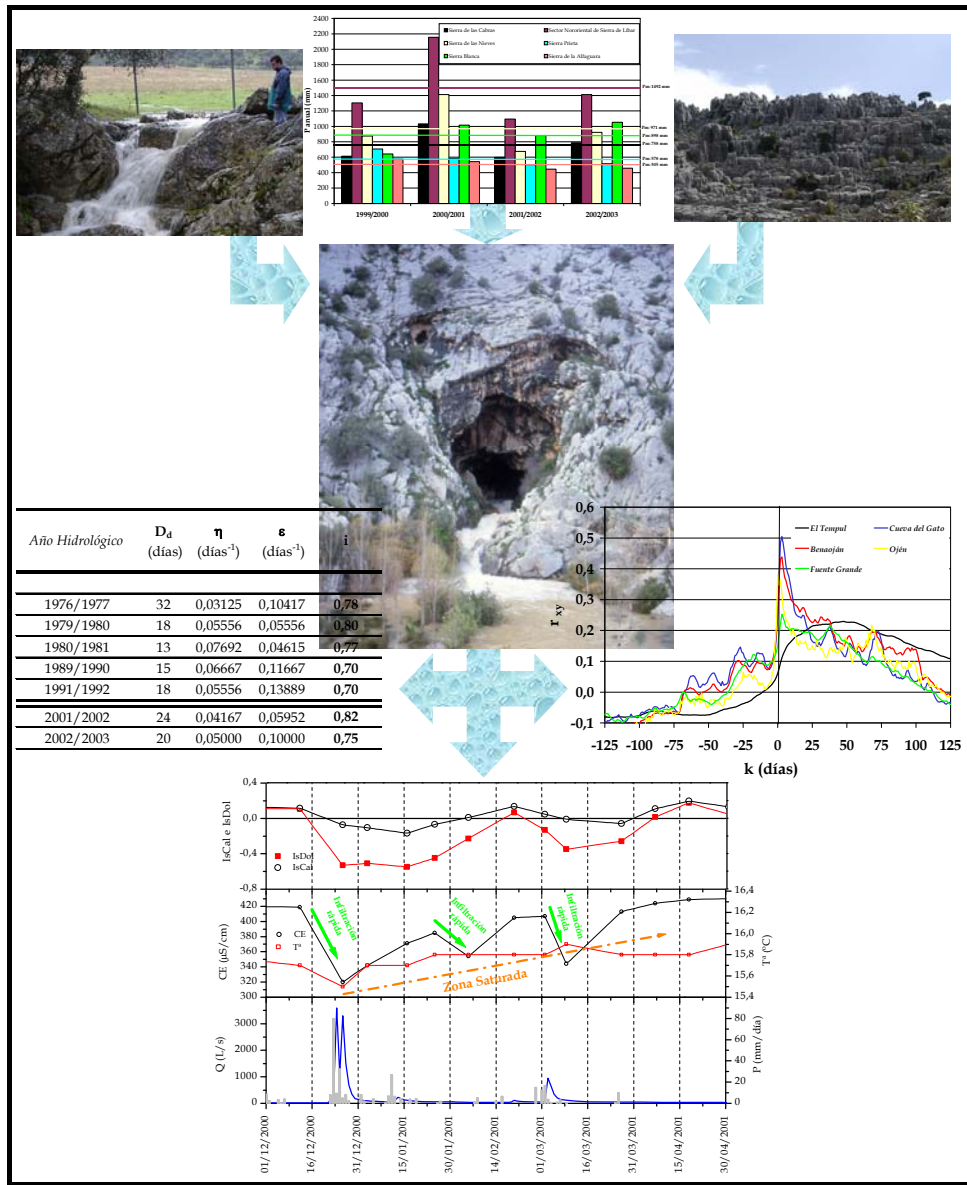


TESIS DOCTORAL
UNIVERSIDAD DE GRANADA



INSTITUTO DEL AGUA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS
DEL SUR DE ESPAÑA A PARTIR DE SUS RESPUESTAS NATURALES



Pablo Jiménez Gavilán
Granada, 2010

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Pablo Jiménez Gavilán
D.L.: GR 3471-2010
ISBN: 978-84-693-5209-0

UNIVERSIDAD DE GRANADA
INSTITUTO DEL AGUA



***CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS
DEL SUR DE ESPAÑA A PARTIR DE SUS RESPUESTAS NATURALES***

Memoria presentada por Pablo Jiménez Gavilán para optar al grado de Doctor

V.B. El Director

Fdo. Bartolomé Andreo Navarro
Profesor Titular de Geodinámica Externa
Departamento de Ecología y Geología
Universidad de Málaga

V.B. El Codirector

Fdo. Francisco Carrasco Cantos
Profesor Titular de Geodinámica Externa
Departamento de Ecología y Geología
Universidad de Málaga

Fdo. Pablo Jiménez Gavilán



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Esta Tesis Doctoral se ha realizado en el seno del Grupo de Hidrogeología del Departamento de Ecología y Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga



ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO.....	7
1.3. OBJETIVOS.....	11
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	12
1.4.1. Métodos de campo.....	12
1.4.1.1. Reconocimiento del medio físico de las áreas de estudio.....	12
1.4.1.2. Inventario de puntos de agua. Establecimiento de la red de control.....	13
1.4.1.3. Medidas en la red de control. Periodicidad de muestreo.....	14
1.4.2. Métodos de Laboratorio.....	18
1.4.2.1. Análisis químicos de las aguas.....	18
1.4.2.2. Análisis isotópicos de las aguas.....	21
1.4.2.3. Análisis de trazadores artificiales.....	22
1.4.3. Métodos de gabinete.....	22
1.4.3.1. Recopilación bibliográfica.....	22
1.4.3.2. Recopilación de datos hidrometeorológicos.....	23
1.4.3.3. Análisis y tratamiento de los datos.....	23
1.4.3.4. Organización y redacción de la memoria de Tesis Doctoral.....	25
2. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS APLICADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDRODINÁMICA.....	28
2.1. ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS.....	28
2.2. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE RECESIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE MANGIN (1970, 1975).....	29
2.2.1. Introducción.....	29
2.2.2. Fundamentos metodológicos.....	30
2.3. ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL (ACE).....	34
2.3.1. Introducción.....	34
2.3.2. Fundamentos metodológicos. Aplicación a sistemas acuíferos carbonáticos.....	34
2.4. ANÁLISIS DE CAUDALES CLASIFICADOS.....	38
2.5. ANÁLISIS DE LA TRANSFORMADA CONTINUA <i>WAVELET</i>	40
3. CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA: LAS PRECIPITACIONES.....	43
3.1. ÁMBITO CLIMÁTICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ACUÍFEROS.....	43
3.2. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES CORRESPONDIENTES AL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN (1999/2000-2002/2003).....	45
4. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LAS CABRAS.....	50
4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS.....	50
4.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA.....	54
4.2.1. Análisis del hidrograma del manantial de El Tempul.....	55
4.2.2. Análisis de la curva de recesión del manantial de El Tempul mediante el método de Mangin (1970, 1975).....	60
4.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral.....	63
4.2.3.1. Análisis de la serie diaria de caudales.....	63
4.2.3.2. Análisis de la serie histórica de caudales mensuales.....	68
4.2.4. Análisis de caudales clasificados.....	74

4.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	76
4.2.5.1. Análisis de la serie diaria de caudales	76
4.2.5.2. Análisis de la serie históricas de precipitaciones y caudales mensuales	80
4.2.6. Síntesis de los resultados obtenidos.....	83
5. CARACTERIZACIÓN DE LA DESCARGA EN EL SECTOR NORORIENTAL DE LA SIERRA DE LÍBAR	86
5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	86
5.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	92
5.2.1. Análisis de los hidrogramas	93
5.2.1.1. Manantial de Benaoján.....	93
5.2.1.2. Manantial de la Cueva del Gato	95
5.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	102
5.2.2.1. Manantial de Benaoján.....	102
5.2.2.2. Manantial de la Cueva del Gato	104
5.2.3. Análisis correlatorio y espectral	108
5.2.3.1. Análisis con los datos diarios correspondientes al periodo 1999-2003 en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato	108
5.2.3.2. Análisis de la serie histórica del manantial de la Cueva del Gato (1976-2003) ...	113
5.2.4. Análisis de caudales clasificados	117
5.2.4.1. Manantial de Benaoján.....	117
5.2.4.2. Manantial de la Cueva del Gato	118
5.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	120
5.2.5.1. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i> a los datos diarios del periodo 1999-2003 en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato.....	120
5.2.5.2. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i> a la serie histórica del manantial de la Cueva del Gato	123
5.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico.....	126
5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	129
5.3.1. Composición química de las aguas del sector nororiental de la Sierra de Lívar....	129
5.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos	133
5.3.1.1. Manantial de Benaoján.....	133
5.3.1.2. Manantial de la Cueva del Gato	138
5.3.3. Curvas de frecuencias.....	142
5.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA	144
5.5. ENSAYO DE TRAZADORES EN AGUAS ALTAS (NOVIEMBRE DE 2002)	146
5.5.1. Características del ensayo multitrazador	146
5.5.2. Resultados del ensayo	148
6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE LA SIERRA DE LAS NIEVES.....	154
6.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	154
6.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	159
6.2.1. Análisis del hidrograma.....	161
6.2.1.1. Manantial del Río Genal	161
6.2.1.2. Manantial del Río Verde.....	163
6.2.1.3. Manantial del Río Grande	166
6.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	167
6.2.2.1. Manantial del Río Genal	167
6.2.2.2. Manantial del Río Verde.....	169
6.2.2.3. Manantial del Río Grande	172
6.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral.....	175
6.2.3.1. Análisis simple.....	175
6.2.3.2. Análisis cruzado	177

6.2.4. Análisis de Caudales Clasificados.....	180
6.2.4.1. Manantial del Río Genal.....	180
6.2.4.2. Manantial del Río Verde.....	181
6.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	183
6.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico	187
6.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA.....	189
6.3.1. Composición química de las aguas del sistema de la Sierra de las Nieves.....	189
6.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos	191
6.3.2.1. Manantial del Río Genal.....	191
6.3.2.2. Manantial del Río Grande.....	196
6.3.3. Curvas de frecuencias.....	200
6.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA	203
6.5. ENSAYO DE TRAZADOR EN AGUAS BAJAS	204
7. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA PRIETA-BONELA-ALCAPARAÍN	209
7.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS.....	209
7.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA.....	210
7.2.1. Análisis del hidrograma del manantial del Río Jorox.....	211
7.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	214
7.2.3. Análisis correlatorio y espectral	217
7.2.3.1. Análisis simple.....	217
7.2.3.2. Análisis cruzado	218
7.2.4. Análisis de caudales clasificados	220
7.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	222
7.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico	224
7.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA.....	226
7.3.1. Composición química de las aguas del manantial del Río Jorox.....	226
7.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos del agua.....	227
7.3.3. Curvas de frecuencias.....	234
8. CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR OCCIDENTAL DE SIERRA BLANCA: LOS SISTEMAS DE OJÉN Y MARBELLA.....	236
8.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS.....	236
8.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA.....	240
8.2.1. Análisis del hidrograma	242
8.2.1.1. Manantial de Ojén.....	242
8.2.1.2. Manantial de Nagüeles.....	244
8.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	247
8.2.2.1. Manantial de Ojén.....	247
8.2.2.2. Manantial de Nagüeles.....	249
8.2.3. Análisis correlatorio y espectral	253
8.2.3.1. Análisis simple.....	253
8.2.3.2. Análisis cruzado	255
8.2.4. Análisis de caudales clasificados	258
8.2.4.1. Manantial de Ojén.....	258
8.2.4.2. Manantial de Nagüeles.....	260
8.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	261
8.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico	264
8.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA.....	266
8.3.1. Composición química de las aguas de los sistemas de Ojén y Marbella	266
8.3.2. Evolución temporal de los parámetros físico-químicos.....	269
8.3.2.1. Manantial de Ojén.....	269

8.3.2.2. Manantial de Nagüeles	274
8.3.3. Curvas de frecuencias	278
8.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA	280
9. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA ALFAGUARA	282
9.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS	282
9.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA	284
9.2.1. Análisis del hidrograma de Fuente Grande	285
9.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	287
9.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral.....	290
9.2.3.1. Análisis simple.....	290
9.2.3.2. Análisis Cruzado	292
9.2.4. Análisis de caudales clasificados	294
9.2.5. Aplicación de la transformada continua <i>wavelet</i>	295
9.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico.....	297
9.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA	299
9.3.1. Composición química de las aguas de la Fuente Grande de Alfacar.....	299
9.3.2. Evolución temporal de los parámetros físico-químicos del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar.....	301
9.3.3. Curvas de frecuencias.....	304
9.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA	306
10. DISCUSIÓN.....	309
10.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS ESTUDIADOS. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN UTILIZADOS	309
10.1.1. Análisis de Hidrogramas	311
10.1.2. Análisis de las Curvas de Recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)	318
10.1.3. Análisis Correlatorio y Espectral.....	323
10.1.4. Análisis de Caudales Clasificados	333
10.1.5. Análisis de la Transformada Continua <i>Wavelet</i>	334
10.1.6. Análisis de los resultados Hidroquímicos.....	335
10.1.7. Análisis de los resultados Isotópicos.....	339
10.2. ANÁLISIS MULTIVARIANTE PARA LA PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS	341
10.2.1. Análisis de Componentes Principales.....	341
10.2.2. Parámetros para una clasificación de los acuíferos carbonáticos	348
10.2.3. Análisis Clúster	350
10.3. PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA	353
11. CONCLUSIONES.....	361
11.1. SOBRE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	361
11.2. SOBRE LA APLICABILIDAD DE LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS Y LA PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS.....	366
BIBLIOGRAFÍA.....	375

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo de elementos capacitivos y transmisivos (Droque, 1980).2

Figura 1.2. Modelo de acuífero kárstico jerarquizado (Mangin, 1975).3

Figura 1.3. Localización geográfica de los macizos carbonáticos estudiados.8

Figura 2.1. Partes de un hidrograma. Leyenda: P (precipitaciones), Q (caudal), t conc (tiempo de concentración), t crecida (tiempo de crecida), t base (tiempo de base). Punta (caudal máximo); Z (punto donde se inicia la crecida); X (punto donde se inicia el agotamiento).28

Figura 2.2. 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)$31

Figura 2.3. Clasificación de Mangin (1975) a partir del análisis de la curva de recesión33

Figura 2.4. Ejemplo de una transformada wavelet (Ψ) de una función cualesquiera, según Torrence y Campo (1998). a , parámetro dilatación/contracción. τ , parámetro traslación. Ψ^* , wavelet madre elegida.41

Figura 2.5. Representación temporal de la funciones wavelet "madre" más usuales: (a) *Morlet wavelet*; (b) *Mexican hat wavelet*; (c) *Haar wavelet*; (d) *Daubechies wavelet* de orden 4; (e) *Daubechies wavelet* de orden 12 y (f) *Daubechies wavelet* de orden 20.42

Figura 3.1. Precipitaciones medias anuales en Andalucía para el período 1951-1992 (ITGE-Junta de Andalucía, 1998) y situación de las estaciones pluviométricas utilizadas (1 Sierra de las Cabras, 2 Sector nororiental de la Sierra de Líbar, 3 Sierra de las Nieves, 4 Sierra Prieta, 5 Sierra Blanca y 6 Sierra de la Alfaguara).44

Figura 3.2 Precipitación anual durante el período de investigación de todas las estaciones pluviométricas seleccionadas (Pm, precipitación media).47

Figura 3.3. Precipitaciones medias mensuales de todas las estaciones pluviométricas seleccionadas durante el período 1999/2000-2002/2003.47

Figura 3.4. Evolución temporal de las precipitaciones diarias registradas en todas las estaciones recopiladas para todo el período de investigación (A, Sierra de las Cabras; B, Sierra de Líbar; C, Sierra de las Nieves; D, Sierra Prieta; E, Sierra Blanca y F, Sierra de la Alfaguara).49

Figura 4.1. Esquema y corte geológico sintetizado de la Sierra de las Cabras (modificado de Martín Algarra, 1987).51

Figura 4.2. Localización geográfica y esquema hidrogeológico de la Sierra de las Cabras53

Figura 4.3. Hidrograma del manantial de El Tempul para el periodo 1985-2003. Precipitaciones registradas en la estación de El Tempul.55

Figura 4.4. Hidrogramas anuales a nivel diario del manantial de El Tempul. Precipitaciones registradas en la estación de El Tempul57

Figura 4.5. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y del porcentaje del volumen dinámico (Vd) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantienen las condiciones de agotamiento.61

Figura 4.6. Gráfico *i-k* propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en el manantial de El Tempul.63

Figura 4.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia (f), f frecuencia.64

Figura 4.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 2003, para una ventana de 1250 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia (f), f frecuencia.65

Figura 4.9. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.66

Figura 4.10. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. Ventana de 1250 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	67
Figura 4.11. Localización de las estaciones meteorológicas de Gibraltar y San Fernando con respecto a la Sierra de las Cabras.	68
Figura 4.12. Resultados del análisis correlatorio (A, B) y espectral (C, D) de corta duración efectuado con datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.	70
Figura 4.13. Resultados del análisis correlatorio (A, B) y espectral (C, D) de larga duración efectuado con datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.	71
Figura 4.14. Espectros de frecuencia simple obtenidos tras el análisis a largo término de los datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando calculados con un paso de 7 meses (A, C) y de 9 meses (B, D). Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.	71
Figura 4.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral de corta (A, B) y larga duración (C, D) efectuado para la serie de caudales mensuales drenados por el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1862 y 1995. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.	73
Figura 4.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales medios mensuales drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación mensual registrada en la estación pluviométrica de Gibraltar para el período comprendido entre 1862 y 1995. Ventana de 125 meses y paso de 1 mes. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	74
Figura 4.17. Gráfico de caudales clasificados del manantial de El Tempul, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).	75
Figura 4.18. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	77
Figura 4.19. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	78
Figura 4.20. Espectro cruzado continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de El Tempul y del caudal medio diario en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	80
Figura 4.21. Espectro continuo de la transformada <i>wavelet</i> de los datos de precipitación mensual en la estación de Gibraltar (A) y de San Fernando (B). Espectro continuo global de ambas series de datos (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	82
Figura 4.22. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal mensual en el manantial de El Tempul. Espectro cruzado continuo (C) y global (D) de la transformada wavelet de los datos de precipitación mensual en la estación de El Tempul y del caudal medio mensual en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1862 y 1995. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	83
Figura 5.1. Esquema y corte geológico de la Sierra de Líbar (modificado de Martín Algarra, 1987).	87
Figura 5.2. Esquema geomorfológico de la Sierra de Líbar, simplificado de Delannoy (1987).	88
Figura 5.3. Esquema hidrogeológico de la Sierra de Líbar.	90

Figura 5.4. Hidrograma del manantial de Benaoján entre 1999 y 2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta.	92
Figura 5.5. Hidrograma del manantial de la Cueva del Gato entre 1976 y 2003	93
Figura 5.6. Hidrogramas anuales con caudales medios diarios del manantial de Benaoján para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta.	95
Figura 5.7. Hidrogramas anuales con caudales medios diarios del manantial de la Cueva del Gato para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta.	97
Figura 5.8. Hidrogramas anuales, con datos diarios, del manantial de la Cueva del Gato para el periodo 1976-1999. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta	99
Figura 5.9. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Benaoján para el periodo 1999-2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	103
Figura 5.10. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de la Cueva del Gato para algunos años del período comprendido entre 1976 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicho manantial si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	106
Figura 5.11. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato.	108
Figura 5.12. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de la precipitación registrada en la estación de la Cueva de la Pileta entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.....	109
Figura 5.13. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.	110
Figura 5.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.....	111
Figura 5.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	112
Figura 5.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de la precipitación registrada en la estación de la Cueva de la Pileta para el período 1976-2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.	114
Figura 5.17. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales del manantial de la Cueva del Gato y de la precipitación en la estación de la Cueva de la Pileta para el período 1976-2003, con una ventana de 1250 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.	115
Figura 5.18. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de precipitación en la estación	

pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre 1976/1977 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	116
Figura 5.19. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de precipitación en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre 1976/1977 y 2002/2003. Ventana de 1250 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	116
Figura 5.20. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Benaoján, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	117
Figura 5.21. Gráfico de caudales clasificados del manantial de la Cueva del Gato, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	119
Figura 5.22. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.	121
Figura 5.23. Espectros continuos de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Benaoján (A) y de la Cueva del Gato (B) para el período comprendido entre 1999 y 2003. Espectros globales de ambas surgencias (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.....	122
Figura 5.24. Espectros continuos cruzados de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta y de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Benaoján (A) y de la Cueva del Gato (B) para el período comprendido entre 1999 y 2003. Espectros cruzados globales de ambas surgencias (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.....	123
Figura 5.25. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.....	124
Figura 5.26. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial de la Cueva del Gato para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.....	125
Figura 5.27. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta y de los datos de caudal medio diario en el manantial de la Cueva del Gato para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.	126
Figura 5.28. Situación en un diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján.	129
Figura 5.29. Matriz de correlación y representación de los factores I-II y I-III del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato (n= 151).....	132
Figura 5.30. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Benaoján durante el período de investigación.....	134
Figura 5.31. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por los manantiales del sector nororiental de la Sierra de Líbar.	135
Figura 5.32. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, temperatura y contenidos en Cl^- y Na^+ del agua drenada por el manantial de Benaoján durante el año hidrológico 1999/2000	135
Figura 5.33. Evolución temporal del caudal, conductividad eléctrica y temperatura del agua drenada por el manantial de Benaoján durante las primeras lluvias del año hidrológico 2000/2001.....	136

Figura 5.34. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de Benaoján durante todo el periodo de estudio (n= 77).....	137
Figura 5.35. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de la Cueva del Gato durante el período de investigación.	139
Figura 5.36. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de la Cueva del Gato durante todo el periodo de estudio (n= 74).....	141
Figura 5.37. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato.....	143
Figura 5.38. Evolución temporal de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de Líbar y del agua drenada por el manantial de Benaoján. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$	144
Figura 5.39. Curvas de frecuencia elaboradas a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial de Benaoján durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.	145
Figura 5.40. Hidrogramas de los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján e hietograma del pluviógrafo situado en Llanos del Pozuelo, durante el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 31 de diciembre de 2002.....	148
Figura 5.41. Curvas de concentración y de masa recuperada de trazador en los principales manantiales controlados durante el ensayo.	150
Figura 5.42. Conexiones hidrogeológicas entre los puntos de inyección (EOS: Eosina, URN: Uranina y SRB: Sulfurodamina B) y los puntos de control, deducidas del ensayo de trazadores.....	152
Figura 6.1. El sistema de la Sierra de las Nieves (tomada de Liñán, 2003).....	154
Figura 6.2. Serie estratigráfica de la Unidad de las Nieves (tomada de Martín Algarra, 1987).....	155
Figura 6.3. Mapa y cortes geológicos de la Sierra de las Nieves (tomada de Liñán, 2003, original de Martín-Algarra, 1987).....	156
Figura 6.4. Hidrograma del manantial del Río Genal entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.	159
Figura 6.5. Hidrograma del manantial del Río Verde entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.	160
Figura 6.6. Hidrograma del Río Grande en la estación de Las Millanas (AAA) entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.	161
Figura 6.7. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial del Río Genal para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.	162
Figura 6.8. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial del Río Verde para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.	165
Figura 6.9. Hidrogramas anuales, con datos diarios, del Río Grande en la estación de Las Millanas (AAA) para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.....	166
Figura 6.10. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Genal para el periodo comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.	168
Figura 6.11. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Verde para el periodo comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.	171
Figura 6.12. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales del Río Genal y del Río Verde.	172
Figura 6.13. A la izquierda, curvas de recesión del Río Grande para el periodo comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráfico del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	174
Figura 6.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de la precipitación	

- registrada en la estación de Alpendeire entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia..... 175
- Figura 6.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación en la estación pluviométrica de Alpendeire entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia..... 177
- Figura 6.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Alpendeire para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia..... 178
- Figura 6.17. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Alpendeire para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia..... 179
- Figura 6.18. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Genal, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B)..... 180
- Figura 6.19. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Verde, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B)..... 182
- Figura 6.20. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Alpendeire, para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables. 183
- Figura 6.21. Espectros continuos y globales de la transformada *wavelet* de los datos de caudal medio diario en los manantiales del Río Genal (A, B), Río Grande (C, D) y Río Verde (E, F) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables... 184
- Figura 6.22. Espectros continuos cruzados y globales de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Alpendeire y de los datos de caudal medio diario en los manantiales del Río Genal (A, B), Río Grande (C, D) y Río Verde (E, F) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes. 186
- Figura 6.23. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogidas en los manantiales del Río Genal y del Río Grande..... 189
- Figura 6.24. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Genal durante el período de investigación..... 192
- Figura 6.25. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal..... 193
- Figura 6.26. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal durante todo el periodo de estudio ($n= 72$)..... 195
- Figura 6.27. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Grande durante el período de investigación..... 197
- Figura 6.28. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Grande..... 198
- Figura 6.29. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Grande durante todo el periodo de estudio ($n= 67$)..... 200
- Figura 6.30. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales del Río Genal y del Río Grande. 202

Figura 6.31. Evolución temporal de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de las Nieves y del agua drenada por el manantial del Río Genal. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$	203
Figura 6.32. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial del Río Genal durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.....	204
Figura 6.33. Situación del punto de inyección y de los puntos controlados dentro del esquema hidrogeológico del acuífero de la Sierra de las Nieves.....	206
Figura 6.34. Evolución de la conductividad eléctrica y del contenido en bicarbonato en el agua de los manantiales de Horcajos, Río Verde y de las dos surgencias del nacimiento de Río Grande durante el ensayo de trazador. Se ha representado también los datos de concentración de Eosina en las dos surgencias del nacimiento de Río Grande así como la evolución de la precipitación en la estación de Los Quejigales y del caudal en el Río Grande (Estación de Las Millanas) y en el manantial de Río Verde.	207
Figura 7.1. El sistema Prieta-Bonela-Alcaparín (tomado de Liñán, 2003).	209
Figura 7.2. Hidrograma del manantial de Río Jorox entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. Precipitaciones registradas en la estación pluviométrica de Casarabonela.....	211
Figura 7.3. Hidrogramas anuales, a paso de tiempo diario, del manantial del Río Jorox durante el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Casarabonela.	212
Figura 7.4. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Jorox para el periodo comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.	215
Figura 7.5. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión del manantial del Río Jorox.	216
Figura 7.6. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de la precipitación registrada en la estación de Casarabonela entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.	217
Figura 7.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de la precipitación registrada en la estación de Casarabonela entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.	218
Figura 7.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Casarabonela para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	219
Figura 7.9. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Casarabonela para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	220
Figura 7.10. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Jorox, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	221
Figura 7.11. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada <i>wavelet</i> de los datos de precipitación diaria en la estación de Casarabonela para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el "cono de influencia" donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.	222

Figura 7.12. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial del Río Jorox para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.....	223
Figura 7.13. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Casarabonela y de los datos de caudal medio diario en el manantial del Río Jorox para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.....	224
Figura 7.14. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en el manantial del Río Jorox.....	226
Figura 7.15. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el período de investigación.....	228
Figura 7.16. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^{-} de las aguas drenadas por el manantial del Río Jorox.....	229
Figura 7.17. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el año hidrológico 2000/2001.....	230
Figura 7.18. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, TAC y Ca^{2+} del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante todo el periodo de estudio.....	231
Figura 7.19. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el año hidrológico 2002/2003.....	232
Figura 7.20. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Jorox durante todo el periodo de estudio (n= 65).....	233
Figura 7.21. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas del manantial del Río Jorox.....	235
Figura 8.1. El acuífero de Marbella (tomado de Andreo, 1997). Leyenda: 1, mármoles; 2, gneises y pizarras; 3, contacto concordante; 4, falla normal; 5, anticlinal tumbado; 6, divisoria hidrogeológica; 7, manantial; 8, sondeo y 9, nivel piezométrico.....	237
Figura 8.2. El sistema de Ojén (tomado de Andreo, 1997). Leyenda: 1, mármoles; 2, gneises; 3, contacto concordante; 4, anticlinal tumbado; 5, anticlinal; 6, divisoria hidrogeológica; 7, manantial; 8, sondeo y 9, nivel piezométrico.....	239
Figura 8.3. Hidrogramas del manantial de Ojén (A) y Nagüeles (B) entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.....	241
Figura 8.4. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial de Ojén para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.....	243
Figura 8.5. Relación de los caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Ojén y valores de la precipitación anual en la estación pluviométrica de Ojén para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm) y representación de la correlación (R) entre ambas variables.....	244
Figura 8.6. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial de Nagüeles para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.....	245
Figura 8.7. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Nagüeles y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Ojén para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm) y representación de la correlación (R) entre ambas variables.....	246
Figura 8.8. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Ojén para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	248
Figura 8.9. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Nagüeles para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t= 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	250

Figura 8.10. Gráfico i-k propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales de Nagüeles y Ojén.	252
Figura 8.11. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de la precipitación registrada en la estación de Ojén entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlogramas, B) Espectros de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia, f frecuencia.	254
Figura 8.12. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación en la estación pluviométrica de Ojén entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlogramas, B) Espectros de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia, f frecuencia.	255
Figura 8.13. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	256
Figura 8.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	257
Figura 8.15. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Ojén, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	258
Figura 8.16. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Nagüeles, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	260
Figura 8.17. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada <i>wavelet</i> de los datos de precipitación diaria en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.	262
Figura 8.18. Espectros continuos y globales de las transformadas <i>wavelet</i> de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Ojén (A, B) y Nagüeles (C, D) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.	263
Figura 8.19. Espectros continuos cruzado y global de las transformadas <i>wavelet</i> de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Ojén (A, B) y Nagüeles (C, D) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.	264
Figura 8.20. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en los manantiales de Ojén y Nagüeles.	267
Figura 8.21. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Ojén durante el período de investigación.	271
Figura 8.22. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial de Ojén.....	271
Figura 8.23. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, Mg^{2+} , TAC y Ca^{2+} del agua drenada por el manantial de Ojén durante todo el año hidrológico 2000/2001.....	272
Figura 8.24. Evolución temporal del TOC, conductividad eléctrica y otros parámetros hidroquímicos del agua drenada por el manantial de Ojén durante parte del año hidrológico 2002/2003.....	273
Figura 8.25. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de Ojén durante todo el periodo de estudio (n= 77).....	274

Figura 8.26. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Nagüeles durante el período de investigación	276
Figura 8.27. Evolución temporal de la conductividad eléctrica y la temperatura del agua drenada por el manantial de Nagüeles durante parte de los años hidrológicos 2000/2001 y 2001/2002.	277
Figura 8.28. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales de Ojén y Nagüeles.	279
Figura 8.29. Evolución temporal del contenido en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de Sierra Blanca y del agua drenada por el manantial de Ojén. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$	280
Figura 8.30. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial de Ojén durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.	281
Figura 9.1. El sistema acuífero de la Alfaguara.	282
Figura 9.2. Hidrograma de Fuente Grande para el periodo de estudio. Precipitaciones registradas en la estación de Puerto Lobo (véase situación en figura 9.1).....	285
Figura 9.3. Hidrogramas anuales, a paso de tiempo diario, de Fuente Grande para el periodo 2000-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Puerto Lobo.....	286
Figura 9.4. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en Fuente Grande para el período comprendido entre 2000 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.....	288
Figura 9.5. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de la precipitación registrada en la estación de Puerto Lobo entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.....	291
Figura 9.6. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de la precipitación registrada en la estación de Puerto Lobo entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.....	291
Figura 9.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Puerto Lobo para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	293
Figura 9.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Puerto Lobo para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.	293
Figura 9.9. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Fuente Grande, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).....	294
Figura 9.10. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada <i>wavelet</i> de los datos de precipitación diaria en la estación de Puerto Lobo para el período comprendido entre Mayo de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.....	296
Figura 9.11. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada <i>wavelet</i> de los datos de caudal medio diario en Fuente Grande para el período comprendido entre Mayo de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.....	297

- Figura 9.12. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada *wavelet* efectuada con los datos de precipitación diaria en la estación de Puerto Lobo y los datos de caudal medio diario en Fuente Grande para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.....297
- Figura 9.13. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en el manantial de Fuente Grande.....299
- Figura 9.14 Evolución temporal de la composición química del agua drenada por Fuente Grande durante el período de investigación.....302
- Figura 9.15. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por Fuente Grande durante todo el periodo de estudio (n= 46).303
- Figura 9.16. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de la Fuente Grande de Alfacar.305
- Figura 9.17. Evolución temporal del contenido en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de la Alfaguara y del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$306
- Figura 9.18. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.....307
- Figura 9.19. Evolución temporal del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia de la Sierra de la Alfaguara junto con la evolución del $\delta^{18}\text{O}$ y de algunos parámetros físico-químicos del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.....308
- Figura 10.1. Esquema básico de distribución de los manantiales en diagramas X-Y, a partir de la representación de los diversos parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos considerados en la tabla 10.1.311
- Figura 10.2. Hidrogramas de los manantiales analizados durante el periodo de investigación (1999-2003). Leyenda: A) sector nororiental de la Sierra de Líbar, manantiales de Benaolán y Cueva del Gato; B) acuífero de la Sierra de las Nieves, manantiales del Río Genal y Río Verde; C) acuífero de Sierra Prieta, manantial del Río Jorox; D) acuíferos de Marbella y Ojén (Sierra Blanca), manantiales de Nagüeles y Ojén; E) acuífero de la Alfaguara, Fuente Grande de Alfacar; F) acuífero de la Sierra de las Cabras, manantial de El Tempul.312
- Figura 10.3. Representación gráfica del tiempo de base frente al tiempo de crecida (A), del tiempo de crecida frente a la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ (B) y del tiempo de base frente a la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ (C).317
- Figura 10.4. Gráfico *i-k* propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los valores medios de todas las curvas de recesión analizadas para cada uno de los manantiales estudiados.320
- Figura 10.5. Representación gráfica, en diagramas X-Y, de varios parámetros obtenidos mediante el análisis de la curva de recesión. Leyenda: α coeficiente de agotamiento, parámetros *i* y *k* de Mangin (1970, 1975).....321
- Figura 10.6. Correlogramas simples de los caudales de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: *r* coeficiente de correlación...324
- Figura 10.7. Espectro de frecuencia de los caudales de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: *S(f)* espectro de frecuencia, *f* frecuencia.325
- Figura 10.8. Correlogramas cruzados lluvia-caudal (hidrogramas unitarios) de cada uno de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: r_{xy} coeficiente de correlación cruzada.328
- Figura 10.9. Clasificación de los sistemas acuíferos a partir del análisis correlatorio y espectral, según Mangin (1984).331
- Figura 10.10. Clasificación de los acuíferos carbonáticos propuesta por Mangin (1984), modificada por Garay (2002), en la que se incluyen algunos ejemplos de sistemas españoles.331

Figura 10.11. Diagramas X-Y de diversos parámetros obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral. Leyenda: R_{max} valor máximo del correlograma cruzado entre las precipitaciones y el caudal de los manantiales.	332
Figura 10.12. Representación gráfica en diagramas X-Y de diversos parámetros obtenidos mediante el estudio hidroquímico.	337
Figura 10.13. Diagramas de frecuencias elaborados a partir de los datos de conductividad eléctrica del agua medidos en los manantiales estudiados.	339
Figura 10.14. Diagramas de frecuencias elaborados a partir de los datos de $\delta^{18}O$ del agua de los manantiales investigados.	340
Figura 10.15. Representación de los factores I-II del primer ACP efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).	342
Figura 10.16. Representación de los factores I-II del segundo ACP efectuado a partir de una selección de parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).	343
Figura 10.17. Representación de los factores I-II del tercer ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos (Tabla 10.1).	345
Figura 10.18. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).	346
Figura 10.19. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos y la totalidad de los parámetros hidroquímicos (Tabla 10.1).	347
Figura 10.20. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos de las surgencias analizadas (Tabla 10.1).	348
Figura 10.21. Representación gráfica de los acuíferos estudiados a partir de los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos significativos a efectos de caracterización hidrogeológica.	349
Figura 10.22. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados.	351
Figura 10.23. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos de los manantiales investigados.	352
Figura 10.24. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales acuíferos menos inerciales.	352

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Cuadro resumen con las periodicidades de control foronómico y de toma muestras de agua en cada uno de los manantiales estudiados.....	17
Tabla 3.1. Precipitaciones anuales (mm) sobre las áreas estudiadas correspondientes al período de investigación 1999-2003. En azul, año húmedo (para la serie analizada); en amarillo, año seco (para la serie analizada); en blanco, año medio.....	45
Tabla 4.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de El Tempul para los años hidrológicos entre 1985/1986 y 2002/2003 (Datos en L/s).....	59
Tabla 4.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de El Tempul (años hidrológicos 1985/1986-2002/2003). Leyenda: Da duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento, Vd volumen dinámico, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), Dd duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad.....	60
Tabla 4.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de El Tempul a partir del análisis de caudales clasificados.	76
Tabla 5.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Benaoján y valores de precipitación anual en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período entre 1999 y 2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).	94
Tabla 5.2. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de la Cueva del Gato y valores de precipitación anual en la Cueva de la Pileta para el periodo 1976-2003 (datos en L/s y mm).	98
Tabla 5.3. Resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión del manantial de Benaoján (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración, ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.	102
Tabla 5.4. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de la Cueva del Gato (periodo 1976-2003). Leyenda: Dd duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración, ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), Da duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.	105
Tabla 5.5. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Benaoján a partir del análisis de caudales clasificados.	118
Tabla 5.6. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de la Cueva del Gato a partir del análisis de caudales clasificados.	120
Tabla 5.7. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato. Leyenda, n número de muestras, m media aritmética, max valor máximo, min valor mínimo y v coeficiente de variación.	130
Tabla 5.8. Periodos de muestreo y número total de muestras recogidas en los manantiales controlados durante el ensayo de trazador.....	148
Tabla 5.9. Principales parámetros hidráulicos deducidos del ensayo de trazador. Leyenda, *:Caudal aproximado, **: Tasa de recuperación aproximada.	149
Tabla 6.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Genal y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Alpandei para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).....	163
Tabla 6.2. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Verde y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Alpandei para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).....	164

Tabla 6.3. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Genal (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.....	167
Tabla 6.4. Resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Genal (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.....	170
Tabla 6.5. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curva de agotamiento del manantial del Río Grande (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento, V_d volumen dinámico y k parámetro de Mangin (1970, 1975).	173
Tabla 6.6. Resultados obtenidos del cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Genal, a partir del análisis de caudales clasificados.	181
Tabla 6.7. Resultados obtenidos del cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Verde, a partir del análisis de caudales clasificados.	182
Tabla 6.8. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas del manantial del Río Genal y del manantial del Río Grande. Leyenda, n número de muestras, m media aritmética, max valor máximo, min valor mínimo y v coeficiente de variación.....	190
Tabla 7.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Jorox y valores de precipitación anual en la estación de Casarabonela para el periodo entre 1999 y 2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).....	213
Tabla 7.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Jorox (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.....	216
Tabla 7.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen de agua que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Jorox a partir del análisis de caudales clasificados.	222
Tabla 7.4. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas del manantial del Río Jorox. Leyenda: n número de muestras, m media aritmética, max valor máximo, min valor mínimo y v coeficiente de variación.	227
Tabla 8.1. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de Ojén (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.....	249
Tabla 8.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de Nagüeles (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.....	251
Tabla 8.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Ojén a partir del análisis de caudales clasificados.....	259
Tabla 8.4. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Nagüeles a partir del análisis de caudales clasificados.....	261

Tabla 8.5. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de los manantiales de Ojén y Nagüeles. Leyenda: <i>n</i> , número de muestras; <i>m</i> , media aritmética; <i>max</i> , valor máximo; <i>min</i> , valor mínimo y <i>v</i> , coeficiente de variación.	268
Tabla 9.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en Fuente Grande y valores de precipitación anual en la estación de Puerto Lobo para el periodo entre 2000 y 2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).....	287
Tabla 9.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión de Fuente Grande (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: <i>D_d</i> duración de la decrecida, <i>η</i> coeficiente de velocidad de infiltración y <i>ε</i> coeficiente de heterogeneidad, <i>i</i> y <i>k</i> parámetros de Mangin (1970, 1975), <i>D_a</i> duración del agotamiento, <i>α</i> coeficiente de agotamiento y <i>V_d</i> volumen dinámico.	289
Tabla 9.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en Fuente Grande a partir del análisis de caudales clasificados.....	295
Tabla 9.4. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de Fuente Grande para todo el período de estudio y por año hidrológico. Leyenda: <i>n</i> número de muestras, <i>m</i> media aritmética, <i>max</i> valor máximo, <i>min</i> valor mínimo y <i>v</i> coeficiente de variación.....	300
Tabla 10.1. Resultados de los principales parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos correspondientes a los manantiales investigados.	313
Tabla 10.2. Propuesta de clasificación de acuíferos carbonáticos del Sur de España. ⁽¹⁾ Dato tomado de Liñán (2003) para el periodo de estudio 1995/1996-1997/1998. ⁽²⁾ Dato tomado de Perez Ramos <i>et al.</i> (2005) para el año hidrológico 2003/2004.....	355

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Lámina 4.1. A- Panorámica de la Sierra de las Cabras B- Arroyo de Bogaz entre las sierras de las Cabras y la Sal, C- Estación de aforos del manantial de El Tempul, D- Manantial de El Tempul.	54
Lámina 5.1. A- Panorámica del sector nororiental de la Sierra de Líbar, B- Lapiaz ruiniforme, C- Manantial de Benaoján (aguas bajas), D- Manantial de Benaoján (aguas altas), E- Manantial de la Cueva del Gato (aguas bajas), F- Manantial de la Cueva del Gato (aguas altas), G- Presa de los Caballeros, H- Sumidero activo en el polje del Pozuelo.....	91
Lámina 6.1. A- Panorámica del Polje de la Nava, B- Sima, C- Manantial del Río Genal (aguas bajas), D- Manantial del Río Genal (aguas altas), E- Manantial del Río Grande (aguas bajas), F- Manantial del Río Grande (aguas altas), G- Manantial del Río Verde (aguas bajas), H- Manantial del Río Verde (aguas altas).	158
Lámina 7.1. A- Panorámica de Sierra de Prieta, B- Panorámica de Sierra Alcaparían, C- Manantial del Río Jorox (aguas bajas), D- Manantial del Río Jorox (aguas medias-altas).....	210
Lámina 8.1. A y B- Panorámicas de Sierra Blanca, C- Manantial de Ojén (aguas bajas), D- Manantial de Nagüeles (aguas bajas).....	240
Lámina 9.1. A- Panorámica desde el SE de la Sierra de la Alfaguara, B- Fuente Grande de Alfacar, C- Acequia de Aynadamar.	284

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

La hidrogeología de acuíferos carbonáticos es una disciplina científica que ha avanzado en gran medida durante las últimas décadas. En todo este intervalo temporal hasta la actualidad, se han generado numerosas reuniones y congresos, han surgido diferentes instituciones y grupos de investigación centrados en el conocimiento de los acuíferos carbonáticos. La mayor parte de las investigaciones llevadas a cabo durante este tiempo se han centrado en el estudio y caracterización del funcionamiento hidrogeológico de este tipo de acuíferos a partir de sus respuestas naturales o provocadas. En este sentido, los primeros trabajos, dedicados a metodologías de investigación y a la caracterización de los acuíferos, fueron realizados, sobre todo, por hidrogeólogos franceses, suizos, americanos e ingleses; y éstos han sido extrapolados al estudio de macizos carbonáticos del Sur de España. Las técnicas de investigación y criterios de caracterización desarrollada por los primeros investigadores cuando se aplican en áreas mediterráneas generan resultados que no se pueden comparar con los que se obtienen en las regiones donde fueron definidos los métodos de estudio.

El conocimiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos, debido a su carácter heterogéneo y anisótropo, entraña problemas de muy diversa índole. Uno de los más importantes está relacionado con los problemas de escala de los diferentes tipos de acuíferos que se engloban dentro del medio carbonático (Kiraly, 1975; Bakalowicz y Mangin, 1980; Mangin, 1982). En este sentido, son dos los modelos conceptuales principales que han intentado idealizar el funcionamiento de los acuíferos carbonáticos de una forma lo suficientemente simple: modelo de elementos capacitivos y transmisivos y modelo de acuífero jeraquizado.

El modelo de elementos capacitivos y transmisivos, propuesto por Kiraly (en Burger y Dubertret, 1975) y Drogue (1980), considera que el acuífero está formado por fracturas abiertas y homogéneamente distribuidas en las tres direcciones del espacio. La mayor parte del volumen de roca estaría constituido

por bloques capacitivos y, por tanto, representaría casi la totalidad de reservas del acuífero, mientras que los drenes, o elementos transmisivos, constituyen una pequeña fracción del volumen de acuífero (Figura 1.1). Según se trate de épocas de aguas bajas o altas, el flujo estará organizado hacia los drenes o hacia los bloques, respectivamente. La evolución del nivel piezométrico en un sondeo dependerá de la localización de éste: si se encuentra en un bloque evolucionará de forma más amortiguada que si está sobre un conducto de alta permeabilidad.

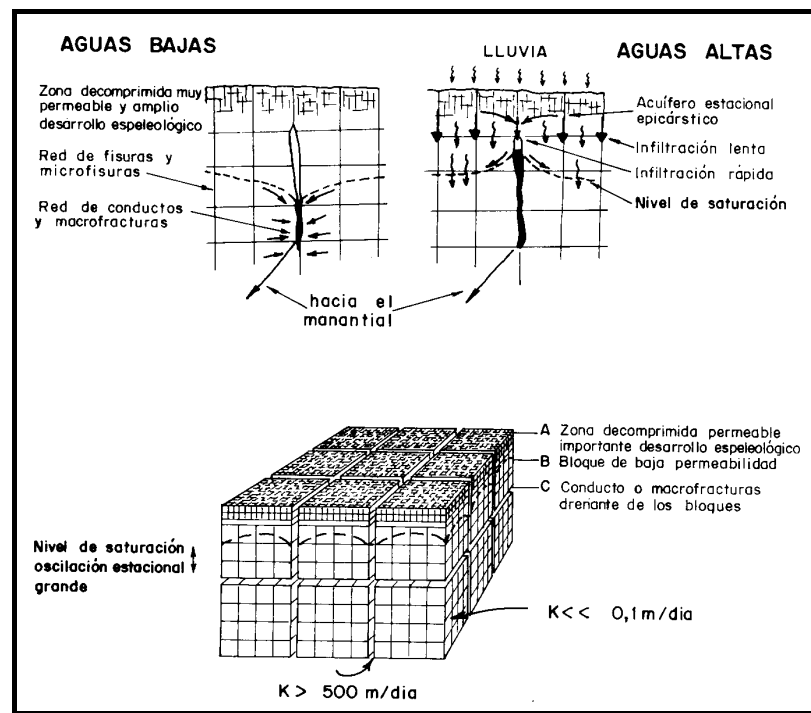


Figura 1.1. Modelo de elementos capacitivos y transmisivos (Droge, 1980).

El modelo conceptual de acuífero jerarquizado propuesto por Mangin (1975, 1984) y Bakalowicz (1979), se basa en la singularidad que presentan los acuíferos carbonáticos, debido a su heterogeneidad, la cual persiste independientemente de la escala. No obstante, el flujo está organizado en las tres direcciones del espacio, de forma similar a una red de drenaje superficial. En este sentido, Mangin distingue dentro del sistema kárstico dos subsistemas principales (Figura 1.2): subsistema infiltración que tiene lugar en la zona no saturada (donde puede existir un epikarst y diferentes modalidades de infiltración) y subsistema del karst inundado o zona saturada.

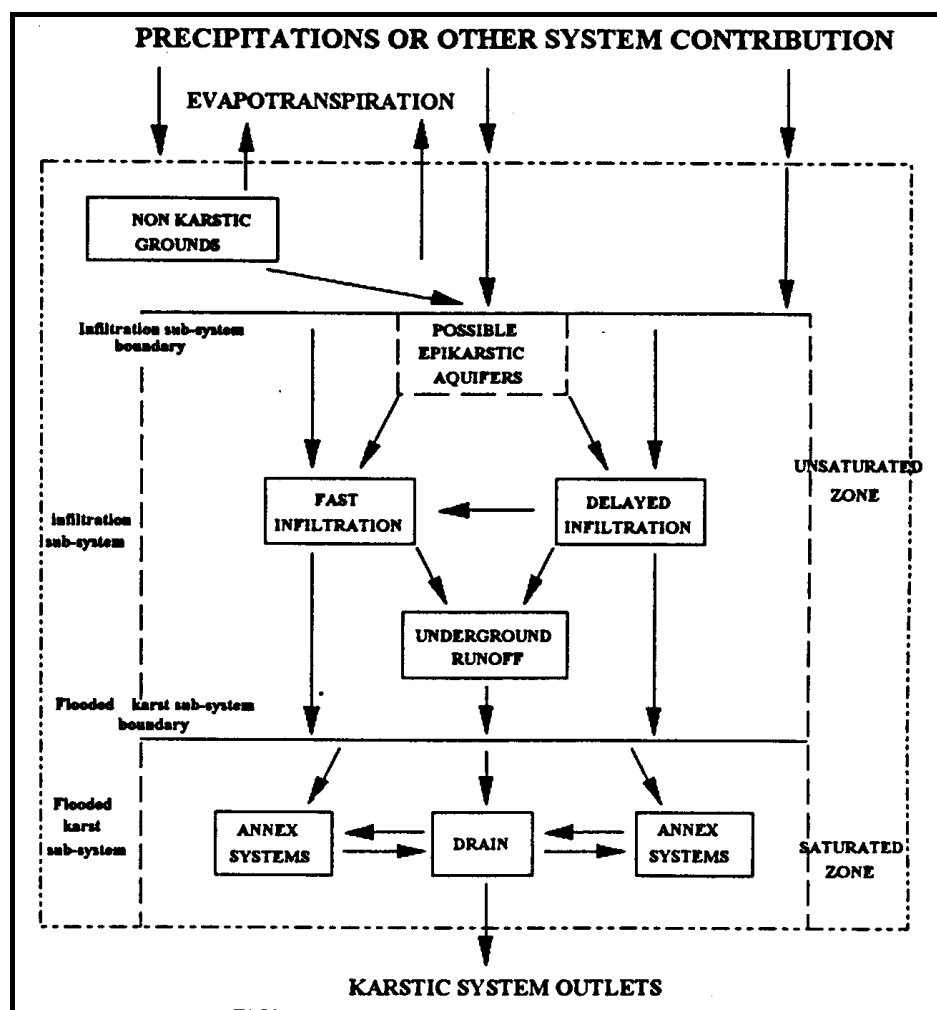


Figura 1.2. Modelo de acuífero kárstico jerarquizado (Mangin, 1975).

Las diferencias entre los dos modelos es consecuencia del estudio de los acuíferos carbonáticos en diferentes regiones: el modelo de elementos capacitivos y transmisivos se adapta mejor a los acuíferos perimediterráneos, mientras que el modelo de acuífero jerarquizado es más adecuado para los acuíferos del Pirineo. Las experiencias recogidas en la literatura científica confirman, por un lado, el modelo de acuífero carbonático formado por drenes y bloques capacitivos (fuertes variaciones piezométricas en sondeos ubicados en los drenes y suaves en los bloques, evoluciones piezométricas diferentes en unos y otros sondeos dependiendo de la recarga) y, por otro, el modelo de acuífero jerarquizado, similar a una red fluvial, que conecta subsistemas independientes (existencia de varias modas en los histogramas de frecuencia de los datos hidroquímicos, curvas de recesión diferentes en un mismo manantial).

Sin embargo, puede existir un punto de encuentro entre los dos modelos antes mencionados (Pulido, 1986; Dreybrodt, 1988; Andreo, 1997). Así, inicialmente, los esfuerzos tectónicos originan fracturas en las rocas carbonáticas, pero el medio presenta cierta homogeneidad a escala macroscópica y tiene validez el modelo de elementos capacitivos y transmisivos. Sobre la estructura anterior actúan los procesos de karstificación, dando lugar a una red más o menos jerarquizada de drenes que terminaría por implantarse en la totalidad del acuífero (modelo de acuífero jerarquizado).

En cualquier caso, tan sólo los acuíferos carbonáticos que promulga el modelo jerarquizado permiten el acceso directo al interior del sistema acuífero activo y, por tanto, son los únicos en los que se puede evaluar las características y el funcionamiento hidrogeológico de manera directa. De este modo, los métodos de investigación en hidrogeología de acuíferos carbonáticos han ido encaminados a caracterizar el comportamiento hidrogeológico de los sistemas a partir del estudio de sus respuestas naturales, tanto hidrodinámicas (Droge, 1969; Mangin, 1975; Pulido, 1979), como hidroquímicas (Shuster y White, 1971; Miserez, 1973; Hanshaw y Back, 1979; Bakalowicz, 1979; Mudry *et al.*, 1979) e isotópicas (Bakalowicz *et al.*, 1974; Blavoux *et al.*, 1979). Todas estas metodologías parten de que las variaciones en las respuestas del sistema son función de su estructura interna (modelo "caja negra"); por tanto, el análisis conjunto de las respuestas, permite conocer la estructura y funcionamiento hidrogeológico del sistema. Así, aplicando las mismas metodologías basadas en el análisis de las respuestas naturales, sería posible establecer comparaciones entre sistemas de distintos lugares a partir de una serie de parámetros característicos. Sin embargo, los resultados son muy dispares. Los acuíferos carbonáticos del País Vasco presentan parámetros similares a los del Pirineo francés (Antigüedad, 1986; Cruz Sanjulián *et al.*, 1986, 1987; Morales, 1991; Mugerza, 2001; Fernández de Valderrama, 2004), mientras que los parámetros característicos de los acuíferos del Sur de España no son comparables con aquellos (Thauvin, 1981; Obartí *et al.*, 1988, Sahuquillo *et al.*, 1987; Cruz Sanjulián *et al.* 1990; Cardenal, 1993; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2002b; Liñán, 2003).

Varios autores (Cruz Sanjulián *et al.*, 1990; Freixes, 1993; Eisenlohr, 1995; Andreo, 1997) sugieren que las respuestas de los sistemas acuíferos dependen, no sólo de su estructura interna, sino también de la señal de entrada (precipitaciones) y ésta, a su vez, es diferente según el área de trabajo. Precisamente, en el marco de una Acción Integrada Hispano-Francesa (HF1996-0139), cuyo objetivo fundamental consistió en evaluar la influencia del clima en la karstificación funcional de los acuíferos, se prestó especial atención al hecho de que en el Sur de España llueve menos y la distribución pluviométrica es más irregular que en los otros lugares donde se han aplicado los mismos métodos. Hay acuíferos carbonáticos del Sur de España con un comportamiento muy inercial, que presentan valores de parámetros característicos (hidrodinámicos, hidroquímicos o isotópicos), no contemplados en las clasificaciones establecidas, por ejemplo, para los dominios del Pirineo francés (Mangin, 1975; 1994). También sistemas del Sur de España con un cierto grado de karstificación presentan respuestas equivalentes a las obtenidas en los sistemas más inerciales del Pirineo (Jiménez *et al.*, 2002b; 2004b). Por tanto, es difícil comparar sistemas acuíferos carbonáticos de diferentes latitudes a partir de sus respuestas naturales.

Sin embargo, es posible aplicar los mismos métodos de investigación antes mencionados a sistemas situados en una latitud similar (Sur de España en este caso) y establecer una regionalización de los sistemas a partir de sus respuestas naturales. En la Cordillera Bética existen distintos tipos de comportamiento acuífero como han puesto de manifiesto diversos autores en varios acuíferos: Sierra de las Cabras (Jiménez *et al.*, 2001a, 2001b y 2002a), Sierras Blanca y Mijas (Andreo, 1997), Sierra de las Nieves-Yunquera (Liñán, 2003), Torcal de Antequera (Padilla, 1990; Padilla y Pulido, 1995), Sierras de Cazorla y Segura (Cruz Sanjulián *et al.*, 1990), Sierra Gorda de Loja (López Chicano, 1992), Sierra Lújar (Cardenal, 1993) y Sierra de Gádor (García López, 1997; Vallejos; 1997).

Existen, pues, una gran cantidad de investigaciones (tesis doctorales, artículos científicos e informes técnicos) que estudian un acuífero carbonático, o a lo sumo varios de ellos geológicamente relacionados (unidad hidrogeológica), en lugares concretos de la geografía andaluza. Hay, por tanto, abundante

información puntual en relación con muchos acuíferos carbonáticos del Sur de España. Sin embargo, no se ha llevado a cabo una integración de toda la información disponible y, lo que es más importante, no se ha investigado simultáneamente en varios acuíferos, con diferentes métodos al mismo tiempo, para llegar a establecer una caracterización regional del funcionamiento de los mismos.

En este sentido, aunque escasos, existen algunos antecedentes significativos (Bayó, 1982; Bayó *et al.*, 1986; Obartí *et al.*, 1988) que pueden tomarse como punto de partida. Estos trabajos realizan un primer intento de clasificación de los acuíferos carbonáticos, sobre todo españoles, en función del potencial de karstificación (alto, medio y bajo) que es establecido mediante parámetros calculados a través del análisis de series temporales y del análisis de las curvas de recesión.

De lo comentado anteriormente se desprende la necesidad de llevar a cabo una investigación hidrogeológica, durante un mismo periodo, para caracterizar los diversos comportamientos que presentan varios acuíferos de la Cordillera Bética y compararlos para determinar los factores que controlan la karstificación dentro de un mismo rango de latitud. Esto permitiría establecer una caracterización de los acuíferos carbonáticos a escala regional y tal vez, entonces, se estaría en condiciones de proponer criterios hidrogeológicos para una clasificación de este tipo de acuíferos que permitiría comparar sistemas de diferentes latitudes.

No obstante, los resultados obtenidos en el análisis coetáneo de varios acuíferos deben tener en cuenta la gran cantidad de información previa ya existente sobre éstos u otros acuíferos carbonáticos, y así poder validar las hipótesis de trabajo deducidas durante esta fase de la investigación. Por ello, otra parte de esta investigación ha ido encaminada a recopilar la máxima información posible sobre las respuestas naturales de diferentes sistemas carbonáticos y de esta forma obtener datos que permitan validar los criterios y/o factores utilizados para establecer una clasificación de acuíferos.

En definitiva, con el presente trabajo se ha pretendido hacer un estudio multidisciplinar, desde una perspectiva global, integradora, que permita conocer los factores que más intervienen en el mayor o menor desarrollo de la karstificación funcional de los acuíferos de nuestra latitud. Además se ha intentado establecer una serie de parámetros característicos del funcionamiento hidrogeológico de los sistemas, que permitan hacer una clasificación de los acuíferos carbonáticos a escala regional, la cual podría servir de referencia, no sólo desde un punto de vista científico, sino también en términos de planificación hidrológica o de gestión de recursos hídricos.

La presente memoria recoge los datos, los métodos, los tratamientos, los resultados, las discusiones y las reflexiones de una investigación basada fundamentalmente en el estudio de los principales puntos de descarga de 7 sistemas acuíferos distribuidos por la geografía andaluza, en los que se han controlado la función de entrada (cantidad de precipitación y la composición química e isotópica de la misma) y varias respuestas de la función salida: hidrodinámica (caudales), hidroquímica (componentes químicos mayoritarios y carbono orgánico total), isótopos (^{18}O y ^2H) e hidrotermia (temperatura del agua).

1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Se han seleccionado 7 sistemas acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, algunos de los cuales han sido investigados por otros autores y ya existe un cierto grado de conocimiento. En la mayoría de ellos había o se ha realizado una infraestructura para poder llevar a cabo una investigación hidrogeológica detallada.

Una descripción preliminar de los acuíferos seleccionados de W a E permite contemplar que el acuífero más occidental es la Sierra de las Cabras (Figura 1.3).

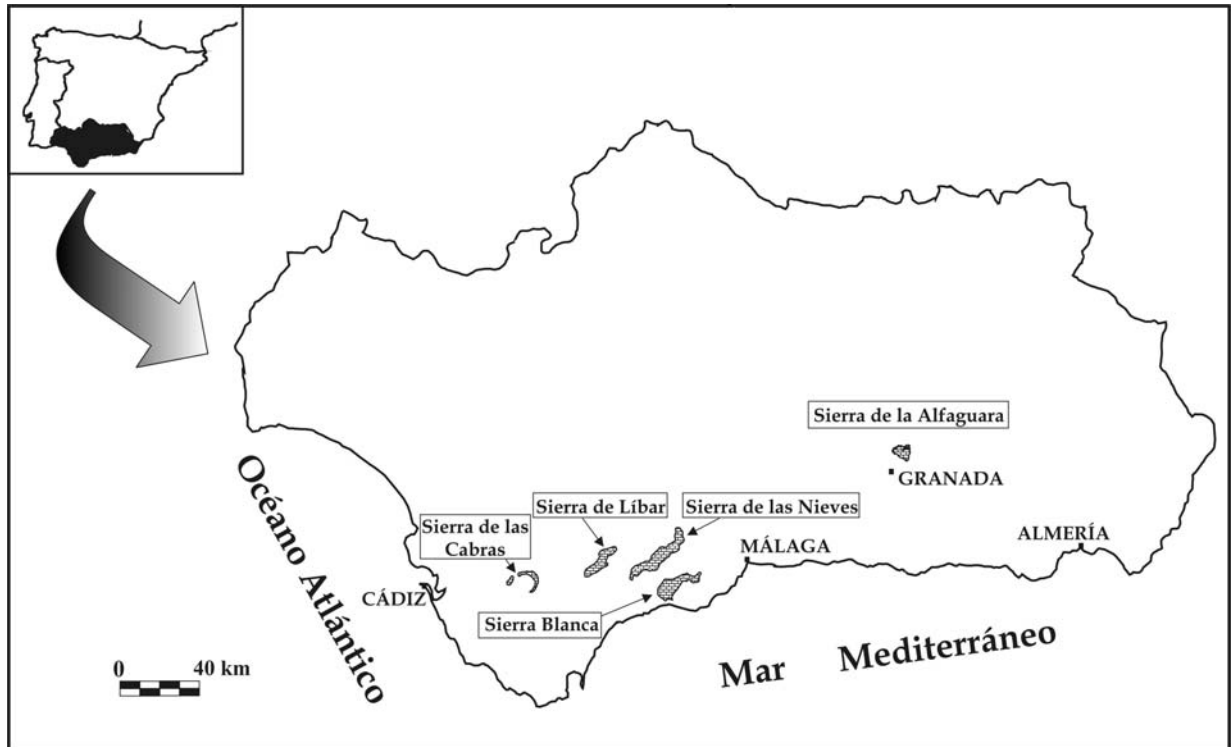


Figura 1.3. Localización geográfica de los macizos carbonáticos estudiados.

Este acuífero está situado en la parte central de la provincia de Cádiz y comprende varias sierras (del Valle, de Dos Hermanas, de la Sal, de las Cabras y de la Loma de El Tempul, nombradas de Oeste a Este) que configuran una alineación montañosa de 42 km² de extensión, cuya forma en planta es de medialuna con la concavidad abierta hacia el Suroeste. El sector oriental de este conjunto de serranías (Sierra de las Cabras s.s.) se engloba dentro del Parque Natural de “Los Alcornocales”. La Sierra de las Cabras es un acuífero de gran interés puesto que su principal punto de descarga (manantial de El Tempul) ha constituido, históricamente, la fuente de abastecimiento de agua a Jerez de la Frontera. Este acuífero está limitado, en gran parte de su perímetro, por carreteras comarcales que comunican las localidades situadas en sus bordes. Así, al Norte de la sierra, se encuentra la carretera que comunica la localidad de San José del Valle, con la aldea de El Tempul, que da nombre al manantial allí existente. Además, esta área de trabajo se encuentra atravesada por dos cauces fluviales: el arroyo de Bujalance en la parte occidental y el arroyo de Bogaz, también llamado Boca de Foz, en la parte oriental.

La Sierra de Líbar (Figura 1.3), situado entre las provincias de Málaga y Cádiz, es el segundo acuífero estudiado. Este macizo se encuentra en el sector occidental de la Serranía de Ronda, presenta una forma trapezoidal en planta, de aproximadamente 22 km de longitud por 6,5 km de anchura, con una superficie total de 103 km². Está constituido por una alineación montañosa que, según una dirección NE-SW, se extiende entre las localidades malagueñas de Montejaque y Cortes de la Frontera. La Sierra de Líbar junto con la de Grazalema, fueron declaradas Reserva de la Biosfera por la UNESCO y, posteriormente, la Junta de Andalucía declaró el conjunto Parque Natural. Este macizo carbonático constituye una de las unidades paisajísticas más emblemáticas de la región, con un modelado kárstico espectacular, a gran escala, por la existencia de extensas cuencas endorreicas y por la gran variedad y cantidad de formas exokársticas y endokársticas. A pesar de la presencia del hombre desde épocas remotas, la sierra conserva una importante masa de vegetación natural típicamente mediterránea.

Inmediatamente al E de la anterior, se encuentra la Sierra de las Nieves, con una superficie aproximada de 170 km² (Figura 1.3), también dentro de la comarca natural de la Serranía de Ronda y, más concretamente, en el interior del Parque Natural “Sierra de las Nieves” y de la Reserva de la Biosfera de la UNESCO “Sierra de las Nieves y su Entorno”. La Sierra de las Nieves s.s. forma parte de una alineación montañosa de dirección aproximada NE-SW, que incluye con las sierras del Pinar de Yunquera, Cabrilla, Bonela, Prieta y Alcaparaín. En sus bordes, se encuentran varios núcleos de población que se encuentran comunicados mediante varias carreteras autonómicas y/o locales. Al igual que la Sierra de Líbar, esta área de estudio cuenta con importantes valores paisajísticos, culturales y geológicos aunque es conocida, fundamentalmente, por su importante riqueza botánica (pinsapos, quejigos, encinas y alcornoques). Además, presenta una orografía muy accidentada, con altitudes medias alrededor de los 1.100 m y el vértice más elevado de la provincia de Málaga (Torrecilla, 1.919 m). El importante desarrollo exokárstico, pero sobre todo endokárstico, queda patente por la abundancia de simas entre las que se encuentra la más profunda del Sur de la península Ibérica y una de las más profundas del planeta, la sima G.E.S.M., con -1.101 m explorados

hasta el momento (Sociedad Excursionista de Málaga, 1990) y la sima del Aire, con -650 m explorados hasta Agosto de 2003, según datos de la Sociedad Excursionista de Málaga. A partir de criterios geológicos e hidrogeológicos, Liñán (2003) diferenció tres sistemas acuíferos dentro de este macizo carbonático, dos de ellos analizados en esta investigación: el sistema de la Sierra de las Nieves, con una superficie de 109 km² que corresponde al sector occidental de la Unidad y el denominado sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín, con una superficie de 44 km², el cual corresponde a un área con menor pluviometría y con un menor desarrollo del modelado kárstico que el de la Sierra de las Nieves.

Al S-SE de la Sierra de las Nieves se sitúa Sierra Blanca (Figura 1.3), la cual forma parte de la cadena montañosa que limita al Norte la Costa del Sol y se encuentra separada de su prolongación oriental (Sierra de Mijas) por el Puerto de los Pescadores. La Sierra Blanca presenta una superficie de 113 km² y se caracteriza por su posición estratégica, ya que constituye una divisoria socioeconómica entre las poblaciones del borde septentrional dedicadas fundamentalmente a la agricultura en contraposición a la fuerte presión que ejerce el sector turístico en la vertiente meridional. En la borde Sur de Sierra Blanca, al Norte de la localidad de Marbella se encuentra el sistema acuífero del mismo nombre. Es uno de los ocho sistemas acuíferos carbonáticos distinguidos por Andreo (1997). Otro sistema acuífero estudiado dentro del contexto de Sierra Blanca, también definido por el mismo autor, es el sistema de Ojén, que se encuentra al NW de la localidad del mismo nombre. Estos dos acuíferos presentan una extensión aproximada de 24 y 13 km², respectivamente.

En el centro geográfico de la provincia de Granada, al NE de la capital, se encuentra la Sierra de la Alfaguara (Figura 1.3). Este macizo delimita el borde nororiental de la cuenca de Granada y abarca una extensión de unos 20 km² y corresponde a la estribación SW de la alineación montañosa de Sierra Arana (Jiménez *et al.*, 2004a). Este paraje forma parte del Parque Natural de la "Sierra de Huétor", declarado por la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. La cercanía y posición elevada con respecto a la ciudad de Granada y a los núcleos

poblacionales situados en sus inmediaciones han hecho de este acuífero carbonático un punto estratégico para el abastecimiento de éstos.

1.3. OBJETIVOS

Los principales objetivos que se han pretendido alcanzar al final de esta investigación han sido:

1. Caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de varios sistemas acuíferos carbonáticos experimentales, durante un mismo periodo de tiempo, a partir de sus respuestas naturales: hidrodinámicas (caudal), hidroquímicas (componentes químicos mayoritarios, TOC), isotópicas (^{18}O y ^2H) y a partir de trazadores artificiales. Contrastar estos resultados con los obtenidos a partir de la aplicación de diferentes metodologías a series históricas de caudal de los principales puntos de descarga de estos acuíferos. Además, en aquellos sistemas acuíferos ya caracterizados por otros autores previos, se intenta profundizar y contrastar las conclusiones de dichos estudios.

2. Realizar una comparación entre los distintos sistemas estudiados durante un mismo periodo de tiempo, a partir de parámetros hidrodinámicos, hidroquímicos e isotópicos, que tengan utilidad al respecto, que permita caracterizar los diversos tipos de funcionamiento hidrogeológico que presentan acuíferos carbonáticos representativos de la Cordillera Bética y, además, conocer los factores que controlan la karstificación funcional dentro de un mismo rango de latitud.

3. Contrastar el grado de aplicabilidad a los acuíferos carbonáticos del Sur de España de determinadas metodologías de trabajo utilizadas en otras áreas nacionales y extranjeras.

4. Analizar la influencia del clima en el funcionamiento de los acuíferos carbonáticos del Sur de España, en comparación con el contexto tectónico y morfoestructural.

5. Establecer una clasificación de los acuíferos carbonáticos, a escala regional, mediante una serie de parámetros sencillos, que contemplen la diversidad de comportamientos hidrogeológicos de, al menos, los sistemas acuíferos del Sur de España, que pueda ser utilizada, de un modo general, por las comunidades científica y técnica.

Los beneficiarios científicos de la consecución de estos objetivos son directamente todos los investigadores de hidrogeología de acuíferos carbonáticos del Sur de España y, en general, la comunidad científica dedicada a dicho cometido. Además, algunos de estos objetivos muestran un claro afán integrador, ya que éstos han sido analizados desde una perspectiva global que permita avanzar en el conocimiento hidrogeológico del medio carbonático.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para poder alcanzar los objetivos expuestos en el epígrafe anterior ha sido necesario el empleo de diversas metodologías de campo, laboratorio y gabinete.

1.4.1. Métodos de campo

1.4.1.1. Reconocimiento del medio físico de las áreas de estudio

Se ha llevado a cabo un detallado reconocimiento físico y geológico de las diferentes áreas de estudio. En aquellos sistemas acuíferos caracterizados anteriormente por otros investigadores, las labores de campo han ido encaminadas a un reconocimiento tanto de la cartografía geológica ya existente como de las diferentes características de tipo geológico (serie estratigráfica, estructura geológica), geomorfológico (principales formas del modelado, con especial atención a las formas kársticas de absorción) e hidrogeológico (puntos de agua).

En aquellas áreas en las que el conocimiento del medio físico era menor, como la Sierra de Líbar, se ha completado la cartografía geológica que se recoge en las hojas de Ubrique (1057) y Cortes de la Frontera (1064), correspondientes al Mapa Geológico Nacional, a escala 1:50.000 con la de Martín Algarra (1987).

Paralelamente a esta revisión de la cartografía geológica, se ha llevado a cabo una recopilación de las principales cavidades, simas y sumideros descubiertas, hasta ahora, por los diferentes grupos espeleológicos que trabajan en la Sierra de Líbar (Grupo Plutón, Grupo de exploraciones espeleológicas de Jerez, Espeleoclub karst, Grupo de Espeleología de la Sociedad Excursionista Malagueña). Toda esta información, junto con la detallada cartografía geomorfológica elaborada por Delannoy (1987), ha permitido avanzar en el conocimiento de la relación existente entre las formas superficiales, los diferentes modos de absorción y la hidrogeología de esta sierra.

Por último, entre los trabajos de campo, cabe señalar dos ensayos de trazadores. El primero de ellos, realizado en la Sierra de Líbar, consistió en un ensayo multitrazador durante un periodo de aguas altas (Noviembre de 2002), con el que se pretendía conocer la conexión hidráulica entre los poljes y los principales mananciales y determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del sistema. Estos resultados permiten precisar el funcionamiento hidrodinámico del sistema deducido por otros métodos hidrogeológicos.

La Sierra de las Nieves fue el área donde se llevó a cabo el segundo ensayo de trazador, el cual se desarrolló en una situación de aguas bajas, durante la fase final de esta investigación (Septiembre de 2003).

1.4.1.2. Inventario de puntos de agua. Establecimiento de la red de control

A partir de los estudios previos y de los trabajos de campo efectuado en esta investigación se han seleccionado los principales puntos para establecer una red de control de los acuíferos investigados, con el fin de controlar periódicamente varios parámetros (caudal, altura de lámina de agua, parámetros físico-químicos e isotópicos). Los criterios de selección de estos puntos han estado regidos por la importancia de éstos en el conjunto de la descarga de los acuíferos y por la existencia de una infraestructura previa para el control a corto término de los parámetros anteriormente comentados.

1.4.1.3. Medidas en la red de control. Periodicidad de muestreo

A partir del inventario elaborado se estableció el control periódico de 9 manantiales y de cuatro estaciones de muestro de aguas de lluvia. Las medidas en esta red se iniciaron a principios de Marzo de 2000 y finalizaron a finales de Septiembre de 2003. La periodicidad de muestreo ha sido variable de unos puntos a otros, no obstante en los siguientes apartados se especifican las periodicidades medias para cada uno de los parámetros controlados

Medida de las precipitaciones

Dentro de las diferentes áreas de estudio o en sus proximidades hay instalados varios pluviómetros y pluviógrafos, pertenecientes al Distrito Hidrográfico Mediterráneo de la Agencia Andaluza del Agua (AAA) -antigua Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE)-, Instituto Nacional de Meteorología y Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. Dada la ausencia de aparatos de medida en las zonas más elevadas de la Sierra de Líbar, se instaló un nuevo pluviógrafo proporcionado por la CHSE en el polje del Pozuelo, durante el mes de Diciembre de 1999. Los datos de los que se ha dispuesto para todas las áreas caracterizadas corresponden a valores de precipitación diaria.

Control de caudal. Aforos

Desde el mes de Marzo de 2000 hasta Septiembre de 2003 se aforó, semanal o quincenalmente, el caudal de las surgencias cuya curva de gastos no era aún conocida. En total se han efectuado 317 aforos, con un micromolinetete marca OTT. En la tabla 1.1 se recogen la periodicidad de control foronómico en cada uno de los manantiales y el periodo de control durante el cual se ha desarrollado esta labor. La mayor parte de los puntos de descarga a controlar desde el punto de vista hidrodinámico presentaban una infraestructura previa para el control, al menos diario, de los mismos.

En el manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz), se ha controlado la altura de lámina de agua diaria en la estación de aforos de la Empresa de Aguas de Jerez (AJEMSA). Por tanto, se ha dispuesto de los valores de caudal medio diario mediante la aplicación de la curva de gastos de la estación de aforos. Esta serie de caudales diarios comprende desde Enero de 1985 hasta Septiembre de 2003. Además, se ha dispuesto de una serie histórica de caudales medios mensuales de excepcional longitud, desde Junio de 1862 hasta Diciembre de 1984.

En el manantial de Benaoján, el cual constituye uno de los dos puntos de descarga considerados en la Sierra de Líbar (Málaga), la Confederación Hidrográfica del Sur de España construyó una estación de aforos y, desde Diciembre de 1999, existe un Data Logger modelo *Thalimedes*, marca SEBA HYDROMETRIE, equipado con registro continuo de altura de lámina de agua. Se cuenta también con registros de limnigrafos OTT en el manantial de la Cueva del Gato (desde Octubre de 1945). En el caso de este manantial, no ha sido necesario aforarlo periódicamente ya que existe una curva de gastos histórica calculada por la CHSE. No obstante, durante el periodo de investigación se realizaron aforos puntuales, sobre todo en situación de aguas bajas, para comprobar que el ajuste de la curva era correcto.

En la Sierra de las Nieves (Málaga), la Cuenca Mediterránea Andaluza tiene instalados sendos limnigrafos en el manantial del Río Genal (Igualeja) y en el río Grande (estación de las Millanas). El limnógrafo de Río Grande es controlado por el personal del citado Organismo, mientras que el limnógrafo del manantial del Río Genal ha sido controlado con una periodicidad quincenal, a la vez que se realizaban el resto de puntos de la red de control en el marco de esta investigación.

Durante el mes de Septiembre de 2000, la CHSE construyó una estación de aforos en el manantial del Río Jorox, principal punto de descarga del sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín. Esta estación ha estado dotada durante el presente estudio de un limnógrafo OTT, aunque desde Enero de 2003 ha dispuesto también de un Data Logger modelo *Thalimedes*, marca SEBA HYDROMETRIE, equipado con registro continuo de altura de lámina de agua.

En el manantial de Nagüeles, principal punto de descarga del sistema acuífero del mismo nombre, ha habido, desde Octubre de 1999 hasta Julio de 2003, un Data Logger modelo *MDS II*, marca SEBA HYDROMETRIE, equipado con registro continuo de altura de lámina de agua.

Se ha contado también con registros de un limnógrafo OTT en el manantial de Ojén (sistema de Ojén) durante todo el período de estudio.

En la Fuente Grande de Alfacar (Sierra de la Alfaguara, Granada), se inició el control de caudales en el mes de Marzo de 2000 mediante una escala limnimétrica situada en el canal de salida de la surgencia. Las lecturas de escala en este canal han sido realizadas por la empresa de aguas SERAGUA con una periodicidad variable (diaria-semanal), según el régimen de precipitaciones.

Recogida de muestras de agua

Aguas de precipitación: en cuatro puntos de muestreo representativos de las diferentes áreas de estudio, se han recogido un total de 168 muestras de agua de lluvia para análisis químicos (componentes mayoritarios) e isotópicos (^{18}O y ^2H), con una periodicidad quincenal o semanal en función de los eventos pluviométricos, desde Marzo de 2000 hasta Julio de 2003.

Aguas subterráneas: entre Marzo de 2000 y Septiembre de 2003, paralelamente a la toma de muestras de aguas de precipitación y al control hidrodinámico de la red de manantiales, se tomaron 635 muestras de agua, en frascos de plástico de 500 mL, para determinar en el laboratorio sus componentes químicos mayoritarios. Al mismo tiempo se han recogido muestras de agua en frascos de 50 mL de topacio para el posterior análisis de ^{18}O y ^2H . En la tabla 1.1 se recogen la periodicidad en la toma de muestras para cada uno de los manantiales y el periodo de control durante el cual se ha desarrollado esta labor.

PERIODICIDAD			
	Período de control	Control de caudal	Recogida de muestras de agua
<i>Manantial de Benaoján</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Diaria/Semanal/Quincenal
<i>Manantial de la Cueva del Gato</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Semanal/Quincenal
<i>Manantial del río Genal</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Semanal/Quincenal
<i>Manantial del río Grande</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Semanal/Quincenal
<i>Manantial de Nagüeles</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Semanal/Quincenal
<i>Manantial de Ojén</i>	20/03/2000-30/09/2003	Diario	Semanal/Quincenal
<i>Manantial de la Fuente Grande</i>	03/05/2000-28/09/2003	Diario/Semanal	Diaria/Semanal

Tabla 1.1. Cuadro resumen con las periodicidades de control foronómico y de toma muestras de agua en cada uno de los manantiales estudiados.

Durante el período de investigación, varios observadores han recogido diariamente botellas de agua en el manantial de Benaoján y en la Fuente Grande de Alfacar, en ambos casos para la determinación de la conductividad eléctrica y, ocasionalmente, el contenido en cloruros. El número total de muestras recogidas por los observadores ha sido de 595.

Entre Diciembre de 2002 y Septiembre de 2003, de cada uno de los manantiales estudiados, se ha tomado una muestra más, en un frasco de topacio de 30 mL, para su posterior análisis del carbono orgánico total (C.O.T.). Este muestreo se realizó al mismo tiempo que la toma de muestras llevada a cabo para la caracterización hidroquímica.

Por último, para los dos ensayos de trazadores realizados se tomaron muestras en frascos de topacio oscuro de 60 mL y se almacenaron en oscuridad y refrigeradas para evitar la fotodegradación del trazador y aminorar la actividad microbiana, procesos causantes de la pérdida de concentración de trazador en el agua. El número de muestras recogidas en el ensayo de la Sierra de Líbar fue de 261 y, 187 en el caso de la Sierra de las Nieves.

Medida de parámetros físico-químicos

Se ha medido “in situ” el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica durante cada una de las campañas de muestreo.

Las medidas correspondientes a la conductividad eléctrica y temperatura del agua se han realizado con un aparato modelo LF 196 de la marca WTW

equipado con una sonda modelo WRW Tetracon 96 de la misma marca. Los sensores de conductividad eléctrica y temperatura tienen una precisión del 0'5% de la medida y del 0'1°C, respectivamente. Los valores de conductividad eléctrica se han medido a una temperatura de referencia de 20°C.

La medida de pH se ha realizado con un pHmetro de campo, modelo LF 192 de la marca WTW, cuya precisión es de $\pm 0'01$ unidades de pH. Antes de realizar las campañas de medida se llevaba a cabo la calibración del aparato con soluciones patrón de 7'02 y 4'00 unidades de pH.

1.4.2. Métodos de Laboratorio

Los trabajos de laboratorio han consistido, fundamentalmente, en la realización de los análisis de las muestras de agua recogidas previamente durante los trabajos de campo.

1.4.2.1. Análisis químicos de las aguas

Se han analizado 9 parámetros en el laboratorio, cuatro cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), tres aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), alcalinidad (T.A.C.) y SiO_2 . En la etapa final del período de muestreo se ha determinado la concentración de carbono orgánico total (C.O.T.).

Componentes químicos mayoritarios

Todas las determinaciones analíticas de cationes, aniones, T.A.C. y SiO_2 han sido realizadas por el autor de la tesis en el Laboratorio de Hidrogeología del Departamento de Geología de la Universidad de Málaga.

Las botellas tomadas en las diferentes campañas de muestreo, tanto de agua de lluvia como de manantiales, se determinaron los parámetros calcocarbónicos (T.A.C., Ca^{2+} y Mg^{2+}) el mismo día de la recogida de la muestra. En el caso de las muestras de agua de lluvia, cuando la cantidad de agua recogida no ha sido

suficiente para realizar el análisis completo, se ha determinado en primer lugar la concentración en Cl^- , Na^+ y K^+ .

Las muestras de agua tomadas por observadores, sólo se ha medido la conductividad eléctrica y, ocasionalmente, el contenido en cloruro que, como es sabido, es un ión conservativo de gran interés en los estudios hidrogeológicos de acuíferos carbonáticos.

Los análisis se realizaron siguiendo los métodos estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989) y considerando algunas indicaciones de Aminot (1974), Custodio y Llamas (1976), Rodier (1978) y Bakalowicz (1979). Los métodos analíticos empleados se describen, brevemente, a continuación:

- Ca^{2+} : por complexometría, previa adición de NaOH, para analizar en medio básico ($\text{pH} \cong 12$). Se ha añadido EDTA 0,02 M, hasta un viraje del indicador metalcrómico, en este caso calcón, de rojo vino a púrpura.

- Mg^{2+} : se ha determinado la dureza total ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) también por complexometría, a través de la valoración con EDTA y negro de ericromo T, previa adición de una mezcla tampón ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_3$). A continuación, se han añadido volúmenes de ácido hasta un viraje del indicador de rojo burdeos a azul. La concentración en Mg^{2+} se obtuvo después por diferencia entre la dureza total y Ca^{2+} .

- Na^+ y K^+ : se han determinado con un fotómetro de llama de la marca EEL.

- Alcalinidad (T.A.C.): se ha valorado con SO_4H_2 0,02N mediante un titrador digital hasta un pH de 4,50 (método potenciométrico).

- Cl^- : mediante volumetrías (argentometría). La adición de un agente valorante como el AgNO_3 0,01 N produce la precipitación de AgCl y un viraje del indicador (K_2CrO_4 al 10%) de amarillo hasta un rojo-anaranjado.

- SO_4^{2-} : a partir de técnicas gravimétricas. Se ha añadido Cl_2Ba sobre la muestra caliente y en medio ácido (CIH al 10%) para formar un precipitado de SO_4Ba que queda retenido en un filtro de fibra de vidrio, previamente pesado. Posteriormente este filtro se desecó y pesó y, por diferencia de pesada, se calculó

la concentración en SO_4^{2-} . La balanza de precisión utilizada (SARTORIUS) tiene una precisión de $\pm 0,5$ mg.

- SiO_2 : por colorimetría, mediante la adición de molibdato amónico en medio ácido (CIH al 50%) y de ácido oxálico para evitar la interferencia de fosfatos. Las lecturas se realizaron en un espectrofotómetro ROY MILTON a una longitud de onda de 410 nm.

- NO_3^- : también se utilizó un método colorimétrico consistente en añadir reactivo de brucina sobre la muestra en medio ácido (con SO_4H_2). Las lecturas se efectuaron en el espectrofotómetro ROY MILTON a una longitud de onda de 410 nm.

Para el cálculo de las concentraciones de SiO_2 y NO_3^- , las lecturas en el espectrofotómetro se han llevado a las rectas patrón, las cuales han sido realizadas a partir de un blanco y tres patrones de calibración. Todas ellas se han preparado antes de la medida de las muestras, para descartar posibles precipitaciones que disminuyeran las concentraciones. En todas las campañas se han mantenido las mismas concentraciones de los patrones.

Tanto para la preparación de disoluciones de reactivos, como para la limpieza de los utensilios de laboratorio se ha utilizado agua desionizada. Este agua desionizada, obtenida a partir del paso de agua previamente bidestilada por un sistema de purificación, da lugar a un agua con una conductividad inferior a $1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Análisis del Carbono Orgánico Total (C.O.T.)

Esta determinación ha sido realizada en el Laboratorio de Hidrogeología de la Universidad de Avignon a través de un TOC ANALYSER MODEL 700 de BIORITECH. Las muestras han sido estabilizadas en el propio muestreo de campo con cloruro mercuríco y conservadas a una temperatura de 4°C . Previamente al muestreo, los frascos de topacio se han limpiado con una solución de ácido nítrico N/10 y lavados tres veces con agua desionizada. El tratamiento analítico se llevó a

cabo en dos fases: (1) el carbono de origen mineral se eliminó por la adición de un ácido fuerte, mientras que el carbono orgánico se transformó en CO₂ gaseoso debido a la presencia de un agente oxidante y (2) la cantidad de CO₂ es detectada posteriormente por un detector infrarrojo no disperso. La masa de CO₂ analizada es equivalente al contenido en C.O.T. de la muestra.

1.4.2.2. Análisis isotópicos de las aguas

Los análisis isotópicos han consistido en la determinación de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, que ha sido realizada en los laboratorios de isótopos estables de la Estación Experimental del CSIC (Granada). Se ha utilizado el método del equilibrio del CO₂ (Epstein y Mayeda, 1953; Fontes *et al.*, 1965), basado en el equilibrado isotópico de una cierta cantidad de agua y dióxido de carbono en baño termostático con agitación, y posterior extracción del CO₂ para su análisis isotópico. La composición isotópica del oxígeno del agua analizada puede ser inferida de la obtenida en el oxígeno del CO₂ que se ha introducido, las cuales están relacionadas por equilibrios isotópicos.

El proceso analítico de la muestra de agua cuya composición se quiere determinar se resume a continuación: (1) se prepara la muestra en una ampolla de vidrio que se lleva a una línea para la extracción del CO₂ de ésta, (2) se introduce CO₂ de composición isotópica conocida, previamente purificado en una trampa de nitrógeno líquido, y se somete a un equilibrio isotópico entre el ¹⁸O del CO₂ de la muestra y el del CO₂ de composición conocida, a una temperatura de 25 °C y (3) al cabo de 12 horas se extrae el CO₂ ya equilibrado y se analiza en el espectrómetro de masas FINNIGAN MAT 251.

En ambos casos la metodología empleada consiste en la comparación de la relación isotópica de la muestra analizada ($R_{\text{MUESTRA}} = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) con la del patrón internacional SMOW ($R_{\text{SMOW}} = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), $\delta^{18}\text{O} = (R_{\text{MUESTRA}} - R_{\text{SMOW}} / R_{\text{SMOW}}) \times 1000$, expresada en ‰ (δ).

1.4.2.3. Análisis de trazadores artificiales

Los análisis de las muestras tomadas durante los dos ensayos de trazadores han consistido en la medida de los espectros de fluorescencia de los trazadores utilizados con un espectrómetro de luminiscencia Perkin Elmer LS-50B, dotado de barrido sincronizado, que ha permitido estudiar de forma conjunta los espectros de excitación y emisión. Todos los análisis se han realizado, en un plazo inferior a una semana, en el laboratorio del Departamento de Geología Aplicada de la Universidad de Karlsruhe (Alemania). Los límites de detección para la Uranina, Eosina y Sulforodamina B han sido, respectivamente, de 0'05 mg/L, 0'06 mg/L y 0'03 mg/L.

1.4.3. Métodos de gabinete

1.4.3.1. Recopilación bibliográfica

Una de las labores primordiales ha consistido en la recopilación de la bibliografía geológica, pero sobre todo hidrogeológica, previamente publicada en relación con todos los sistemas acuíferos, así como de los informes realizados, tanto por Organismos Públicos (IGME, CHSE y Ayuntamientos) como por la iniciativa privada (CEPSA). Gran parte del tiempo dedicado a esta recopilación ha ido encaminada, por un lado, a temas específicos relacionados con la aplicación de metodologías clásicas para la caracterización de acuíferos carbonáticos, tanto dentro del contexto regional en el que se ubica este estudio como de áreas diferentes. Por otro lado, se ha realizado una búsqueda de referencias en las bases de datos del Instituto para la Investigación Científica (ISI) y poder así conocer los últimos avances conseguidos en la aplicación de nuevas metodologías de estudio para la caracterización de acuíferos carbonáticos.

Con todo ello se ha generado un importante volumen de información sobre los condicionantes de los acuíferos carbonáticos en general (geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos) y de las metodologías utilizadas por diferentes investigadores en este campo.

1.4.3.2. Recopilación de datos hidrometeorológicos

Se ha llevado a cabo una recopilación de los datos históricos sobre series de caudales (con frecuencia inéditos) de los principales puntos de descarga de la Sierra de las Cabras (manantial de El Tempul) y de la Sierra de Líbar (manantial de la Cueva del Gato). Las principales fuentes de suministro de estos datos han sido el IGME y la CHSE (actual AAA). La recopilación de todas estas series de datos, excepcionalmente prolongadas en el tiempo en algunos casos, ha permitido que sean tratadas mediante diferentes técnicas o métodos de análisis de series temporales.

Los datos relativos a la precipitación en las diferentes áreas de estudio se han obtenido, principalmente, de los archivos de la antigua Confederación Hidrográfica del Sur de España que tiene instalada un importante red de estaciones en la región. Además, se ha obtenido información de otros organismos como la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía y el Instituto Nacional de Meteorología.

1.4.3.3. Análisis y tratamiento de los datos

Datos meteorológicos

Los datos climáticos procedentes de las estaciones meteorológicas de las diferentes áreas de estudio se han completado y depurado, mediante el paquete de programas *HIDROBAS*. Además se han calculado los diferentes parámetros estadísticos de la precipitación para el periodo durante el cual se ha desarrollado esta investigación y se ha analizado la distribución espacial de los datos para cada uno de los sistemas acuíferos estudiados.

Hidrodinámica

En los manantiales que no disponían de curva de gastos, ésta se ha realizado a partir de la información procedente tanto de los aforos con

micromolinete, realizados por el autor de la tesis, como de los aforos realizados por el personal de la Agencia Andaluza del Agua.

Con los datos de caudal procedentes de la aplicación de la curva de gastos, a partir de las alturas de lámina de agua deducidas del análisis de los limnigramas, se han elaborado los hidrogramas de las surgencias y se han determinado diversos parámetros estadísticos. Estos hidrogramas se han analizado siguiendo la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975) y han sido objeto de análisis de la curva de caudales clasificados. Otro tratamiento llevado a cabo ha sido la aplicación del análisis correlatorio y espectral de las series de datos mediante el programa *STOCHASTOS*, elaborado por el Dr. D'Ulst, del Laboratorio de Aguas de Moulis (Francia). También a las series de datos de lluvia-caudal correspondientes al período de investigación se ha aplicado el análisis continuo *wavelet* a partir del software gratuito para *MATLAB* proporcionado por Torrence y Compo (1998) en la dirección <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>. Estas mismas metodologías han sido aplicadas a las series históricas de registro foronómico.

Parámetros físico-químicos

Se han calculado los diferentes parámetros estadísticos (media, máximo, mínimo, desviación típica, coeficiente de variación) de la conductividad eléctrica, temperatura y pH de las muestras de agua de lluvia y de agua subterránea recogidas durante el período de investigación. Además, se han elaborado gráficos con la evolución temporal de dichos parámetros físico-químicos.

Hidroquímica e Isótopos

A partir de los análisis hidroquímicos y mediante el programa *DIAGRAMMES*, creado por R. Simler del Laboratorio de Hidrogeología de la Universidad de Avignon, se han elaborado diagramas de Piper para determinar la facies hidroquímica de las diversas muestras de agua de lluvia y subterráneas

analizadas. En todo este tipo de tratamientos no se han utilizado las muestras (observaciones o unidades estadísticas), cuyos análisis presentaban un error de $\pm 6\%$, siempre según la fórmula $(\text{Cat}-\text{An}/\text{Cat}+\text{An}) \times 200$.

Los parámetros característicos del sistema calcocarbónico (presión parcial de CO_2 e índices de saturación en calcita y dolomita) se han calculado mediante el programa *AQUA*. Se han representado evoluciones temporales de los distintos componentes de las aguas para tratar de comparar la respuesta hidroquímica e isotópica con la hidrodinámica y evaluar así el grado de karstificación funcional y la capacidad de regulación de los diversos acuíferos. Además, se han elaborado curvas de frecuencia para los diferentes parámetros y se ha estudiado la mayor o menor importancia de cada uno de los componentes analizados en la distribución espacial del quimismo de las aguas mediante Análisis de Componentes Principales a partir del software *XLSTAT-Pro*.

Para los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, tanto de las aguas de lluvia como para el agua subterránea, se han realizado gráficos de su evolución temporal que han permitido comparar la distribución de la señal pluviométrica frente a la registrada en los puntos de descarga.

Discusión

Para el análisis de los resultados obtenidos y criticar y evaluar las diferentes metodologías aplicadas, se han realizado diagramas X-Y con los valores de los principales parámetros seleccionados. Además, para poder establecer qué parámetros dan más información sobre el funcionamiento de los acuíferos y comprobar qué afinidades se establecen entre los diferentes acuíferos se han realizado varios Análisis de Componentes Principales (ACP), así como tres Análisis Cluster mediante el programa *STATISTICA*.

1.4.3.4. Organización y redacción de la memoria de Tesis Doctoral

Esta investigación no es un estudio hidrogeológico clásico, en el sentido de estudio monográfico sobre el acuífero principal de un área, sino que trata sobre una caracterización de diversos sistemas durante un mismo intervalo temporal.

Por ello no se presenta un análisis muy exhaustivo sobre las características geológicas e hidrogeológicas de las diferentes áreas de estudio.

Aunque no se muestran estrictamente como bloques temáticos diferenciados, la memoria presenta tres partes claramente diferenciadas. La primera de ellas incluye tres capítulos: introducción a la temática del estudio planteado, descripción y revisión de la metodología utilizada en esta investigación y definición del marco climático que ha caracterizado las diferentes áreas estudiadas durante el desarrollo de la misma.

La segunda parte comprende el volumen más importante de información, capítulos del 4 al 9, donde se recogen los resultados obtenidos para cada uno de los sistemas acuíferos analizados. La estructuración de cada capítulo de esta parte es muy similar. Comienza, con una breve descripción de las características geológicas e hidrogeológicas y a continuación, se aborda la caracterización hidrodinámica e hidroquímica. Estos dos trabajos se han realizado en todos los sistemas, excepto en la Sierra de la Cabras (capítulo 4), donde tan sólo ha sido posible analizar la respuesta hidrodinámica. Además, en cuatro de los acuíferos analizados, se ha llevado a cabo un análisis de los datos isotópicos. Por último, en los capítulos 5 y 6 se recogen los resultados obtenidos en dos ensayos de trazadores realizados en la Sierra de Líbar y la Sierra de las Nieves, respectivamente.

La tercera parte incluye dos de los capítulos más importantes de esta memoria de investigación. El capítulo 10 recoge la caracterización y comparación conjunta de los sistemas acuíferos investigados, el análisis sobre el grado de aplicabilidad de las diferentes metodologías utilizadas y la discusión y desarrollo de la propuesta de clasificación, a escala regional, de los acuíferos carbonáticos. El último capítulo (11) reúne las principales conclusiones, que se han dividido por un lado, en las relacionadas directamente con los resultados de la caracterización y comparación del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos estudiados y, por otro, las relativas a la aplicabilidad de los diferentes métodos o técnicas utilizadas, así como de la propuesta de clasificación de los acuíferos

carbonáticos a partir de sus respuestas naturales. Finalmente, tras la exposición de las principales conclusiones se muestra una extensa relación de los trabajos bibliográficos citados en la memoria.

2. INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS APLICADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDRODINÁMICA

2.1. ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS

En general, el término “hidrograma” en el campo de la Hidrología se define como la curva que representa la variación en el tiempo de una circunstancia relativa a la circulación de agua (caudal de un río, caudal de un manantial, nivel piezométrico de un sondeo, etc...). En esta investigación, la variable que se ha estudiado corresponde al caudal drenado por los manantiales de sistemas acuíferos carbonáticos en función del tiempo. Así, dentro del hidrograma es posible diferenciar (Figura 2.1):

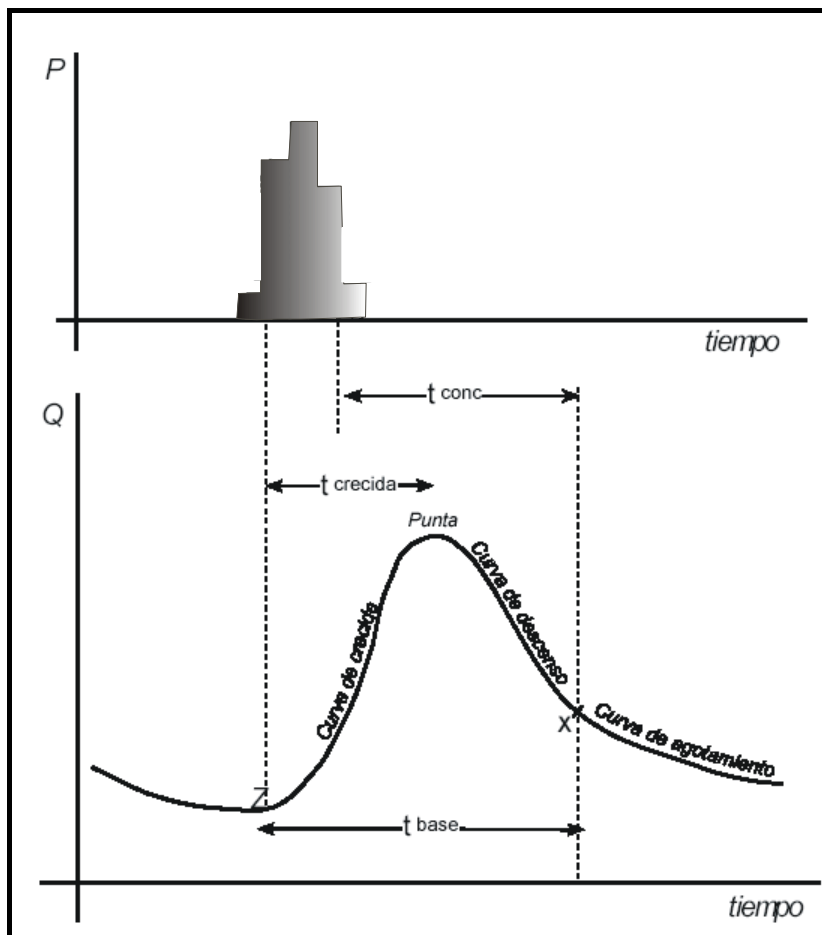


Figura 2.1. Partes de un hidrograma. Leyenda: P (precipitaciones), Q (caudal), t conc (tiempo de concentración), t crecida (tiempo de crecida), t base (tiempo de base). Punta (caudal máximo); Z (punto donde se inicia la crecida); X (punto donde se inicia el agotamiento).

- Tiempo de base (t_{base}): tiempo que transcurre desde el comienzo del aumento de caudal hasta el inicio del agotamiento.

- Tiempo de crecida ($t_{crecida}$): tiempo que transcurre desde el comienzo del incremento de caudal hasta la punta del hidrograma (caudal máximo registrado).

- Tiempo de concentración (t_{conc}): tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del aguacero hasta el inicio del agotamiento.

En esta investigación se han determinado los tiempos de base y crecida para los hidrogramas de las diferentes surgencias analizadas. Además se ha determinado una cuarta variable temporal, denominada tiempo de aguacero ($t_{aguacero}$), que se define como el tiempo que transcurre desde el inicio del aguacero hasta el comienzo del incremento del caudal. Todas estas variables junto con el análisis de la cantidad e intensidad de las precipitaciones producidas y la evaluación de la situación hidrodinámica precedente permiten discernir diversos tipos de funcionamiento en los acuíferos estudiados.

Por último se han calculado la relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$) de todas las surgencias estudiadas. Este parámetro tiene interés para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los diferentes acuíferos investigados

2.2. ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE RECESIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE MANGIN (1970, 1975)

2.2.1. Introducción

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 el modelo elegido, de modo que los parámetros obtenidos experimentalmente cumplen las

expresiones matemáticas en que se basan tales modelos (Pulido, 1987). El método de Mangin (1970, 1975) es el más aceptado y el que más se ha utilizado (Cruz Sanjulián *et al.*, 1986; Antigüedad, 1986; Padilla, 1990; Morales, 1991; Llanos, 1992; Grasso y Jeannin, 1994; Andreo *et al.*, 1992; Andreo, 1997; Cardoso da Silva, 1997; Ramoneda *et al.*, 1999; Mugerza, 2001; Carrasco *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*; 2001a, 2002b y 2003; Liñán, 2003; Moral, 2005), porque fue desarrollado específicamente para acuíferos carbonáticos 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 carbonático: 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). Además, hay que tener en cuenta que la forma de la curva de la recesión depende de la manera en que se produce la infiltración (curva de descenso o decrecida), lo cual está directamente relacionado con el tipo (lluvia, nieve,...), cantidad e intensidad de los diferentes eventos pluviométricos, así como con las condiciones hidrodinámicas en las que se encuentran tanto la zona saturada como no saturada que, a su vez, dependen de las estado hidrodinámico previo del acuífero.

2.2.2 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 esta investigación se aplica el modelo propuesto por Mangin (1975), basado 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 (Figura 2.2), modulada por su transferencia a través de la zona no saturada y, además, tiene en cuenta el comportamiento propio de la zona saturada durante la decrecida.

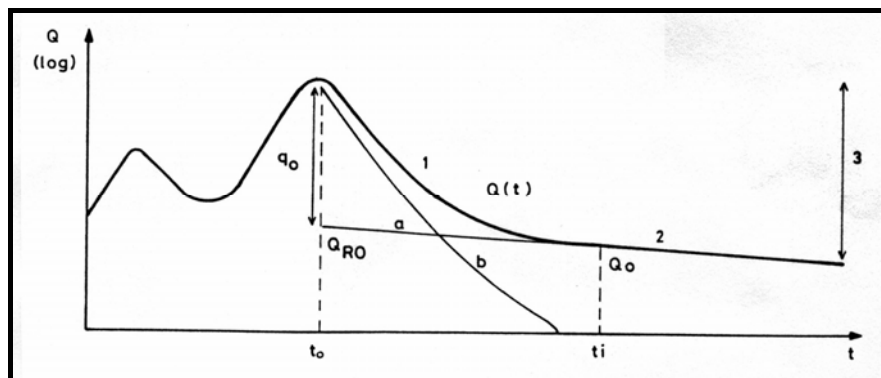


Figura 2.2. Descomposición de la curva de recesión, según Mangin (1975). 1. Decrecida propiamente dicha 2. Agotamiento 3. Curva de recesión, $a = \phi(t)$; $b = \psi(t)$.

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:

$\psi(t) = q_0(1 - \eta t) / (1 + \epsilon t)$, definida entre $t_0 = 0$ y $t_i = 1/\eta$ (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 $\varepsilon = (1/t) - 2\eta$, considerando t como el tiempo que debe transcurrir para que $q = q_0/2$.

La función $\phi(t)$ se refiere fundamentalmente a la descarga de la zona saturada del acuífero y , por tanto, informa sobre la situación durante el agotamiento (Figura 2.2). 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.

Para obtener el coeficiente de agotamiento es necesario representar el hidrograma correspondiente a la curva de recesión en gráfico semilogarítmico (caudales en escala logarítmica y tiempo en escala aritmética). Así, una vez que se ha iniciado el agotamiento la función $\psi(t)$ es nula, por lo que la pendiente de la recta, α (coeficiente de agotamiento se calcula mediante la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343(t_2 - t_1)},$$

donde Q_1 y Q_2 son los caudales del manantial transcurridos los tiempos t_1 y t_2 del inicio del agotamiento.

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

A partir de este tratamiento, Mangin (1975) propuso 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.

A partir de los datos anteriores se puede calcular el valor de los parámetros k e i (Mangin, 1975), que informan sobre la capacidad de regulación del sistema y sobre la forma de la decrecida, respectivamente. Se establece así un principio de clasificación en el que, según Mangin, se pueden individualizar 5 dominios (Figura 2.3). El dominio I ($k < 0,1$, $i < 0,25$) corresponde a acuíferos muy karstificados, sobre todo en la zona saturada; red espeleológica muy bien desarrollada. El dominio II ($0,1 < k < 0,5$, $i < 0,25$) es similar al dominio I aunque con un mayor poder de regulación debido a la existencia de una zona saturada importante. En el dominio III ($k < 0,5$, $0,25 < i < 0,5$) la karstificación es mayor en el subsistema infiltración con retardos en la alimentación debido, por ejemplo, a la presencia de materiales no karstificados. El dominio IV ($k < 0,5$, $i > 0,5$) es el que engloba los sistemas complejos, mientras que el dominio V ($k > 0,5$) es el característico de los sistemas poco o nada karstificados.

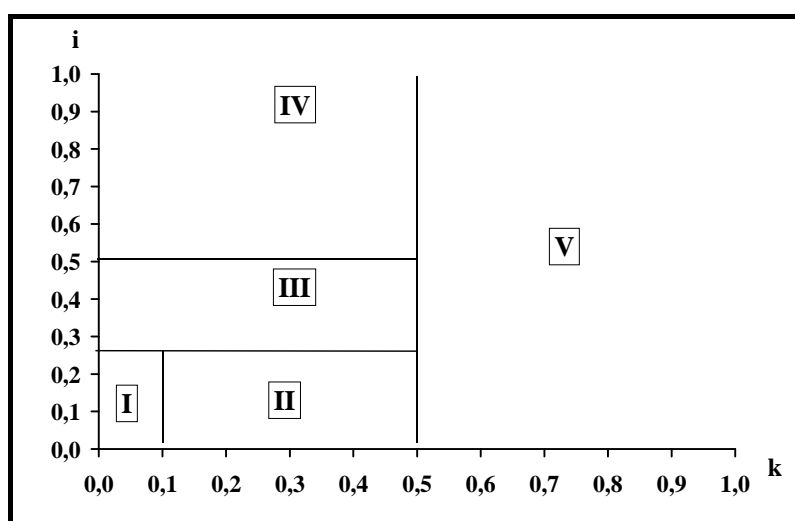


Figura 2.3. Clasificación de Mangin (1975) a partir del análisis de la curva de recesión

2.3. ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL (ACE)

2.3.1. Introducción

Durante las tres últimas décadas, el estudio de series temporales a través del análisis correlatorio y espectral ha sido una metodología muy extendida en el campo de la Hidrología en general, con el fin de describir y caracterizar los diferentes sistemas hidrológicos.

El análisis correlatorio y espectral es un método de tratamiento de series temporales que considera la totalidad de datos disponibles y que se puede aplicar en el dominio temporal (análisis correlatorio) y en el dominio de las frecuencias (análisis espectral). Esta metodología fue desarrollada con fines inferenciales (Jenkins y Watts, 1968) y, posteriormente, fue puesta a punto y utilizada por Mangin (1975, 1981a y b; 1984) para el estudio de los sistemas kársticos. Durante las tres últimas décadas, son muchos los acuíferos carbonáticos en los que se ha aplicado esta metodología: en el Pirineo francés (Mangin, 1981a y b; 1984 y Labat, 2000a) y más al norte (Larocque *et al.*, 1998), Pirineo catalán (Ramoneda *et al.*, 1999), País Vasco (Antigüedad *et al.*, 1987; Ibarra *et al.*, 1987; Cruz Sanjulián *et al.*, 1987; Morales, 1991; Llanos, 1992 y Mugerza, 2001), Cordillera Bética (Mangin y Pulido, 1983; Benavente y Mangin, 1984; Benavente *et al.*, 1985; Pulido, 1993; Padilla y Pulido, 1995; Andreo *et al.*, 1996; Jiménez *et al.*, 2001a, 2002b y 2004b; Liñán, 2003), por citar sólo algunos ejemplos.

La aplicación de esta metodología a series de precipitaciones sobre los acuíferos y de caudales de los manantiales, tanto de forma simple como cruzada, aporta información sobre el comportamiento del acuífero, es decir, del efecto modulador producido por éste sobre las lluvias y, por consiguiente, de la estructura y funcionamiento del acuífero investigado.

2.3.2. Fundamentos metodológicos. Aplicación a sistemas acuíferos carbonáticos

A continuación se detalla, brevemente, el tratamiento matemático (del análisis simple) y las principales características de cada uno de los dominios en los

que se aplica. Un mayor conocimiento de este desarrollo matemático se puede encontrar en los trabajos de Mangin (1975, 1984), que como ya se ha comentado anteriormente ha sido el investigador que desarrolló esta metodología para el estudio de acuíferos carbonáticos.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral de forma simple, a series de datos de cualquier variable, permite identificar la estructura y componentes de las mismas. Esta metodología permite obtener información para sucesos cuya periodicidad esté comprendida entre el doble del paso del tiempo utilizado (k) y un tercio de la longitud de la serie; a dicho período de tiempo se le denomina ventana de observación (m). El correlograma de una serie de datos es la función autocorrelación de una crónica finita y pone de manifiesto la dependencia entre las observaciones de la crónica para intervalos de tiempo cada vez mayores; por tanto, traduce el efecto memoria: el correlograma decrece tanto más rápido cuanto menos inercial es el proceso que lo genera. El correlograma, r_k , ha sido calculado usando la fórmula propuesta por Jenkins and Watts (1968):

$$r = \frac{C_k}{C_0} \quad \text{donde} \quad C_k = n^{-1} \sum_1^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})$$

y r es el valor del correlograma, k es el tiempo de paso que varía entre 0 y m (ventana de observación). Mangin (1984) propuso cuantificar el **efecto memoria** (E.M.) como el valor de k correspondiente a un valor del coeficiente de correlación $r = 0.1-0.2$, valor que se obtiene directamente del correlograma, y que está ligado a las reservas reguladoras, por lo que serviría para comparar la importancia de éstas entre distintos sistemas acuíferos.

El espectro de densidad de varianza es la transformada de Fourier del correlograma simple y permite descomponer la varianza total de una crónica en función de la frecuencia.

La expresión analítica del espectro de densidad de varianza utilizada (S_f), al igual que para el cálculo del correlograma simple es la propuesta por Jenkins and Watts (1968):

$$S_F = 2 \left[1 + 2 \sum_1^m D_k r_k \cos 2\pi Fk \right]$$

donde k es el tiempo de paso y $F=j/2m$ con $j=0, 1, 2, 3, \dots, m$. D_k es un filtro de r_k impuesto por la transformada de Fourier, ya que ésta se aplica a funciones continuas. El filtro que mejor parece adaptarse es el de Tukey II (Mangin, 1984).

$$D_k = \frac{\left(1 + \cos \frac{\pi k}{m} \right)}{2}$$

El espectro permite detectar las diversas componentes periódicas y las tendencias existentes en la crónica de datos. Además se pueden extraer dos nuevos parámetros (Mangin, 1984): (1) la **frecuencia de corte** (F.C.), a partir de la cual el espectro es despreciable. Se trata de la mayor frecuencia que contiene información, de manera que el análisis de la serie de datos con una frecuencia mayor (menor paso de tiempo) no aporta más información. (2) El **tiempo de regulación** (T.R.), se calcula como $S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro para $f=0$. Este valor define la duración de la influencia de la señal de entrada en el sistema y está ligada a la importancia de las reservas.

La función de entrada (precipitaciones) corresponde a un proceso que se puede considerar aleatorio en nuestro dominio climático. Así, la aplicación del análisis correlatorio y espectral, de forma cruzada, muestra la relación causa-efecto entre lluvia y caudal (correlograma cruzado) y permite conocer la respuesta impulsional del sistema, es decir, el hidrograma unitario del acuífero.

En el dominio frecuencial, debido a que el correlograma cruzado no es simétrico para los valores negativos y positivos de k , el espectro resultante se expresa por un número complejo definido por la función de amplitud cruzada (S_{xy}) y la función de fase (θ_{xy}). La primera, representa la respuesta impulsional en el dominio de las frecuencias y pone de manifiesto la capacidad de filtro del sistema. La segunda, muestra el desfase entre las precipitaciones y caudales para cada frecuencia. La función $t=\theta/2\pi f$ permite calcular este desfase, donde t =días, θ =radianes y f =frecuencia.

Además, a partir de los espectros simples y del cruzado se pueden calcular dos nuevas funciones: coherencia (C_{xy}) y ganancia (G_{xy}). La función de coherencia indica la correlación existente entre las variaciones periódicas del caudal y precipitación; por tanto, da cuenta de la linealidad del sistema en el dominio frecuencial. Una no-linearidad importante puede suponer la existencia de desfases importantes o de entradas/salidas que influyen en el comportamiento del sistema. La función de ganancia, expresa la amplificación ($G_{xy}>1$) o atenuación ($G_{xy}<1$) de la señal de entrada, imputable al acuífero como responsable de dicha alteración.

La correcta aplicación de esta metodología lleva implícito que la función de entrada presente un marcado carácter aleatorio. Así, la función salida posee dos componentes: 1) una componente aleatoria debida a la señal de entrada 2) una componente estructural relacionada con la organización del sistema, y por tanto, responsable de una mayor o menor regulación de la señal de entrada. El objetivo primordial del análisis correlatorio y espectral es poner de manifiesto la componente estructural de la señal (caudal) a partir del estudio de las funciones aleatorias (precipitaciones) en el que el sistema acuífero se comporta como un filtro entre ambas señales.

Muchos autores ya han señalado importantes aspectos relacionados con la función de entrada (precipitaciones), en relación con la correcta interpretación del análisis correlatorio y espectral y con la generalización de los resultados obtenidos. Así, la comparación de estos resultados tras la aplicación de este tipo de análisis a un mismo sistema acuífero durante dos ciclos hidrológicos distintos llevaría, muy probablemente, a obtener interpretaciones diferentes ya que tanto la cantidad, como la distribución de las precipitaciones no habría sido igual durante ambos ciclos. La distinta interpretación, dependiendo del contexto climático, debe de ser tenida en cuenta para evitar generalizar conclusiones que puedan no corresponder a una situación "estándar o normal" del sistema acuífero. Por ello, a nivel comparativo, la aplicación de este análisis se llevará a cabo para el mismo intervalo de años hidrológicos, así se uniformizarán también los efectos externos relativos al régimen de precipitaciones ocurridos durante el período de estudio.

De acuerdo con Mangin (1981a y b), los sistemas carbonáticos 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, tienen 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.

Los sistemas con un drenaje bien organizado, y siempre según el mismo autor, son sistemas que apenas si 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.

2.4. ANÁLISIS DE CAUDALES CLASIFICADOS

El caudal de los manantiales que drenan acuíferos carbonáticos puede estar condicionado por la existencia de varias formas de circulación dentro del propio acuífero. El análisis de caudales clasificados puede ser un método interesante para poner de manifiesto la presencia de fenómenos de circulación de diferente naturaleza deducidos a partir de la existencia de correlación en la repetición de caudales de distinta magnitud.

La curva de caudales clasificados de un manantial representa el porcentaje de días del periodo considerado en los que el caudal tiene un valor igual o inferior a uno dado. Por tanto, expresa la regularidad o irregularidad de los caudales de un manantial, es decir la frecuencia con la que se presenta un determinado caudal (Custodio y Llamas, 1976). Al dividir dicha frecuencia por el número de días considerados, se obtiene la probabilidad de que se produzca un caudal cualquiera.

La ley de probabilidad que mejor se ajusta a la distribución de frecuencias de los caudales es, según Mangin (1975), la que se deriva de la Ley de Laplace:

$$F(x) = \text{Prob}(X < x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-u^2/2} du$$

En caso de linealidad aritmética,

$$X = a(Q - Q_0), \text{ siendo } a > 0$$

la media $m_Q = (0.79788/a) + Q_0$ y la desviación típica $s_Q = 0.6028/a$

En caso de linealidad exponencial,

$$X = a(\log Q - \log Q_0), \text{ siendo } a > 0$$

$$m_Q = Q_0 e^{A^2/2} \text{ y } s_Q = \sqrt{Q_0 (e^{2A^2} - e^{A^2})}, \text{ siendo } A = 2.30/a.$$

El caudal Q_0 es el punto de corte con el eje de abscisas, para el cual la probabilidad es nula y "a" es la pendiente de la recta.

Por tanto, la relación entre la probabilidad y el caudal es diferente según el sistema acuífero carbonático que se analice. Así, los acuíferos con decrecidas relativamente lentas muestran una relación de linealidad aritmética, mientras que para decrecidas más rápidas ésta es de tipo exponencial. En esta investigación todas las surgencias analizadas se han resuelto con una relación exponencial.

Los cambios de pendiente de la curva de caudales clasificados indican cambios en la velocidad de aumento o disminución de los caudales, que pueden ser debidos a diferentes orígenes (Mangin, 1971 y 1975). Un aumento de la pendiente representa un incremento del porcentaje de los caudales para un cierto número de clases, es decir, un crecimiento o disminución más lento de los caudales para esas clases: en situación de crecida representaría un fenómeno de tipo "trop-plein", mientras que en decrecida significaría el drenaje de una reserva preexistente. Por el contrario, una disminución de la pendiente, representa un crecimiento o disminución más rápida de los caudales para ciertas clases: en crecida podría deberse al aporte de otra cuenca vertiente y en decrecida podría atribuirse a la existencia de pérdidas de agua en una red de drenaje distinta de la

que habitualmente drena el manantial o a la formación de una reserva que podría ser restituida al flujo en un ciclo posterior.

La aplicación del análisis de caudales clasificados sobre años hidrológicos diferentes puede presentar graves inconvenientes debido a las variaciones en el comportamiento hidrogeológico de un sistema acuífero, ligadas al estado de las reservas de un año hidrológico con respecto al siguiente. Por ello, este tipo de análisis requiere disponer de cierta información previa sobre el funcionamiento del acuífero (García-Latorre *et al.*, 1987). En caso contrario, las rupturas de pendiente en las curvas, analizadas año por año, pueden inducir a errores como consecuencia de condiciones locales en el espacio y en el tiempo, no atribuibles al conjunto del sistema. Por ello, y para evitar la influencia del estado hidrodinámico del acuífero, en todos los casos se ha calculado la curva de caudales clasificados correspondiente a todo el periodo analizado. De este modo, el análisis de caudales clasificados propuesto por Mangin (1971 y 1975), aún no siendo un método muy utilizado en investigación hidrogeológica, permite contrastar la información preexistente sobre el funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

2.5. ANÁLISIS DE LA TRANSFORMADA CONTINUA WAVELET

La aplicación del análisis *wavelet* al estudio de series temporales, a diferencia del análisis correlatorio y espectral, permite detectar componentes periódicas no estacionarias en una señal. Para llevar a cabo el análisis se utiliza la transformada wavelet de la onda estudiada. A diferencia del análisis de Fourier, que utiliza senos y cosenos de longitud infinita para representar la señal original, la transformada descompone la serie de datos en wavelets (Figura 2.4), que son pequeñas oscilaciones muy localizadas en el tiempo, mediante dilataciones (a) y traslaciones (τ) de una función wavelet “madre” (Ψ).

Existen numerosos trabajos donde se ofrece una visión completa sobre el fundamento teórico y algunas de las aplicaciones del análisis wavelet (Daubechies, 1990; Kumar y Foufoula-Georgiou, 1993; Meyers *et al.*, 1993 y 1994; Takeuchi *et al.*,

1994; Kumar, 1996; Liu, 1995; Torrence y Compo, 1998; Szilagy, *et al.*, 1999; Labat *et al.*, 1999a, 1999b, 2000b y 2001; Breaker *et al.*, 2001; Gaucherel, 2002; Chambers *et al.*, 2002).

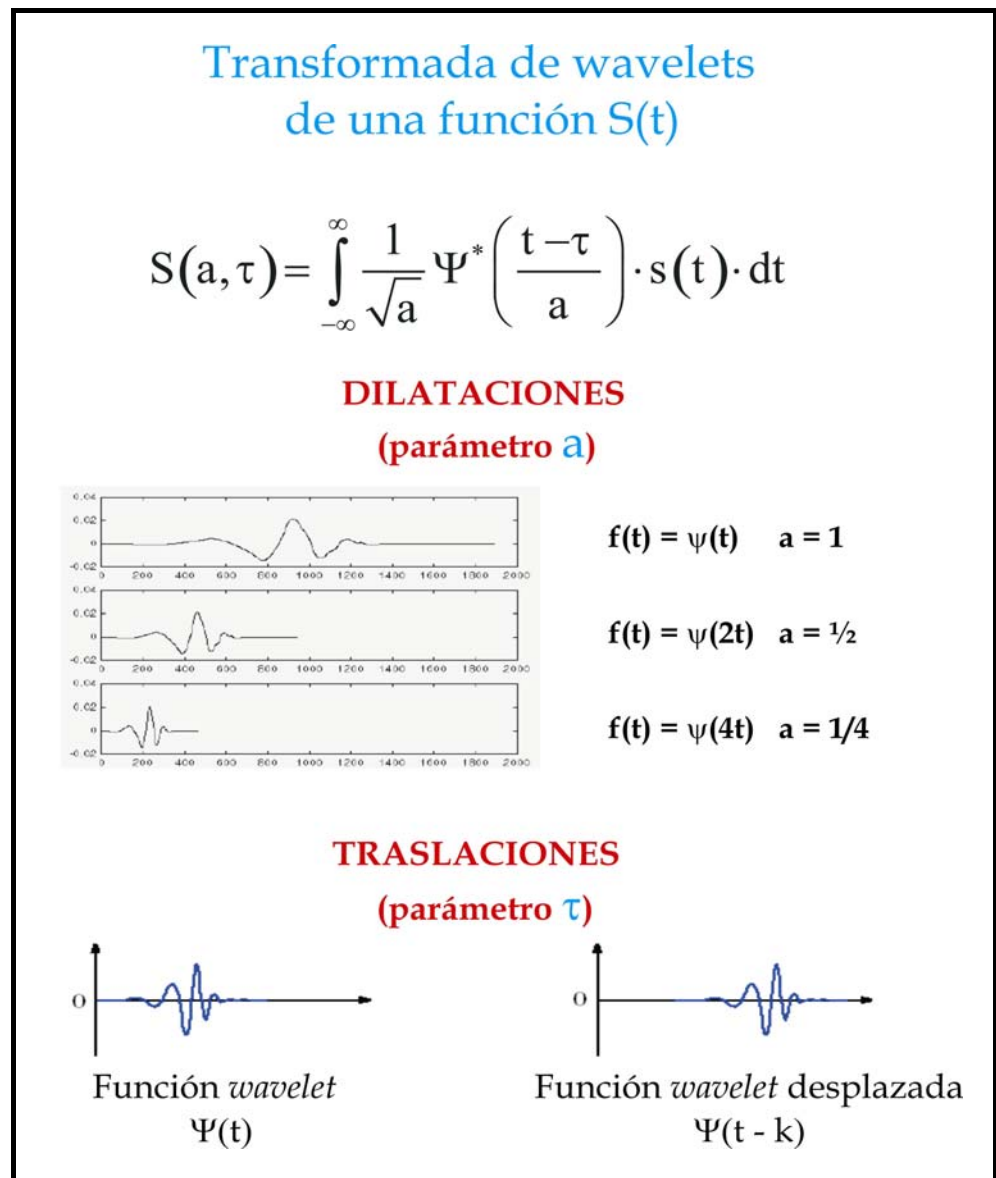


Figura 2.4. Ejemplo de una transformada wavelet (Ψ) de una función cualquiera, según Torrence y Compo (1998). a , parámetro dilatación/contracción. τ , parámetro traslación. Ψ^* , wavelet madre elegida.

En el marco de la presente investigación se ha utilizado la función gaussiana derivativa (Torrence y Compo, 1998). La forma de esta wavelet depende del orden empleado (Figura 2.5). Por ejemplo, con orden 2 se obtiene la denominada wavelet de Marr o de “sombrero mejicano”. El orden derivativo usado en este trabajo es 15, la transformada de wavelet empleada es de tipo continuo (en inglés *continuous wavelet transform*). Además, el carácter finito de las

series de datos analizadas produce ciertos errores en el cálculo de la transformada de wavelet. Para paliar esta deficiencia existen algunas técnicas, de las cuales la denominada *cero-padding* es la más utilizada (Torrence y Compo, 1998). Consiste en rellenar el final de la serie con ceros hasta alcanzar un número que sea potencia de dos. Sin embargo, la introducción de ceros en la convolución implica una reducción de la amplitud cerca de los bordes de la serie, mayor cuanto mas baja es la frecuencia. En un diagrama wavelet tiempo-frecuencia, las áreas en las que estos efectos de borde son significativos se conocen como “cono de influencia”. La porción del espectro que entra dentro del cono de influencia, por tanto, no debe ser utilizada para extraer conclusiones sobre la estructura de la serie temporal. El cono de influencia depende de la wavelet madre considerada. La wavelet utilizada en esta investigación posee un cono de influencia relativamente pequeño, con una resolución tiempo-frecuencia similar.

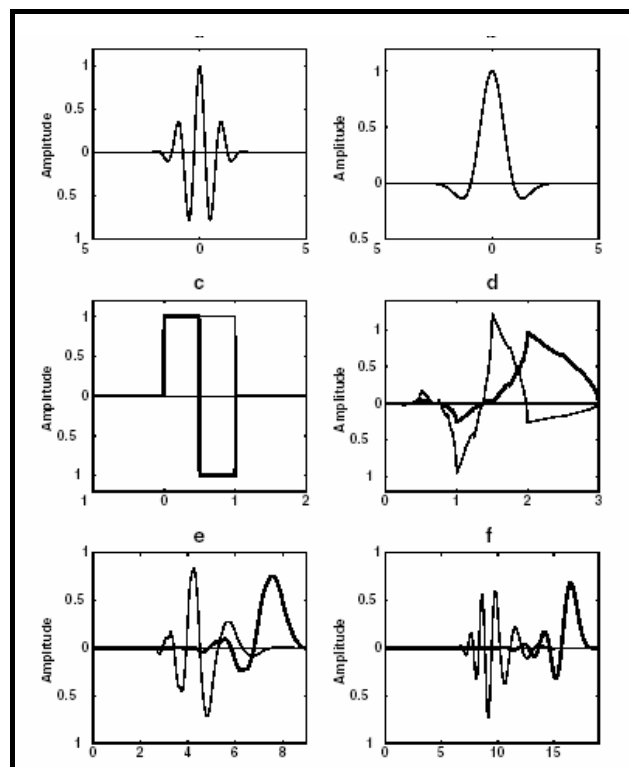


Figura 2.5. Representación temporal de la funciones wavelet “madre” más usuales: (a) *Morlet wavelet*; (b) *Mexican hat wavelet*; (c) *Haar wavelet*; (d) *Daubechies wavelet* de orden 4; (e) *Daubechies wavelet* de orden 12 y (f) *Daubechies wavelet* de orden 20.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA: LAS PRECIPITACIONES

3.1. ÁMBITO CLIMÁTICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ACUÍFEROS

La importancia de las precipitaciones en el marco climático andaluz se caracteriza, fundamentalmente, por una escasez de valores medios anuales de éstas. No obstante hay que entenderlo dentro de una amplia área geográfica -zona mediterránea- cuyo rasgo más original es la falta de lluvia estivales, sin olvidar la escasa pluviometría anual. Así, cabe destacar que, las condiciones de sequedad son máximas en el contexto oriental andaluz, mientras en la vertiente occidental se registra uno de los máximos pluviométricos de la Península Ibérica.

Esta distribución de las precipitaciones en el Sur de España se encuentra definida por diversos factores. El primero de ellos viene determinado por el comportamiento global de la circulación atmosférica. Así, la vertiente oeste está sometida con mayor frecuencia e intensidad a los frentes atlánticos que la vertiente oriental, lo que provoca un descenso pluviométrico y del número de días de lluvia desde el extremo occidental al oriental, que las perturbaciones mediterráneas no llegan a compensar. Dentro de este contexto geográfico, se observa una disminución de la pluviometría, desde 2000 mm/año en la Serranía de Grazalema hasta 200 mm/año en el levante almeriense (Figura 3.1).

Un segundo factor es la variable altitud, de manera que las precipitaciones aumentan con ésta. No obstante, la topografía regional impone unas condiciones de barrera y de corredores orográficos, barlovento/sotavento (efecto Föhn), a las masas de aire con sus características propias (temperatura, humedad, nubosidad, detención, descenso). Así la disposición orográfica del Sur de la Península Ibérica, favorece, a grandes rasgos, la extensión de las influencias marítimas atlánticas: los altos relieves alpinos de la Cordillera Bética corren de SW a NE. Sin embargo, en los sectores orientales (levante almeriense y nordeste granadino) y, sobre todo, en zonas deprimidas topográficamente (depresiones de Ronda, Granada y Guadix-Baza) quedan a sotavento de las influencias oceánicas y de los frentes ciclónicos

atlánticos. En estos últimos casos existe una influencia mediterránea, caracterizada por una disminución de las precipitaciones (Figura 3.1).

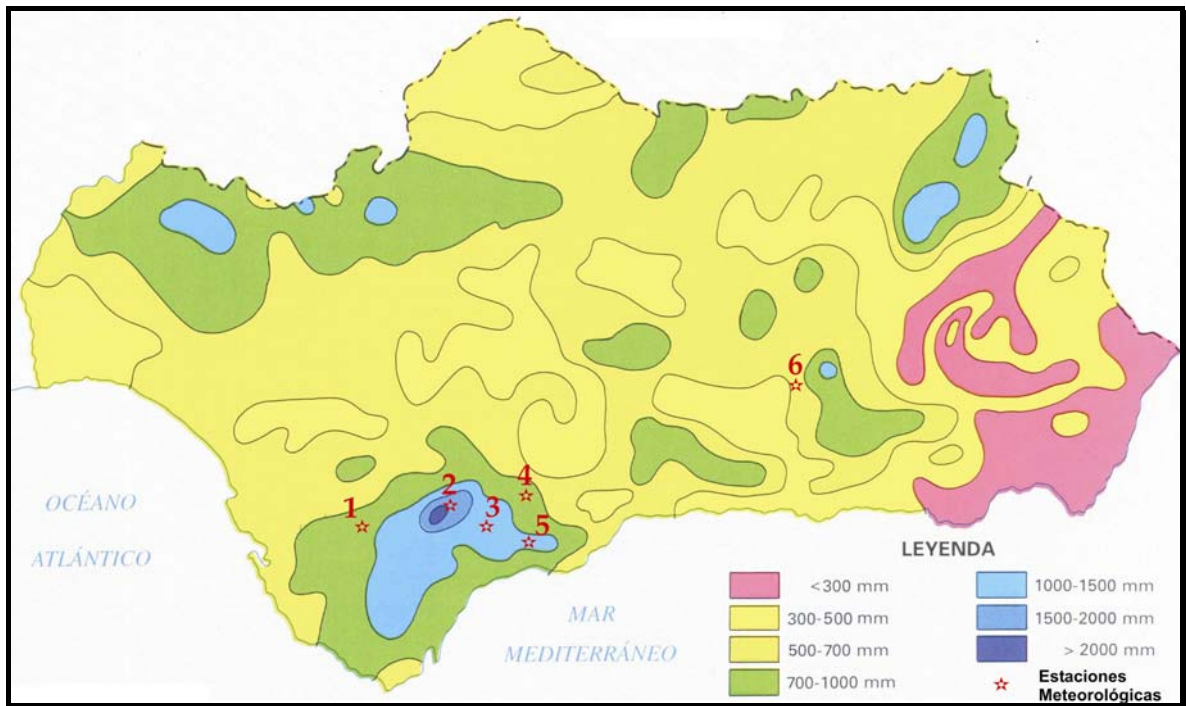


Figura 3.1. Precipitaciones medias anuales en Andalucía para el período 1951-1992 (ITGE-Junta de Andalucía, 1998) y situación de las estaciones pluviométricas utilizadas (1 Sierra de las Cabras, 2 Sector nororiental de la Sierra de Líbar, 3 Sierra de las Nieves, 4 Sierra Prieta, 5 Sierra Blanca y 6 Sierra de la Alfaguara).

El tercer factor geográfico que condiciona las precipitaciones es el efecto de la proximidad a la confluencia de las masas de agua oceánica y mediterránea. Así, en general, las precipitaciones aumentan de Norte a Sur, hacia la zona de contacto de las dos masas de agua (Figura 3.1).

Teniendo en cuenta estas constantes, desde el punto de vista pluviométrico, se pueden diferenciar tres sectores en Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998):

-*Húmeda*, con precipitaciones superiores a los 700 mm/año, se sitúan sobre todo en los sectores occidental y septentrional de la comunidad autónoma .

-*De transición*, cuya precipitación está comprendida entre 700 y 300 mm/año y ocupa la mayor parte del territorio andaluz.

-*Árida*, con precipitaciones inferiores a 300 mm/año, se concentra en los sectores más orientales del territorio.

Las áreas de estudio contempladas en esta investigación se engloban dentro de los dos primeros sectores (Figura 3.1): húmeda y de transición.

3.2. ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES CORRESPONDIENTES AL PERÍODO DE INVESTIGACIÓN (1999/2000-2002/2003)

Para caracterizar la señal de entrada (pluviometría), durante el período de investigación, se han utilizado los datos procedentes de seis estaciones meteorológicas: El Tempul (Sierra de las Cabras), Cueva de la Pileta (Sierra de Líbar), Alpandeire (Sierra de las Nieves), Casarabonela (Sierra Prieta), Ojén (Sierra Blanca) y Puerto Lobo (Sierra de la Alfaguara). La primera se ubica en la parte central de la provincia de Cádiz, las cuatro siguientes se distribuyen a lo largo de la provincia de Málaga y la última en el sector central de la provincia de Granada (Figura 3.1).

Los valores de precipitación media anual de cada una de las estaciones, para el período de estudio (Tabla 3.1), son relativamente coincidentes con los intervalos de precipitación media anual para el periodo histórico (1951-1992) que se resume en la figura 3.1.

	Acuífero de las Cabras	Sector Nororiental de Sierra de Líbar	Sistema de las Nieves	Sierra Prieta	Sierra Blanca	Sierra de la Alfaguara
1999/2000	614	1304	875	707	642	575
2000/2001	1032	2155	1412	584	1016	544
2001/2002	598	1095	676	503	880	445
2002/2003	787	1412	922	516	1053	457
Máxima	1032	2155	1412	707	1053	575
Mínima	598	1095	676	503	642	445
Media	758	1492	971	578	898	505
Media*1,15	871	1715	1117	664	1032	581
Media*0,85	644	1268	826	491	763	429

Tabla 3.1. Precipitaciones anuales (mm) sobre las áreas estudiadas correspondientes al período de investigación 1999-2003. En amarillo, año húmedo (para la serie analizada); en azul, año seco (para la serie analizada); en blanco, año medio.

La distribución espacial de las áreas de investigación muestra que la cantidad de lluvia disminuye desde el SW hacia el NE (Figura 3.1 y Tabla 3.1), de manera que los mayores valores de precipitación se miden en la Sierra de Líbar (1492 mm de media) mientras que en la Sierra de la Alfaguara se recogen los valores más bajos (505 mm). Estas diferencias de cantidad de precipitación, entre la mayor parte de las estaciones occidentales con respecto a las orientales son patentes incluso dentro de un mismo macizo, ya que en la parte occidental (Sierra de las Nieves) se registra mayor precipitación que en la oriental. Este mismo patrón se reproduce para cualquiera de los años analizados, ya sean, de tipo medio, seco o húmedo (Tabla 3.1).

El período de investigación se inicia en Octubre de 1999, en un contexto de precipitaciones medias-bajas (Figura 3.2), que continúa con un rápido aumento durante el año hidrológico siguiente (2000/2001), que constituye un año de tipo húmedo, sobre todo, para los sectores más occidentales (Sierra de la Cabras, Sierra de Líbar y Sierra de las Nieves). No obstante, las precipitaciones sobre estos últimos acuíferos cambian radicalmente de tendencia durante el año siguiente, que es de tipo seco, mientras que para el resto de áreas de estudio se trata de un año de tipo medio. Durante el último año de estudio (2002/2003), las precipitaciones recogidas corresponden a unos valores característicos de un año de tipo medio para todas las áreas, excepto para la Sierra Blanca, donde se alcanzan valores de precipitación propios de un año húmedo. Por lo tanto, el período de estudio empieza y termina en unas condiciones climáticas de tipo medio-seco, pasando por condiciones climáticas de tipo húmedo, circunstancia ésta particularmente interesante para llevar a cabo una investigación hidrogeológica más completa, a efectos comparativos, ya que la diferencias en la señal de entrada pueden condicionar las respuestas de los acuíferos (señal de salida).

La distribución temporal de las precipitaciones medias mensuales para el período de estudio es muy parecida en todas las estaciones pluviométricas (Figura 3.3). Se caracteriza, fundamentalmente, por la ausencia total de precipitaciones

durante el periodo estival (junio, julio y agosto), mientras que los mayores valores de precipitación se producen durante los meses de diciembre y enero.

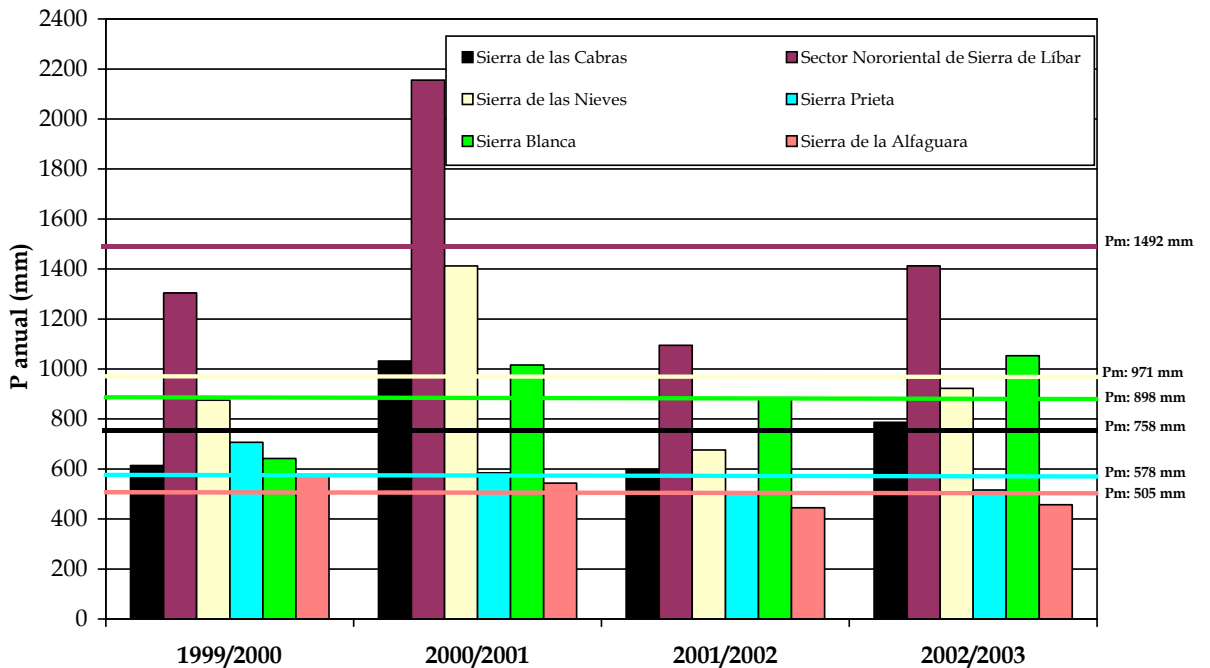


Figura 3.2 Precipitación anual durante el período de investigación de todas las estaciones pluviométricas seleccionadas (Pm, precipitación media).

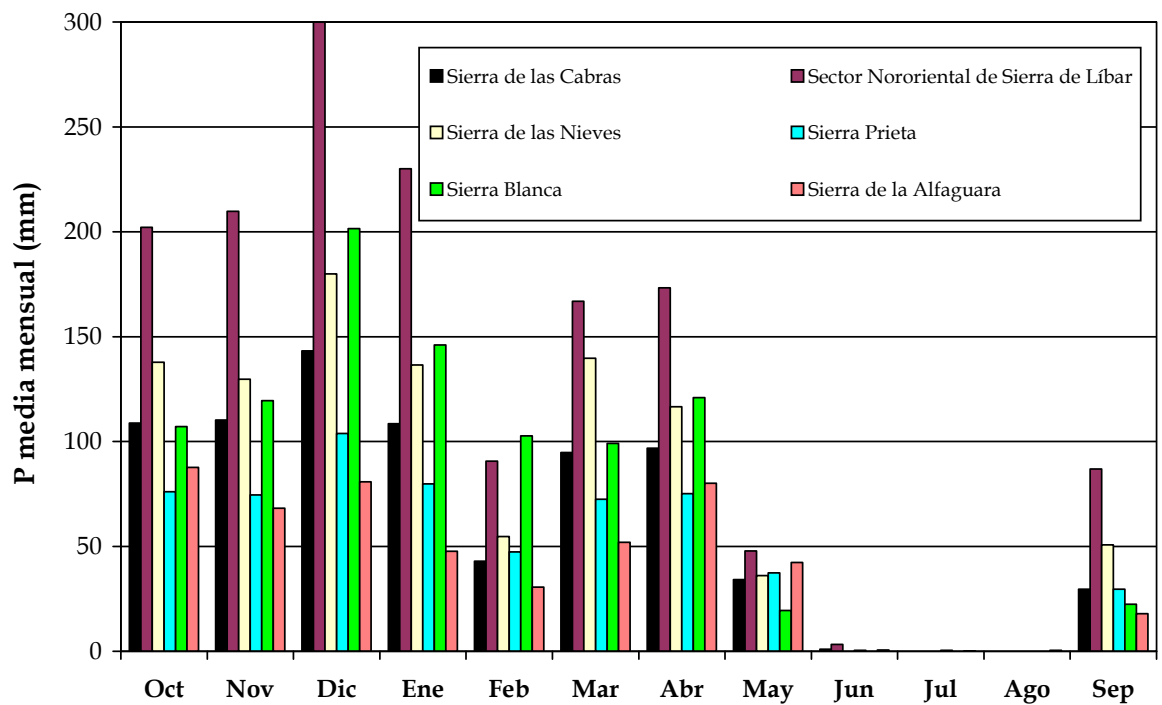


Figura 3.3. Precipitaciones medias mensuales de todas las estaciones pluviométricas seleccionadas durante el período 1999/2000-2002/2003.

La evolución temporal de las precipitaciones diarias registradas en todas las estaciones (Figura 3.4) pone de manifiesto que la distribución de los periodos lluviosos producidos durante el período de investigación ha sido muy similar durante los cuatros años de investigación, aunque con valores máximos de precipitación diaria muy diferentes. Así, los periodos lluviosos más importantes, se han distribuido, resumidamente, tal como se describen a continuación:

1) Precipitaciones de inicio de año hidrológico: de cuantía poco importante, ocurren de manera puntual, fundamentalmente en los meses de octubre y noviembre, aunque también aparecen durante los últimos días del mes de septiembre.

2) Precipitaciones invernales: son las más importantes y continuas para todas las áreas analizadas. Se concentran, fundamentalmente, en los meses de diciembre y enero, de manera que constituyen el principal periodo lluvioso y, por tanto, de recarga.

3) Precipitaciones de primavera: desde el punto de vista cuantitativo, son de menor magnitud que las precipitaciones invernales y se producen durante los meses de marzo, abril y mayo. Esta última marca de la señal de entrada, antes del periodo estival sin precipitaciones, juega un papel importante para comprender el funcionamiento de los acuíferos aquí analizados, que resulta más interesante, si cabe, al comprobar que los valores de precipitación, sobre todo durante el último mes (mayo), son muy parecidos en todas las estaciones analizadas.

Este patrón de distribución de los diversos episodios lluviosos se cumple en la práctica totalidad de las estaciones analizadas (Figura 3.4). No obstante, mientras que las precipitaciones invernales constituyen el núcleo fundamental del valor de precipitación anual, sobre todo en los sectores más occidentales, las precipitaciones de principios de año hidrológico resultan claves en los mismos términos para las áreas costeras y orientales.

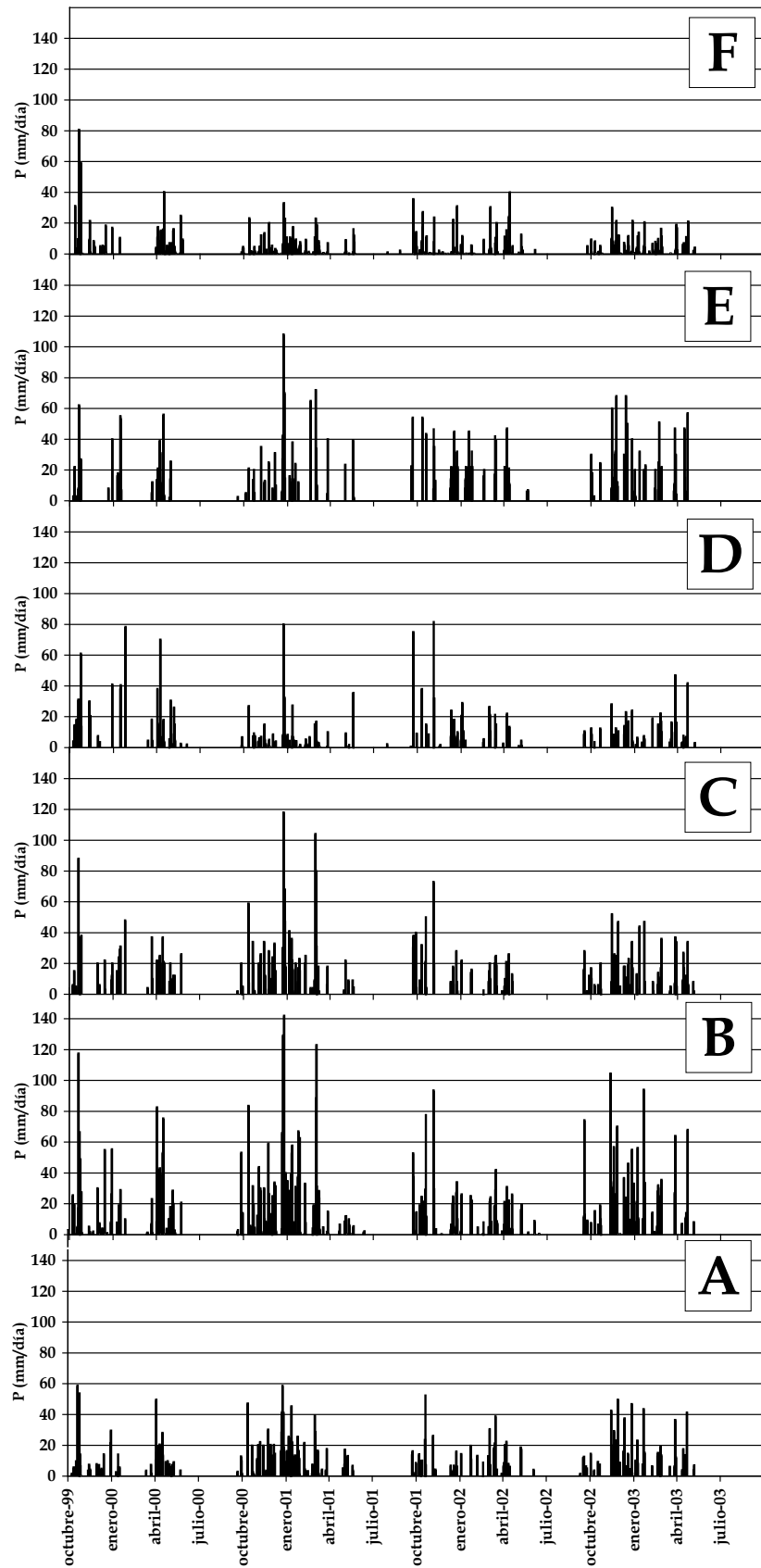


Figura 3.4. Evolución temporal de las precipitaciones diarias registradas en todas las estaciones recopiladas para todo el período de investigación (A, Sierra de las Cabras; B, Sierra de Líbar; C, Sierra de las Nieves; D, Sierra Prieta; E, Sierra Blanca y F, Sierra de la Alfaguara).

4. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA SIERRA DE LAS CABRAS

4.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

Los materiales que constituyen la Sierra de las Cabras pertenecen a la unidad del mismo nombre, dentro del dominio Subbético Medio de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Chauve, 1960-62; Martín Algarra, 1987; ITGE, 1990). La serie estratigráfica de dicha unidad está constituida por tres conjuntos litológicos principales: uno inferior, de edad triásica en facies germano-andaluza (Keuper); uno medio, de 300 metros de espesor y naturaleza calcáreo-dolomítica, de edad fundamentalmente jurásica, y otro superior, de carácter margoso y de edad cretácico-terciaria (Figura. 4.1).

El conjunto en facies germánico-andaluza (Trías Keuper) está formado por arcillas de colores abigarrados con presencia de evaporitas (yeso y halita) y, en menor medida, areniscas y carniolas.

A techo de la formación anterior aparece el conjunto dolomítico-calizo jurásico, cuya potencia es superior a los 300 metros, formado por los siguientes tramos: dolomías masivas con intercalaciones de calizas de grano fino de edad Lías inferior, seguidas de calizas oolíticas y de filamentos de edad Dogger, que pasan progresivamente hacia arriba a una monótona sucesión de edad Malm-Cretácico inferior, constituida por calizas tableadas con nódulos de sílex y calizas arcillosas con intercalaciones de limolitas calcáreas.

El conjunto superior de edad Cretácico tiene un espesor del orden de 250 m y comienza con un paquete de calizas y margas de tonos claros (Cretácico inferior), ampliamente representados en la vertiente meridional de la Sierra de las Cabras, seguido de un conjunto de arcillas y margas oscuras (Cretácico medio) que pasan hacia arriba a una alternancia de margocalizas y margas con tonos rojizos y grises respectivamente (Cretácico superior-Paleoceno). Encima de estos materiales, hay margas grises del Eoceno y margas y margocalizas blancas del Oligoceno.

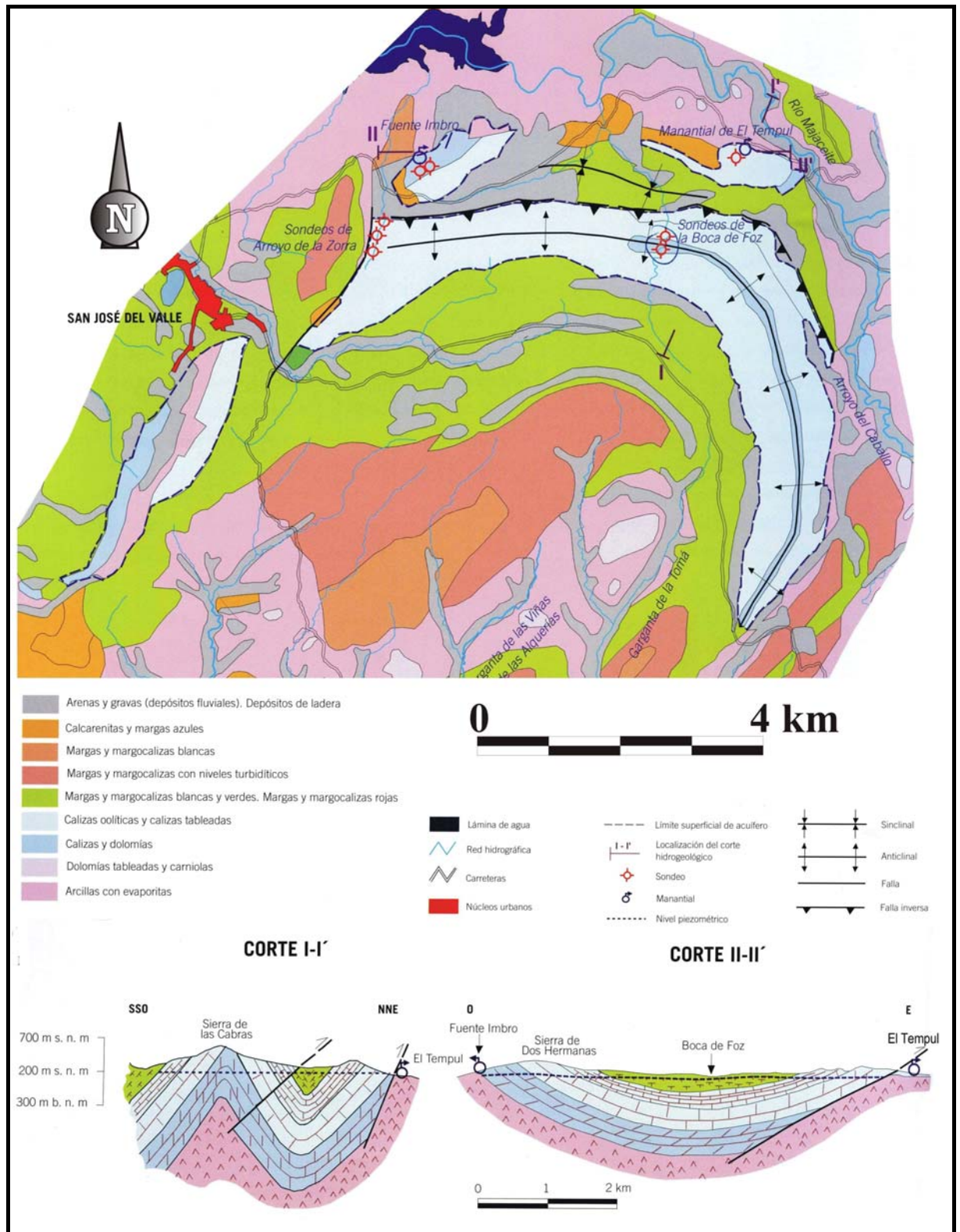


Figura 4.1. Esquema y corte geológico sintetizado de la Sierra de las Cabras (modificado de Martín Algarra, 1987).

La estructura geológica del área de estudio está formada por pliegues anticlinales y sinclinales que presentan una forma arqueada en cartografía y que han sido afectados por una tectónica de fractura posterior. En la parte meridional

hay una estructura anticlinal que constituye los relieves de Sierra del Valle, Sierra de la Sal y Sierra de las Cabras, en cuyo núcleo afloran principalmente los materiales carbonáticos jurásicos; sólo en la parte central de la Sierra del Valle afloran los materiales triásicos. Hacia el Norte, la estructura está formada por un sinclinal ocupado por materiales cretácicos, bajo los cuales deben encontrarse las dolomías y calizas jurásicas, que afloran inmediatamente al norte (Sierra de Dos Hermanas y Loma de El Tempul) formando parte del flanco meridional del siguiente anticlinal. Además, el modelado tanto exokárstico como endokárstico está poco representado en todo el conjunto de afloramientos carbonáticos de la Sierra de las Cabras.

Las afloramientos de calizas y dolomías del Jurásico, con una superficie aproximada de 34 km², constituyen un acuífero cuya alimentación se produce por infiltración directa de las precipitaciones caídas sobre los afloramientos de este tipo de rocas y, eventualmente, por infiltración de parte de la escorrentía que circula por los arroyos de Bujalance y Bogaz (Figura 4.2), arroyos que se encuentran normalmente secos y con sus cauces colgados del orden de 30 metros o más, sobre la zona saturada del acuífero. En el antiguo Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz (DPC, 1984) se estimaron los recursos medios del sistema en 5,5 hm³/año, procedentes exclusivamente de las precipitaciones. En trabajos posteriores (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001a), se ha calculado que los recursos medios del sistema son del orden de los 8-9 hm³/año.

La descarga se produce, de modo natural, por el manantial de El Tempul, a la cota 120 m s.n.m., cuyo caudal varía entre 20 L/s y menos de 2000 L/s, con un valor medio histórico de 283 L/s (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001a). En épocas de recarga excepcional entra en funcionamiento el “trop plein” de Fuente Imbro (Figura 4.2), situado en la cabecera del arroyo del Infierno (Sierra de Dos Hermanas) a la cota de 140 m s.n.m. Existe, pues, un flujo subterráneo dirigido preferentemente hacia el manantial de El Tempul, con un gradiente hidráulico del orden del 7‰ (Carreras, 1996).

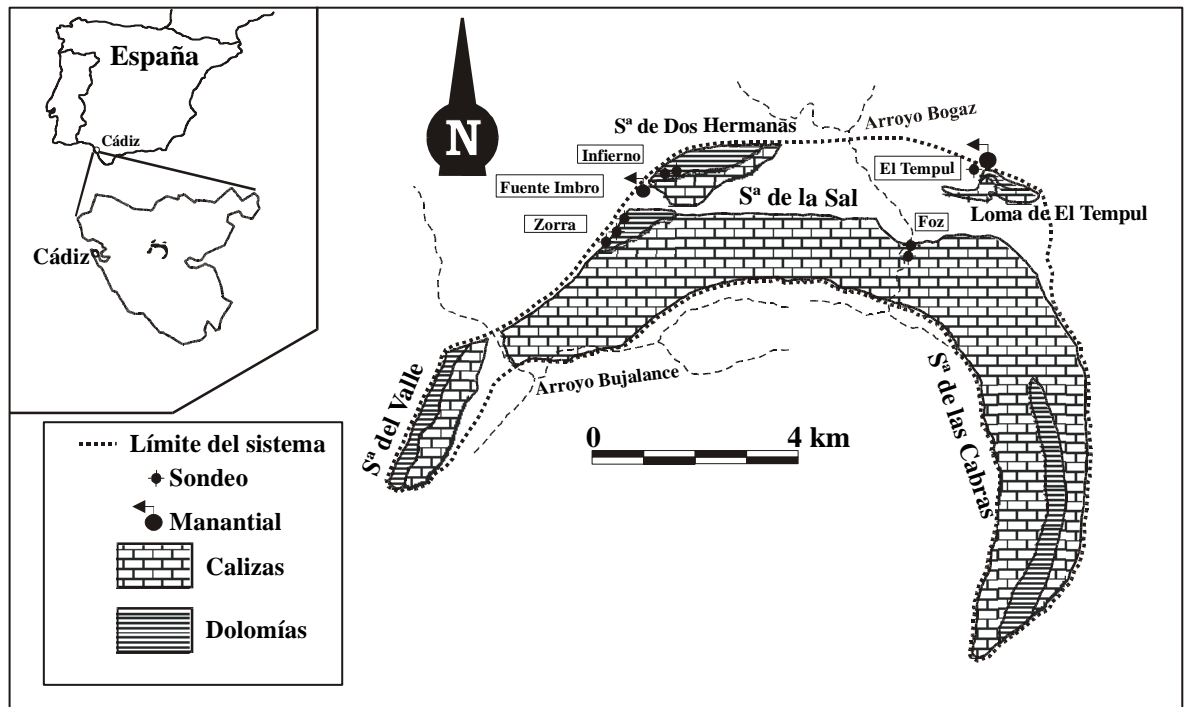


Figura 4.2. Localización geográfica y esquema hidrogeológico de la Sierra de las Cabras

Durante la metasequia de 1995, también se produjo extracción por bombeo en algunos de los sondeos perforados en este acuífero durante aquella época (Carreras, 1996; ITGE, 1996); todos ellos atraviesan un espesor saturado de acuífero mayor de 200 m, excepto en la vertical del manantial de El Tempul donde la potencia del acuífero es de unos 18 metros. Así, en el periodo comprendido entre agosto de 1995 y marzo de 1996, 2 sondeos en la Boca de Foz, 3 en el arroyo de la Zorra y 3 en el Arroyo del Infierno fueron instalados y puestos en funcionamiento, lo que permitió calcular valores de transmisividad comprendidos entre 10 y 10^4 m²/día (Carreras, 1996). Se bombeó un volumen superior a 6 hm³, con caudales continuos de hasta 900 L/s, y se produjo un descenso piezométrico del orden de 30 m, que habría sido mayor si no se hubieran registrado precipitaciones. El control de los volúmenes bombeados y de la piezometría permitieron estimar las reservas del acuífero en 0,2 hm³/m en los 30 m más someros de la zona saturada (Carreras, 1996). A partir de estos datos, en un informe del ITGE (1996) se calculó la porosidad eficaz, que resultó ser del orden de 0,5%.

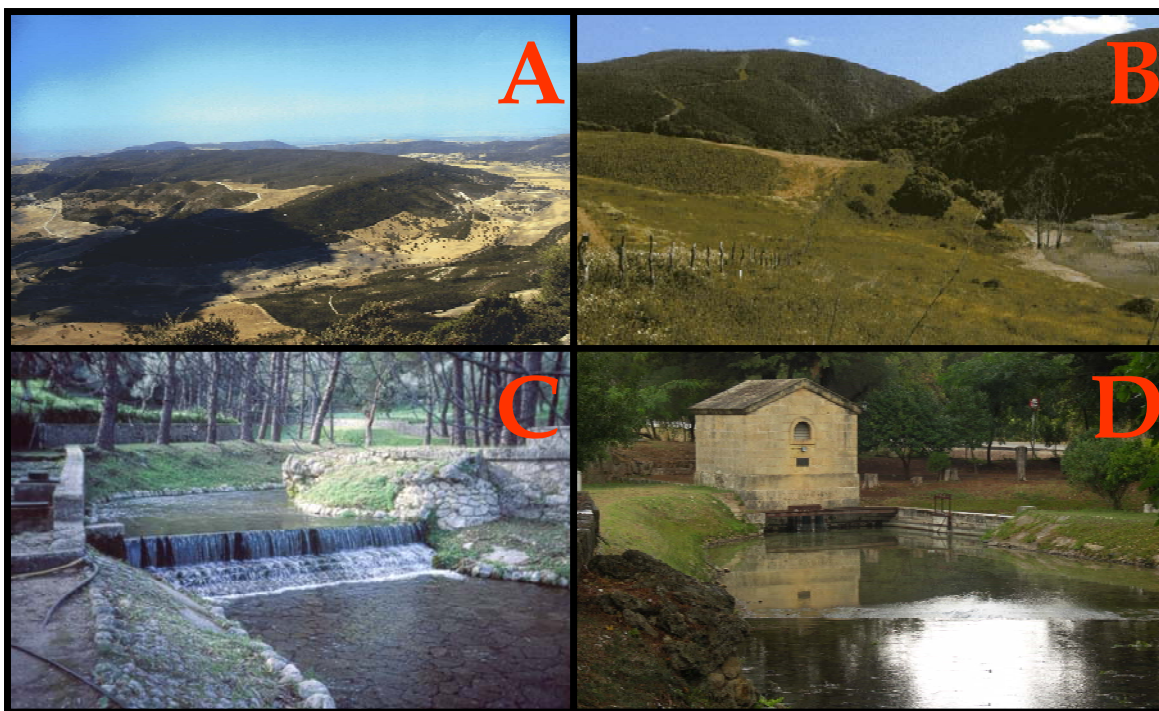


Lámina 4.1. A- Panorámica de la Sierra de las Cabras B- Arroyo de Bogaz entre las sierras de las Cabras y la Sal, C- Estación de aforos del manantial de El Tempul, D- Manantial de El Tempul.

4.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

Para llevar a cabo la caracterización de la respuesta hidrodinámica del sistema de las Cabras se ha analizado la serie de caudales medios diarios del manantial de El Tempul. Los datos han sido proporcionados por la empresa de Aguas de Jerez (AJEMSA), la cual realizaba lecturas diarias de la altura de agua en las estaciones de aforos (una para aguas bajas y otra para aguas altas) y, mediante la aplicación de la curvas de gastos de ambas estaciones, se ha obtenido el caudal medio diario. Esta serie de caudales diarios comprende desde Enero de 1985 hasta Septiembre de 2003. El caudal medio del manantial durante este periodo es de 255 L/s. En la figura 4. 3 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos estudiada.

Además, se ha analizado la serie histórica de caudales medios mensuales del manantial de El Tempul, que también ha sido proporcionada por AJEMSA. Estos caudales han sido calculados a partir de las lecturas de altura de la lámina agua en el vertedero principal de la estación de aforos. Las lecturas fueron realizadas los días 20 de cada mes y convertidas posteriormente en caudales

mediante la aplicación de una curva de gastos (ITGE, 1996). Se trata de una serie de excepcional longitud ya que se extiende desde Junio de 1862 hasta Diciembre de 1995 (133 años). Este importante volumen de información se ha estudiado mediante técnicas propias del análisis de series temporales (Análisis correlatorio y espectral y análisis de la transformada *wavelet*).

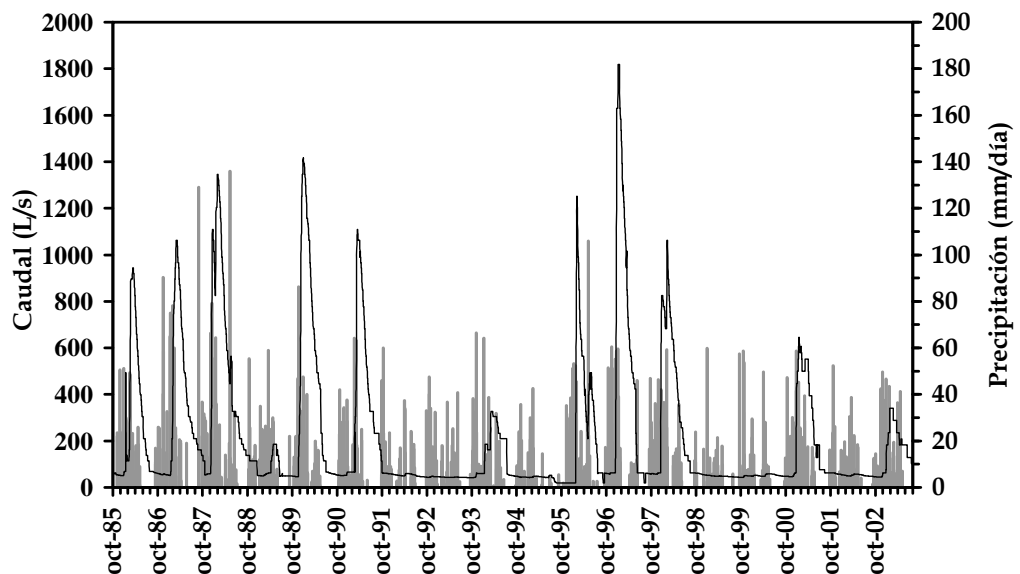


Figura 4.3. Hidrograma del manantial de El Tempul para el periodo 1985-2003. Precipitaciones registradas en la estación de El Tempul.

4.2.1. Análisis del hidrograma del manantial de El Tempul

El análisis de los hidrogramas anuales del manantial de El Tempul muestra que se registra una crecida importante por cada año hidrológico (Figura 4.4). No obstante, durante el período analizado son varios los años hidrológicos en los que no se registran aumentos significativos de caudal en respuesta a las precipitaciones. Así, en aquellos años hidrológicos que se producen importantes variaciones de caudal (1984/1985, 1985/1986, 1986/1987, 1987/1988, 1989/1990, 1990/1991, 1995/1996, 1996/1997, 1998/1999), se observa que el hidrograma anual presenta un tiempo de base aproximado de 4 meses (Figura 4.4), lo que parece indicar un drenaje relativamente lento del acuífero. Las crecidas se inician, como muy pronto, una semana después del evento pluviométrico principal, con tiempos de crecida de al menos un mes, lo cual denota una respuesta lenta, amortiguada

frente a las precipitaciones, probablemente debido a un escaso grado de karstificación funcional de este sistema acuífero. Los caudales máximos registrados durante estos años hidrológicos varían entre 1000 y 1600 L/s. Por último, estas crecidas se producen cuando la precipitación acumulada antes del inicio de la misma es del orden de los 400 mm.

Durante los años hidrológicos 1993/1994, 2000/2001 y 2002/2003 se diferencia un segundo tipo de hidrograma, que se caracteriza por un tiempo de base y crecida aproximado de 6 y 2 meses, respectivamente (Figura 4.4). Los caudales máximos que se registran están en torno a los 400-600 L/s. Este tipo de respuesta es debido a que los años hidrológicos vienen precedidos de un importante periodo de drenaje en condiciones de agotamiento (al menos 1 año), de manera que, aunque los valores de precipitación son importantes, el agua infiltrada se emplean en recargar las reservas que han sido drenadas durante el agotamiento anterior.

Por último, los hidrogramas de los años hidrológicos 1988/1989, 1991/1992, 1992/1993, 1994/95, 1998/1999, 1999/2000, 2001/2002 no presentan aumentos significativos de caudal (Figura 4.4), como máximo del orden de la decena de L/s. En estos hidrogramas es difícil diferenciar los tiempos de base y crecida, ya que prácticamente se encuentra en condiciones de agotamiento durante todo el tiempo. Los eventos pluviométricos que dan lugar a este tipo de hidrogramas se caracterizan por valores de precipitación acumulada durante todo el año hidrológico de 400-500 mm. No obstante, ninguno de los aguaceros que tienen lugar durante estos años superan los 100 mm.

En la tabla 4.1. se indican los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años hidrológicos analizados en el manantial de El Tempul. A partir de ellos se obtiene 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. Como ya se ha comentado anteriormente en el capítulo de metodología, este parámetro se utilizará para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los diferentes acuíferos investigados. El valor obtenido para esta relación es 13'1 (Tabla 4.1.).

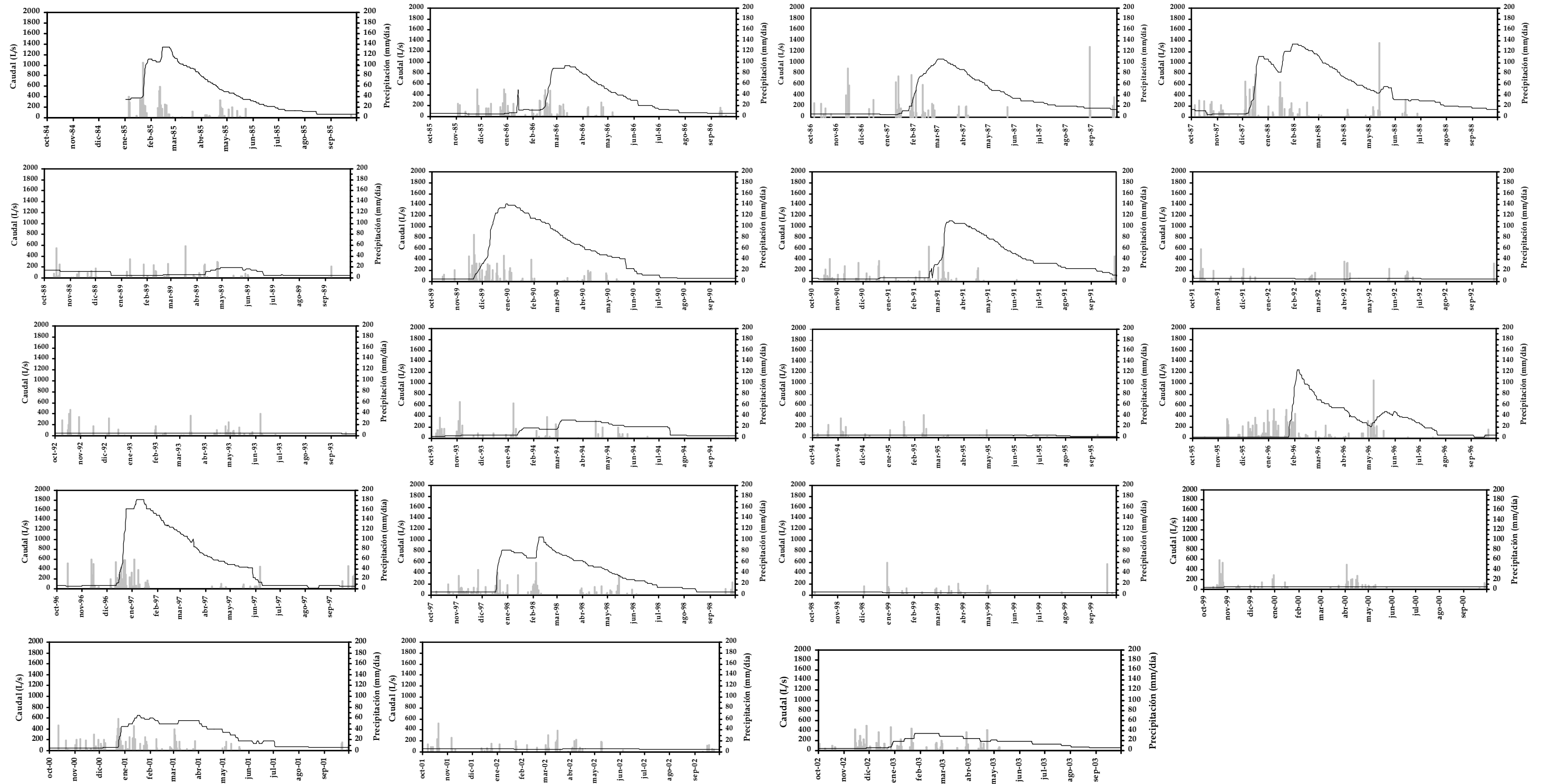


Figura 4.4. Hidrogramas anuales a nivel diario del manantial de El Tempul. Precipitaciones registradas en la estación de El Tempul

En definitiva, el análisis de los hidrogramas del manantial de El Tempul permite extraer una idea preliminar en relación al funcionamiento hidrodinámico del acuífero de la Sierra de las Cabras, que parece bastante inercial, característico de un sistema de flujo difuso o de tipo fisurado.

	Q_{\max}	Q_{\min}
1985/1986	943	61
1986/1987	1062	53
1987/1988	1346	54
1988/1989	138	50
1989/1990	1417	55
1990/1991	1109	52
1991/1992	62	44
1992/1993	47	41
1993/1994	328	48
1994/1995	53	43
1995/1996	1251	61
1996/1997	1819	58
1997/1998	1062	57
1998/1999	61	43
1999/2000	59	43
2000/2001	645	46
2001/2002	63	47
2002/2003	341	44
<i>media</i>	656	50

$$\overline{Q_{\max}} / \overline{Q_{\min}}$$

$$13,1$$

Tabla 4.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de El Tempul para los años hidrológicos entre 1985/1986 y 2002/2003 (Datos en L/s).

4.2.2. Análisis de la curva de recesión del manantial de El Tempul mediante el método de Mangin (1970, 1975)

A partir de la serie de datos diarios de la descarga del manantial de El Tempul se ha llevado a cabo el estudio de 5 curvas de recesión siguiendo la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975). En la figura 4.5 se muestran las curvas seleccionadas y en la tabla 4.2 se recogen los datos relativos a los mismos y los resultados obtenidos de su análisis. En todos los casos, se ha trabajado con hidrogramas unitarios, es decir, no se han tenido en cuenta hidrogramas en los que se han producido crecidas (aunque sean de pequeña cuantía) durante la decrecida o el agotamiento.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media (D_a) de ésta es aproximadamente de 155 días, varía poco de unos años a otros, excepto en el caso del año hidrológico 2001/2002, que presenta una duración de 97 días. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre $0,0054 \text{ días}^{-1}$ (1998/1999) y $0,0103 \text{ días}^{-1}$ (año 2001/2002), con un valor medio de $0,0069 \text{ días}^{-1}$. Estos valores son claramente indicativos de que la velocidad de infiltración es muy lenta y de que la decrecida es prolongada en el tiempo, probablemente debido a la escasa jerarquización del drenaje kárstico y a la potente zona no saturada del acuífero.

<i>Año Hidrológico</i>	D_a (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1984/1985	177	0,0056	0,0100	0,97	136	2,08E-03	4,44	0,55
1986/1987	132	0,0076	0,0143	0,96	173	1,64E-03	4,39	0,55
1989/1990	183	0,0055	0,0114	0,97	150	1,59E-03	4,89	0,61
1998/1999	186	0,0054	0,0071	0,98	174	2,19E-03	3,73	0,47
2001/2002	97	0,0103	0,0050	0,97	257	1,68E-03	4,68	0,58
Media	155	0,0069	0,0095	0,97	178	1,84E-03	4,43	0,55

Tabla 4.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión correspondientes a la serie diaria de datos del manantial de El Tempul (años hidrológicos 1985/1986-2002/2003). Leyenda: D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento, Vd volumen dinámico, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad.

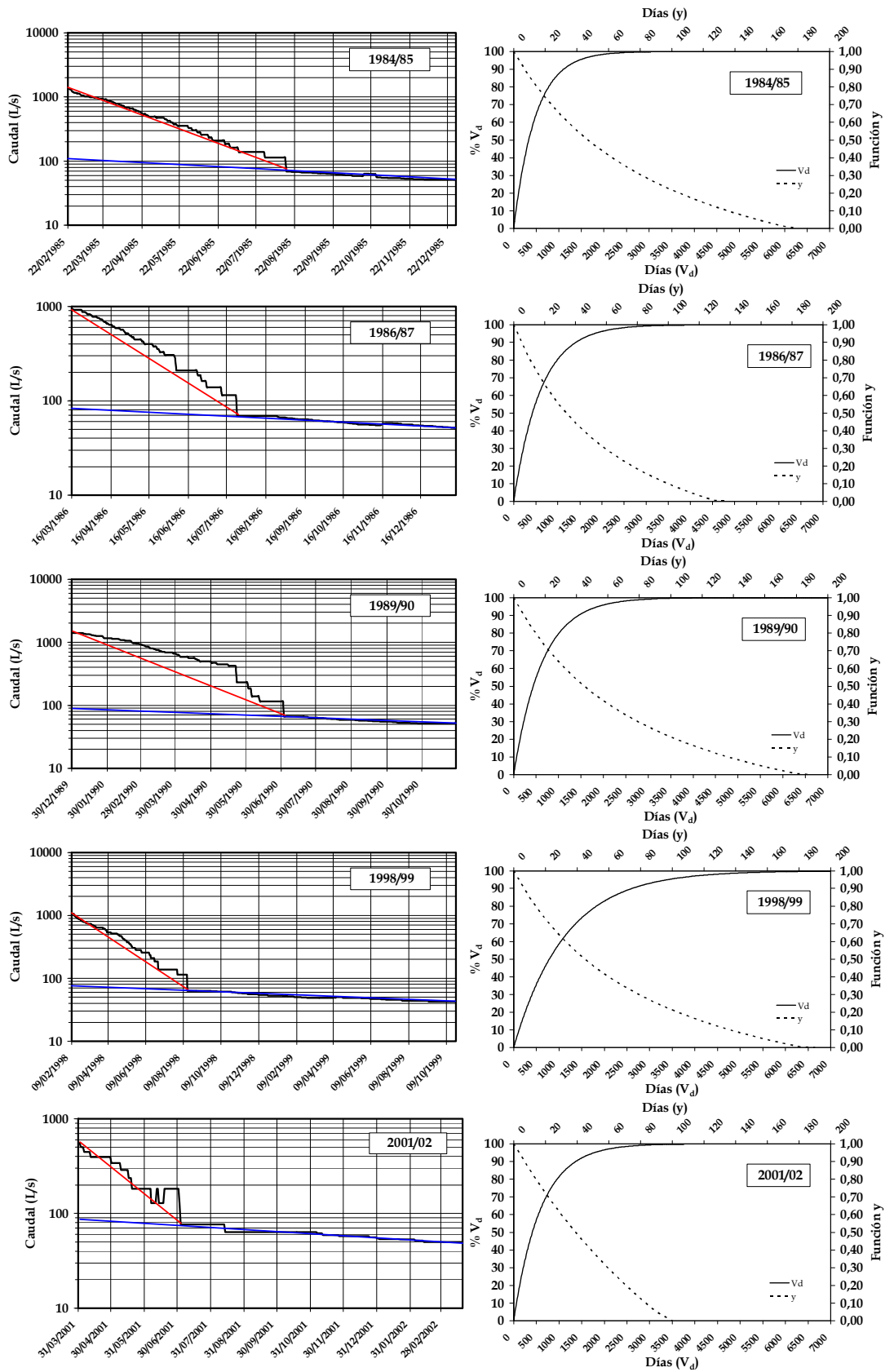


Figura 4.5. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y del porcentaje del volumen dinámico (Vd) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantienen las condiciones de agotamiento.

El coeficiente de heterogeneidad (ϵ) varía entre 0'0050 (2001/2002) y 0'0143 días⁻¹ (1986/1987). Estos valores provocan una escasa concavidad de la curva de la función y (Figura 4.5) lo cual demuestra que, durante la decrecida, la disminución del caudal en la surgencia se produce de manera lenta y gradual.

Los valores de los coeficientes η y ϵ permiten calcular el valor del parámetro i para cada una 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 (Figura 4.6). Sin embargo, el sistema abarca una extensión de 40 km², por lo que sus dimensiones no son demasiado grandes. La razón del valor tan alto de i no es otra que la duración prolongada de la decrecida, por el espesor relativamente importante y la escasa jerarquización del drenaje de la zona no saturada.

La duración del agotamiento varía entre 136 (1984/1985) y 257 días (2001/2002). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores entre $1,59 \times 10^{-3}$ días⁻¹ (1989/1990) y $2,19 \times 10^{-3}$ días⁻¹ (1998/1999), con un valor medio de $1,84 \times 10^{-3}$ días⁻¹. Todos estos valores indican que el agotamiento se produce de forma lenta como corresponde a un sistema de flujo difuso.

Los volúmenes dinámicos calculados para los agotamientos estudiados varían entre 3,73 hm³ (1998/1999) y 4,89 hm³ (1989/90); el valor medio es de 4,43 hm³. Al representar el porcentaje del volumen dinámico (Vd) drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Figura 4.5), se observa que, al cabo de 500 días 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 (Vt), calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de 8 hm³. Así, el valor del parámetro k (Vd/Vt), durante el período de estudio, presenta valores comprendidos entre 0,47 (1998/1999) y 0,61 (1989/90), con un valor medio de $k=0'55$, que según Mangin (1975) corresponde a un sistema de tipo poroso (Figura 4.6). Estos resultados traducen la importancia de la zona saturada y el importante poder regulador que presenta este acuífero.

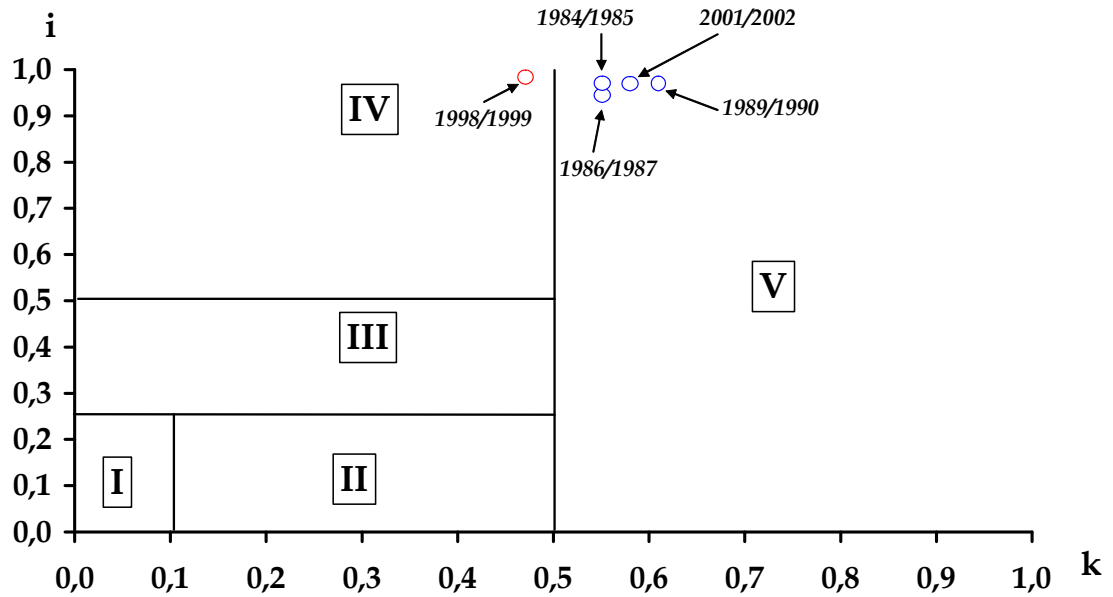


Figura 4.6. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en el manantial de El Tempul.

4.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral

4.2.3.1. Análisis de la serie diaria de caudales

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie de datos registrados entre 01/01/1985 y 31/09/2003. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de El Tempul y la de salida a caudales medios diarios en la estación de aforos del manantial de El Tempul. Dada la periodicidad de los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. 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).

4.2.3.1.1. Análisis simple

El correlograma de la serie de caudales diarios del manantial de El Tempul es bastante tendido (Figura 4.7A). Así, para el análisis de corta duración, el efecto memoria, que Mangin (1981a y b) definió como el valor de k (días) para $r = 0,1-0,2$, presenta un valor de 95 días. Mangin (1981a y b), indicó que cuanto mayor es el

efecto memoria, más importantes son las reservas de agua almacenadas en el acuífero. Según esto, las reservas serían bastante abundantes en el acuífero de Sierra de las Cabras. No obstante, según otros autores (Sahuquillo *et al.*, 1987; Andreo, 1997), además del hidrograma, es preciso tener en cuenta la geometría o los parámetros hidráulicos del acuífero para poder precisar la importancia de las reservas.

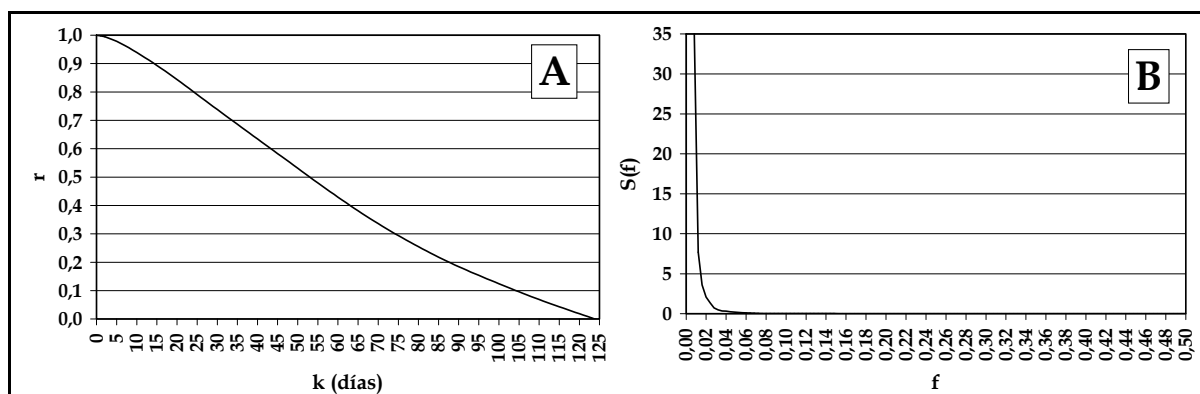


Figura 4.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

En el dominio frecuencial, la anchura de la banda espectral o frecuencia de corte permite conocer, desde un punto de vista cuantitativo, la capacidad de filtro del sistema. En este caso, la anchura de la banda es de 0,03 (Figura 4.7B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 33 días y, por tanto, si se analiza el sistema con una periodicidad menor a ésta, teóricamente 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 $f=0$. En el caso del manantial de El Tempul el tiempo de regulación es de 84 días. Este dato corrobora la interpretación efectuada anteriormente en el sentido de que la capacidad de regulación del sistema es importante.

El análisis a largo término ha permitido obtener un correlograma que refleja la existencia de ciclos anuales bien marcados (Figura 4.8A). El espectro, para el análisis de larga duración (Figura 4.8B), muestra un marcado ciclo anual, igual que

el detectado para las precipitaciones; por tanto, su origen es de naturaleza climática. Además, se observan dos componentes periódicas de 6 y 4 meses; la primera se ha detectado claramente en la señal de entrada pero la segunda es menos marcada. También se insinúa la tendencia plurianual (probablemente cuatrianual) que se observa en el espectro de la serie de datos diarios correspondiente a la estación de El Tempul.

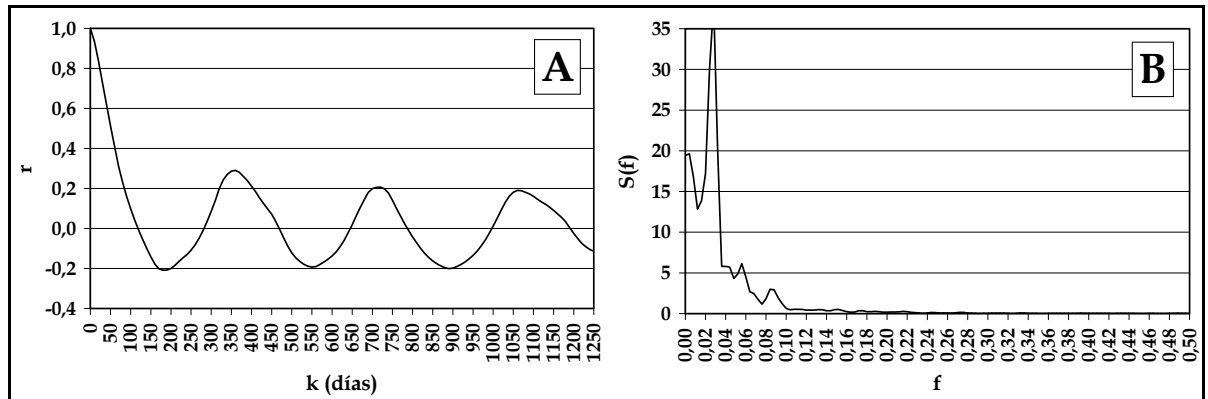


Figura 4.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul entre 1985 y 2003, para una ventana de 1250 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

4.2.3.1.2 Análisis Cruzado

El análisis simple se ha completado con un análisis cruzado de los datos de caudal correspondientes al manantial de El Tempul y los datos de precipitación medidos en la estación próxima. La función de correlación cruzada representa la intercorrelación de dos series finitas, considerando una de ellas (lluvia) como causa de la otra (caudal). El correlograma cruzado puede mostrar una buena imagen de la respuesta impulsional del sistema. En este caso, presenta una forma extendida, poco puntiaguda, con valores máximos del coeficiente de correlación de 0,202 para un valor de k de 28 días (Figura 4.9A). Ello sugiere una transmisión lenta de la señal de entrada, ya que se produce una importante amortiguación de la misma, debido a un escaso grado de karstificación. Todo esto conlleva un modelo de acuífero muy inercial, acorde con un importante poder regulador, ya deducido anteriormente a partir de los resultados del análisis simple. El

correlograma cruzado de larga duración (Figura 4.10A) muestra, una vez más, la periodicidad anual muy marcada.

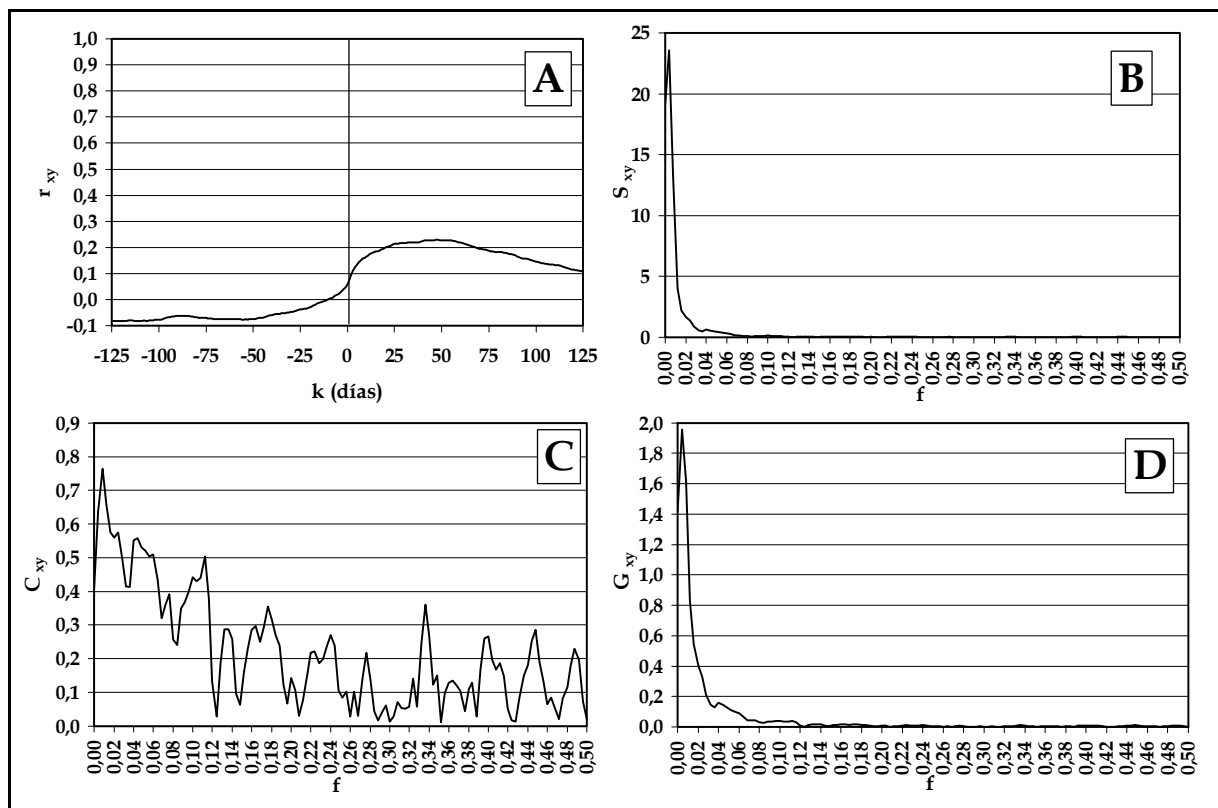


Figura 4.9. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

La función amplitud cruzada, tanto para el análisis de corta como de larga duración (Figuras 4.9B y 4.10B), muestra de forma clara el pico correspondiente a la componente anual, evidenciando la gran capacidad de filtro del sistema y las mismas componentes de 4 y 6 meses detectadas en el espectro simple, así como la tenue tendencia plurianual. Además, a partir de la función de fase se puede conocer el desfase medio existente entre la señal de entrada y la de salida para cualquier frecuencia, mediante la expresión $T = \theta(2\pi f)^{-1}$ (T = días, θ = radianes, f = frecuencia). Así, para sucesos de periodicidad anual el desfase medio es de unos 69 días.

En la figura 4.9C se observa que la función de coherencia es próxima a 1 para las frecuencias bajas (0,7-0,8); es decir, las precipitaciones anuales son las que

provocan variaciones más apreciables en el caudal del manantial. El análisis de larga duración corrobora, nuevamente, el hecho de que este sistema sea ligeramente lineal para los sucesos de periodicidad anual y, en menor medida, para componentes de periodicidad 4 y 6 meses (Figura 4.10C).

Por último, se observa que únicamente se produce amplificación de la señal de entrada para las bajas frecuencias ($<0,02$) y atenuación de la señal de entrada para frecuencias superiores. La capacidad reguladora del sistema queda perfectamente evidenciada por la fuerte atenuación que éste produce sobre las altas frecuencias en el gráfico de la función ganancia (Figura 4.9D); sólo la señal de entrada de la componente anual (bajas frecuencias) es claramente amplificada. En el análisis de larga duración (Figura 4.10D), aunque se insinúan ciertos picos para periodicidades menores a la anual (4 y 6 meses), todas se atenúan considerablemente, excepto la anual y la correspondiente a los 2,5 años.

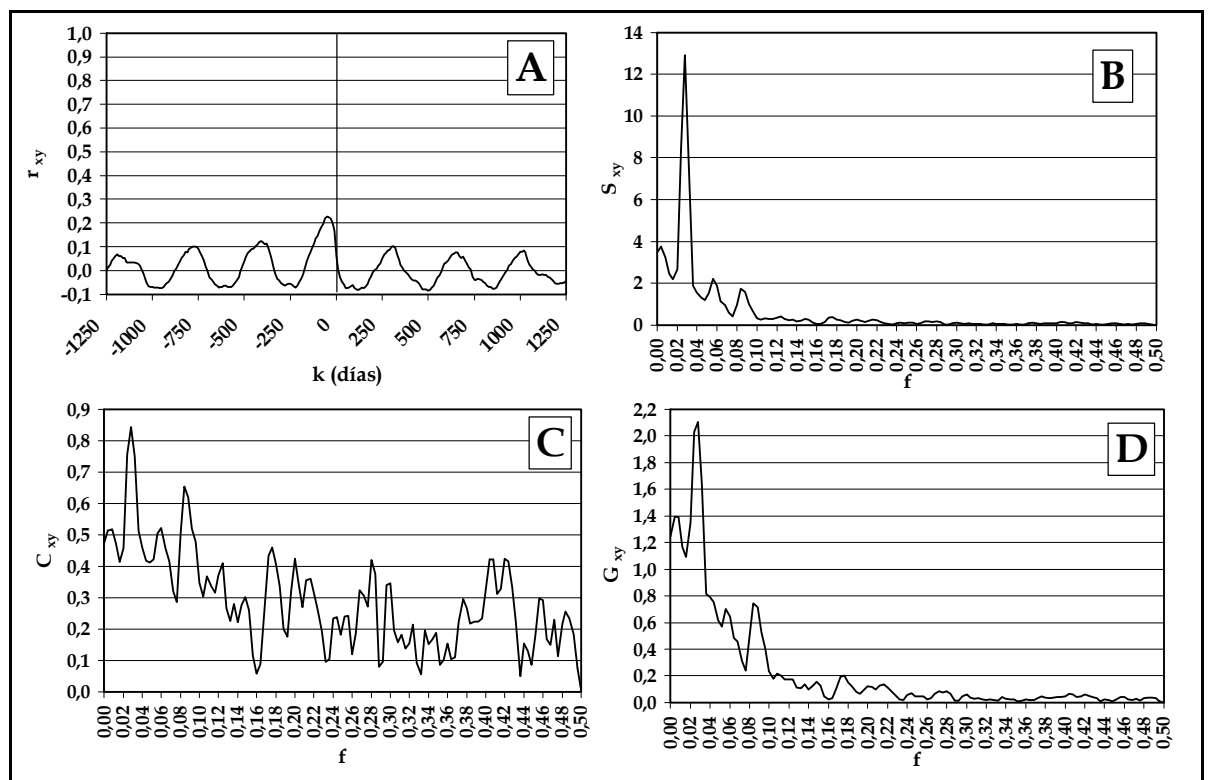


Figura 4.10. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. Ventana de 1250 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

4.2.3.2. Análisis de la serie histórica de caudales mensuales

A continuación se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie histórica de caudales mensuales comprendida entre junio de 1862 y diciembre de 1995. Previamente, se han analizado los datos de precipitaciones mensuales de dos estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio (Figura 4.11):

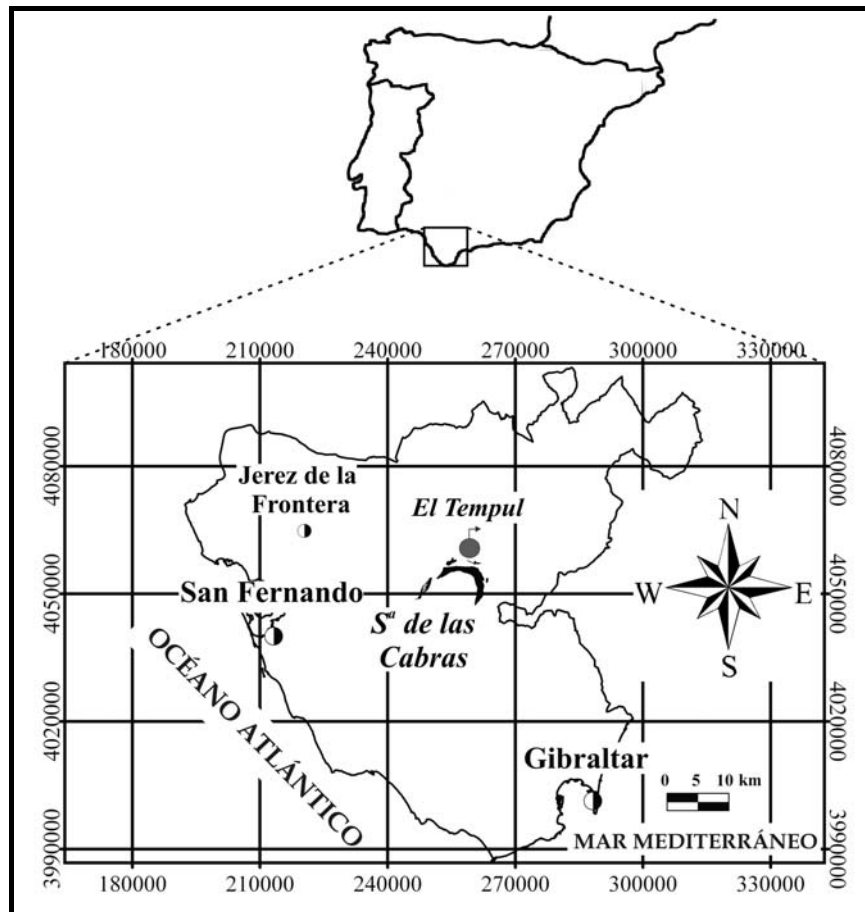


Figura 4.11. Localización de las estaciones meteorológicas de Gibraltar y San Fernando con respecto a la Sierra de las Cabras.

- Estación meteorológica del Real Observatorio de San Fernando (Cádiz). La serie histórica de datos de precipitación facilitada por dicho organismo corresponde a valores totales mensuales para el periodo comprendido entre enero de 1870 y diciembre de 1997 (127 años).
- Estación meteorológica de Gibraltar. La serie histórica analizada corresponde a de datos pluviométricos diarios, desde octubre de

1834 hasta noviembre de 2000 (166 años). Esta serie de datos ha sido facilitada por la extinta Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE) y por la Oficina Meteorológica de Gibraltar.

Por último, se ha llevado a cabo el análisis cruzado para la serie histórica de caudales mensuales en el manantial de El Tempul. Para ello, se ha utilizado como señal de entrada las precipitaciones mensuales en la estación pluviométrica de Gibraltar. Al igual que el análisis de la serie diaria, el análisis correlatorio y espectral de los datos históricos de precipitación y caudal se ha realizado a dos niveles: corta duración (ventana de observación de 125 meses y paso de un mes), para detectar las tendencias a corto plazo dentro de los periodos de registro considerados, y larga duración (ventana de observación de 500 meses y paso de 10 meses), para detectar las tendencias a más largo plazo.

4.2.3.2.1. *Análisis simple de los datos de precipitación*

Se ha realizado un análisis simple (correlograma y espectro de frecuencia) de las series de datos registrados en ambas estaciones. Para poder llevar a cabo este análisis, en la estación de Gibraltar ha sido necesario calcular, a partir de los datos diarios, los valores mensuales de precipitación durante todo el periodo considerado.

El correlograma simple de corta duración realizado con los datos de lluvia de la estación de Gibraltar, pone de manifiesto un efecto memoria de varios meses, de acuerdo con el paso de tiempo mensual que se ha utilizado, aunque tratamientos realizados a más corto plazo (Jiménez *et al.*, 2001a) demuestran que la distribución de precipitaciones es un fenómeno aleatorio, con un efecto memoria del orden de 2 días. Tanto en la estación de Gibraltar como en la de San Fernando se detecta la existencia de ciclos anuales bien marcados (Figuras 4.12A y 4.12B)

El espectro de densidad de varianza para ambas series históricas permite deducir una periodicidad pluviométrica anual muy marcada (Figuras 4.12C y 4.12D) y una semestral menos patente, algo más clara en la estación de San Fernando.

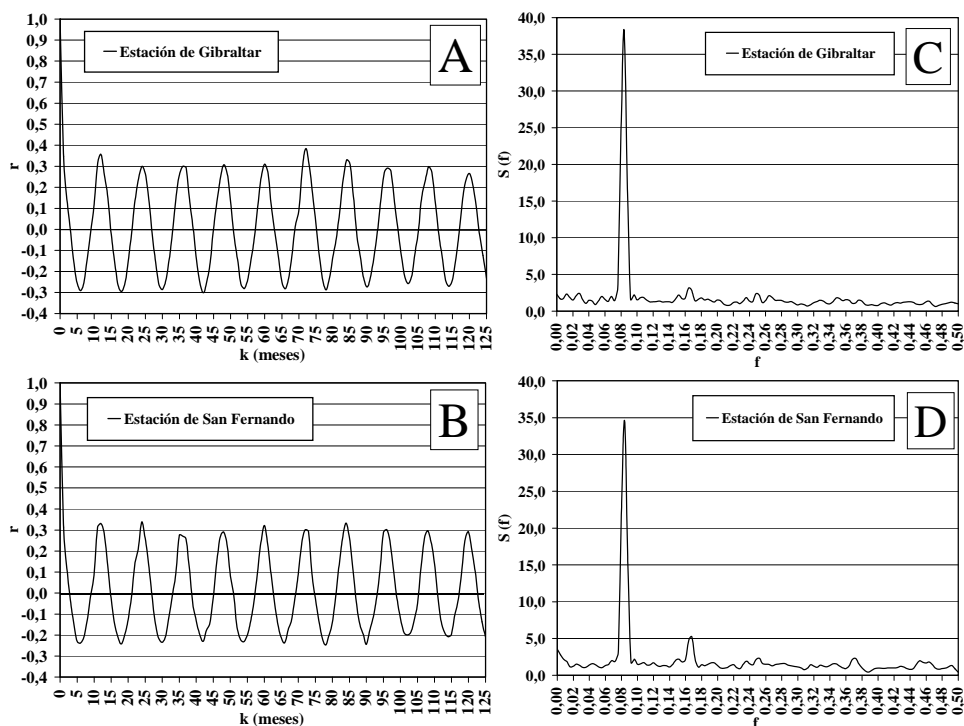


Figura 4.12. Resultados del análisis correlatorio (A, B) y espectral (C, D) de corta duración efectuado con datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

El análisis a largo término, tanto de la serie de datos de Gibraltar como de la de San Fernando, muestra correlogramas simples (Figuras 4.13A y 4.13B) en los que se detecta una periodicidad pluviométrica de aproximadamente 5 años en la distribución de las precipitaciones. Este hecho es corroborado por el espectro de densidad de varianza para ambas series de datos (Figuras 4.13C y 4.13D), en el que se aprecia claramente la periodicidad pluviométrica quinquenal. Además, de forma menos marcada, se observa una periodicidad pluviométrica de 2'5 años, con mayor claridad en la estación de San Fernando.

Este análisis simple a largo término se ha llevado a cabo también con pasos de 7 y 9 meses (Figura 4.14). Los resultados obtenidos han vuelto a poner de manifiesto que la periodicidad quinquenal es la más importante, por lo que se puede descartar que ésta sea consecuencia del procedimiento matemático y, por tanto, intrínseca a las series de datos analizadas. Además, el análisis de series de datos pluviométricos que engloban periodos de registro similares a los aquí analizados y, registrados fundamentalmente en estaciones situadas en la zona central de Inglaterra y de Gales (Burroughs, 1992), muestran también una

periodicidad de 5 años en la distribución de las precipitaciones. Según Burroughs (*op.cit.*) este hecho podría ser consecuencia de una evolución climática general que presenta características más extremas aproximadamente cada 5 años.

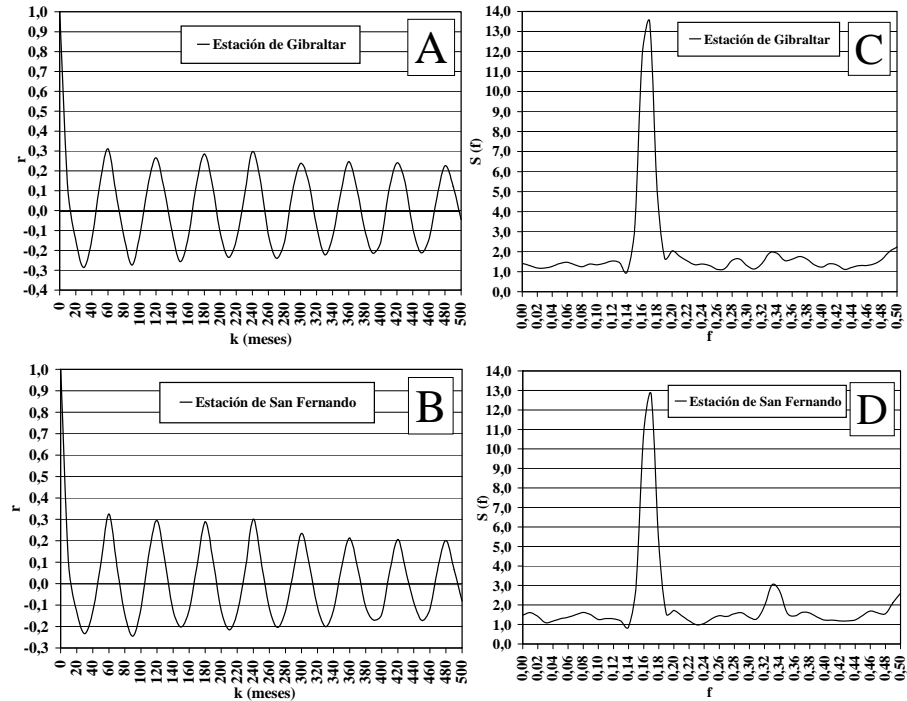


Figura 4.13. Resultados del análisis correlatorio (A, B) y espectral (C, D) de larga duración efectuado con datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

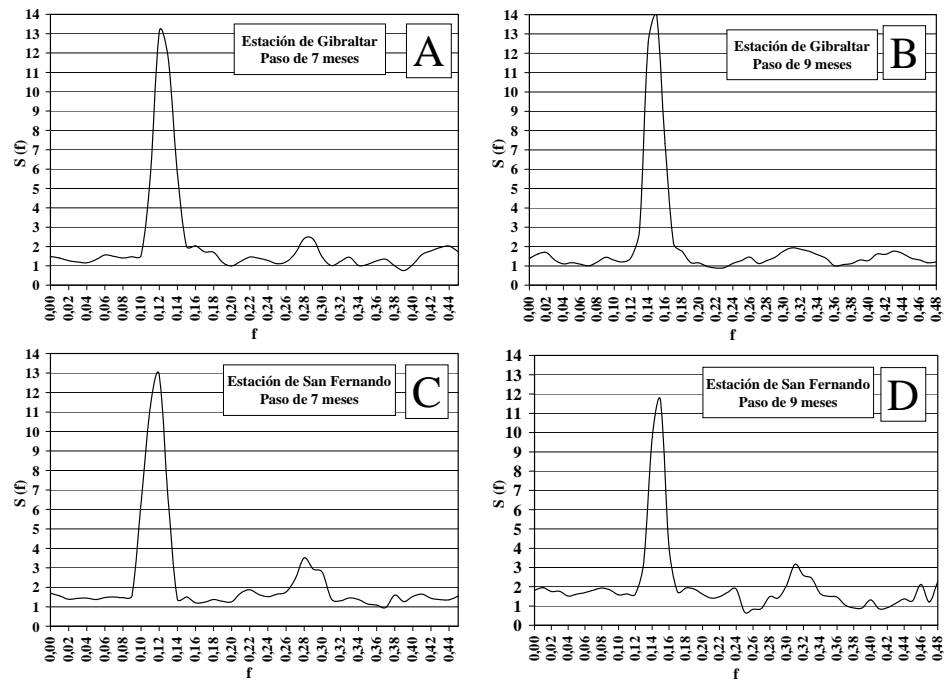


Figura 4.14. Espectros de frecuencia simple obtenidos tras el análisis a largo término de los datos mensuales de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando calculados con un paso de 7 meses (A, C) y de 9 meses (B, D). Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

Por último, resulta interesante destacar que en los espectros de frecuencia a largo término, tanto de la estación de Gibraltar como de la de San Fernando (Figuras 4.13C y 4.13D), no se observan tendencias a largo plazo (baja frecuencia).

4.2.3.2.2. Análisis simple de los datos de caudal

El correlograma de corta duración de la serie de caudales mensuales del manantial de El Tempul muestra una periodicidad anual bastante marcada (Figura 4.15A). En el dominio frecuencial se observa claramente el pico correspondiente a la periodicidad anual (Figura 4.15B), análogo al detectado en la distribución de las precipitaciones. Además, se detectan componentes periódicas de 4, 2 y 1'4 años, menos marcadas, que no se observan en el espectro de las precipitaciones (Figuras 4.12C y 4.12D). Este hecho vuelve a poner de manifiesto la gran inercia del acuífero de la Sierra de las Cabras, es decir, muestra una importante capacidad natural de amortiguar las variaciones de las precipitaciones.

El correlograma simple de caudales mensuales obtenido para el análisis a largo término, al igual que para los análisis de las series de precipitación, permite observar una ciclicidad quinquenal bastante marcada (Figura 4.15C). El espectro de frecuencia corrobora dicha componente periódica de cinco años (Figura 4.15D). Todo ello induce a pensar que se trata de una periodicidad de origen climático, al igual que la periodicidad anual observada para el análisis a corto término. Sin embargo, en el espectro de los datos de caudal (Figura 4.15D) se aprecia una tendencia a largo plazo (baja frecuencia) que no se identifica en el espectro de la serie de datos de precipitación. Por lo tanto, la tendencia detectada en la evolución de los caudales del manantial de El Tempul no se puede atribuir a una causa climática y, tal vez, podría estar relacionada con alguna variación en la sección de afloros y/o en la toma de los datos por parte de los observadores.

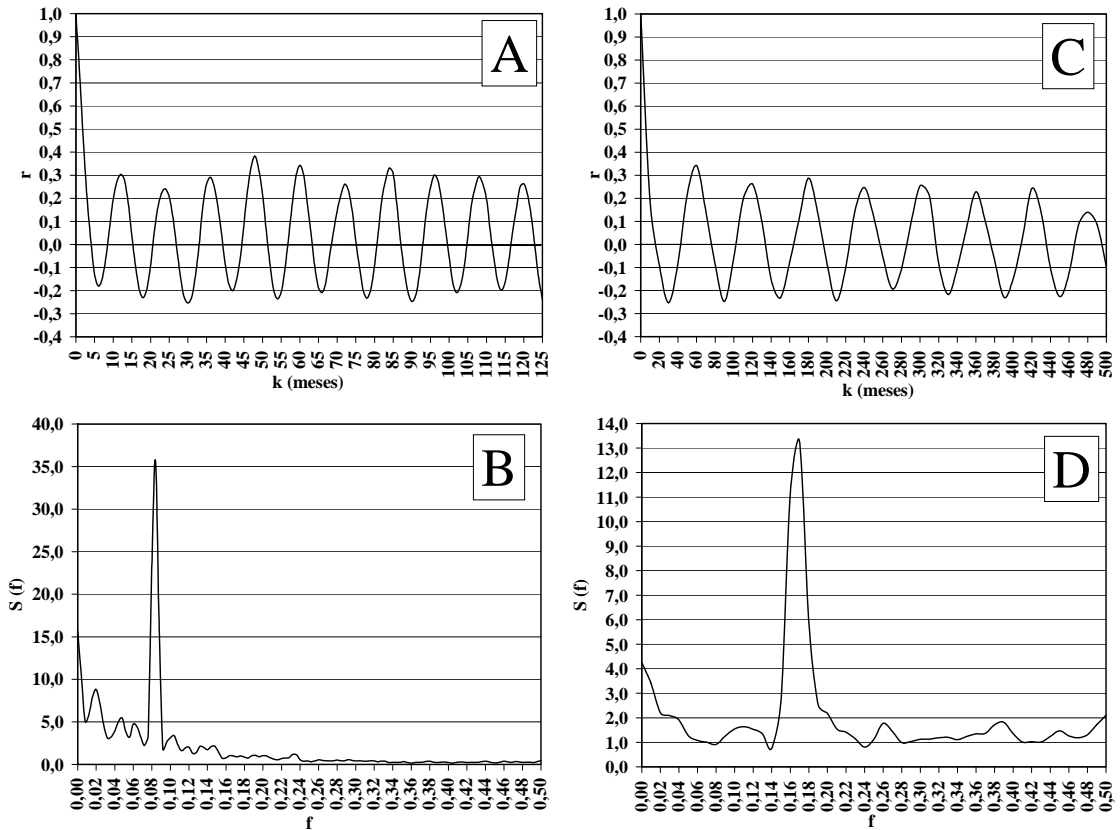


Figura 4.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral de corta (A, B) y larga duración (C, D) efectuado para la serie de caudales mensuales drenados por el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1862 y 1995. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

4.2.3.2.3 Análisis Cruzado

En este caso, el análisis correlatorio y espectral se ha realizado únicamente a corto término: ventana de observación de 125 meses y paso de 1 mes.

El correlograma cruzado (dominio temporal) y la función amplitud cruzada (dominio de las frecuencias) han permitido constatar la importancia de la componente anual de las precipitaciones y su incidencia en los caudales del manantial (Figuras 4.16A y 4.16B). Al igual que para el análisis de la serie de datos diarios, el desfase existente entre las señales de entrada y salida para sucesos de periodicidad anual es de 69 días.

A partir de la función de coherencia (Figura 4.16C) se observan correlaciones relativamente altas sólo para las frecuencias bajas, lo cual indica un importante comportamiento lineal para sucesos de periodicidad anual, y, en

menor medida, la periodicidad cuatrienal. La función de ganancia (Figura 4.16D) muestra amplificación para sucesos cuya periodicidad es de 1 y 4 años, y atenuación en el resto de frecuencias.

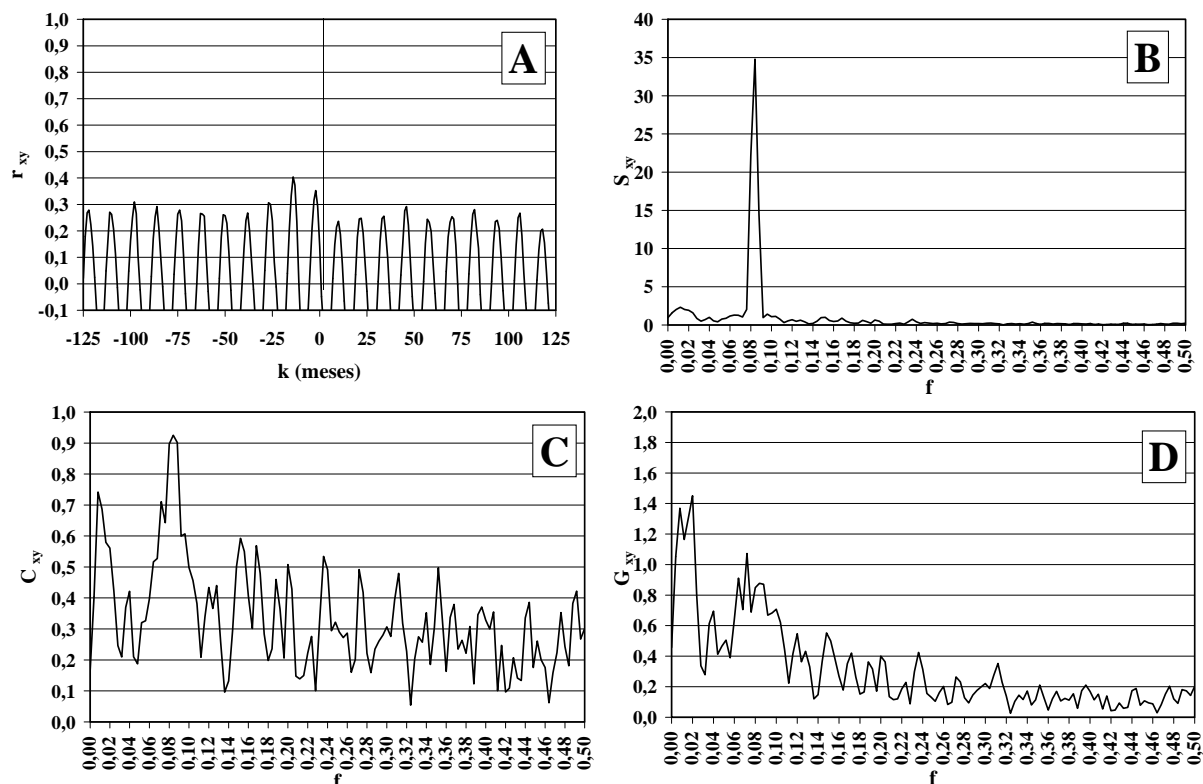


Figura 4.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales medios mensuales drenados por el manantial de El Tempul y de precipitación mensual registrada en la estación pluviométrica de Gibraltar para el período comprendido entre 1862 y 1995. Ventana de 125 meses y paso de 1 mes. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

4.2.4. Análisis de caudales clasificados

La serie de datos diarios recopilados del manantial de El Tempul (1985-2003) se ha dividido en clases de 50 L/s. Hubiera sido más razonable hacer clases de 25 L/s, pero hay pocos datos de caudal en la clase 75-100 L/s, por cuestiones imputables a la curva de gastos. Posteriormente, se ha determinado el número de días que el manantial ha estado drenando caudales correspondientes a cada clase de 50 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase. El gráfico resultante (Figura 4.17A) refleja que, durante el 60% del tiempo, el manantial drena caudales inferiores a 100 L/s lo que es característico de sistemas poco karstificados. Además, se ha representado la frecuencia acumulada en una

escala de probabilidad de Mangin (1975), frente a las clases de caudales en escala logarítmica (Figura 4.17B). En el gráfico resultante se pueden distinguir cuatro tramos principales:

- Tramo de caudales inferiores a 100 L/s (1), que corresponde a la situación de agotamiento del manantial. La pendiente es relativamente alta, porque las variaciones de caudal del agotamiento se producen de forma lenta, como se ha constatado a partir del análisis del hidrograma. Directamente sobre la figura, se aprecia que casi el 60 % de los datos de la serie corresponden a esta situación hidrodinámica.

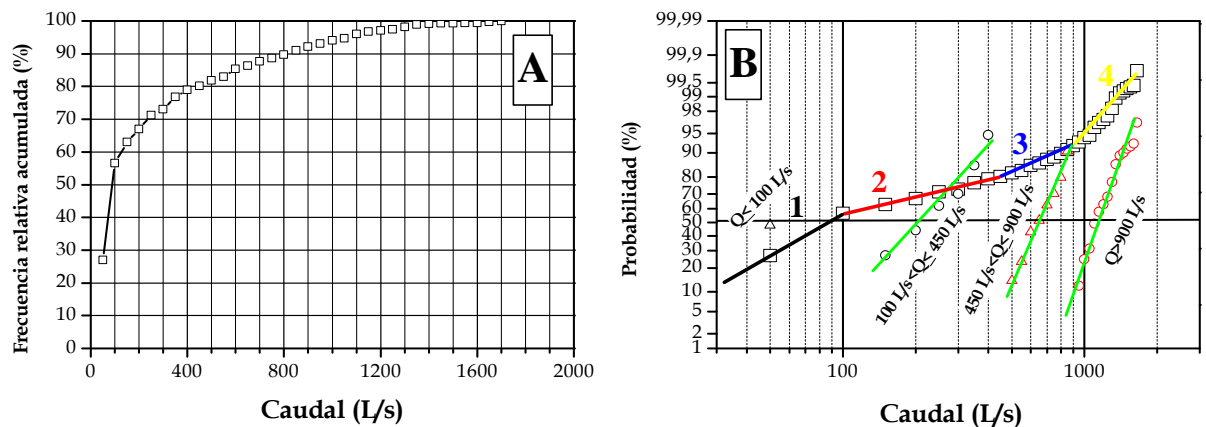


Figura 4.17. Gráfico de caudales clasificados del manantial de El Tempul, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

- Tramo intermedio que corresponde a la situación de decrecida, con caudales comprendidos entre 100 y 900 L/s, dentro del cual es posible distinguir a su vez dos subtramos. Uno, con caudales entre 100 y 450 L/s (2), menos pendiente (disminución más rápida de los caudales), que traduce la formación de una reserva que podría ser restituida al flujo en un ciclo posterior. Otro, con caudales entre 450 y 900 L/s (3), de mayor pendiente (disminución más lenta de los caudales) que correspondería al drenaje de la reserva de agua almacenada previamente entre la cota de Fuente Imbro y la de El Tempul.
- Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 900 L/s (4), correspondiente a la crecida del manantial. El hecho de que presente una mayor pendiente indica que las variaciones de caudal en el manantial de

El Tempul durante la crecida se producen de forma lenta, porque en esas condiciones ($Q > 950$ L/s) es cuando entra en funcionamiento Fuente Imbro y posiblemente también el arroyo de Bogaz (Boca de Foz).

Este mismo tratamiento se ha llevado a cabo para cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 4.17B). Además, de acuerdo con la metodología propuesta por Padilla (1990), se ha calculado el porcentaje del volumen de agua drenado para cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 4.3). Los resultados muestran que la Sierra de las Cabras presenta una alta capacidad de regulación, ya que durante el agotamiento y la decrecida se drena casi el 65% del volumen total.

	m _Q (L/s) % Volumen	
$Q \leq 100$ L/s	50	11
100 L/s < $Q \leq 450$ L/s	205	20
450 L/s < $Q \leq 900$ L/s	650	32
$Q > 900$ L/s	1160	37

Tabla 4.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de El Tempul a partir del análisis de caudales clasificados.

4.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

4.2.5.1. Análisis de la serie diaria de caudales

En esta sección se presentan los resultados de aplicar la transformada continua *wavelet* a los datos de caudal medio diario en el manantial de El Tempul y de precipitación diaria en la estación pluviométrica del mismo nombre, para el período comprendido entre el 01/01/1985 y el 30/09/2003. Además, se ha aplicado el análisis cruzado de la transformada *wavelet* entre ambas series de datos, lo cual ha permitido estudiar la variabilidad temporal de la relación entre precipitación y caudal en el acuífero de la Sierra de las Cabras.

Como ya se ha indicado en el apartado de metodología, la transformada *wavelet*, en comparación con la transformada de Fourier (análisis correlatorio y espectral), permite obtener resultados más precisos, sobre todo, en relación con la

variabilidad temporal de los procesos, que deben de ser tenidos muy en cuenta para la correcta modelización de la respuesta hidrodinámica de cualquier sistema acuífero.

El *software* utilizado para la aplicación de la transformada *wavelet* representa, en escala de grises, las figuras correspondientes a los espectros continuos, de manera que las tonalidades más claras indican un elevado valor del coeficiente de *wavelet*, mientras que las oscuras representan valores bajos de dicho coeficiente. La gama de tonos grisáceos ponen de manifiesto un mayor o menor valor del coeficiente de *wavelet*. También se ha representado en estas figuras el denominado “cono de influencia” que incluye los períodos, dentro de la serie de datos, cuyos resultados no son interpretables, debido al efecto de borde que se produce en el propio tratamiento y, por lo tanto, no han sido tenidos en cuenta para este análisis.

El espectro continuo de los datos de precipitación de la estación de El Tempul (Figura 4.18A) muestra componentes reseñables para periodos menores de 1 año mientras que en el espectro de caudales (Figura 4.19A) estas componentes son menos evidentes, lo que pone de manifiesto el efecto filtro que ejerce el sistema acuífero frente a las precipitaciones.

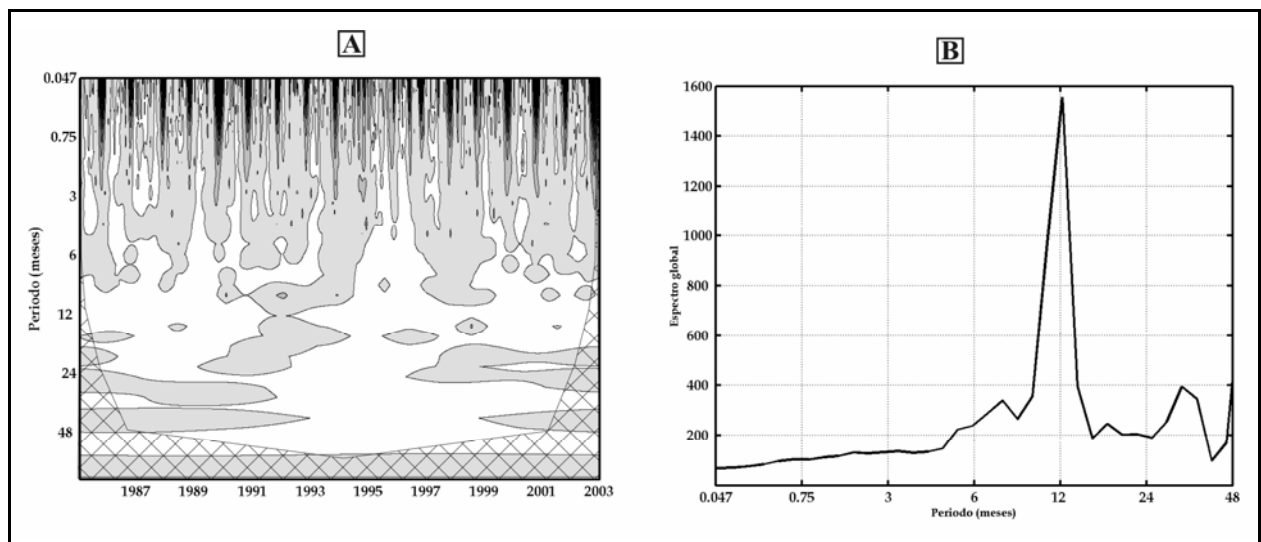


Figura 4.18. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

La periodicidad anual es claramente visible tanto en el espectro continuo de precipitaciones (Figura 4.18A) como en el de caudales (Figura 4.19A), aunque en este último es más marcado, como ponen de manifiesto ambos espectros globales continuos (Figuras 4.18B y 4.19B).

El hecho de que no se observen periodicidades inferiores a la anual en el espectro de caudales (Figura 4.19B), junto con la amplificación de la señal anual en dicho espectro en relación al de precipitaciones (Figuras 4.18B) refleja la capacidad reguladora del acuífero, ya que se produce un filtrado de las periodicidades de mayor frecuencia (< 1 año) que se registran en las precipitaciones.

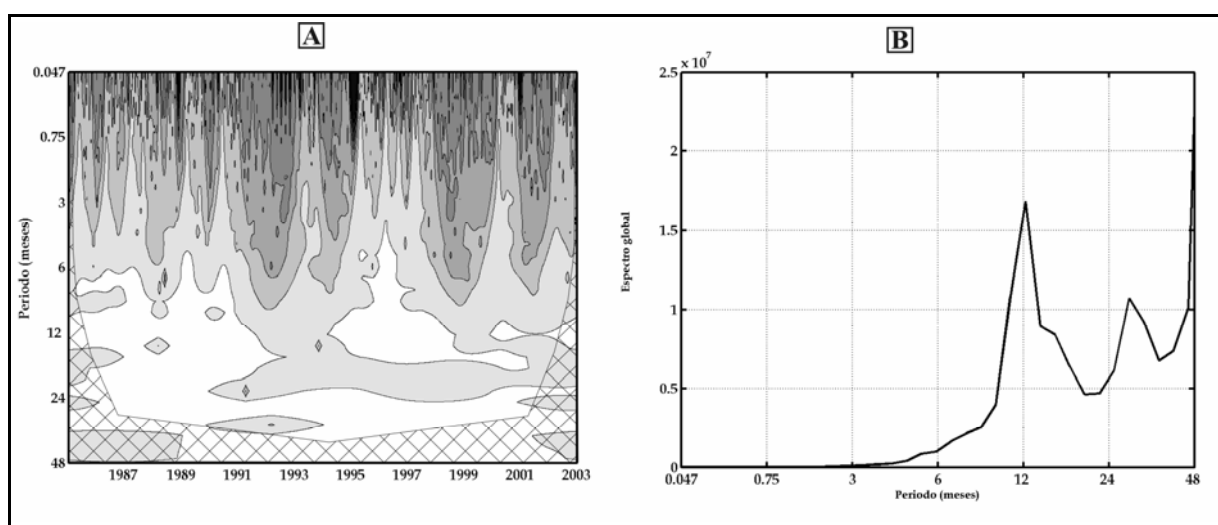


Figura 4.19. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

A largo término, los espectros continuos de lluvia y caudal (Figuras 4.18A y 4.19A) ponen de manifiesto una importante componente plurianual de 2,5-3 años, más acentuada en el análisis de la serie de caudales. Los espectros continuos globales de ambas variables (Figuras 4.18A y 4.19A) reflejan que esta periodicidad de tres años es bastante importante ya que después de la anual es la más marcada. Dicha componente plurianual es similar a la descrita por Mandelbrot y Wallis (1968) que fue denominada por estos autores como “Joseph Effect” y, está relacionada con la alternancia de condiciones más extremas de periodos secos y húmedos aproximadamente cada 3 años.

La variabilidad temporal de la componente anual en ambas series de datos es escasa. No obstante, para el periodo comprendido entre 1991 y 1994 esta componente desaparece de ambos espectros (Figuras 4.18A y 4.19A). Además, en el espectro continuo de las precipitaciones (Figura 4.18A) se muestra que para el año hidrológico 1999/2000 la componente anual desaparece, mientras que en el espectro continuo de la serie de caudales (Figura 4.19A), esta eliminación de la componente anual se extiende hasta parte del año hidrológico siguiente (2000/2001).

Hasta ahora se han presentado los resultados del análisis de las series de datos de precipitación y caudal por separado. El siguiente paso consiste en el análisis cruzado de ambas series de datos, para poder estudiar la variabilidad de la relación entre precipitación y caudal.

Los espectros cruzados continuo y global se representan en las figuras 4.20A y 4.20B, respectivamente. Así, un análisis a corto término del espectro cruzado continuo, permite constatar que es la periodicidad anual la más destacable, mientras que, no se detectan componentes menores de 3 meses. El espectro cruzado global pone de manifiesto nuevamente que es la componente anual la más marcada. Según Labat *et al.* (1999b), la amplificación de la señal original de las precipitaciones a corto término (altas frecuencias) se debe asociar a la importante capacidad de filtro del sistema, debido a un escaso grado de karstificación del sistema acuífero de la Sierra de las Cabras.

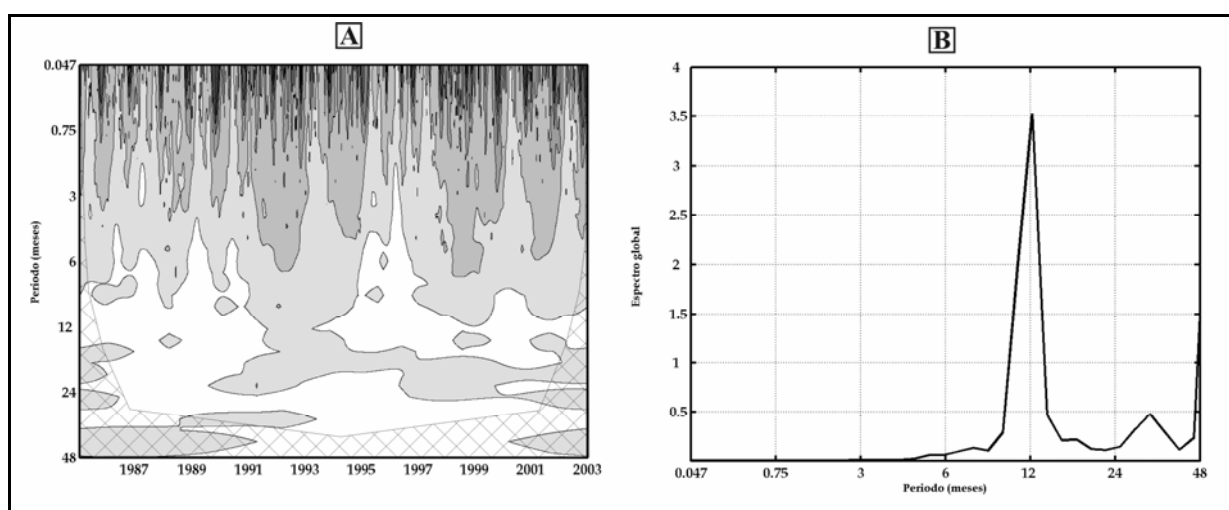


Figura 4.20. Espectro cruzado continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de El Tempul y del caudal medio diario en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1985 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Por último, el espectro cruzado continuo también muestra una importante periodicidad plurianual de 2,5-3 años durante todo el período de estudio (Figura 4.20A), tal como se observa claramente representada en el espectro cruzado global (Figura 4.20B). La amplificación de esta señal a largo término en el espectro de caudales, en relación al espectro de precipitaciones, según los resultados obtenidos por Labat *et al.* (1999b), se debe relacionar con la importancia de las reservas de agua subterránea.

4.2.5.2. Análisis de la serie históricas de precipitaciones y caudales mensuales

En esta sección se presentan los resultados de aplicar la transformada continua *wavelet* tanto a las series históricas de precipitación registrada en la estaciones de Gibraltar y San Fernando, como a los datos de la serie histórica de caudales mensuales del manantial de El Tempul. Además, al igual que para el análisis correlatorio y espectral, se ha aplicado el análisis cruzado de la transformada *wavelet* entre los datos de precipitación de Gibraltar y de caudal de El Tempul.

Los espectros continuos de los datos de precipitación de las estaciones de Gibraltar y San Fernando (Figuras 4.21A y 4.21B) ponen de manifiesto que es la periodicidad anual la componente más fácilmente observable en ambos espectros. Además, a largo término se muestran dos componentes más o menos localizadas a escala temporal. La primera de ellas, con una periodicidad de 2-3 años, se registra durante todo el periodo de estudio, aunque con mayor claridad para la estación de Gibraltar. Esta componente plurianual se convierte durante los últimos sesenta años (desde 1950) en una periodicidad de 4-6 años y, aunque es de menor intensidad que la primera, pone de manifiesto la variación a largo término de la distribución de las precipitaciones. Los espectros globales continuos de las dos

series de datos (Figura 4.21C) muestran la importancia de la componente anual, mientras que las periodicidades plurianuales aparecen muy atenuadas.

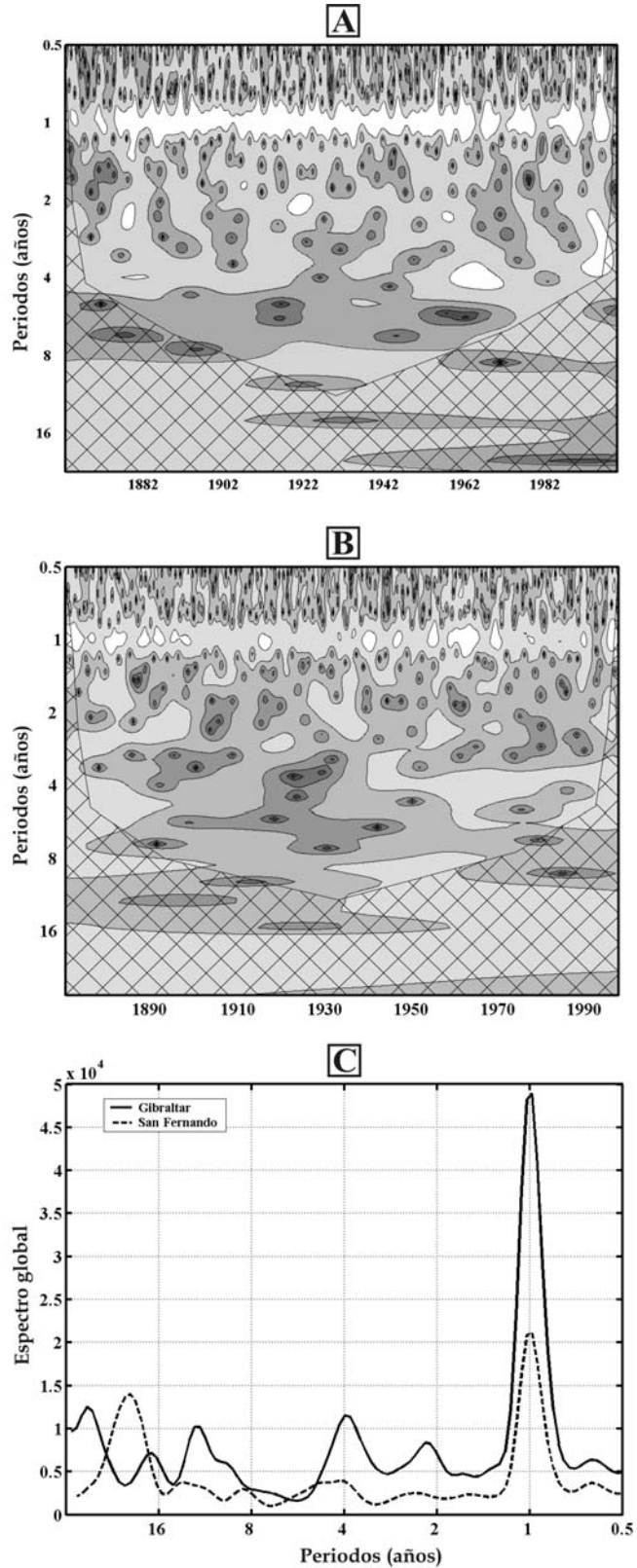


Figura 4.21. Espectro continuo de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación mensual en la estación de Gibraltar (A) y de San Fernando (B). Espectro continuo global de ambas series de datos (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Estas componentes plurianuales (2-3 y 4-6 años) se han observado también en los resultados del análisis correlatorio y espectral de estas series de datos y, como ha se comentado anteriormente, están relacionadas con la alternancia de condiciones más extremas de periodos secos y húmedos.

El espectro continuo de los datos de El Tempul (Figura 4.22A) muestra que las componentes a corto término son menos evidentes que en los espectros de precipitación (Gibraltar y San Fernando). No obstante, estas componentes a corto plazo no presentan una variabilidad importante y se detectan durante todo el periodo analizado (Figura 4.22A), en contraposición a lo que se observa en los espectros de precipitación (Figuras 4.21A y 4.22B). Esto demuestra la fuerte inercia del acuífero, capaz de filtrar las variaciones de corto período en la señal de la lluvia.

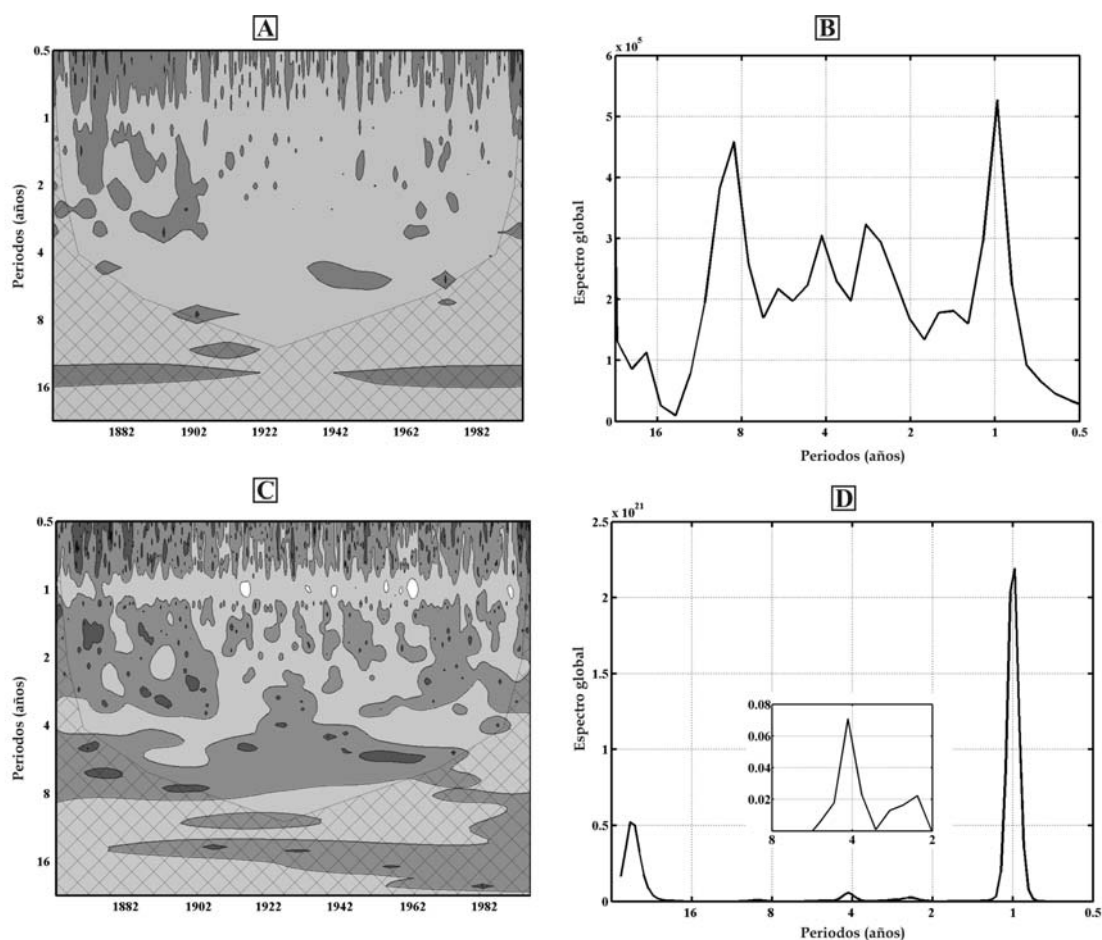


Figura 4.22. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal mensual en el manantial de El Tempul. Espectro cruzado continuo (C) y global (D) de la transformada wavelet de los datos de precipitación mensual en la estación de El Tempul y del caudal medio mensual en el manantial de El Tempul para el período comprendido entre 1862 y 1995. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

El espectro continuo global (Figura 4.22B) muestra la componente anual, y diversas componentes plurianuales (2-3, 4-6 y 8-10 años). Sin embargo, la periodicidad de 8-10 años no se advirtió en los resultados del análisis correlatorio y espectral y, debido al cono de influencia, los resultados están alterados, por lo que no se ha tenido en cuenta esta periodicidad.

Los espectros cruzados continuo y global se representan en las figuras 4.22C y 4.22D, respectivamente. Un análisis a corto término del espectro cruzado continuo, permite constatar que es la periodicidad anual la más destacada, mientras que a largo término, se observan dos componentes diferentes (2-3 y 4-6 años). El espectro cruzado global muestra nuevamente que es la componente anual la más importante, por lo que las componentes plurianuales se muestran muy atenuadas. De nuevo, se detecta una amplificación de la señal a largo término en el espectro de caudales frente al espectro de precipitaciones, por lo que según los resultados obtenidos por Labat *et al.* (1999b), se debe relacionar con la importancia de las reservas de agua subterránea.

4.2.6. Síntesis de los resultados obtenidos

El análisis de los hidrogramas anuales del manantial de El Tempul, principal punto de descarga de la Sierra de las Cabras, permite diferenciar tres tipos de comportamiento en función de la cantidad e intensidad de los eventos pluviométricos que se producen. Así, para aquellos años hidrológicos en los que se producen aumentos significativos de caudal, la respuesta es una única crecida, como pronto una semana después del principal evento pluviométrico, que da lugar a un hidrograma anual con un tiempo de base de 4 meses. La baja relación (13,1) entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$) indica el alto grado de inercial del acuífero drenado por el manantial de El Tempul.

El análisis de las curvas de recesión mediante la metodología propuesta por Mangin (1971, 1975), muestra que la decrecida del manantial tiene lugar lentamente (>100 días), lo cual significa que la infiltración no se produce de forma rápida o concentrada, porque existe una zona de infiltración relativamente potente y poco karstificada. El agotamiento del manantial comienza con un caudal de 75 L/s y está caracterizado por un coeficiente (α) del orden de 2×10^{-3} días⁻¹, lo cual parece indicar la existencia de una zona saturada relativamente importante, que descarga de forma lenta.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a los datos diarios de caudal del manantial de El Tempul corrobora las afirmaciones descritas anteriormente, ya que el sistema de la Sierra de las Cabras actúa como un gran filtro capaz de amortiguar y modular la señal de entrada (precipitaciones). Presenta un efecto memoria considerable (del orden de 100 días) y el tiempo de regulación es igualmente elevado (85 días), aspectos ambos indicativos de una importante capacidad reguladora ante las precipitaciones. En general, las variaciones más significativas de caudal tienen que ver con la componente anual de las precipitaciones, es decir, todos los años hay un aumento de caudal asociado a las lluvias invernales, que son las que producen la recarga más importante. Estas lluvias encuentran una respuesta lineal y amplificada, aunque desfasada más de 2 meses.

El análisis de caudales clasificados permite concluir que por encima de 950 L/s el manantial está en crecida, y previsiblemente se produce descarga por Fuente Imbro (e incluso por Boca de Foz), por lo que la variación de los caudales de El Tempul se produce de forma más lenta de lo que cabría esperar. Entre 950 y 75 L/s el manantial se encuentra en decrecida, drenando la reserva almacenada anteriormente entre 140 y 120 m s.n.m. Y, por debajo de 75 L/s el manantial está en agotamiento, y el vaciado del acuífero, se realiza de acuerdo con el coeficiente de agotamiento.

La aplicación de la transformada *wavelet* a los datos diarios de precipitación y de caudal ha ratificado aún más las conclusiones puestas de manifiesto

anteriormente, en el sentido de que el acuífero de la Sierra de las Cabras se comporta como un gran filtro frente a las precipitaciones. El sistema muestra gran capacidad de amplificar la señal original de las precipitaciones tanto a corto, como a largo término, lo cual es indicativo, respectivamente, de un escaso grado de karstificación funcional y de la existencia de ciertas reservas de agua subterránea.

Por último, los resultados de la aplicación del análisis correlatorio y espectral y la aplicación de la transformada *wavelet* a las series históricas, tanto de precipitación (Gibraltar y San Fernando) como de caudal (El Tempul), permiten extraer varias conclusiones que se indican a continuación.

La periodicidad anual en la distribución de las precipitaciones ha sido una constante desde hace más de un siglo y medio, aunque se hayan detectado algunas periodicidades menores (semestrales), poco marcadas. Además, el análisis a largo término permite advertir dos periodicidades pluviométricas de 2-3 y 4-6 años que han sido registradas también en otros lugares de Europa, donde se ha atribuido a una evolución general del clima hacia condiciones más extremas.

El análisis de la serie de caudales mensuales del manantial de El Tempul ha permitido constatar la existencia de las periodicidades correspondientes a 1, 2-3 y 4-6 años, que parecen tener un claro origen climático. La amplificación de la señal a largo término en el espectro de caudales frente al espectro de precipitaciones, ha puesto de manifiesto la existencia de reservas de agua subterránea.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA DESCARGA EN EL SECTOR NORORIENTAL DE LA SIERRA DE LÍBAR

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

La unidad hidrogeológica de la Sierra de Líbar presenta una superficie total de 103 km² y constituye una alineación montañosa de dirección NE-SW (Figura 5.1) en el límite entre las provincias de Málaga y Cádiz. La Sierra de Líbar y la de Grazalema, situada inmediatamente al Oeste, constituyen un enclave natural de primera importancia, declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO en 1977.

Desde el punto de vista geológico, la Sierra de Líbar forma parte de la Zona Externa de la Cordillera Bética, concretamente del denominado Penibético o Subbético Interno occidental. La serie estratigráfica general de este dominio geológico está formada, de muro a techo, por tres conjuntos litológicos (Martín-Algarra, 1987): dolomías negras del Trías Medio y arcillas con evaporitas del Trías Superior (Grupo Hidalga), dolomías y calizas del Jurásico (Grupo Torcal) y margas y margocalizas del Cretácico (Grupo Espartina).

La estructura geológica (Figura 5.1) está constituida por pliegues en forma de cofre, de dirección NE-SW (IGME, 1987 y 1991; Martín-Algarra, 1987). Esta estructura plegada ha sido afectada por fracturas de dirección predominante NW-SE (Durán y López-Martínez, 1992). En el núcleo de los anticlinales se encuentran las calizas jurásicas, mientras que las margas y margocalizas cretácicas afloran en los bordes de la sierra o en la parte alta de la misma, a favor de sinclinales menores y/o de fallas normales que generan pequeñas fosas tectónicas. Los ejes de los pliegues presentan una ligera inclinación hacia el NE, lo cual provoca el afloramiento de las dolomías del Grupo Hidalga en la parte SW del macizo (Figura 5.1).

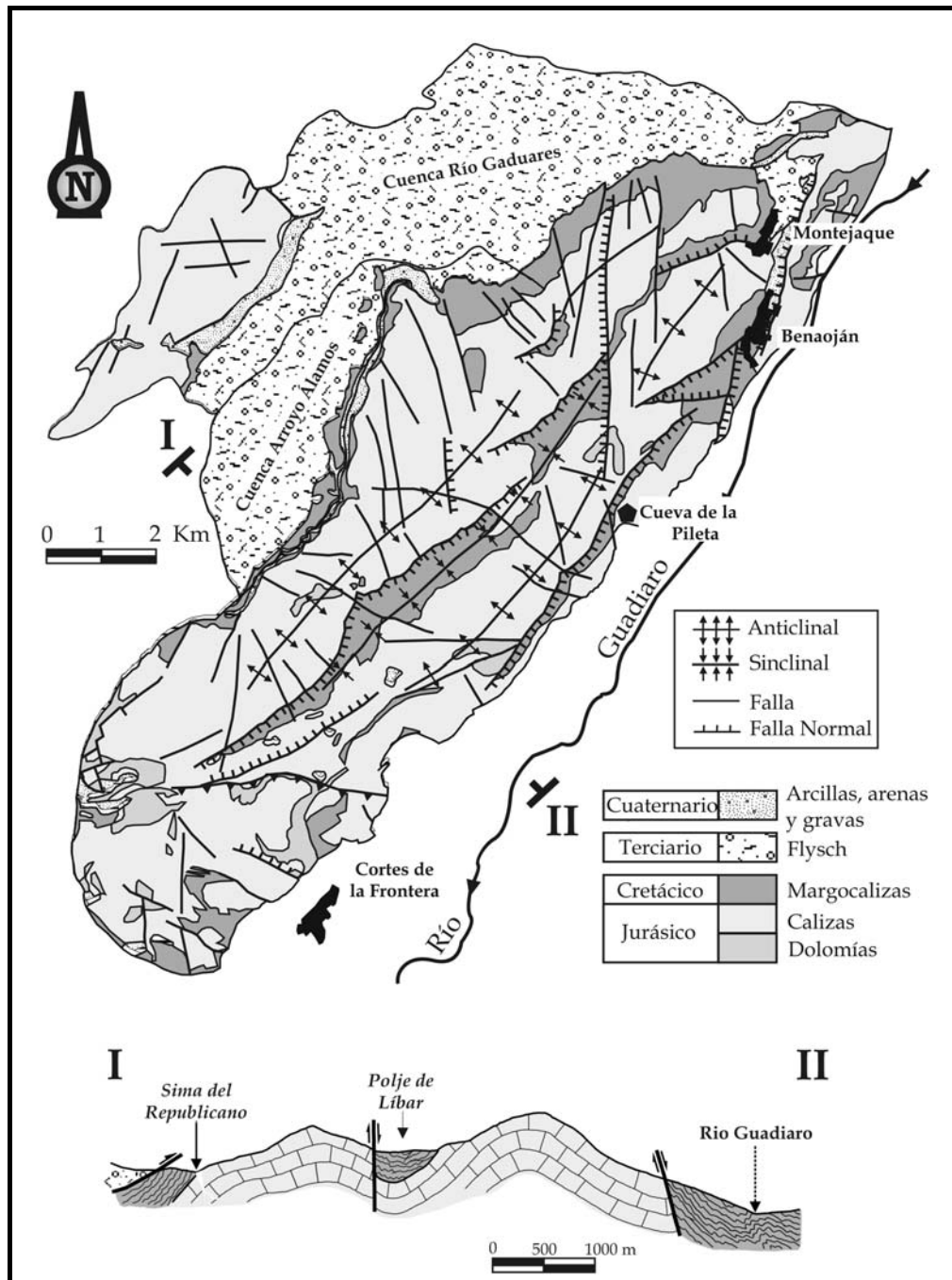


Figura 5.1. Esquema y corte geológico de la Sierra de Líbar (modificado de Martín Algarra, 1987).

La coexistencia de litologías solubles, como es el caso de las calizas y dolomías, con una disposición subhorizontal de los estratos en las charnelas de los anticlinales con forma de cofre, la importante fracturación y la elevada precipitación de la zona (1500 mm/año de valor medio) han dado lugar a un desarrollo espectacular del modelado kárstico (Delannoy, 1987 y 1998; Delannoy y

Díaz del Olmo, 1987; Durán, 1996; Gracia *et al.*, 2000; Jiménez, 2002). En este macizo es posible observar formas exokársticas de todos los tipos y tamaños, desde campos de lapiaz a poljes, pasando por dolinas (Figura 5.2). Los lapiazes y las dolinas son más frecuentes en los afloramientos de calizas, generalmente desprovistos de suelos. Los poljes de mayor entidad (Líbar, Pozuelo y Burfo) están situados en la parte central de la sierra, sobre materiales cretácicos que se han preservado de la erosión por las estructuras sinclinales y/o falladas (fosas o semifosas tectónicas) en las que se encuentran.

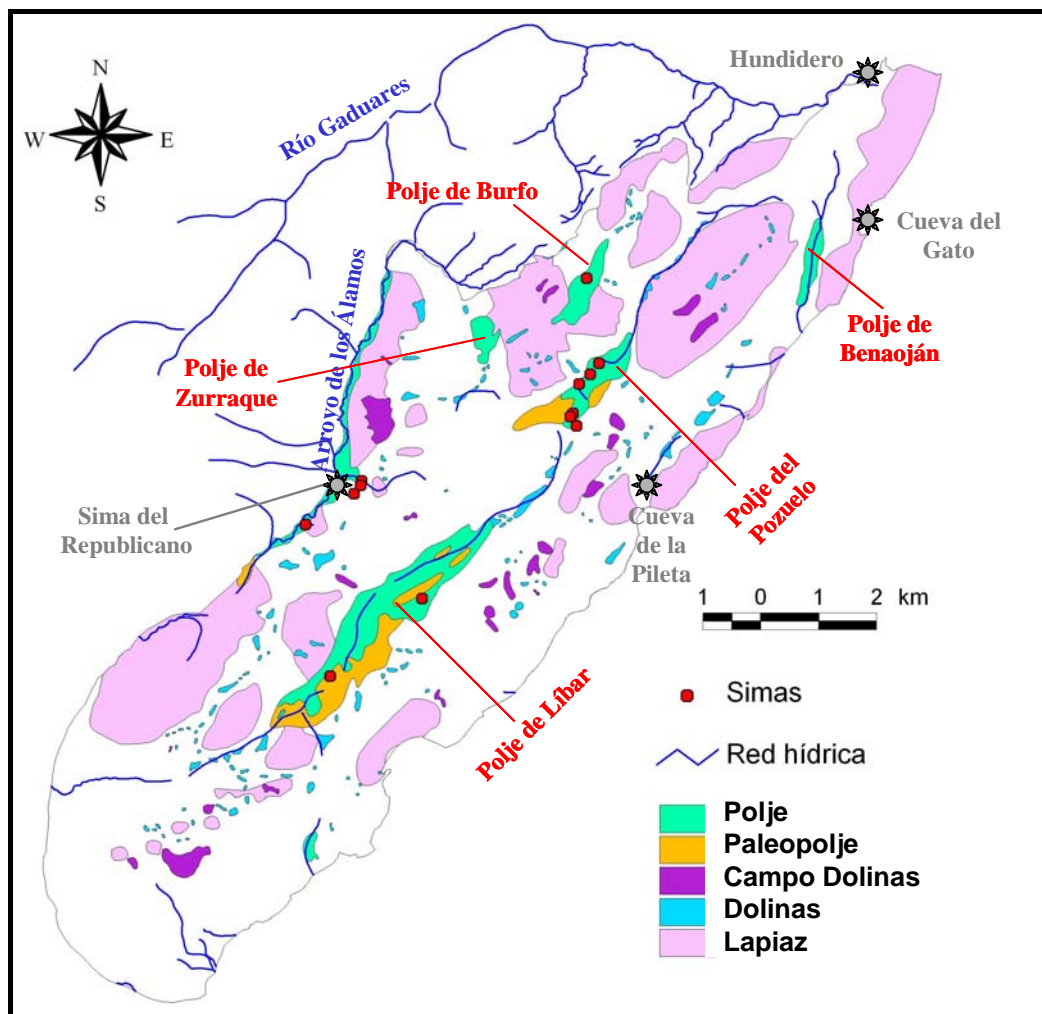


Figura 5.2. Esquema geomorfológico de la Sierra de Líbar, simplificado de Delannoy (1987).

También existen abundantes formas endokársticas (Delannoy, 1987; Durán, 1996; Mayoral *et al.*, 2000; Millán y Wiczorek, 2000; Pedroche y Mendoza, 2000, Mayoral, 2004), sobre todo, en la parte alta de la sierra. Se trata de cavidades de

desarrollo predominantemente vertical, muchas de ellas continuación de sumideros kársticos por los que se produce la infiltración de agua. En el borde oriental del macizo se encuentran cuevas de desarrollo horizontal relacionadas con la descarga del acuífero, como la Cueva de la Pileta, un antiguo dren kárstico con más de 2 km de desarrollo, y el sistema Hundidero-Gato, que constituye la continuación subterránea del Río Gaduares a través de la Sierra de Líbar (Figura 5.2).

Las calizas y dolomías que afloran en la Sierra de Líbar son permeables por fracturación y karstificación, por lo que constituyen un importante acuífero. La principal recarga de este acuífero proviene de la infiltración directa del agua de lluvia sobre los afloramientos carbonáticos y del agua que se infiltra a través de los sumideros kársticos de los poljes. Además, existe una aportación de la escorrentía producida en las cuencas del Río Gaduares (44 km²) y del arroyo de los Álamos (30 km²), constituidas por materiales arcillosos del Flysch (Figura 5.1), que vierten sus aguas hacia formas superficiales de absorción (simas). El agua de escorrentía del Río Gaduares se acumula en el embalse de Montejaque, cuya cerrada se asienta sobre las calizas karstificadas del Grupo Torcal, lo que provoca pérdidas del agua almacenada y, por tanto, recarga artificial al acuífero.

Las descargas se producen en el borde oriental (Figura 5.3) condicionadas por el nivel de base actual que representa el Río Guadiaro, a través de los manantiales de Cueva del Gato (462 m s.n.m), Benaoján (450 m s.n.m) y Jimera de Líbar (410 m s.n.m.). En el área conocida como Angosturas del Guadiaro se encuentra el manantial del Charco del Moro (223 m s.n.m), cuya surgencia se produce en el propio cauce del Río Guadiaro. Tradicionalmente, el manantial se ha supuesto relacionado con la descarga de la Sierra de Líbar por la importancia de sus caudales y por el reducido afloramiento carbonático donde se encuentra.

El manantial de la Cueva del Gato (Figura 5.3) está situado en la cueva del mismo nombre, aproximadamente 15 metros por encima del cauce actual del Río Guadiaro. Constituye la salida natural del Río Gaduares, tras un recorrido subterráneo, de aproximadamente 3 km, que se inicia en la sima de Hundidero. La

construcción del embalse de Montejaque (presa de los Caballeros), aguas arriba de la sima de Hundidero, de total ineficacia al estar situada la cerrada sobre las propias calizas karstificadas, contribuye a la recarga del acuífero, sobre todo, durante periodos de lluvias importantes.

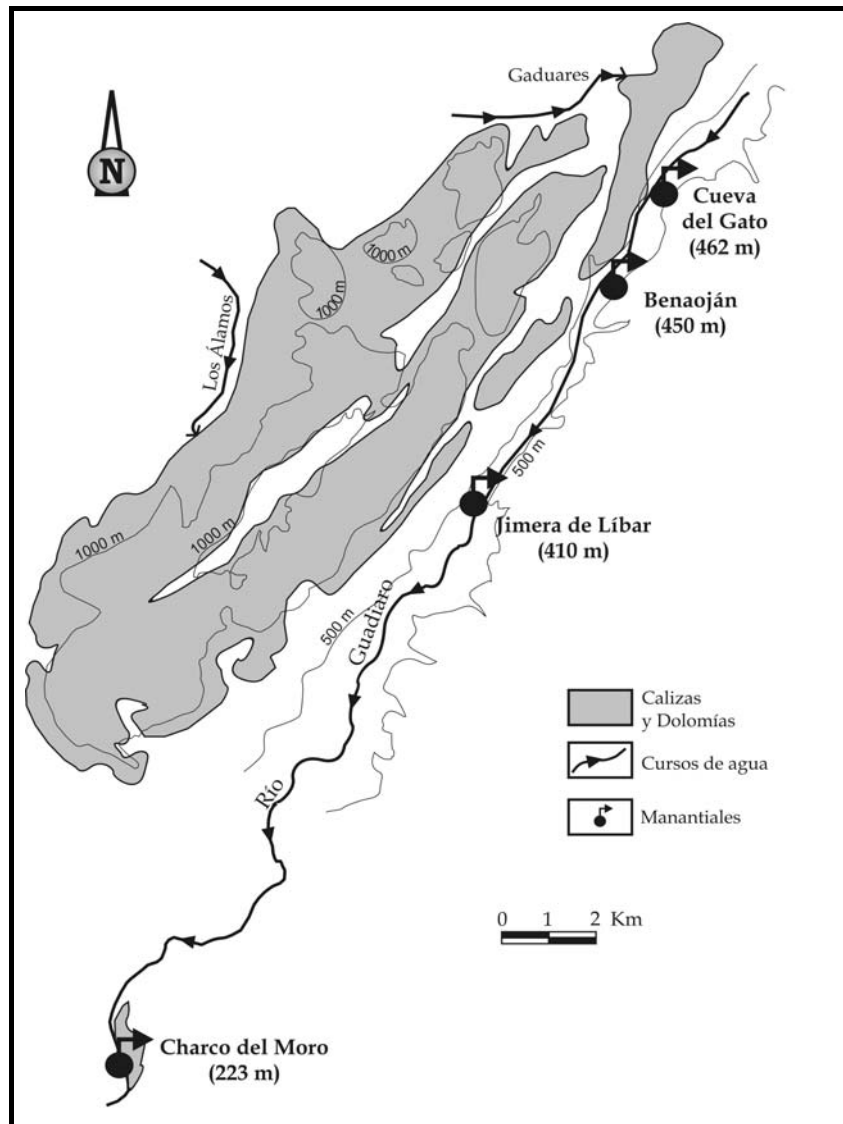


Figura 5.3. Esquema hidrogeológico de la Sierra de Líbar

A 2 km al suroeste de la Cueva del Gato, dentro del término municipal de Benaoján y muy cerca de la estación ferroviaria de esta población, está situado el manantial de Benaoján, también llamado de El Ejío o del Molino del Santo (Figura 5.3). Este manantial emerge en las calizas jurásicas, a favor de un contacto mecánico con las margas y margocalizas cretácicas.

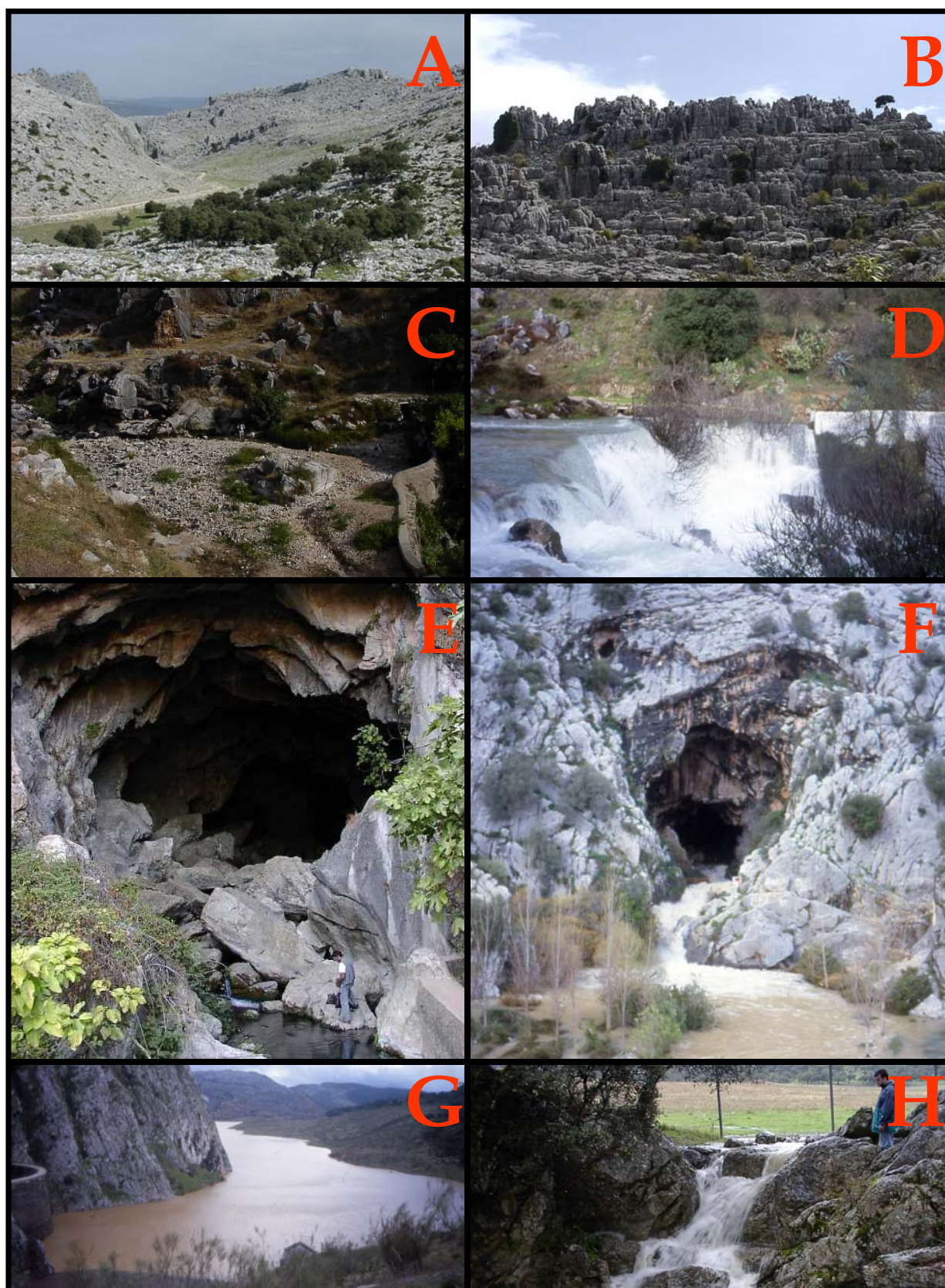


Lámina 5.1. A- Panorámica del sector nororiental de la Sierra de Lívar, B- Lapiaz ruiniforme, C- Manantial de Benaoján (aguas bajas), D- Manantial de Benaoján (aguas altas), E- Manantial de la Cueva del Gato (aguas bajas), F- Manantial de la Cueva del Gato (aguas altas), G- Presa de los Caballeros, H- Sumidero activo en el polje del Pozuelo

5.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

La caracterización de la respuesta hidrodinámica del sector nororiental de la Sierra de Lívar se ha llevado a cabo mediante el análisis de la serie de caudales medios diarios de los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato.

La serie considerada del manantial de Benaoján comprende desde Octubre de 1999 hasta Septiembre de 2003. Los valores de caudal medio diario se han obtenido a partir de la aplicación de la curva de gastos a los datos de altura de la lámina de agua media diaria en la estación de aforos. Estos datos han sido proporcionados por la antigua Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE). El caudal medio del manantial durante este periodo ha sido de 1484 L/s. La figura 5.4 muestra la evolución temporal de los caudales para la serie de datos estudiada.

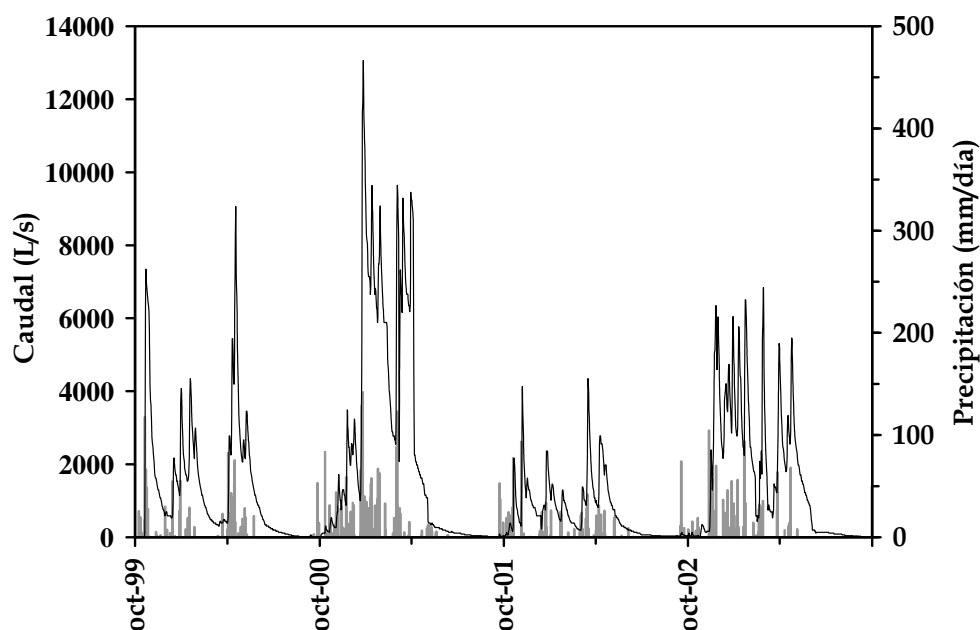


Figura 5.4. Hidrograma del manantial de Benaoján entre 1999 y 2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta.

El manantial de la Cueva del Gato, desde un punto de vista hidrodinámico, ha sido una de las surgencias mejor controladas y con registro histórico más largo, gracias a la labor de la CHSE. La serie de datos facilitada por este organismo comprende desde Octubre de 1945 hasta la actualidad, aunque presenta lagunas de información en diversos períodos. Por ello, en esta investigación se ha

analizado sólo el período comprendido entre Octubre de 1976 y Septiembre de 2003, el cual no presenta interrupciones en la serie de datos. Los valores proporcionados por la CHSE corresponden a datos de caudal medio diario en la estación de aforos. El caudal medio del manantial durante este periodo ha sido de 1461 L/s. En la figura 5.5 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos estudiada.

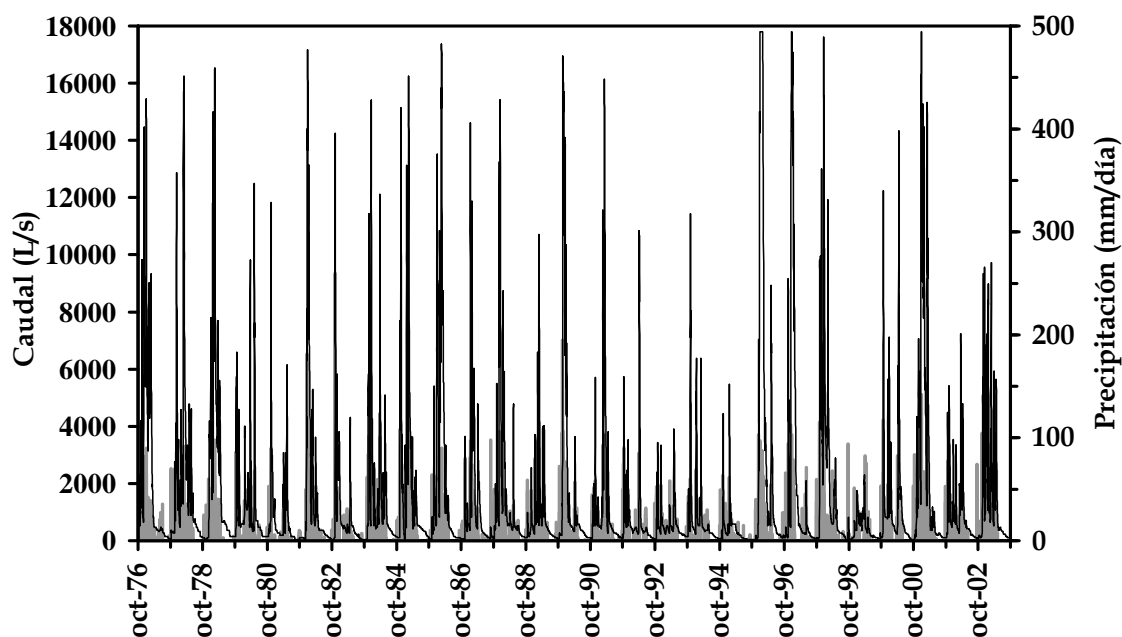


Figura 5.5. Hidrograma del manantial de la Cueva del Gato entre 1976 y 2003

Además de analizar la serie histórica de caudales del manantial de la Cueva del Gato, y dado que uno de los objetivos fundamentales de esta investigación es comparar las respuestas naturales de manantiales durante un mismo periodo de tiempo, también se ha llevado a cabo el análisis de series temporales (análisis correlatorio y espectral y aplicación de la transformada *wavelet*) para el período 1999/2000-2002/2003. El caudal medio del manantial durante este periodo ha sido de 1654 L/s.

5.2.1. Análisis de los hidrogramas

5.2.1.1. Manantial de Benaoján

Los hidrogramas anuales del manantial de Benaoján muestran varias crecidas, para cada año hidrológico, en respuesta a los diferentes eventos

pluviométricos (Figura 5.6). Las crecidas son rápidas y de forma puntiaguda y existen importantes diferencias de caudal entre el final del agotamiento y la punta de la crecida. Hay una clara relación entre los eventos pluviométricos y las crecidas en el manantial, de manera que estas últimas son proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones. Los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria).

Durante los años hidrológicos 1999/2000 y 2001/2002 los hidrogramas anuales se caracterizan por tiempos de base y de crecida del orden de 1 mes y 10 días, respectivamente (Figura 5.6). En estos años hidrológicos, las precipitaciones importantes, que dan lugar a las diferentes crecidas, se producen con una periodicidad aproximadamente bimensual, por lo que el manantial inicia el agotamiento después de cada episodio de precipitación. Sin embargo, los hidrogramas de los años hidrológicos 2002/2003 y, sobre todo, 2000/2001, muestran aumentos significativos y continuados de caudal (Figura 5.6). En estos hidrogramas es difícil diferenciar los tiempos de base y crecida, ya que el manantial se encuentra en condiciones de crecida prácticamente durante todo el tiempo.

En la tabla 5.1 se indican los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años hidrológicos del período de registro en el manantial de Benaoján. El valor obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 489.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	Precipitación
1999/2000	9060	9	1007	1304
2000/2001	13058	9	1451	2155
2001/2002	4329	31	140	1095
2002/2003	6819	18	379	1412
<i>media</i>	<i>8317</i>	<i>17</i>		<i>1492</i>

$$\frac{\overline{Q_{max}}}{\overline{Q_{min}}} = 489$$

Tabla 5.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Benaoján y valores de precipitación anual en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período entre 1999 y 2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).

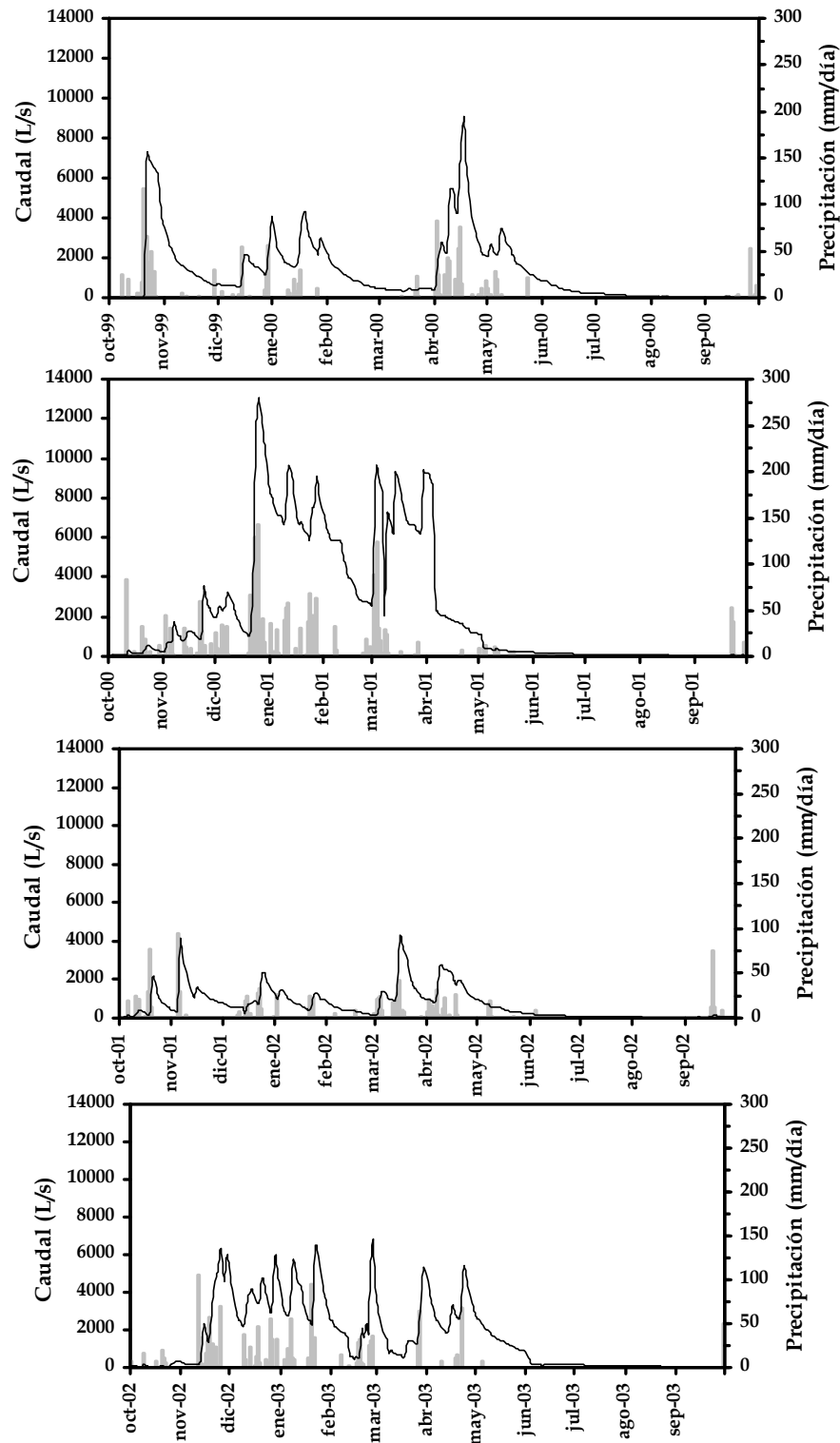


Figura 5.6. Hidrogramas anuales con caudales medios diarios del manantial de Benaoján para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Peleta.

5.2.1.2. Manantial de la Cueva del Gato

Los hidrogramas anuales del manantial de la Cueva del Gato muestran, al igual que los del manantial de Benaoján, varias crecidas por cada año hidrológico

(Figuras 5.7 y 5.8). Los aumentos de caudal se producen de forma rápida y las crecidas presentan una morfología puntiaguda. La forma y magnitud de las crecidas depende de la cantidad de agua de lluvia y de la intensidad con la que se producen los diferentes eventos pluviométricos.

Los hidrogramas del manantial de la Cueva del Gato se han separado en dos figuras. Por un lado, se han representado en la figura 5.7 los hidrogramas anuales del periodo 1999-2003, el cual corresponde al intervalo temporal de esta investigación. En la figura 5.8 se muestran el resto de hidrogramas anuales para el periodo 1976-1999. Ambas figuras (Figuras 5.7 y 5.8) muestran que durante todos los años hidrológicos se producen, como mínimo, dos grandes episodios de crecidas (invierno y primavera). La distribución temporal de los eventos pluviométricos importantes, que dan lugar a las diferentes crecidas, es la que controla que el hidrograma del manantial de la Cueva del Gato pueda registrar caudales de agotamiento. Así, para el año 1999/2000, el manantial alcanzó las condiciones de agotamiento tres veces, mientras que en los años 2000/2001 y 2002/2003, con valores similares de precipitación total anual, tan sólo se alcanzan una vez. Estas características, parecidas a las descritas para el manantial de Benaoján, ponen de manifiesto la escasa capacidad de filtro del sector drenado por el manantial de la Cueva del Gato.

En general, el tiempo de base de las crecidas que se producen en el manantial de la Cueva del Gato es inferior a un mes, mientras que los tiempos de crecida se aproximan a los 10 días. Los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante. Durante el tiempo de la serie analizada (27 años hidrológicos) el manantial de la Cueva del Gato no se secó. El caudal mínimo fue de 20 L/s.

En la tabla 5.2 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 se obtiene la relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$) correspondiente al periodo analizado. Este parámetro se utilizará para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los

diferentes sistemas considerados en la presente investigación. El valor de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ para todo el periodo histórico es de 229, mientras que para el periodo 1999/2000-2002/2003 presenta un valor de 154.

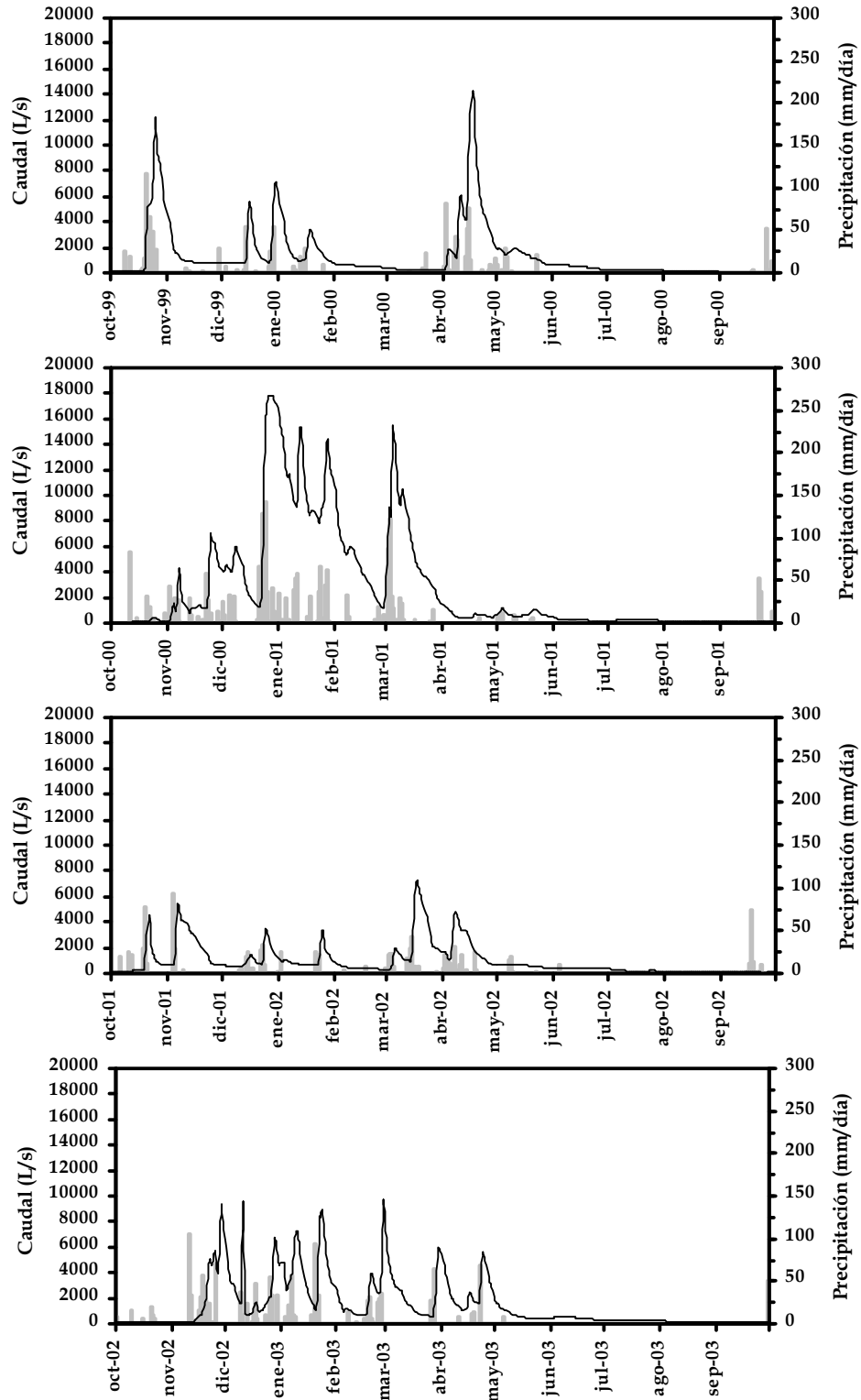


Figura 5.7. Hidrogramas anuales con caudales medios diarios del manantial de la Cueva del Gato para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta.

	Q_{\max}	Q_{\min}	Q_{\max}/Q_{\min}	Precipitación
1976/1977	15412	71	217	1725
1977/1978	16244	71	229	1599
1978/1979	16524	41	403	1829
1979/1980	12465	144	87	1096
1980/1981	6136	41	150	760
1981/1982	17088	41	417	1192
1982/1983	14052	41	343	991
1983/1984	15412	41	376	1452
1984/1985	16244	106	153	1912
1985/1986	17372	41	424	1459
1986/1987	14592	41	356	1270
1987/1988	15412	71	217	1513
1988/1989	10849	71	153	1097
1989/1990	16947	71	239	1813
1990/1991	16105	41	393	1335
1991/1992	10805	71	152	980
1992/1993	3900	41	95	799
1993/1994	11436	71	161	909
1994/1995	5395	41	132	563
1995/1996	17800	16	1113	2104
1996/1997	17800	71	251	2168
1997/1998	17514	16	1095	1647
1998/1999	2052	41	50	877
1999/2000	14321	41	349	1304
2000/2001	17800	106	168	2155
2001/2002	7236	41	176	1095
2002/2003	9573	106	90	1412
media	12606	55		1361

$$\frac{\overline{Q}_{\max}}{\overline{Q}_{\min}} = 229$$

Tabla 5.2. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de la Cueva del Gato y valores de precipitación anual en la Cueva de la Pileta para el periodo 1976-2003 (datos en L/s y mm).

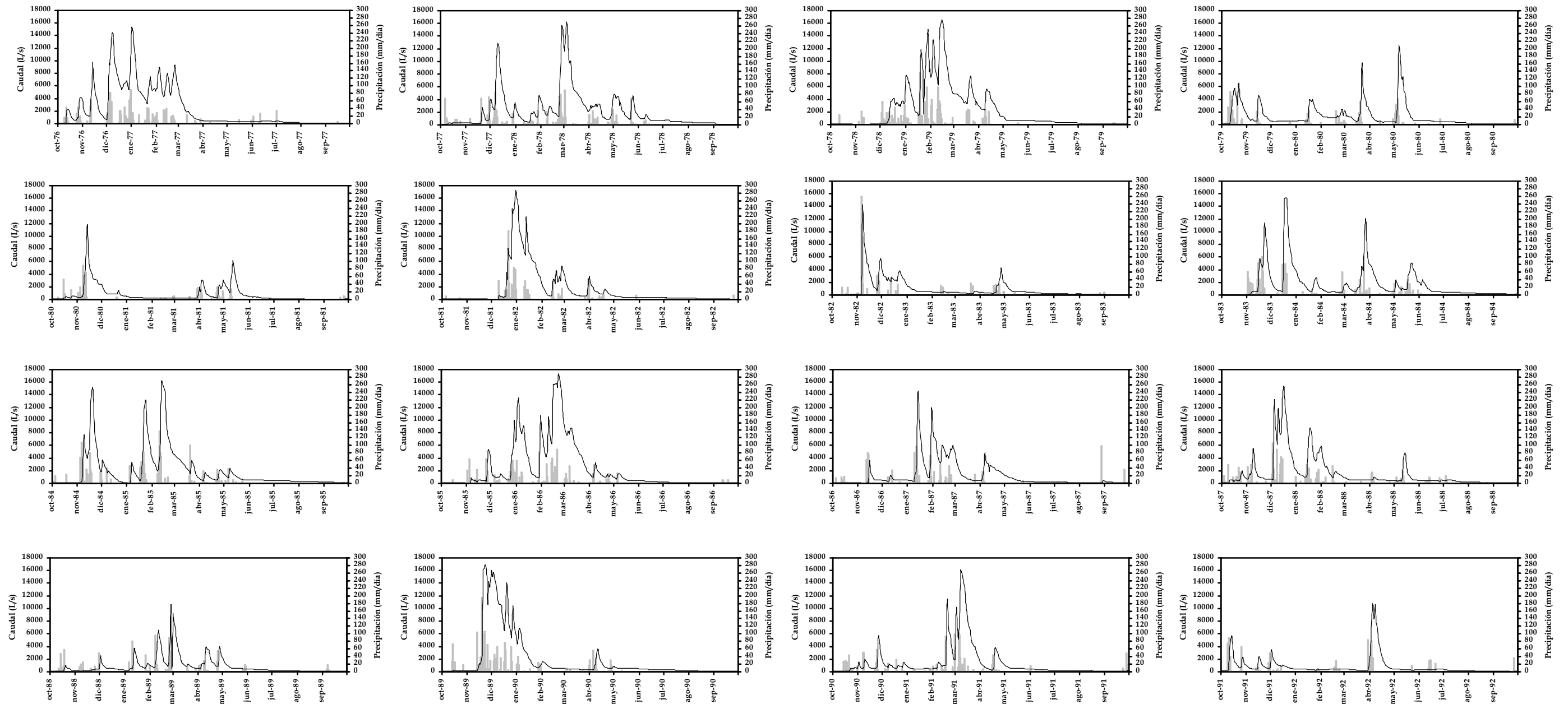


Figura 5.8. Hidrogramas anuales, con datos diarios, del manantial de la Cueva del Gato para el periodo 1976-1999. Precipitaciones registradas en la estación de la Cueva de la Pileta

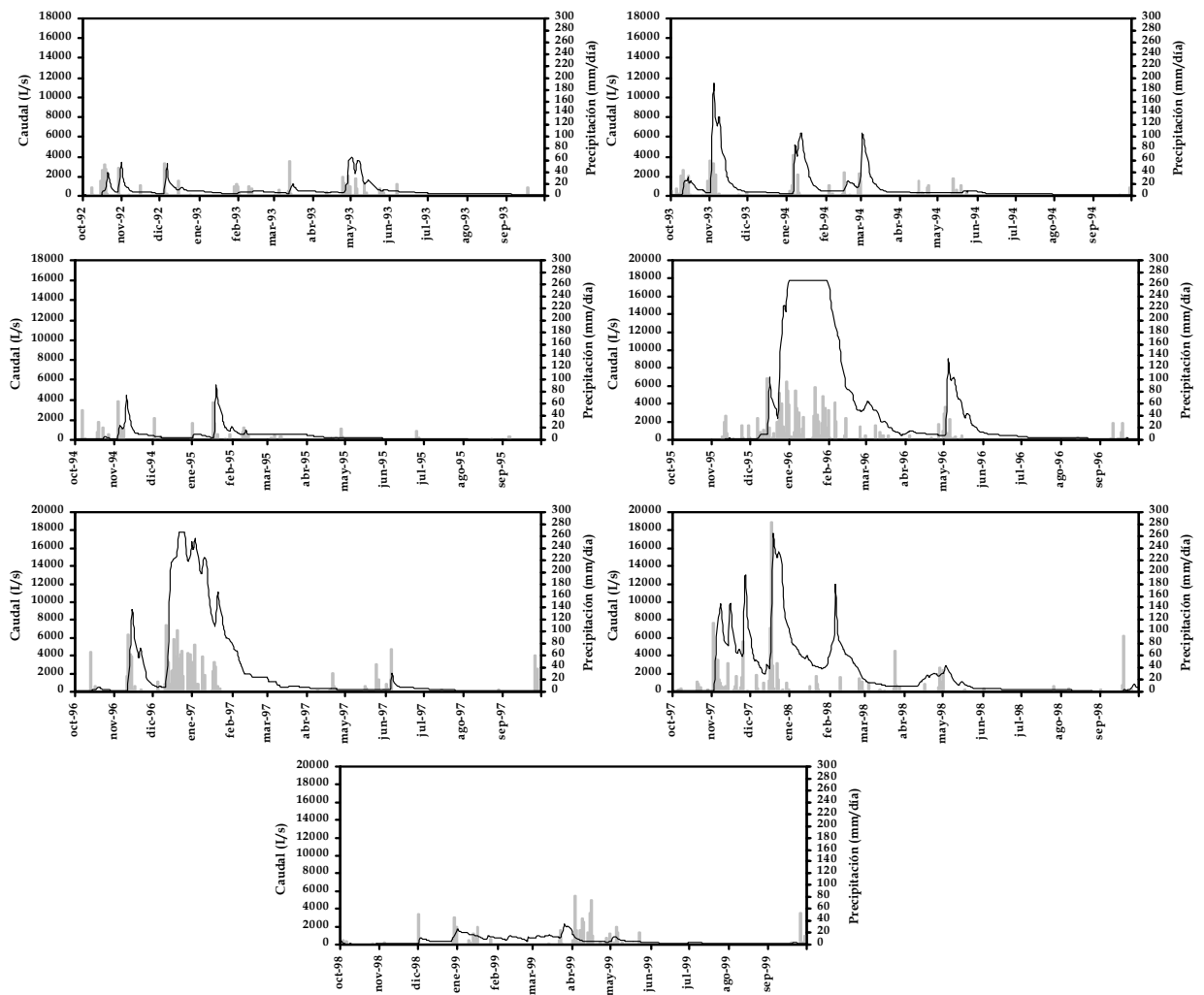


Figura 5.8. (continuación).

Por tanto, a partir del análisis de la forma de los hidrogramas del manantial de la Cueva del Gato se puede extraer, como hipótesis preliminar, que el funcionamiento hidrodinámico del sector nororiental de la Sierra de Líbar es característico de un acuífero de tipo kárstico, con rápidas respuestas antes las precipitaciones y proporcionales a la magnitud de las mismas

5.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

5.2.2.1. Manantial de Benaoján

Se han analizado las 4 curvas de recesión más importantes del manantial de Benaoján, correspondiente al periodo 1999-2003. En la figura 5.9 se muestran las curvas seleccionadas y en la tabla 5.3 se recogen los datos relativos a las mismas y los resultados obtenidos de su análisis. Conviene precisar que, en todos los casos, se ha trabajado con hidrogramas unitarios, es decir, no se han tenido en cuenta hidrogramas en los que se han producido crecidas (aunque sean de pequeña cuantía) durante la decrecida o el agotamiento.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999-2000	36	0,02778	0,14444	0,73	90	4,06E-02	3,18	0,07
2000-2001	35	0,02857	0,10952	0,77	141	2,67E-02	3,21	0,07
2001-2002	42	0,02381	0,07738	0,82	117	2,42E-02	3,02	0,06
2002-2003	41	0,02439	0,11789	0,77	119	2,01E-02	1,93	0,04
Media	39	0,02614	0,11231	0,78	117	2,79E-02	2,84	0,06

Tabla 5.3. Resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión del manantial de Benaoján (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración, ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.

La duración de la decrecida (D_d) varía poco en las diferentes curvas de recesión analizadas y presenta un valor medio de 39 días. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre 0'0286 días⁻¹ (año 2000/2001) y 0'0238 días⁻¹ (2001/2002). Todos estos valores indican que la velocidad de infiltración es muy rápida, probablemente debido a un importante grado de karstificación funcional de la zona no saturada del acuífero.

El coeficiente de heterogeneidad (ε) varía entre 0'077 (2001/2002) y 0'1444 días⁻¹ (1999/2000). Estos valores dan lugar a una cierta concavidad de la curva de la función y (Figura 5.9), indicativa de que la disminución del caudal en el

manantial de Benaoján se produce de manera relativamente rápida durante la decrecida.

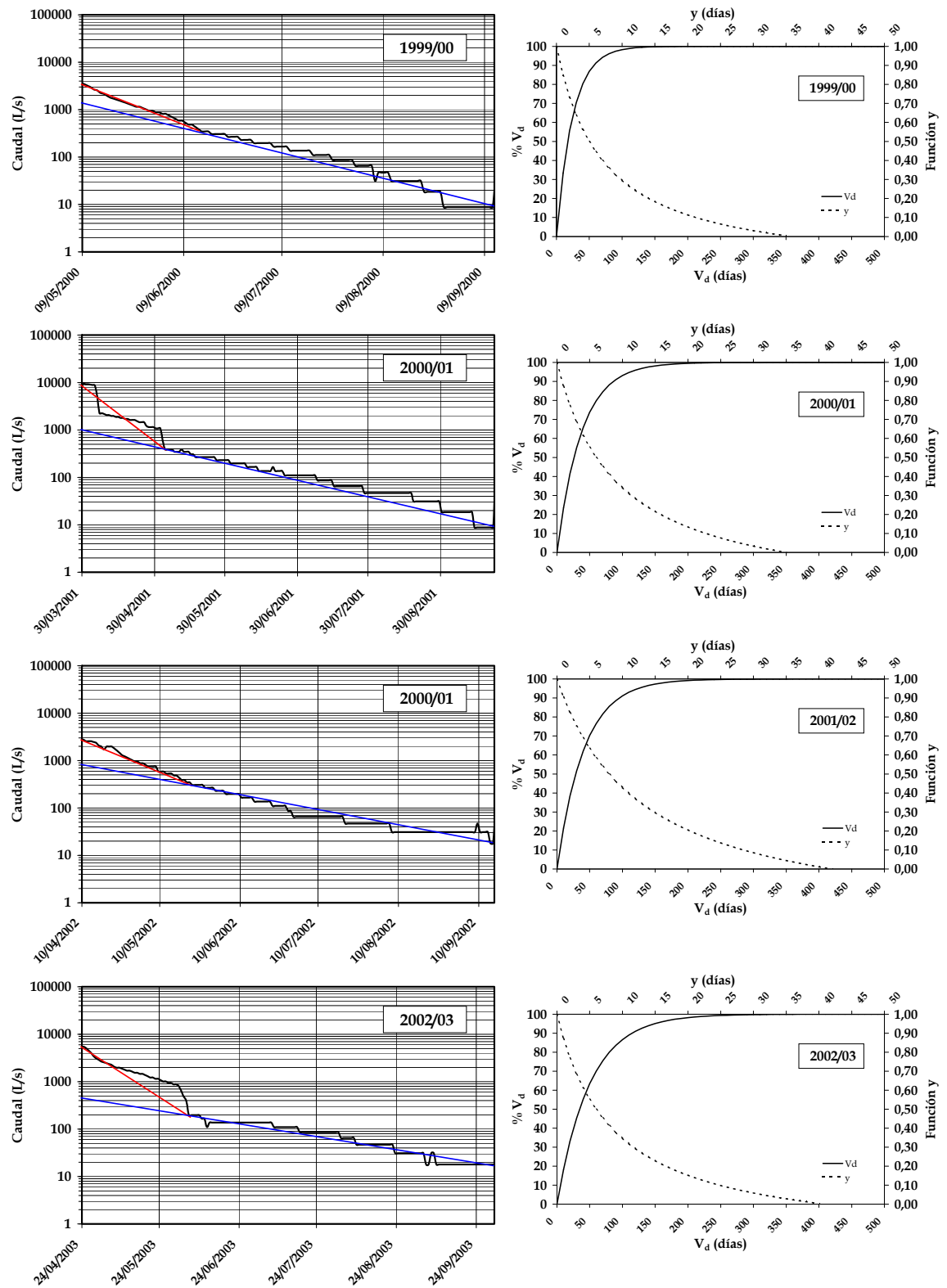


Figura 5.9. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Benaoján para el período 1999-2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t=2$ días y del porcentaje del

volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

Los valores del parámetro i para cada una de las curvas analizadas son superiores a 0'70. Según Mangin (1975) se trataría de un sistema complejo y de grandes dimensiones.

El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores del orden de 10^{-2} días⁻¹, muy similares a los obtenidos por Carrasco *et al.* (2001), lo cual pone de manifiesto que el agotamiento se produce de manera relativamente rápida. Los volúmenes dinámicos calculados para los agotamientos estudiados varían entre 1,93 hm³ (2002/2003) y 3,21 hm³ (2000/2001); el valor medio es de 2,84 hm³. La representación del porcentaje del volumen dinámico (V_d) en función del tiempo (Figura 5.9), permite estimar que al cabo de 50 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se habría drenado más del 60% de dicho volumen. Estos valores son indicativos de la escasa capacidad de filtro del sistema. El volumen de tránsito anual (V_t) drenado por el manantial es de 46'8 hm³. De este modo, el valor del parámetro k (V_d/V_t) presenta valores inferiores a 0'10, según Mangin (1975), característicos de un sistema de tipo kárstico.

5.2.2.2. Manantial de la Cueva del Gato

A partir de la serie histórica de datos de caudal del manantial de la Cueva del Gato se ha llevado a cabo el estudio de 7 curvas de recesión, siguiendo la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975). La tabla 5.4 recoge los resultados más importantes del análisis de los hidrogramas unitarios que se muestran en la figura 5.10.

La duración media de la decrecida es aproximadamente de 20 días (D_d) y varía poco de unos años hidrológicos a otros, excepto en el caso del año 1976/1977 que presenta una duración de 32 días. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre 0'0313 días⁻¹ (año 1976/1977) y 0'0769 días⁻¹ (1980/1981), con un valor medio de 0'054 días⁻¹. Todos estos datos son indicativos de que la velocidad de infiltración es bastante rápida, debido al alto

grado de karstificación funcional y a la elevada jerarquización de los conductos kársticos, probablemente a nivel de la zona no saturada.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	V_d (hm ³)	k
1976/1977	32	0,03125	0,10417	0,78	193	1,04E-02	6,14	0,13
1979/1980	18	0,05556	0,05556	0,80	143	1,11E-02	6,69	0,14
1980/1981	13	0,07692	0,04615	0,77	126	2,26E-02	3,61	0,07
1989/1990	15	0,06667	0,11667	0,70	105	1,96E-02	4,90	0,10
1991/1992	18	0,05556	0,13889	0,70	154	1,66E-02	3,72	0,08
2001/2002	24	0,04167	0,05952	0,82	147	1,81E-02	4,32	0,09
2002/2003	20	0,05000	0,10000	0,75	140	1,07E-02	4,75	0,10
Media	20	0,05395	0,08871	0,76	144	1,56E-02	4,87	0,10

Tabla 5.4. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de la Cueva del Gato (periodo 1976-2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración, ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.

Por su parte, el coeficiente de heterogeneidad (ε) varía entre 0'0462 (1980/1981) y 0'1389 días⁻¹ (1991/1992). Así, para estos valores de ε, la concavidad de las diferentes curvas correspondientes a la función *y* es relativamente marcada, algo más que en el caso del manantial de Benaoján (Figura 5.10), lo que demuestra que la disminución de caudal en la surgencia de la Cueva del Gato durante la decrecida se realiza de manera más rápida que en el manantial de Benaoján

El valor del parámetro *i* para cada una de las curvas analizadas es igual o superior a 0'70, lo cual, según Mangin (1975), es indicativo de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Este resultado está de acuerdo con la realidad, ya que el sector de acuífero drenado por las surgencias de la Cueva del Gato y Benaoján presenta una extensión superior a 60 km².

La duración del agotamiento (D_a) para cada una de las curvas estudiadas, varía entre 105 (1989/90) y 193 días (1976/77). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores del orden de 1 a 2x10⁻² días⁻¹. Todos estos resultados indican que el agotamiento se produce de forma rápida, como corresponde a un acuífero de tipo kárstico.

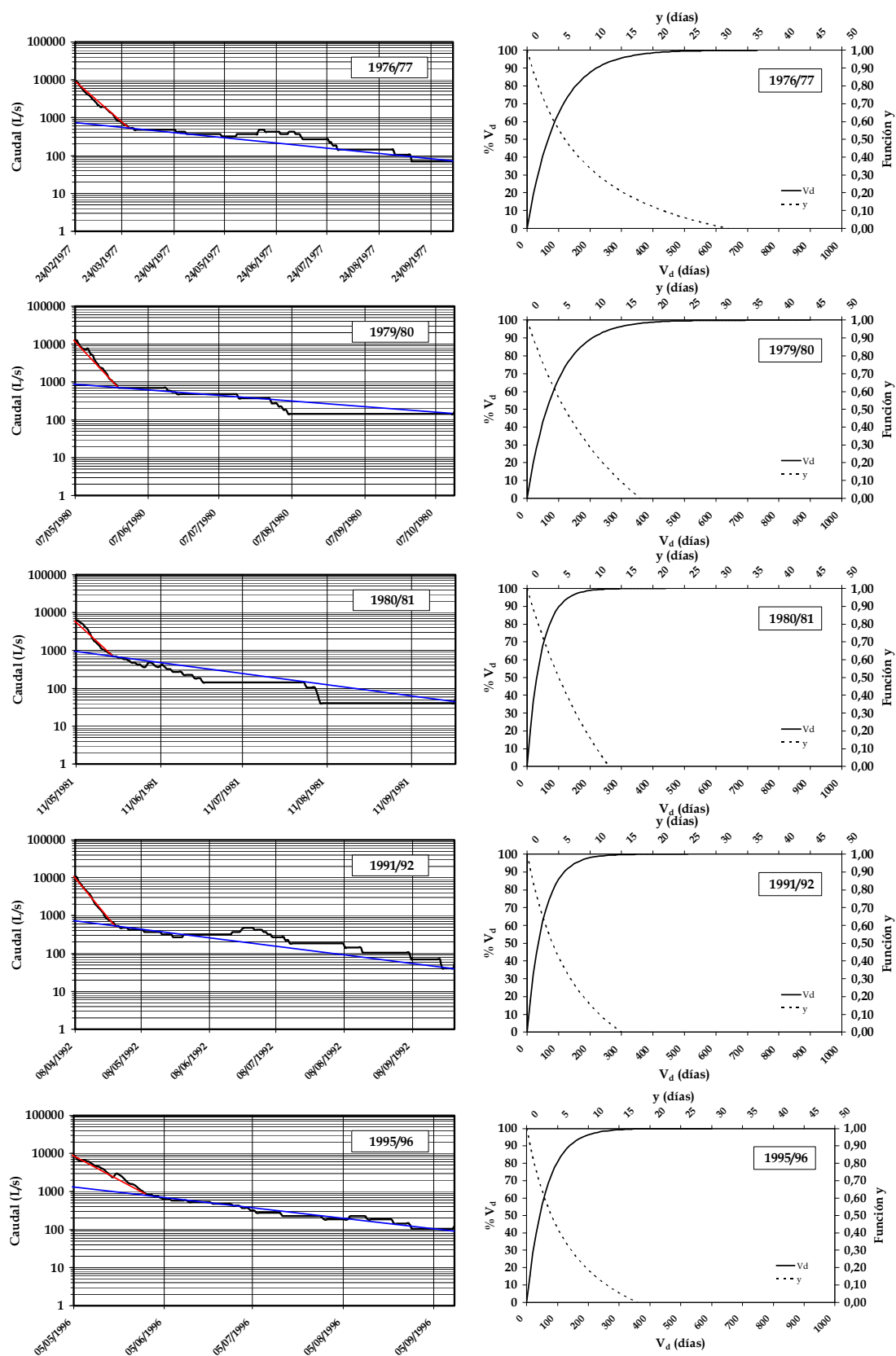


Figura 5.10. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de la Cueva del Gato para algunos años del período comprendido entre 1976 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicho manantial si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

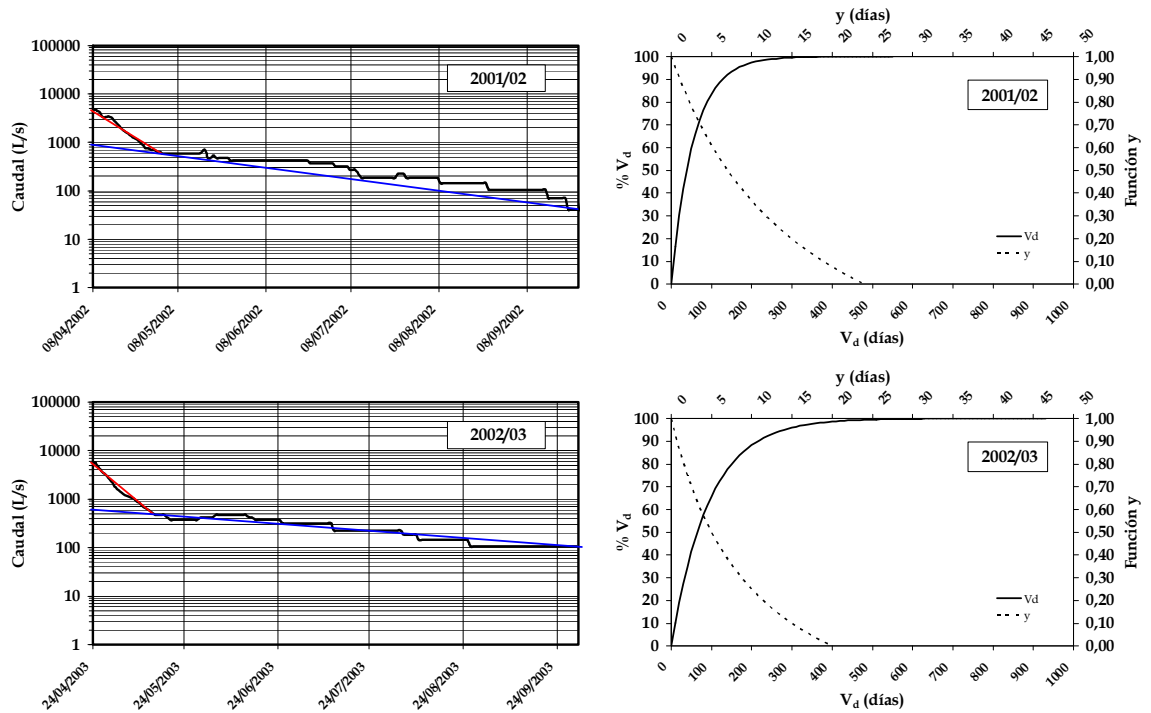


Figura 5.10. (continuación)

Los volúmenes dinámicos (V_d) calculados para los agotamientos estudiados varían entre $3,61 \text{ hm}^3$ (1980/81) y $6,69 \text{ hm}^3$ (1979/80); el valor medio es de $4,87 \text{ hm}^3$.

Al representar el porcentaje del volumen dinámico drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Figura 5.10), se observa que después de 100 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), normalmente, se drenaría más del 60% de dicho volumen. El volumen de tránsito anual, calculado a partir de la serie de caudales diarios, es de $48,3 \text{ hm}^3$. Por último, el valor del parámetro k presenta valores inferiores a 0,15. Estos resultados ponen de manifiesto que el sector de acuífero drenado por el manantial de la Cueva del Gato presenta un elevado grado de karstificación y un escaso poder regulador.

La representación de los parámetros k e i de los dos manantiales de la Sierra de Líbar en el gráfico de Mangin (1975) muestra que ambos se encuentran dentro del dominio IV (Figura 5.11), característico de los sistemas kársticos con una compleja organización de drenaje, lo cual está en consonancia con los datos geológicos e hidrogeológicos disponibles.

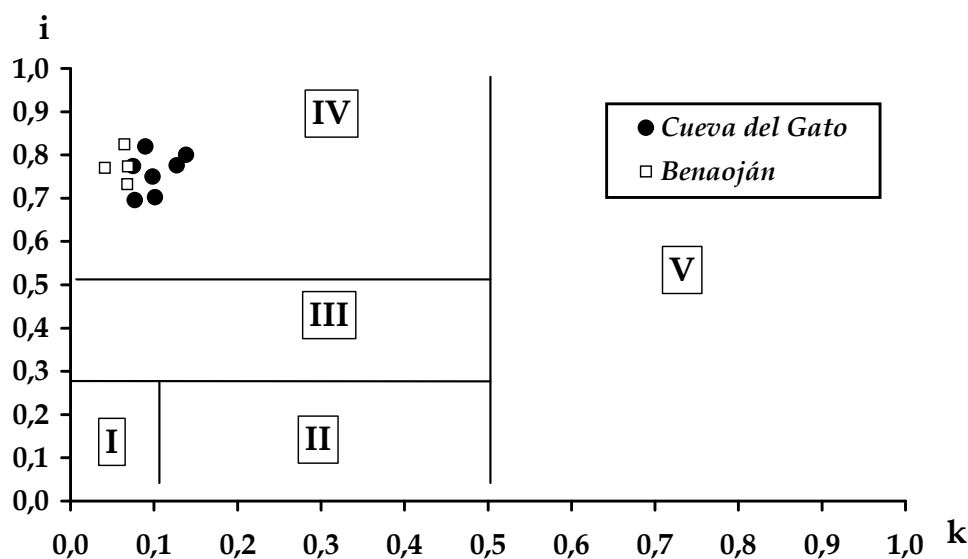


Figura 5.11. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato.

5.2.3. Análisis correlatorio y espectral

5.2.3.1. Análisis con los datos diarios correspondientes al periodo 1999-2003 en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral realizado con la serie de datos registrados entre 01/10/1999 y 30/09/2003. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta y la de salida a los caudales medios diarios en la estaciones de aforos de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato. Dada la periodicidad de los datos empleados, no pueden deducirse fenómenos de periodicidad inferior a 2 días. El tratamiento se realiza de dos maneras: 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).

5.2.3.1.1. Análisis simple

Los correlogramas simples de los caudales de las surgencias de Benaoján y Cueva del Gato son relativamente poco tendidos (Figura 5.12A). El efecto memoria

obtenido para ambos manantiales es de 79 y 70 días, respectivamente. Si se comparan estos resultados con los obtenidos en otros acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (Padilla, 1990; López-Chicano, 1992; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2001a y 2002b; Liñán, 2003) se deduce que los valores obtenidos para ambos manantiales son propios de acuíferos relativamente inerciales, el manantial de Benaoján parece algo más inercial que el de la Cueva del Gato.

En el espectro simple de caudales de las dos surgencias (Figura 5.12B) aparecen picos que coinciden con los observados en el espectro simple de lluvia (8, 17 y 36 días), más acentuados para el manantial de la Cueva del Gato, lo cual refleja que el sector del acuífero drenado por esta surgencia filtra menos la señal de entrada. El espectro de densidad de varianza permite calcular, además, la duración de la influencia de los eventos de lluvia en el sistema a partir del parámetro denominado tiempo de regulación. Al igual que el efecto memoria, el tiempo de regulación muestra un valor más alto para el manantial de Benaoján (57 días) que para la surgencia de la Cueva del Gato (46 días), aunque ambos resultados indican una capacidad de regulación relativamente escasa del sector nororiental de la Sierra de Lívar. La frecuencia de corte presenta un valor de 0,08 para ambas surgencias (Figura 5.12B), lo que permite estimar que la influencia de la lluvia es filtrada al cabo de 13 días aproximadamente.

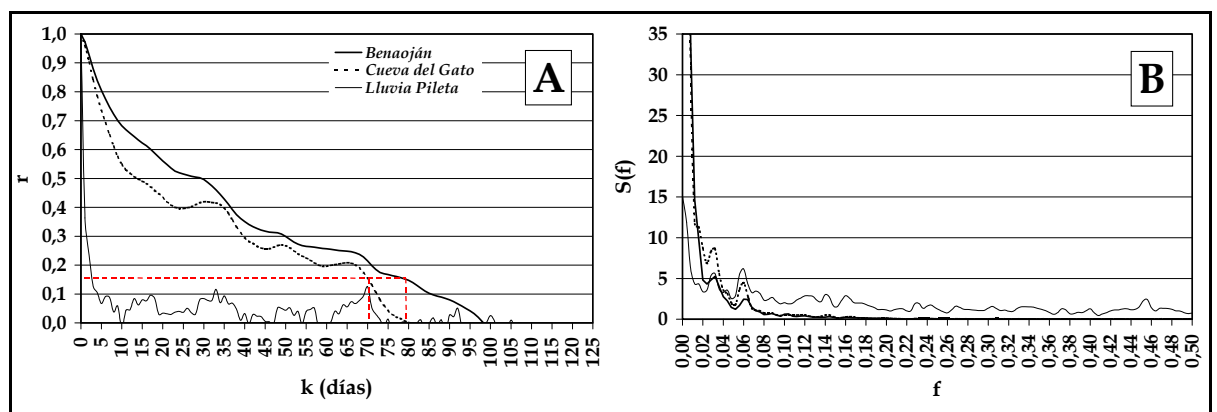


Figura 5.12. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de la precipitación registrada en la estación de la Cueva de la Pileta entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f , f frecuencia).

El análisis a largo término ha permitido obtener correlogramas que denotan la existencia de ciclos anuales (Figura 5.13A). El espectro, para el análisis de larga duración (Figura 5.13B), muestra que la periodicidad anual es algo más marcada en el manantial de Benaoján que en el de la Cueva del Gato. Esta periodicidad anual se produce en respuesta a la que se observa en las precipitaciones.

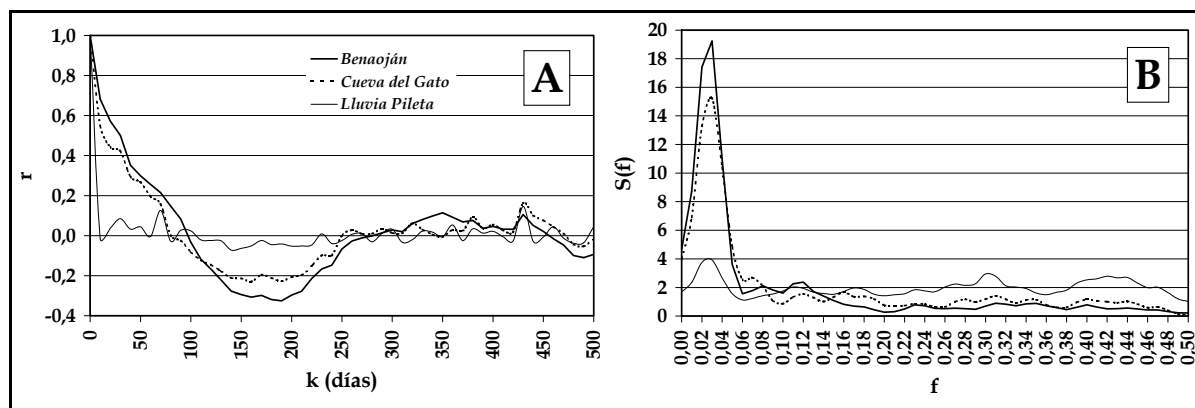


Figura 5.13. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

5.2.3.1.2. Análisis cruzado

El análisis simple para el período 1999-2003 se ha completado con un análisis cruzado de los datos de caudal de los dos manantiales (Benaoján, Cueva del Gato) y los datos de precipitación medidos en la estación de la Cueva de la Pileta. Los correlogramas cruzados obtenidos en las dos surgencias son relativamente puntiagudos (Figura 5.14A), con valores máximos del coeficiente de correlación de 0,505 en la Cueva del Gato y 0,439 en Benaoján, para un valor de k de 2 días. Tras el pico de correlación máxima, se observa en ambos correlogramas un descenso rápido de los valores de correlación. Esta respuesta sugiere una transmisión rápida de la señal de entrada (precipitaciones) y, por tanto, atribuible a un desarrollo de la karstificación importante que da lugar a una escasa amortiguación de las precipitaciones por parte del sistema. Se deduce así que se trata de un acuífero poco inercial, como ya se ha puesto de manifiesto anteriormente con los resultados del análisis de la curva de recesión.

A partir del valor de $k=15$ días, se observa un cambio en la forma de los correlogramas cruzados (Figura 5.14A); las funciones muestran un decrecimiento más lento, con una forma más achatada. Este tipo de respuesta impulsional correspondería a al drenaje de zonas menos karstificadas dentro del sistema.

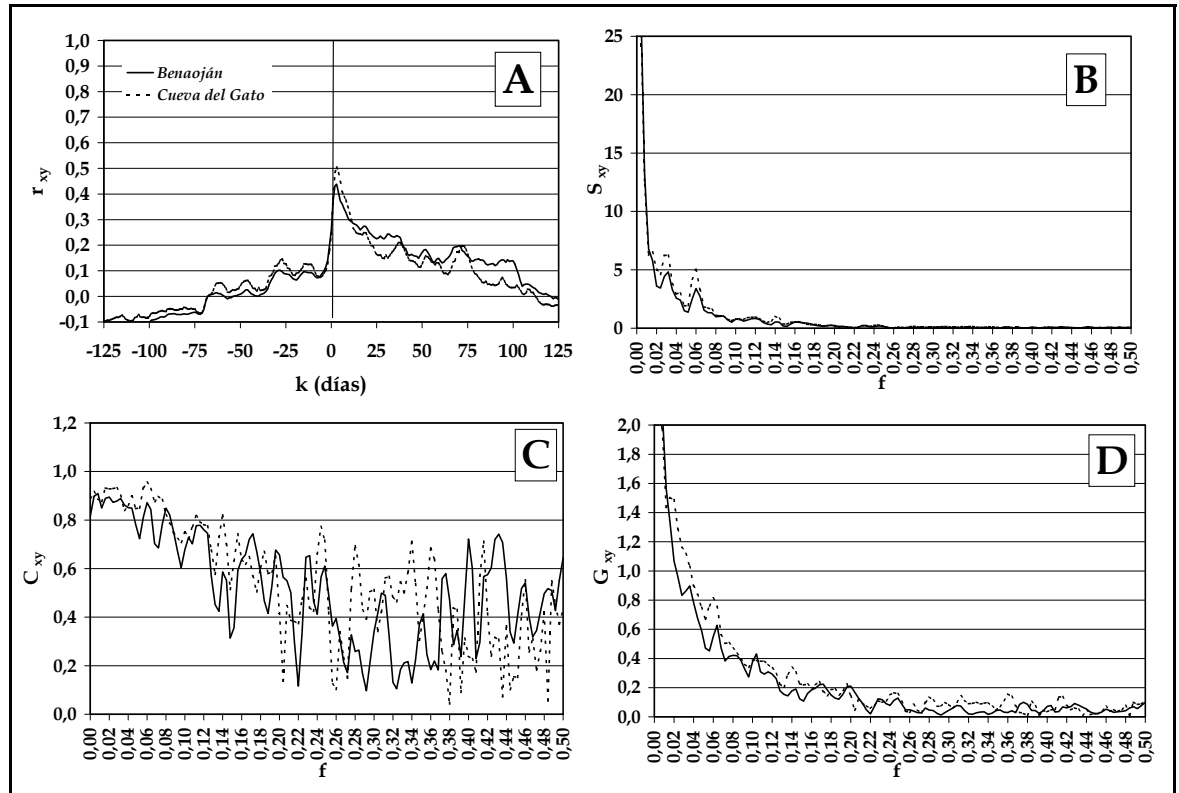


Figura 5.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

De acuerdo con los resultados obtenidos anteriormente por Benavente y Mangin (1984) para el manantial de la Cueva del Gato, la forma de los correlogramas cruzados de ambas surgencias puede interpretarse como la superposición de dos tipos de flujo dentro del sector de acuífero drenado por ambas. Esta interpretación, al menos en el caso del manantial de la Cueva del Gato, está relacionada, según Benavente y Mangin (1984), con la infiltración rápida que se produce del agua embalsada en el embalse de Montejaque. El drenaje de la red kárstica menos desarrollada se produciría a partir de $k=15$ días. No obstante, el hecho de que se registre el mismo resultado para el manantial de Benaoján, e

independientemente de que exista conexión entre el embalse de Montejaque (Hundidero) y el manantial de Benaoján, permite plantear otras posibles interpretaciones. El drenaje rápido también se podría relacionar con la infiltración concentrada del agua de lluvia a través de los sumideros kársticos de los poljes, o incluso, como Liñán (2003) puso de manifiesto en el sistema de las Nieves, podría corresponder al drenaje de sectores internos del acuífero con conductos kársticos bien desarrollados. Estas interpretaciones estarían más en consonancia con el resto de resultados del análisis correlatorio y espectral simple, ya que se detectan los mismos picos en los caudales que en las lluvias. Además, conviene tener presente que la infiltración desde el embalse de Montejaque solo se produce cuando hay aportaciones continuas por importantes lluvias sobre la cuenca del Río Gaduares.

Los correlogramas cruzados y funciones de amplitud cruzada de larga duración muestran, nuevamente, la periodicidad anual (Figuras 5.15A y 5.15B).

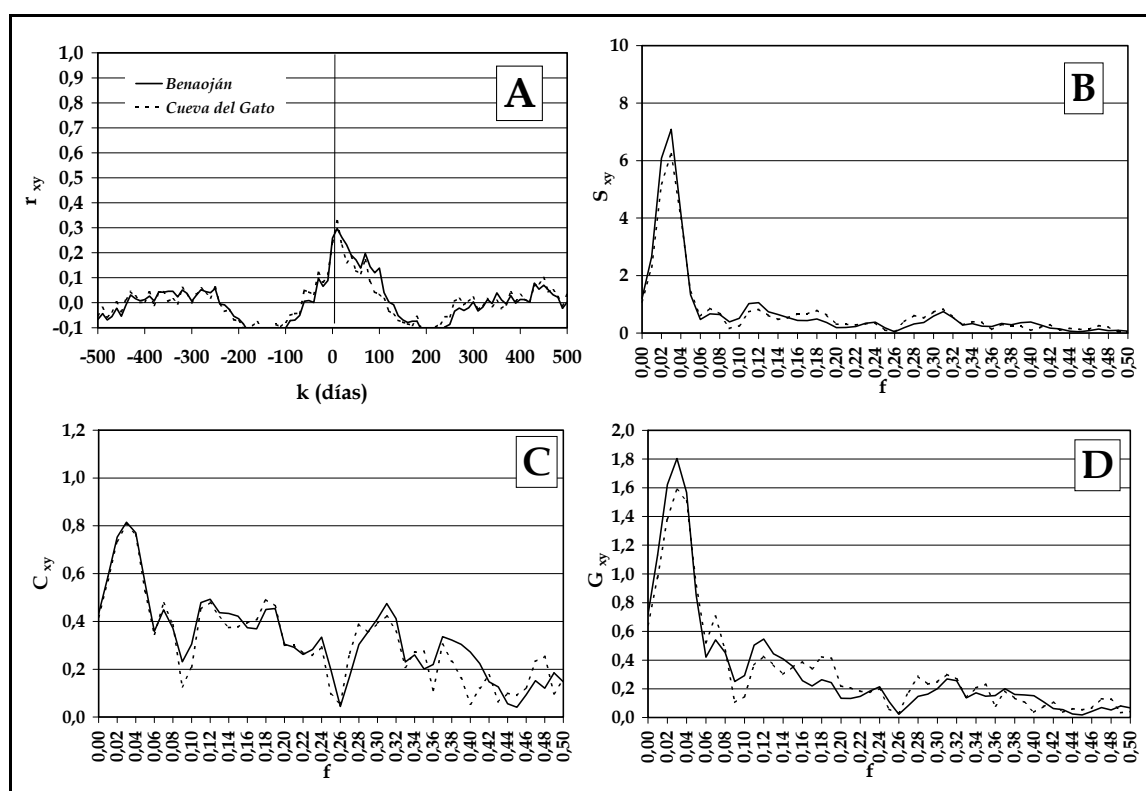


Figura 5.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

En las funciones de amplitud cruzada (Figura 5.14B) se observan los mismos picos que se observaban en el espectro simple de lluvia (8, 17 y 36 días), lo que pone de manifiesto una capacidad de filtro escasa y, por lo tanto, corrobora la hipótesis de una respuesta rápida asociada a una red kárstica relativamente desarrollada. Además, las funciones de fase permiten conocer que el desfase para los sucesos periódicos observados en el análisis a corto plazo es de 5, 3 y 2 días en el manantial de Benaoján y de 8, 4 y 2 días en la surgencia de la Cueva del Gato.

En la figura 5.14C se muestra que la coherencia es relativamente baja para ambos manantiales, tan sólo es algo lineal para los valores de 17 y 36 días, además de para los sucesos de periodicidad anual (Figura 5.15C).

Por último, las funciones de ganancia correspondientes al análisis a corto y largo término indican que únicamente se produce amplificación de la señal de entrada para las componentes de 17 y 36 días (Figura 5.14D) y anual (Fig. 5.15D).

5.2.3.2. Análisis de la serie histórica del manantial de la Cueva del Gato (1976-2003)

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral llevado a cabo con la serie de caudales medios diarios registrados en la estación de aforos del manantial de la Cueva del Gato entre el 01/10/1976 y el 30/09/2003. Al igual que para el análisis del periodo 1999-2003, la señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta. Análogamente, dada la periodicidad de los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. El tratamiento se ha realizado de dos modos: a corto término (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y a largo término (ventana de observación de 1250 días y paso de 10 días).

5.2.3.2.1. Análisis simple

El correlograma obtenido para el análisis de corta duración (Figura 5.16A) decrece de manera relativamente rápida. El efecto memoria que se obtiene es de 45 días, valor muy inferior al obtenido para el análisis del periodo 1999-2003. Tanto la forma del correlograma como el valor del efecto memoria ponen de manifiesto que se trata de un sistema poco inercial, en comparación con los resultados de otros acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (Padilla, 1990; López Chicano, 1992; Andreo, 1997; Liñán, 2003). El correlograma de larga duración de la serie de caudales (Figura 5.17A) muestra la existencia de periodicidades anuales, que también se detectan para los datos de precipitación.

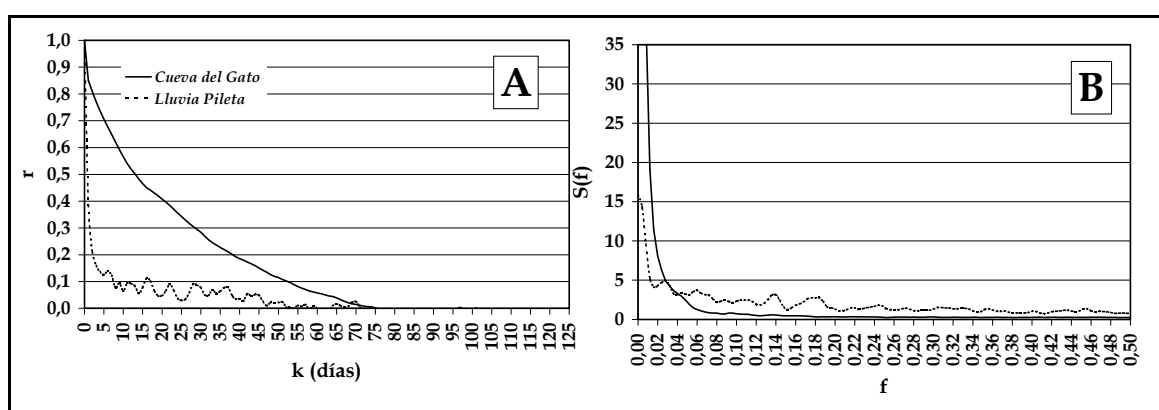


Figura 5.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de la precipitación registrada en la estación de la Cueva de la Pileta para el período 1976-2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

En el dominio frecuencial (Figura 5.16B) se observa una banda espectral ancha (0'06), lo que significa que la información de la lluvia es filtrada al cabo de 17 días. Por otra parte, a diferencia del análisis para el período 1999-2003, no se distinguen componentes que sí se observan en la señal de entrada (36, 8 y 5 días). El tiempo de regulación obtenido para el análisis a corto término es de 36 días, también más bajo que el calculado para los últimos años de la serie de datos.

Con respecto al análisis de larga duración, el espectro muestra la presencia de una marcada periodicidad anual y otras de 6, 4 y 3 meses menos patentes (Figura 5.17B), pero coherentes con las observadas en el espectro simple de las precipitaciones.

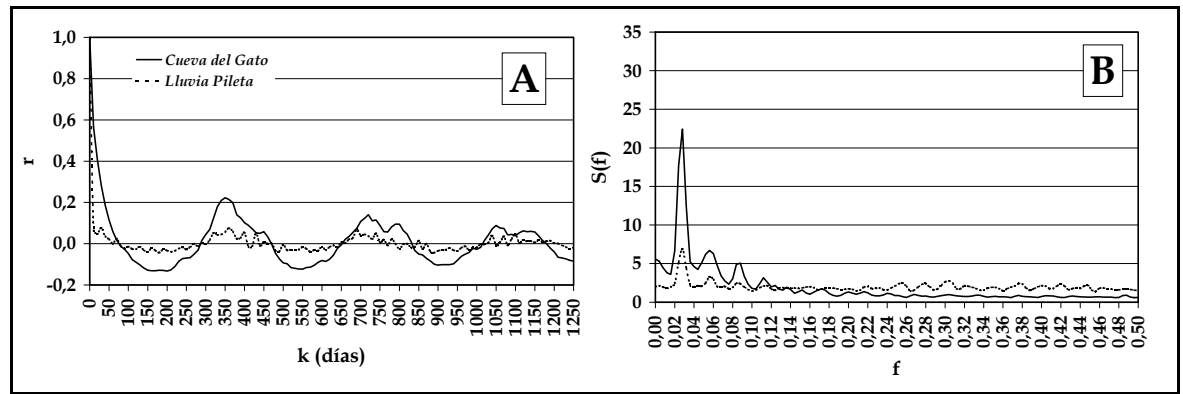


Figura 5.17. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales del manantial de la Cueva del Gato y de la precipitación en la estación de la Cueva de la Pileta para el período 1976-2003, con una ventana de 1250 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

5.2.3.2.2. Análisis cruzado

El correlograma cruzado obtenido para este manantial (Figura 5.18A), al igual que para el análisis del período 1999-2003, presenta una forma puntiaguada, con valores máximos del coeficiente de correlación de 0,475 para un valor de k de 2 días. También se observa que los valores de correlación disminuyen más lentamente a partir de un valor de $k=16$ días. La primera respuesta sugiere, nuevamente, un desarrollo importante de la karstificación, lo que provoca una respuesta rápida en el punto de descarga. La segunda parte de la respuesta impulsional correspondería a una infiltración y circulación menos rápida del agua a través de las zonas menos karstificadas del sistema. El correlograma cruzado a largo término muestra, una vez más, la periodicidad anual (Figura 5.19A).

La función amplitud cruzada, tanto para el análisis de corta como de larga duración (Figuras 5.18B y 5.19B), muestran la componente anual. También se observan componentes de 3, 4 y 6 meses (Figura 5.19B), ya detectadas en el espectro simple (Figura 5.17B), lo que refleja la baja capacidad de filtro del sistema. El desfase entre las precipitaciones y los caudales en el manantial de la Cueva del Gato es de 66 días para sucesos de periodicidad anual. Por último, la coherencia sólo existe para las frecuencias bajas (0,08-0,09) y el sistema se muestra lineal para las precipitaciones con periodicidad anual y semestral (Figuras 5.18C y 5.19C). En lo que respecta a la función de ganancia (Figuras 5.18D y 5.19D), se observa una amplificación importante de las precipitaciones para las bajas frecuencias.

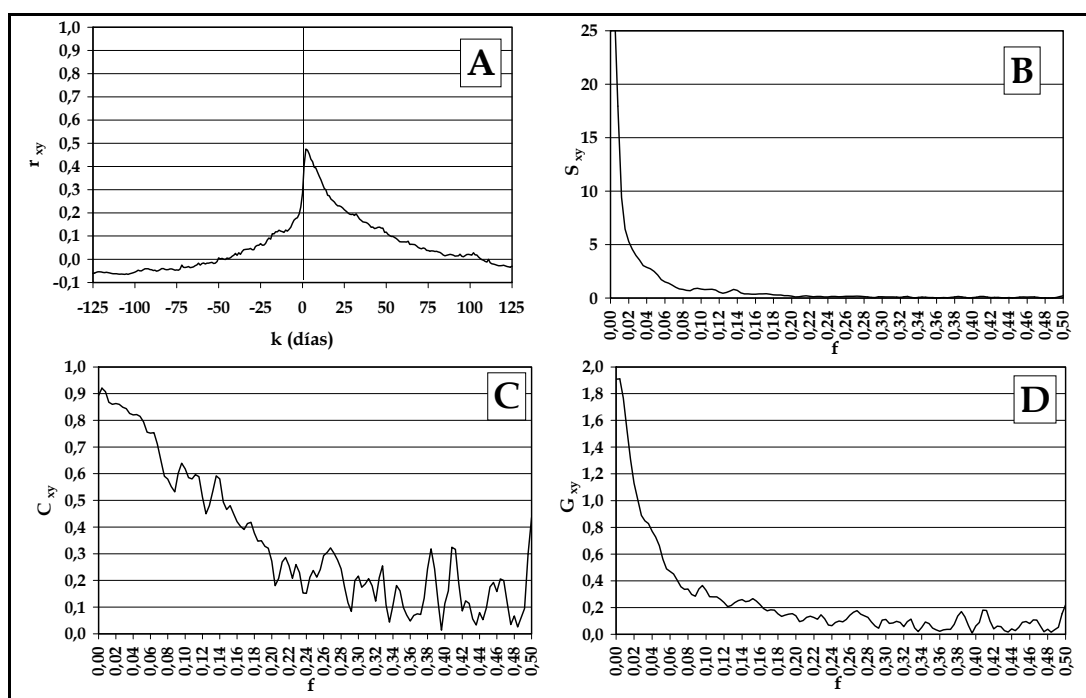


Figura 5.18. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de precipitación en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre 1976/1977 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

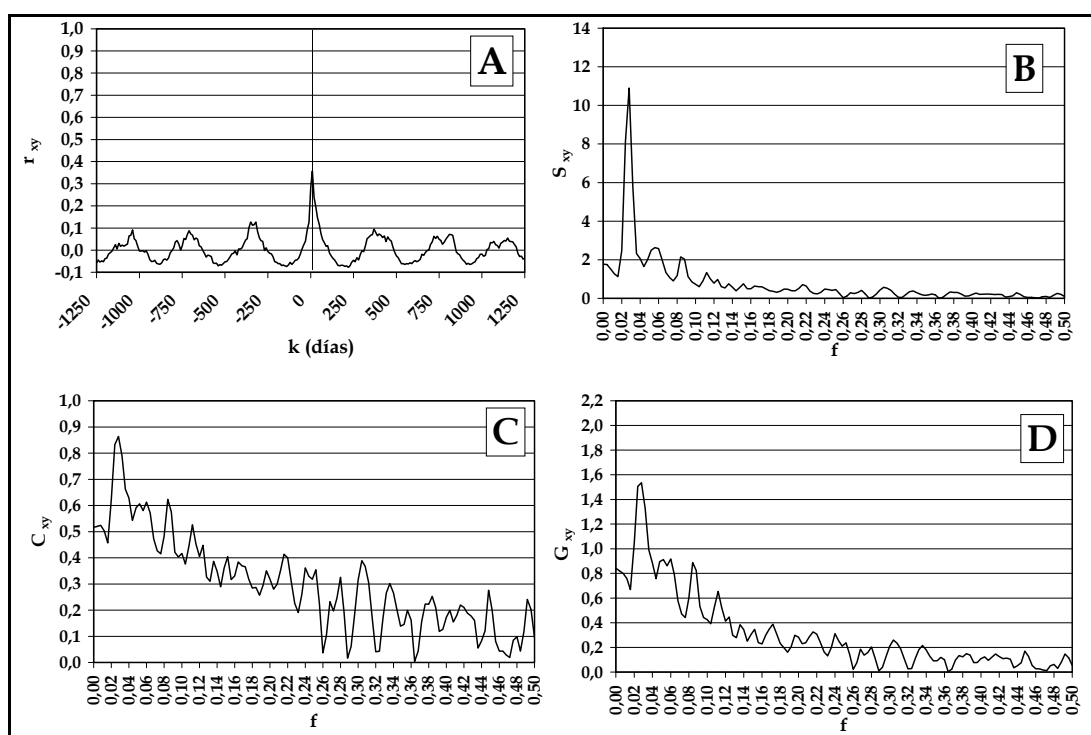


Figura 5.19. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie de caudales medios diarios drenados por el manantial de la Cueva del Gato y de precipitación en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el período comprendido entre 1976/1977 y 2002/2003. Ventana de 1250 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

5.2.4. Análisis de caudales clasificados

5.2.4.1. Manantial de Benaoján

La serie de caudales diarios del manantial de Benaoján durante el período 01/10/1999 - 30/09/2003 se ha dividido en clases de 100 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase. El gráfico resultante (Figura 5.20A), con variaciones pequeñas en las frecuencias acumuladas para los caudales elevados, indica que, durante el 60% del tiempo, el manantial drena caudales inferiores a 1000 L/s. La representación de la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 5.20B), permite diferenciar la existencia de tres tramos principales:

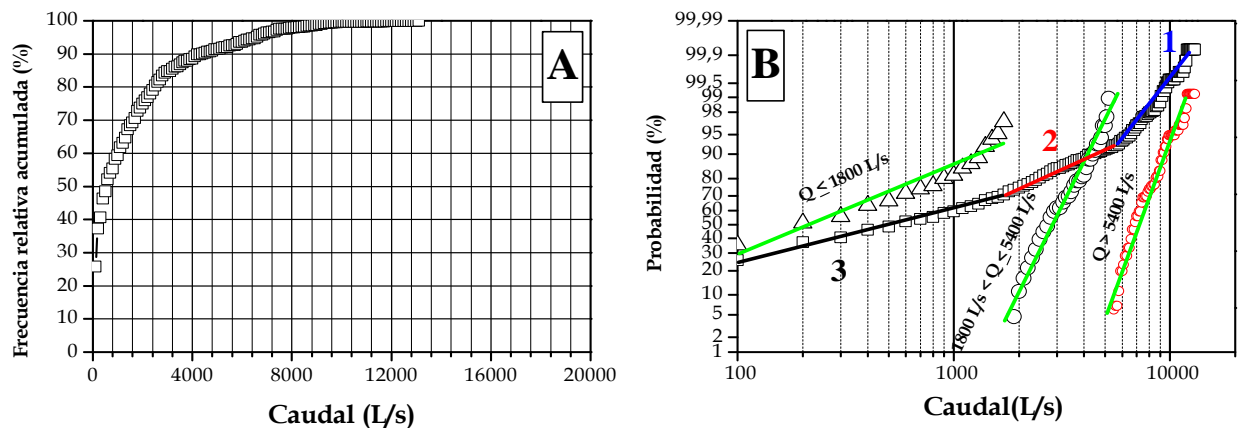


Figura 5.20. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Benaoján, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(1) Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 5400 L/s, correspondiente a la crecida del manantial. El hecho de que presente una mayor pendiente que el tramo siguiente, de menor caudal, podría indicar que en esta situación hidrodinámica, la surgencia no puede drenar más agua y, dado que no se conocen surgencias asociadas de tipo *trop-plein*, lo que debe producirse es la formación de una reserva momentánea que será restituida al flujo después.

(2) Tramo con caudales entre 5400 y 1800 L/s, que corresponde a la situación de decrecida, y presenta una menor pendiente que el tramo correspondiente a la crecida. Esta disminución de la pendiente, indica una rápida variación de los caudales que puede ser debida al aporte del agua infiltrada a

través de los sumideros kársticos de los diferentes poljes existentes en el sector de acuífero drenado. El agua de escorrentía superficial que se concentra en estas áreas preferenciales de infiltración es drenada en no más de 3 días después del evento pluviométrico, de manera que esta infiltración preferencial produciría una variación importante de los caudales de la surgencia durante la decrecida.

(3) Tramo de caudales inferiores a 1800 L/s, que corresponde al tramo final de la decrecida y al agotamiento del manantial. Aunque la pendiente es prácticamente igual durante todo el tramo, sí se observa una pequeña variación en torno a los 400 L/s, que claramente estaría relacionada con el inicio del agotamiento.

Este mismo tratamiento también se ha llevado a cabo para cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados anteriormente analizada (Figura 5.20B). Además, de acuerdo con la metodología propuesta por Padilla (1990), se ha calculado el porcentaje del volumen desaguado con respecto al total, para cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 5.5). Los resultados reflejan que el sector de la Sierra de Líbar drenado por el manantial de Benaoján presenta una inercia escasa, pues durante el final de la decrecida y los estiajes se drena sólo un 13% del volumen total.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 1800$ L/s	215	13
1800 L/s < $Q \leq 5400$ L/s	2850	43
$Q > 5400$ L/s	7100	44

Tabla 5.5. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Benaoján a partir del análisis de caudales clasificados.

5.2.4.2. Manantial de la Cueva del Gato

A partir de la serie histórica de caudales diarios de la Cueva del Gato (01/10/1976 - 30/09/2003) se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase para intervalos de 100 L/s. El gráfico resultante (Figura 5.21A), muestra escasas variaciones en las frecuencias acumuladas para los caudales

elevados y, además, que durante el 70% del tiempo, el manantial drena caudales inferiores a 1000 L/s. La representación de la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 5.21B), permite diferenciar cuatro tramos principales:

(1) Tramo de caudales superiores a 13400 L/s, de mayor pendiente (disminución más lenta de los caudales), que corresponde al periodo de crecida. Este tramo, al igual que para la situación de aguas altas del manantial de Benaoján, pone de manifiesto que el sector drenado por la surgencia de la Cueva del Gato entra en carga y no puede drenar más agua, por lo que se produce la formación de una reserva que será drenada posteriormente.

(2) Tramo de caudales entre 3800 y 13400 L/s, con menor pendiente que el anterior, que representa mayoritariamente una situación de crecida. El hecho de que este tramo presente mayor pendiente que el tramo siguiente, de menor caudal, podría indicar el aporte del agua infiltrada a través de los sumideros kársticos desde los poljes, junto con el drenaje del agua embalsada en la presa de Montejaque.

(3) Tramo con caudales entre 600 y 3800 L/s, que corresponde también a la fase de decrecida, pero en este caso sin influencia debida al aporte de otra cuenca vertiente (Río Gaduares) o de áreas preferenciales de infiltración (poljes).

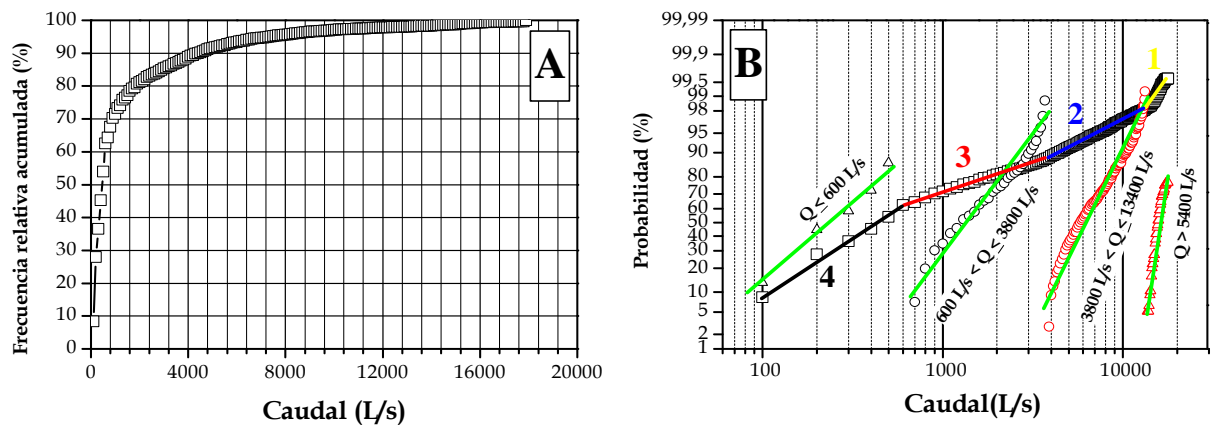


Figura 5.21. Gráfico de caudales clasificados del manantial de la Cueva del Gato, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(4) Tramo de caudales inferiores a 600 L/s, que corresponde a la situación de agotamiento del manantial.

Al igual que para el manantial de Benaoján, se ha llevado a cabo el análisis independiente de cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados del manantial de la Cueva del Gato (Figura 5.21B). Los porcentajes del volumen desaguado para cada situación hidrodinámica (Tabla 5.6) indican que la capacidad de regulación del sector de la Sierra de Líbar drenado por esta surgencia es muy bajo, ya que durante el agotamiento se drena sólo una décima parte del volumen total desaguado por el manantial.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 600$ L/s	220	10
600 L/s < $Q \leq 3800$ L/s	1220	23
3800 L/s < $Q \leq 13400$ L/s	6150	47
$Q > 13400$ L/s	14900	20

Tabla 5.6. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de la Cueva del Gato a partir del análisis de caudales clasificados.

5.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

5.2.5.1. Aplicación de la transformada continua *wavelet* a los datos diarios del periodo 1999-2003 en los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato

En este apartado se presentan los resultados de aplicar la transformada continua *wavelet* y el análisis cruzado de la transformada *wavelet* entre las series de datos de caudal (Benaoján y Cueva del Gato) y la de precipitación (estación de la Cueva de la Pileta), lo cual ha permitido estudiar la variabilidad temporal de la relación entre precipitación y caudal en el sector nororiental de la Sierra de Líbar.

El espectro continuo de los datos de precipitación de la estación de la Cueva de la Pileta (Figura 5.22A) muestra componentes para periodos menores de 1 mes, que también se detectan, aunque menos marcados, en los espectros de caudales (Figuras 5.23A y 5.23B).

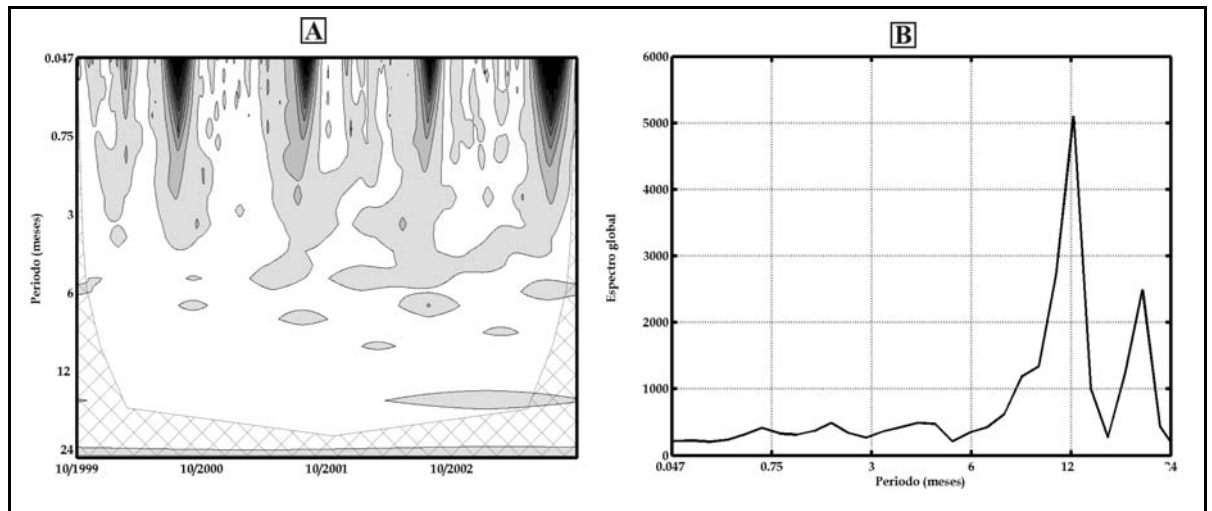


Figura 5.22. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La periodicidad anual es claramente visible en el espectro continuo global de precipitaciones (Figura 5.22B). Los espectros continuos de las series de caudal también muestran la señal anual (Figuras 5.23A y 5.23B), aunque con mayor intensidad en el manantial de la Cueva del Gato, como ponen de manifiesto ambos espectros globales continuos (Figura 5.23C). Además, en los espectros continuos globales de las precipitaciones (Figura 5.22B) y del caudal de las dos surgencias (Figura 5.23C) aparece una componente plurianual de aproximadamente 1'5 años, que no ha sido tomada en cuenta en los resultados obtenidos, por tratarse de una componente artificial debida a su proximidad al “cono de influencia”.

El hecho de que no se atenúen por completo ciertas periodicidades inferiores a la anual (entre 6 y 3 meses) en los espectro de caudales (Figura 5.23C), junto con la amplificación de la señal anual en dichos espectros en relación al de precipitaciones (Figuras 5.22B) refleja, por un lado, que el sistema no tiene la capacidad de amortiguar todas las señales a corto término y, por otro lado, a largo término, el acuífero drenado por estas surgencias presenta cierto potencial regulador.

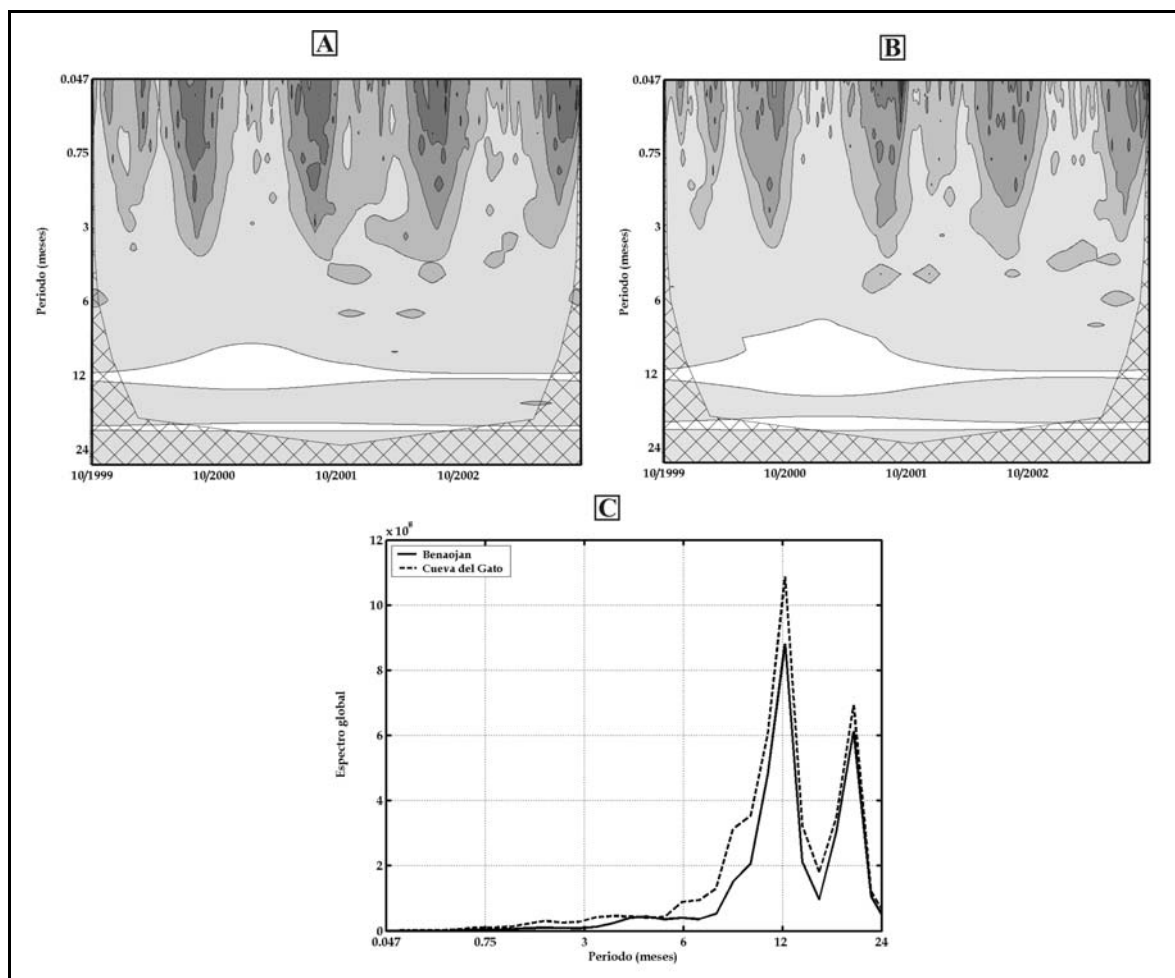


Figura 5.23. Espectros continuos de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Benaoján (A) y de la Cueva del Gato (B) para el período comprendido entre 1999 y 2003. Espectros globales de ambas surgencias (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

Existe una gran variabilidad temporal de la componente anual en las series de caudales (Figuras 5.23A y 5.23B), ya que la mayor parte de esta señal se concentra en el año hidrológico 2000/2001 (máximo pluviométrico dentro del periodo analizado) para los dos manantiales.

Los espectros cruzados continuos de las series de datos de lluvia y de caudal de los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato se representan en las figuras 5.24A y 5.24B, respectivamente. Un análisis a corto término de ambos espectros permite constatar que es la periodicidad anual la más destacable, aunque se observan claramente componentes menores de 1 mes.

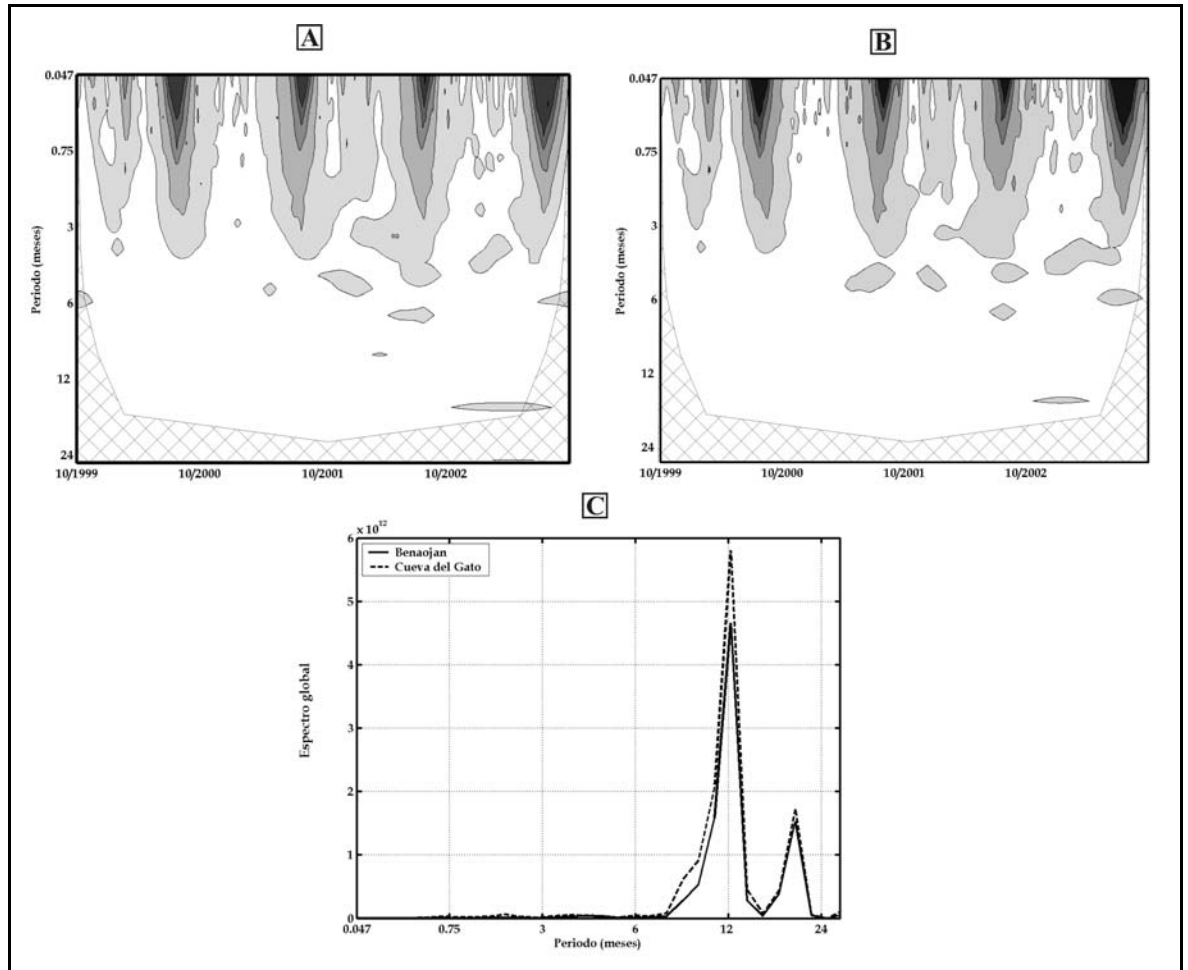


Figura 5.24. Espectros continuos cruzados de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta y de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Benaoján (A) y de la Cueva del Gato (B) para el período comprendido entre 1999 y 2003. Espectros cruzados globales de ambas surgencias (C). La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Los espectros cruzados globales ponen de manifiesto nuevamente que es la componente anual la más marcada, de manera que se atenúa la señal para frecuencias más altas.

5.2.5.2. Aplicación de la transformada continua *wavelet* a la serie histórica del manantial de la Cueva del Gato

A continuación se presentan los resultados de calcular la transformada continua *wavelet* a los caudales medios diarios registrados en el manantial de la Cueva del Gato, entre el 01/10/1976 y el 30/09/2003, y a la precipitación diaria en la estación pluviométrica de la Cueva de la Pileta para el mismo período.

El espectro continuo de los datos de precipitación de la estación de la Cueva de la Pileta (Figura 5.25A), al igual que el espectro de la serie de caudales del manantial de la Cueva del Gato (Figura 5.26A) muestra componentes de periodicidad inferior a 1 año.

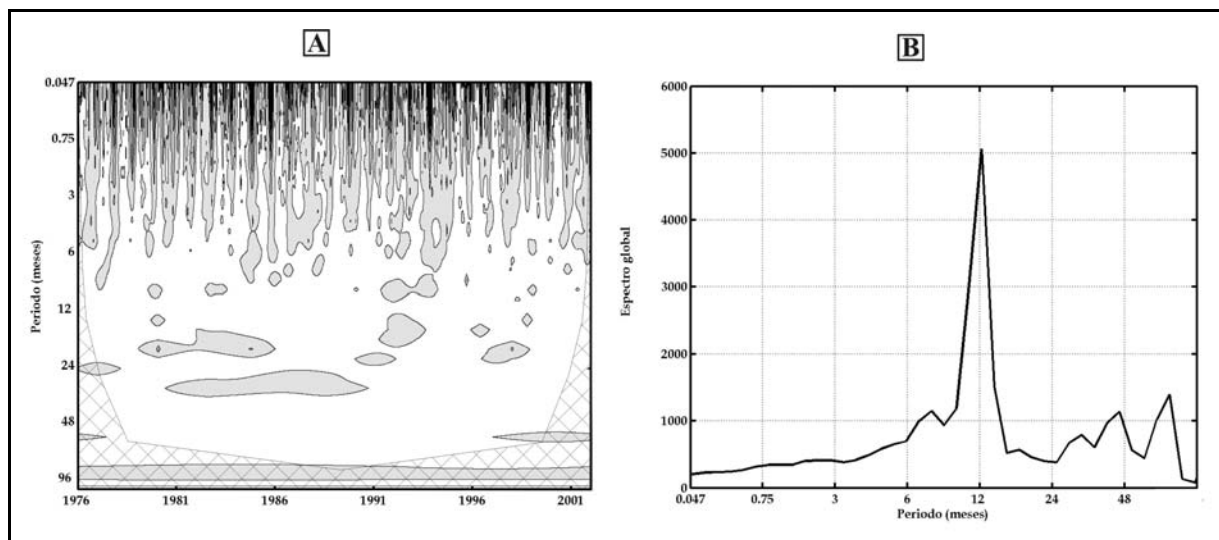


Figura 5.25. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta, para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Los espectros globales continuos de ambas variables (Figuras 5.25B y 5.26B) muestran que la periodicidad anual es la más destacada.

No obstante, se observa nuevamente un comportamiento complejo para la surgencia de la Cueva del Gato, pues la existencia de periodicidades inferiores a la anual en los espectros de caudales pone de manifiesto que el sistema no tiene la capacidad de amortiguar todas las señales a corto término (Figura 5.26B). En cambio, la amplificación de la señal anual en dicho espectro en relación al de precipitaciones (Figura 5.25B) muestra cierta capacidad reguladora del acuífero a largo término. Estos resultados corroboran la interpretación efectuada anteriormente, relativa al comportamiento hidrodinámico del sector drenado por este manantial, a partir del análisis correlatorio y espectral.

El análisis a largo término del espectro continuo de caudal (Figura 5.26A) permite observar que durante la última década aparecen dos componentes plurianuales de 2,5 y 4 años. Los espectros continuos globales de precipitación y

caudal reflejan que estas periodicidades de 2,5 y 4 años son relativamente importantes (Figuras 5.25B y 5.26B), ya que después de la anual son las más marcadas. Estas componentes plurianuales son similares a la descrita por Mandelbrot y Wallis (1968), que fue denominada por estos autores como “Joseph Effect” y, está relacionada con la alternancia de periodos secos y húmedos aproximadamente cada 3 años.

La variabilidad temporal de la componente anual en la serie de caudales es bastante importante. Así, para los años 1980, 1981 y el periodo comprendido entre 1991 y 1994 esta componente desaparece del espectro continuo de caudales (Figuras 5.26A)

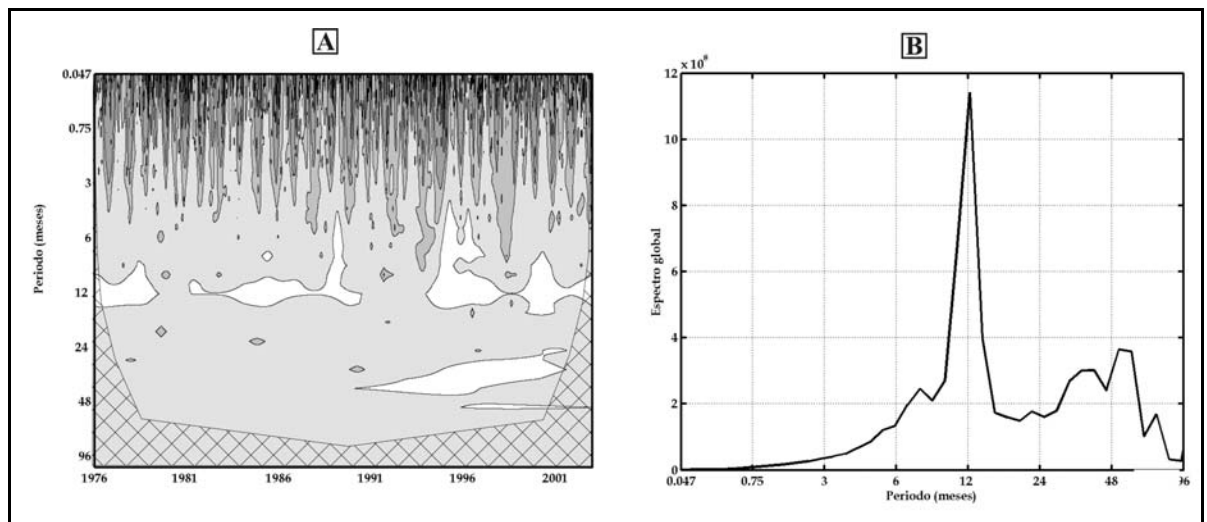


Figura 5.26. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial de la Cueva del Gato para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Los espectros cruzados continuo y global se representan en las figuras 5.27A y 5.27B, respectivamente. Un análisis a corto término del espectro cruzado continuo, permite constatar que es la periodicidad anual la más destacable, aunque hay otras a corto término. El espectro cruzado global pone de manifiesto, una vez más, que es la componente anual la más marcada, aunque hay otra, cuyo periodo es ligeramente superior a 6 meses, y que no se detectan componentes menores de 3 meses. La limitada atenuación de la señal de entrada a corto término (altas frecuencias) por parte del manantial de la Cueva del Gato indica un grado

de karstificación relativamente importante en el sector del acuífero drenado por esta surgencia.

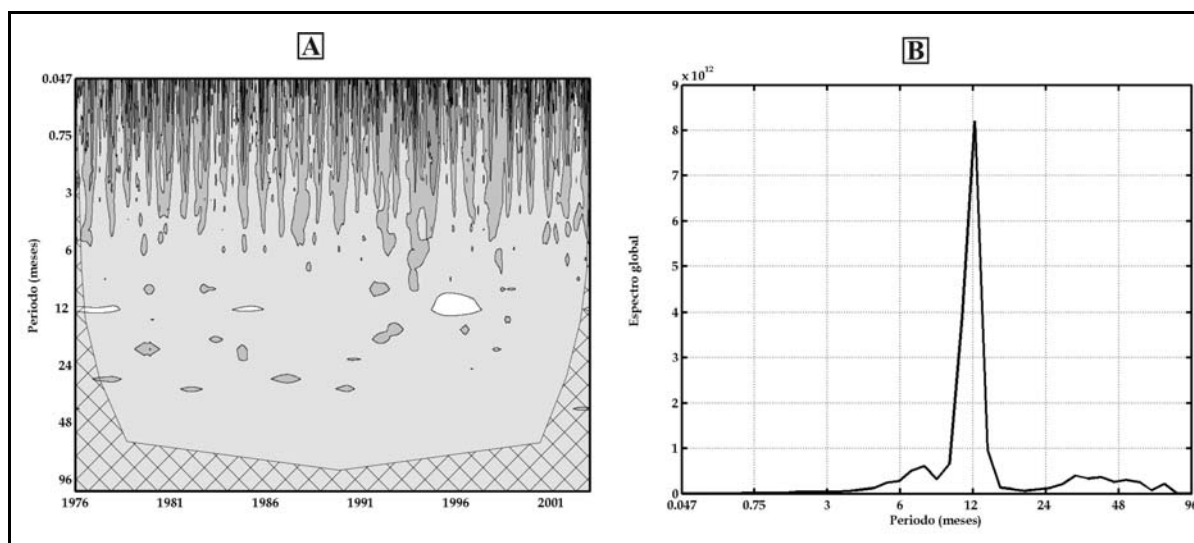


Figura 5.27. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Cueva de la Pileta y de los datos de caudal medio diario en el manantial de la Cueva del Gato para el período comprendido entre 1976 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

Por último, el espectro cruzado continuo global muestra una importante periodicidad plurianual, con un valor máximo para la componente de 3 años aproximadamente (Figura 5.27B). La amplificación de esta señal a largo término en el espectro de caudales, con respecto al espectro de precipitaciones, se debe relacionar con la importancia de las reservas internas de agua subterránea, según Labat *et al.* (1999b).

5.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico

Los hidrogramas anuales de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato, principales puntos de descarga del sector nororiental de la Sierra de Líbar muestran, al menos, dos crecidas para cada año hidrológico, proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones. En general, el tiempo de base de las crecidas para ambas surgencias es igual o inferior a un mes, mientras que los tiempos de crecida se aproximan a los 10 días. Además, los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante. Todos estos resultados junto con los valores altos de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ ponen de

manifiesto la escasa capacidad de filtro del sector drenado por estas dos surgencias.

El análisis de las curvas de recesión de los hidrogramas mediante la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975), refleja el comportamiento escasamente inercial del sector drenado por ambas surgencias. Los parámetros característicos de la decrecida demuestran la existencia de un importante grado de karstificación funcional de la zona no saturada del acuífero. Los valores de los coeficientes de agotamiento obtenidos, del orden de 10^{-2} días⁻¹, indican que la zona saturada se vacía rápidamente. No obstante, el análisis conjunto del resto de parámetros característicos de la curva de agotamiento permite constatar una mayor capacidad de filtro y un mayor poder regulador del sector drenado por el manantial de Benaoján. Además, la representación de los parámetros *k* e *i* de las dos surgencias muestra que el sector drenado por estos dos manantiales de tipo kárstico presenta una compleja organización de drenaje, lo cual está en consonancia con los datos geológicos e hidrogeológicos disponibles.

A partir de los resultados del análisis correlatorio y espectral simple de los datos diarios de caudal registrados entre 01/10/1999 y 30/09/2003 en los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato (forma del correlograma, efecto memoria, tiempo de regulación) se deduce un comportamiento relativamente kárstico del acuífero drenado por ambas surgencias, algo más inercial en el sector drenado por el manantial de Benaoján. Los resultados del análisis cruzado para ambas surgencias pueden interpretarse como la superposición de dos tipos de flujo: una primera respuesta asociada a la transmisión rápida de la señal de entrada (precipitaciones) y, por tanto, relacionada con las zonas de mayor desarrollo de la karstificación; y una segunda respuesta impulsional menos rápida, con un decrecimiento más lento de las funciones de correlación cruzada, característica de un sistema más inercial. El primer tipo de respuesta, característica de un drenaje kárstico más desarrollado, puede ser consecuencia, por un lado, de la infiltración rápida de agua procedente del embalse de Montejaque y/o, por otro lado, de la infiltración concentrada del agua de lluvia a través de los sumideros kársticos de los poljes.

El análisis correlatorio y espectral llevado a cabo con la serie histórica de caudales (01/10/1976 - 30/09/2003) registrados en el manantial de la Cueva del Gato, corrobora los resultados del análisis para el periodo 01/10/1999 - 30/09/2003. Así, tanto la forma del correlograma simple como el valor del efecto memoria son propios de un sistema kárstico, poco inercial. Además, nuevamente, los resultados del análisis cruzado reflejan la yuxtaposición de dos tipos de comportamientos, uno característico de un desarrollo importante de la karstificación y otro propio de una infiltración y circulación menos rápida del agua a través del sistema.

En lo que respecta al análisis de caudales clasificados, la curva de frecuencias relativa acumulada frente a los intervalos de caudal del manantial de Benaoján permite diferenciar, por un lado, que durante la situación de aguas altas se debe de producir la formación de una reserva que se restituye al flujo posteriormente y, por otro lado, la importante influencia en la variación de los caudales, durante la fase de decrecida, como consecuencia del agua infiltrada a través de los sumideros kársticos de los diferentes poljes. La curva del manantial de la Cueva del Gato permite concluir que por encima de los 13400 L/s el sistema entra en carga, de manera que se produce la formación de una reserva que se drena, posteriormente, durante la fase de decrecida. Además, los resultados de ambos manantiales indican que la capacidad de regulación del acuífero drenado por ellos es muy escasa, pues durante el agotamiento sólo se drena una décima parte del volumen total desaguado.

Por último, la aplicación de la transformada *wavelet* a los datos diarios de precipitación y de caudal ha ratificado aún más las conclusiones puestas de manifiesto anteriormente, respecto a que el acuífero presenta una escasa capacidad de filtro frente a las precipitaciones, debido a un destacable grado de karstificación funcional. No obstante, el análisis de *wavelet* también muestra que el sistema tiene capacidad de amplificar la señal original de las precipitaciones a largo término, lo cual puede ser indicativo de cierto poder regulador, relacionado con la existencia de reservas de agua subterránea en la zona saturada de este acuífero.

5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

5.3.1. Composición química de las aguas del sector nororiental de la Sierra de Líbar

Las muestras de agua recogidas en los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján, entre Marzo de 2000 y Septiembre de 2003, son de facies bicarbonatada cálcica (Figura 5.28).

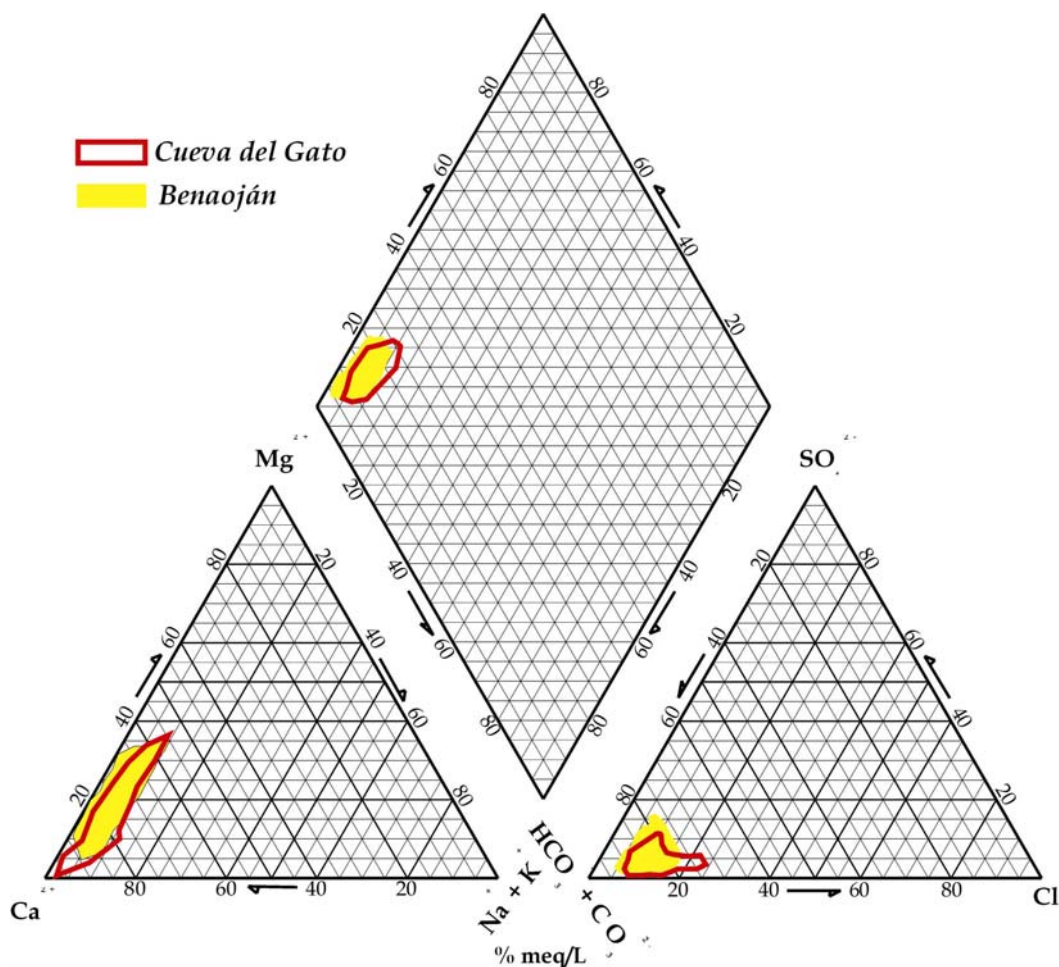


Figura 5.28. Situación en un diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján.

No existen grandes diferencias en la composición química media de las aguas drenadas por ambos manantiales, aunque la surgencia de Benaoján drena aguas con mayores contenidos en Mg^{2+} y TAC y el contenido medio en Cl^- es ligeramente mayor en la surgencia de la Cueva del Gato (Tabla 5.7). Los valores medios de conductividad eléctrica del agua son similares en las dos surgencias. En cambio, el coeficiente de variación de este parámetro presenta un valor doble en el

manantial de la Cueva del Gato (10,2%) que en el manantial de Benaoján (4,7%). Los coeficientes de variación de los componentes químicos del agua están comprendidos entre 3'3 y el 94'8 % (Tabla 5.7), aunque en su mayor parte son superiores al 10%. Por tanto, según el criterio Shuster y White (1971, 1972) se trataría de un sistema de tipo kárstico o *conduit flow* (flujo por conductos), aunque algunos de los parámetros del manantial de Benaoján, como conductividad eléctrica y TAC, presentan coeficientes de variación por debajo del 5%, que serían propios de un sistema con un flujo de tipo difuso (*diffuse flow system*).

	Manantial (periodo)	T (°C)	C.E. (µS/cm)	pH	TAC (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	IS _{CAL}	IS _{DOL}	TOC (mg/L)
n		96	96	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74	12
m		13,7	280	7,96	164,8	13,2	6,0	1,9	4,0	50,8	5,2	4,2	0,7	0,28	-0,24	1,30
max	Cueva del Gato	15,5	319	8,21	186,9	27,0	16,5	4,6	8,7	57,1	13,3	8,2	1,3	0,55	0,64	1,98
min		11,2	182	7,65	124,4	5,7	0,8	0,0	0,0	38,4	1,7	2,1	0,2	-0,14	-1,20	0,58
v(%)		6,0	10,2	1,4	9,7	28,4	52,2	61,2	47,8	10,3	42,5	27,3	39,1	54,9	-171,8	40,2
m		14,0	287	8,0	171,6	12,0	9,1	2,5	4,8	51,8	6,5	4,0	0,7	0,31	-0,04	
max	<i>Cueva del Gato</i> (1999/2000)	14,4	300	8,2	182,0	15,6	16,5	3,8	7,6	57,1	13,3	4,9	1,3	0,55	0,64	
min		12,3	255	7,7	143,0	10,7	1,2	1,3	0,0	38,4	4,2	2,6	0,5	-0,05	-0,96	
v(%)		3,3	4,7	2,0	5,9	11,0	49,2	27,6	39,4	9,6	32,6	16,3	38,6	55,4	-1028,4	
m		13,5	273	7,9	156,1	14,6	4,8	1,2	4,3	49,0	3,8	4,4	0,7	0,23	-0,40	
max	<i>Cueva del Gato</i> (2000/2001)	14,7	319	8,2	174,9	27,0	8,2	3,0	8,7	56,5	5,5	8,2	1,0	0,52	0,18	
min		11,2	182	7,7	124,4	5,7	1,7	0,0	0,0	38,6	1,7	2,1	0,2	-0,14	-1,20	
v(%)		7,3	15,5	1,6	11,8	37,4	36,5	83,4	56,3	13,1	26,7	35,4	41,7	84,9	-112,3	
m		13,8	288	8,0	174,0	13,1	6,4	1,8	3,8	53,3	6,2	4,2	0,6	0,33	-0,10	
max	<i>Cueva del Gato</i> (2001/2002)	14,6	311	8,0	186,9	16,7	11,1	4,6	5,3	57,0	12,3	4,9	1,0	0,42	0,20	
min		12,5	252	7,9	154,5	9,9	0,8	0,0	2,1	47,7	3,1	3,2	0,2	0,17	-0,98	
v(%)		3,7	4,3	0,6	5,2	15,1	38,5	74,6	24,6	5,0	36,3	11,1	39,0	19,6	-296,6	
m		13,6	270	8,0	163,6	12,5	4,4	2,4	3,0	50,2	5,2	3,9	0,7	0,29	-0,29	1,30
max	<i>Cueva del Gato</i> (2002/2003)	15,5	300	8,1	182,0	18,5	6,4	4,6	5,1	57,0	9,6	6,9	1,0	0,45	0,14	1,98
min		11,7	223	7,8	139,3	6,9	2,0	0,9	0,4	43,6	2,0	2,4	0,2	0,15	-0,89	0,58
v(%)		8,5	9,3	0,9	8,9	21,2	26,3	38,8	40,5	8,1	48,8	28,8	36,9	32,8	-114,1	40,2
n		81	306	81	79	79	77	79	79	79	79	79	79	77	77	12
m		14,8	298	7,65	185,7	10,8	8,5	2,3	4,5	52,7	8,6	3,6	0,5	0,06	-0,52	0,51
max	Benaoján	15,7	336	7,92	200,0	22,0	21,0	5,0	8,7	62,4	16,6	13,3	4,0	0,30	0,15	0,95
min		14,1	261	7,27	167,4	5,7	2,5	0,0	0,0	42,2	1,9	1,3	0,2	-0,32	-1,83	0,36
v(%)		1,8	4,7	1,5	3,3	34,7	46,2	63,3	47,7	8,1	32,6	70,4	94,8	225,7	-57,0	38,3
m		14,8	303	7,57	184,0	12,0	10,5	2,7	4,9	50,8	10,6	4,3	0,5	-0,06	-0,66	
max	<i>Benaoján</i> (1999/2000)	15,2	332	7,92	191,5	22,0	19,8	5,0	7,7	57,6	16,6	13,3	0,8	0,26	0,15	
min		14,7	280	7,27	175,7	5,7	2,5	0,0	1,2	42,2	6,9	1,6	0,2	-0,32	-1,22	
v(%)		0,9	3,3	2,2	2,2	40,3	49,4	48,0	39,4	9,7	26,2	82,5	46,5	-279,8	-53,4	
m		14,8	293,3	7,7	185,7	10,8	8,5	1,9	3,6	52,4	7,8	3,0	0,4	0,10	-0,48	
max	<i>Benaoján</i> (2000/2001)	15,0	336,0	7,9	197,6	17,8	20,6	5,0	8,7	57,4	16,6	8,2	1,5	0,29	-0,09	
min		14,4	261,0	7,4	176,2	6,4	4,1	0,0	0,0	43,1	1,9	1,3	0,2	-0,17	-1,83	
v(%)		0,9	4,8	1,5	2,6	31,4	35,0	85,9	66,2	6,4	32,7	56,4	80,4	123,0	-75,5	
m		14,7	299,5	7,6	185,0	10,3	7,9	1,9	5,0	51,9	8,9	2,9	0,4	0,04	-0,52	
max	<i>Benaoján</i> (2001/2002)	15,0	336,0	7,7	200,0	18,5	21,0	4,3	8,7	55,8	16,4	8,9	1,0	0,13	-0,21	
min		14,5	277,0	7,5	167,4	7,8	3,3	0,0	0,0	44,2	6,3	1,5	0,2	-0,07	-0,84	
v(%)		1,1	5,3	0,7	4,4	29,2	47,3	69,7	43,7	6,2	26,3	75,1	65,1	159,0	-32,2	
m		15,0	298,7	7,7	188,5	9,8	7,2	2,8	5,4	55,8	7,5	4,7	0,9	0,13	-0,45	0,51
max	<i>Benaoján</i> (2002/2003)	15,7	336,0	7,8	200,0	19,9	21,0	4,3	8,7	62,4	14,9	9,4	4,0	0,30	-0,16	0,95
min		14,1	278,0	7,5	178,6	6,4	4,1	1,0	2,7	48,1	3,9	1,9	0,2	-0,04	-0,77	0,36
v(%)		3,3	5,8	1,2	3,5	37,0	54,4	41,1	28,1	8,1	37,8	53,6	99,3	70,7	-45,2	38,3

Tabla 5.7. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato. Leyenda, *n* número de muestras, *m* media aritmética, *max* valor máximo, *min* valor mínimo y *v* coeficiente de variación.

Las aguas drenadas por el manantial de la Cueva del Gato muestran un valor medio del índice de saturación en calcita característico de sobresaturación en este mineral (Tabla 5.7), mientras que el valor medio de este parámetro en las aguas del manantial de Benaoján están en equilibrio con respecto a la calcita. Ambos manantiales drenan aguas subsaturadas en dolomita.

Se ha realizado un análisis de componentes principales con las 151 muestras recogidas en los dos manantiales estudiados (Figura 5.29). En el análisis se han considerado 13 variables (temperatura, conductividad eléctrica, temperatura, pH, TAC, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, SiO₂, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺). La matriz de correlación refleja que la conductividad eléctrica está correlacionada, principalmente, con temperatura y TAC y, en menor medida, con el Mg²⁺.

Los tres primeros factores del ACP (Figura 5.29) explican el 64% de la varianza total. El factor I (33%) está definido por la conductividad eléctrica, TAC, temperatura y Mg²⁺, por lo que representa al eje de la *mineralización* y del *tiempo de residencia*. El factor II (17%), queda definido por Cl⁻ y Na⁺ y caracteriza la influencia en el sistema de la *infiltración del agua a través del epikarst* (procesos de evapotranspiración). El factor III explica el 14% de la varianza y está definido por el contenido en Ca²⁺.

La situación de las unidades estadísticas en los planos factoriales I-II y I-III (Figura 5.29) permite diferenciar claramente las muestras de agua del manantial de Benaoján de las aguas del manantial de la Cueva del Gato. Las aguas del manantial de Benaoján están más mineralizadas y presentan una temperatura más alta y un mayor contenido en Mg²⁺; parece claro que éstas permanecen un mayor tiempo de residencia dentro del acuífero o que se afectan menos por las diluciones asociadas a la recarga.

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	0,7590	1										
pH	-0,4569	-0,2880	1									
TAC	0,8495	0,8314	-0,4657	1								
Cl ⁻	0,0077	0,4187	0,3151	-0,0428	1							
SO ₄ ²⁻	0,2777	0,3844	-0,3404	0,2794	0,0264	1						
NO ₃ ⁻	0,2090	0,1549	-0,1156	0,1646	-0,0698	0,2263	1					
SiO ₂	0,0864	0,0295	-0,1619	0,0728	-0,1020	0,0677	0,1272	1				
Ca ²⁺	0,4880	0,4910	-0,0944	0,5858	0,0813	-0,0358	-0,0028	0,0250	1			
Mg ²⁺	0,5353	0,5493	-0,4385	0,5248	0,0166	0,5155	0,3740	0,0750	-0,1672	1		
Na ⁺	0,0919	0,4053	0,1315	0,0325	0,7106	0,1987	0,2017	0,0600	0,0041	0,2127	1	
K ⁺	-0,1442	-0,1666	0,0883	-0,2435	0,0250	-0,0360	0,1589	0,0782	-0,1808	-0,0839	0,2647	1

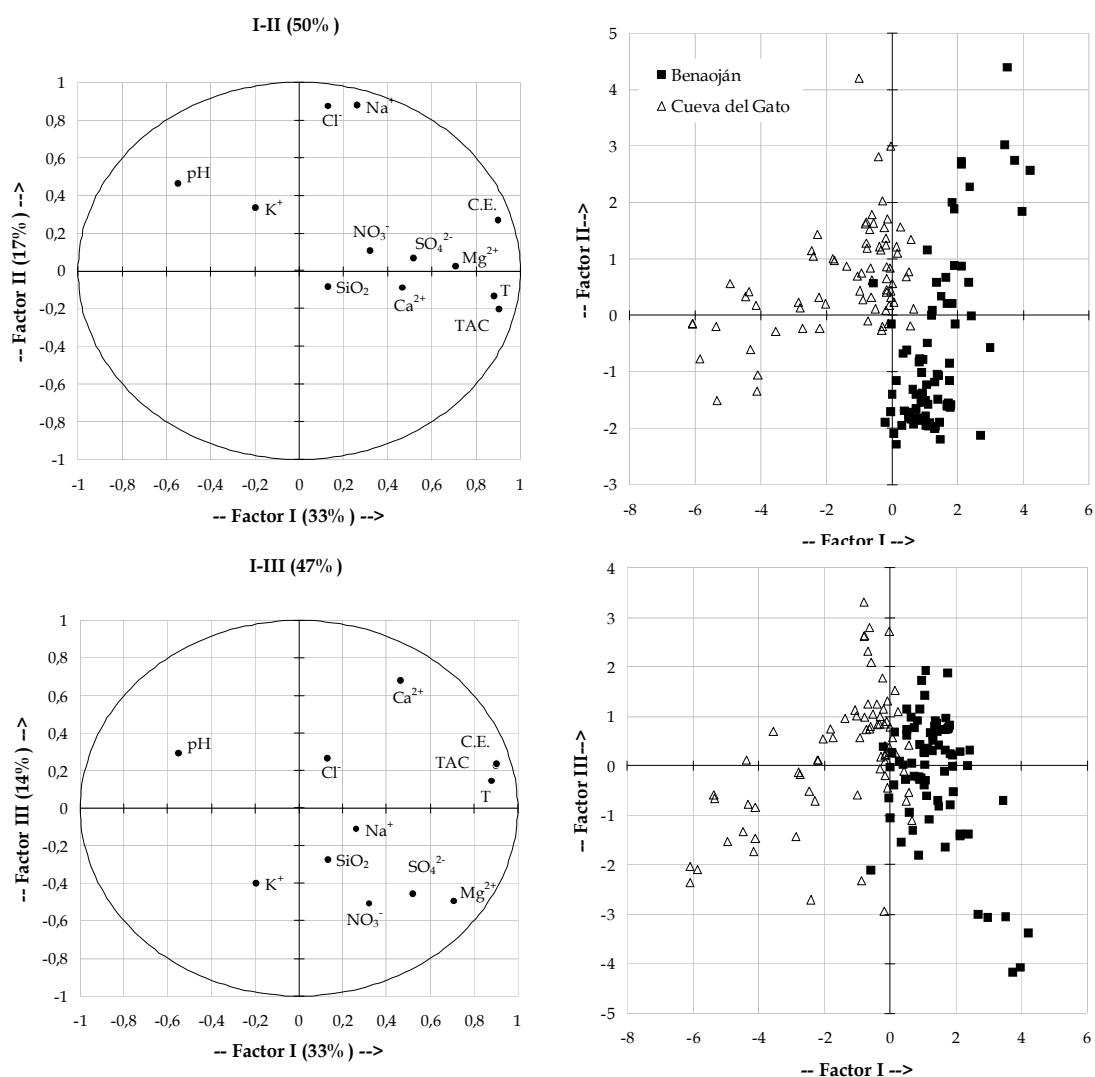


Figura 5.29. Matriz de correlación y representación de los factores I-II y I-III del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por los manantiales de Benaoján y de la Cueva del Gato (n= 151).

5.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos

5.3.1.1. Manantial de Benaoján

Un análisis general para el conjunto del período de estudio (Figura 5.30) permite constatar que, paralelamente a las crecidas hidrodinámicas, se producen importantes procesos de dilución por mezcla del agua de lluvia con agua de mayor tiempo de residencia dentro del acuífero. El valor máximo de estas diluciones para todo el periodo de registro no es muy elevado, aproximadamente del 16% con respecto al valor máximo ($\approx 50 \mu\text{S}/\text{cm}$). Este cálculo se realiza asumiendo que el agua drenada antes de la crecida representa el 100% de la mineralización del agua subterránea procedente, mayoritariamente, de la zona saturada y que la dilución producida durante la crecida es el resultado de la infiltración rápida de un porcentaje del agua de lluvia, cuya conductividad eléctrica puede considerarse insignificante. Este resultado pone de manifiesto que, aunque existe un cierto desarrollo de la karstificación funcional del sector de acuífero drenado por este manantial, dicha karstificación se encuentra limitada y condiciona la cantidad de agua de lluvia que participa en la mezcla. Por ello, independientemente de la magnitud de la crecida, la conductividad eléctrica no presenta disminuciones importantes.

Las diluciones, en respuesta a la recarga, suelen estar relacionadas con el descenso de la TAC y de los contenidos en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ (Figura 5.30). También presenta, en general, menores contenidos en Mg^{2+} durante la época de crecidas, sobre todo en las más importantes (a principios de 2001 y 2003). La evolución general de la conductividad eléctrica coincide, en gran medida, con las de los contenidos en Cl^- y Na^+ . De forma menos clara (porque las variaciones son menos acentuadas), esta misma evolución general es la que presenta la temperatura del agua de la surgencia (Figura 5.30). Las aguas muestran una marcada estacionalidad, tanto de los contenidos en Cl^- y Na^+ , como de la temperatura.

Durante prácticamente todo el periodo de estudio, las aguas del manantial de Benaoján presentan un índice de saturación en calcita próximo al equilibrio y están subsaturadas en dolomita (Figura 5.30). Los valores de los índices de

saturación son ligeramente más bajos durante algunos eventos de recarga, mientras que en estiaje las aguas están sobresaturadas en calcita y próximas al equilibrio en el índice de saturación de la dolomita.

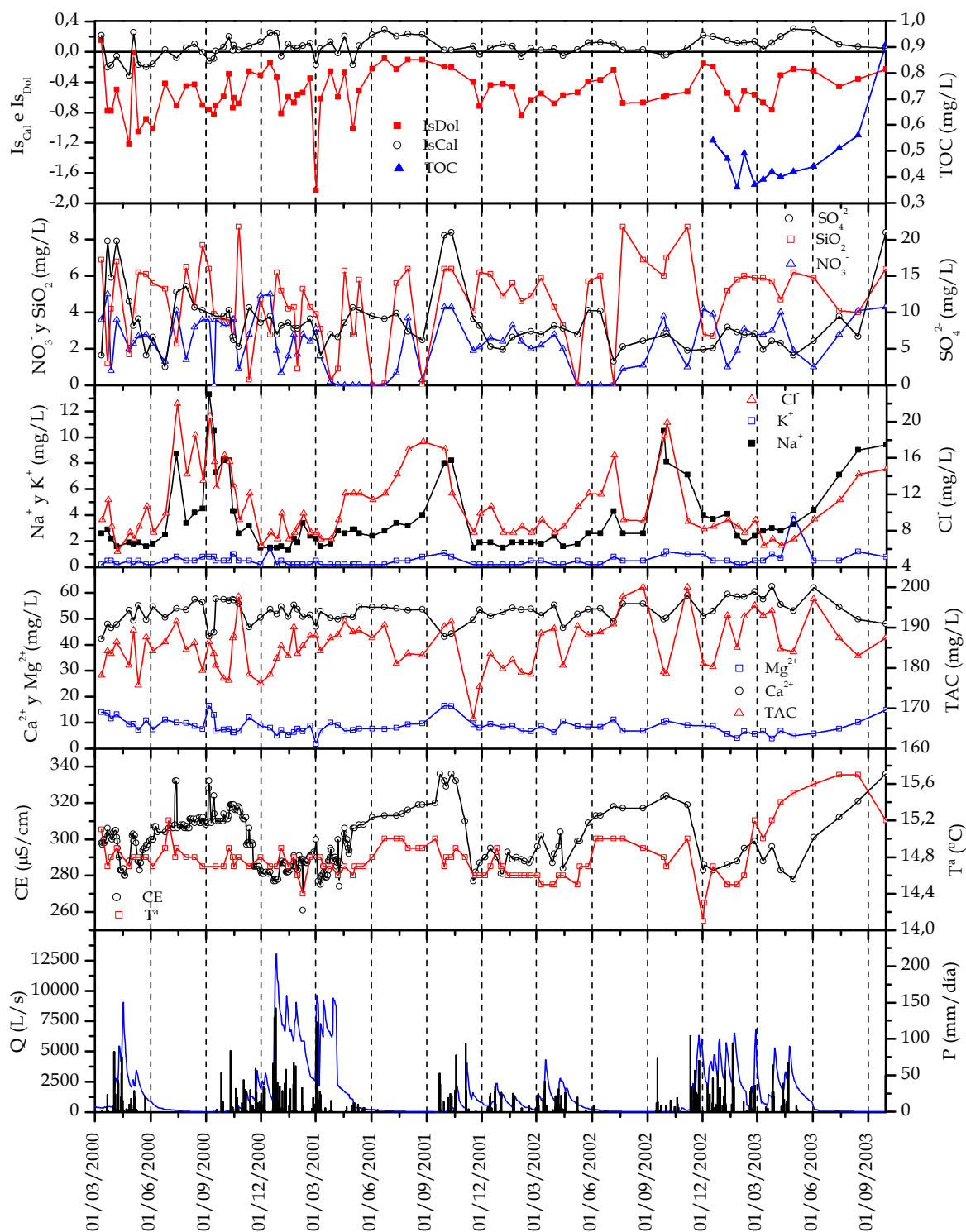


Figura 5.30. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Benaójan durante el período de investigación.

Existe cierto grado de correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- (Figura 5.31), de manera que las aguas con mayor tiempo de residencia en el acuífero (valores altos de Mg^{2+}/Ca^{2+}) muestran también contenidos en Cl^- más elevados, lo cual es indicativo de la influencia de la zona no saturada del acuífero.

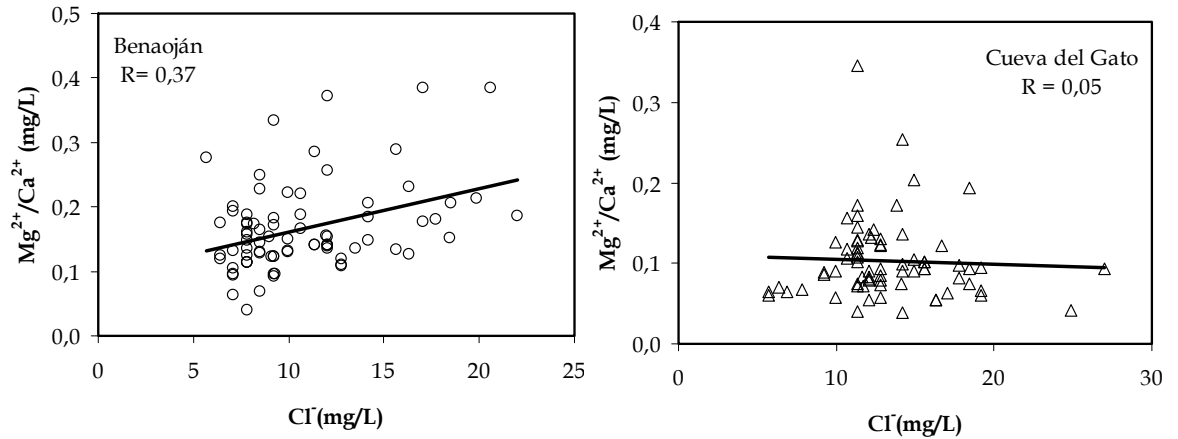


Figura 5.31. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por los manantiales del sector nororiental de la Sierra de Líbar.

Durante el estiaje del año hidrológico 1999/2000 se registraron elevados valores puntuales de la conductividad eléctrica y de los contenidos en Cl^- y Na^+ (Figura 5.32), posiblemente, relacionados con procesos de contaminación.

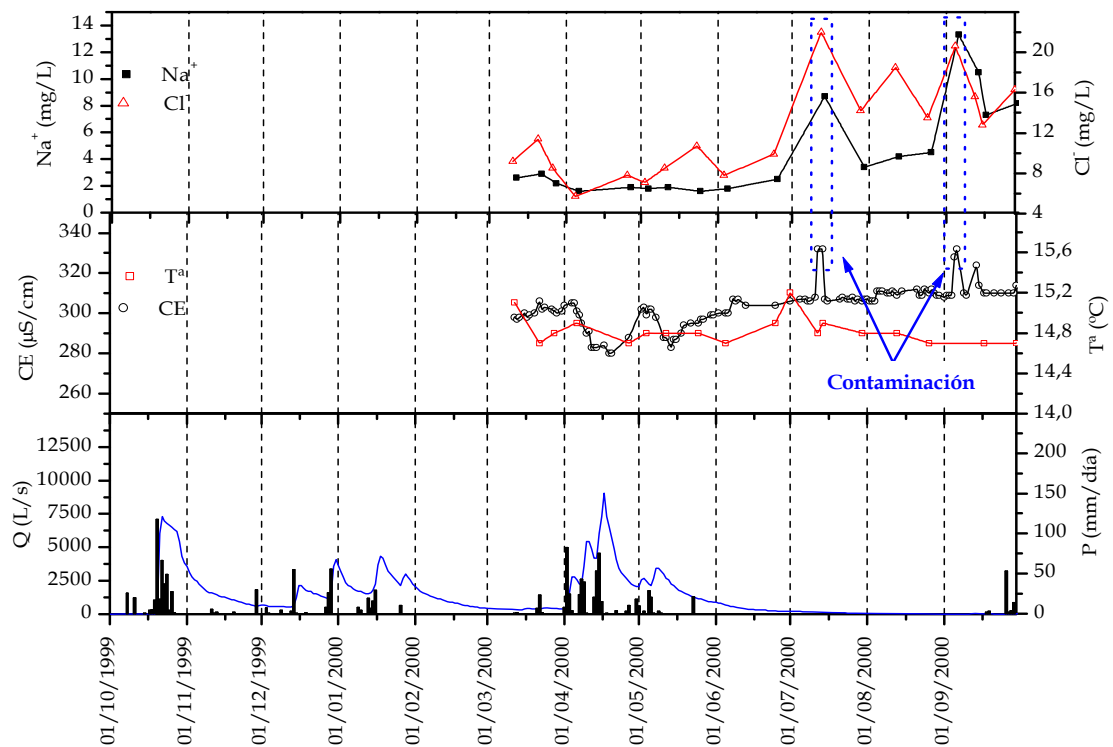


Figura 5.32. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, temperatura y contenidos en Cl^- y Na^+ del agua drenada por el manantial de Benaoján durante el año hidrológico 1999/2000

El Sistema de Alertas en Salud Pública de la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía detectó un brote epidémico en el abastecimiento de agua a las poblaciones de Benaoján y Montejaque, que en el verano del año 2000 se producía desde un sondeo situado en las proximidades del manantial de Benaoján (<http://www.csalud.juntaandalucia.es/saand/svea/bemasem/bemasem.htm>).

Una de las respuestas hidroquímicas más características del manantial de Benaoján se produce con las primeras lluvias otoñales (Figura 5.30). Estos eventos pluviométricos provocan crecidas de pequeña magnitud y dan lugar a los valores más elevados de la conductividad eléctrica (indicativos del final del estiaje) en el agua de la surgencia (Figura 5.33). Este aumento de la mineralización se debe al aumento de los contenidos en Cl^- y Na^+ , porque a la surgencia llega agua del epikarst (zona no saturada) que ha estado concentrándose por evaporación durante el estiaje (efecto pistón de la zona no saturada). Además, los mayores contenidos de TOC en estiaje (Figura 5.30) indican una participación de la zona no saturada también durante la fase de agotamiento, hecho éste que se ha puesto de manifiesto en otros sistemas kársticos del Sur de Francia en diferentes trabajos (Batiot *et al.*, 2003 y Emblanch *et al.*, 2003).

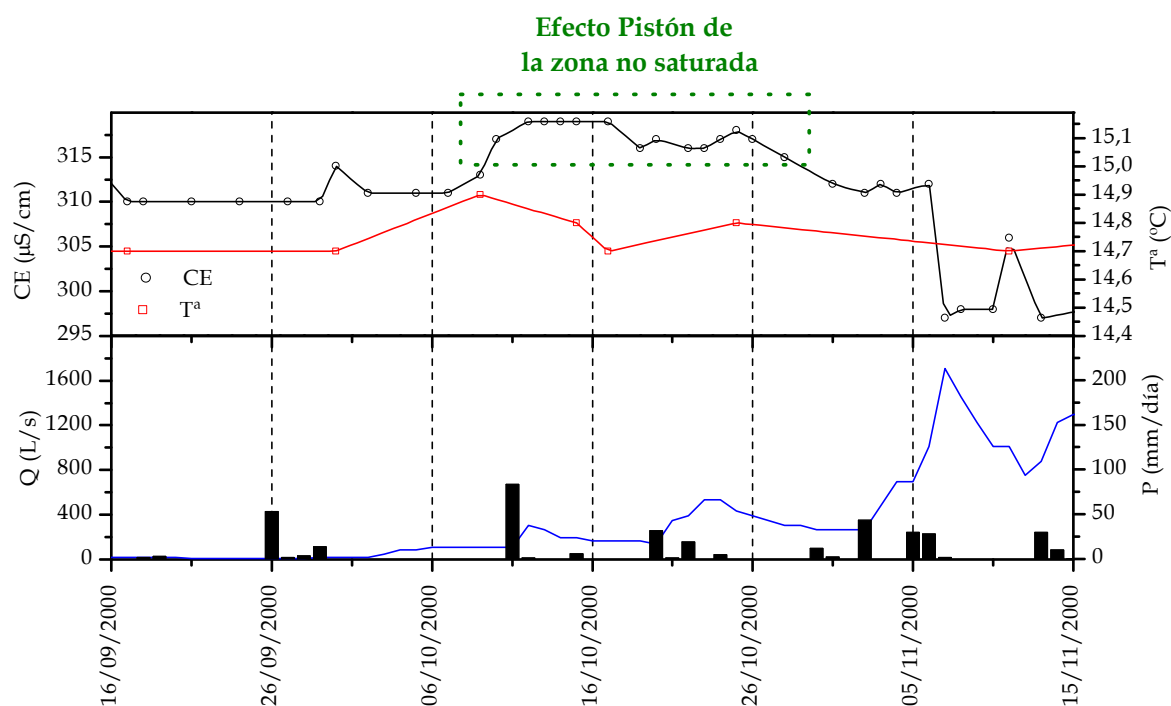


Figura 5.33. Evolución temporal del caudal, conductividad eléctrica y temperatura del agua drenada por el manantial de Benaoján durante las primeras lluvias del año hidrológico 2000/2001.

La matriz de correlación de las 78 muestras de aguas tomadas en el manantial de Benaoján pone de manifiesto que la conductividad eléctrica está correlacionada principalmente con los contenidos en Cl⁻ y Na⁺ (Figura 5.34). El eje I podría representar la *mineralización*, ya que se encuentra definido en gran medida por conductividad eléctrica, Cl⁻, Na⁺ y Mg²⁺. El eje II está caracterizado por la TAC y el contenido en Ca²⁺ en su parte positiva.

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	0,4437	1										
pH	0,3314	0,0462	1									
TAC	-0,1101	0,3366	-0,4240	1								
Cl ⁻	0,3483	0,7682	0,1877	0,0091	1							
SO ₄ ²⁻	-0,0228	0,3661	0,1160	-0,0262	0,4126	1						
NO ₃ ⁻	-0,0826	-0,0979	0,1524	-0,4414	-0,0124	0,2024	1					
SiO ₂	0,0098	-0,0247	-0,1022	0,2265	0,0098	0,1427	0,2244	1				
Ca ²⁺	0,4159	0,0898	-0,0693	0,0361	0,0805	-0,5099	-0,1200	-0,0217	1			
Mg ²⁺	0,0524	0,3757	0,1528	-0,0779	0,4601	0,6789	0,1204	-0,1022	-0,4366	1		
Na ⁺	0,1247	0,6201	0,0558	-0,0183	0,7516	0,5622	0,2746	0,0730	-0,0479	0,4731	1	
K ⁺	0,1161	0,3889	0,1062	-0,1438	0,3913	0,2610	0,5548	0,0162	0,0698	0,2592	0,4139	1

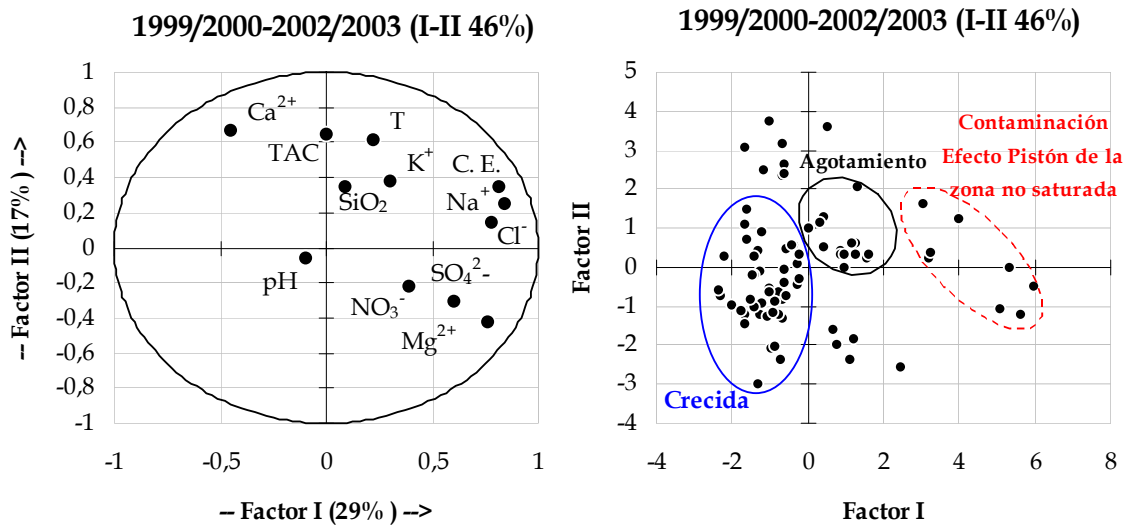


Figura 5.34. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de Benaoján durante todo el periodo de estudio (n= 77).

En el campo de las observaciones pueden diferenciarse, al menos, tres familias de aguas (Figura 5.34):

- Aguas afectadas por contaminación puntual y procedentes del efecto pistón de la zona no saturada: presentan la mayor mineralización, mayor contenido en Cl⁻, Na⁺ y corresponden a las crecidas de principios de año hidrológico.

- Aguas de crecida y decrecida: son las menos mineralizadas, el número de unidades estadísticas pertenecientes a esta familia es muy elevado debido a que se incluyen tanto los valores de la crecida en sentido estricto, como los de la decrecida.
- Aguas de agotamiento: corresponden a la fase de estiaje, cuando menor es el caudal del manantial.

5.3.1.2. Manantial de la Cueva del Gato

El manantial de la Cueva del Gato presenta una variabilidad hidroquímica mayor que la surgencia de Benaoján (Figura 5.35, Tabla 5.7). Las crecidas hidrodinámicas producen importantes procesos de dilución por mezcla del agua de lluvia con las aguas almacenadas dentro del acuífero. La influencia de la recarga desde la presa del Río Gaduares aumenta la magnitud de las crecidas, provocando diluciones puntuales más importantes en el tiempo. El valor máximo de estas diluciones es muy elevado (40%), indicativo de una karstificación funcional importante en el sector de acuífero drenado por este manantial.

Las disminuciones de la conductividad eléctrica ante la recarga, al igual que en el manantial de Benaoján, están relacionadas con el descenso de la TAC y los contenidos en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ (Figura 5.35). Además, las evoluciones generales de la temperatura y de la conductividad eléctrica son bastante similares entre sí, con valores más bajos durante los meses en los que se produce recarga (Figura 5.35). Cuando se produce una entrada importante de agua desde el embalse de Montejaque, se registra una disminución progresiva de la temperatura y de la conductividad eléctrica seguidas de un rápido aumento. En definitiva, se produce una importante dilución del agua del manantial, por la llegada de aguas más frías y menos mineralizadas.

No existe correlación entre la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial de la Cueva del Gato (Figura 5.31), lo cual podría indicar que el tiempo de permanencia del agua en el epikarst no es lo suficientemente largo como para incrementar su contenido en Cl^-

(evapotranspiración), ni sus contenidos en Ca^{2+} y Mg^{2+} por procesos de disolución de la roca carbonatada, lo que indicaría, a priori, una escasa influencia de la zona no saturada en la composición química general del agua del manantial.

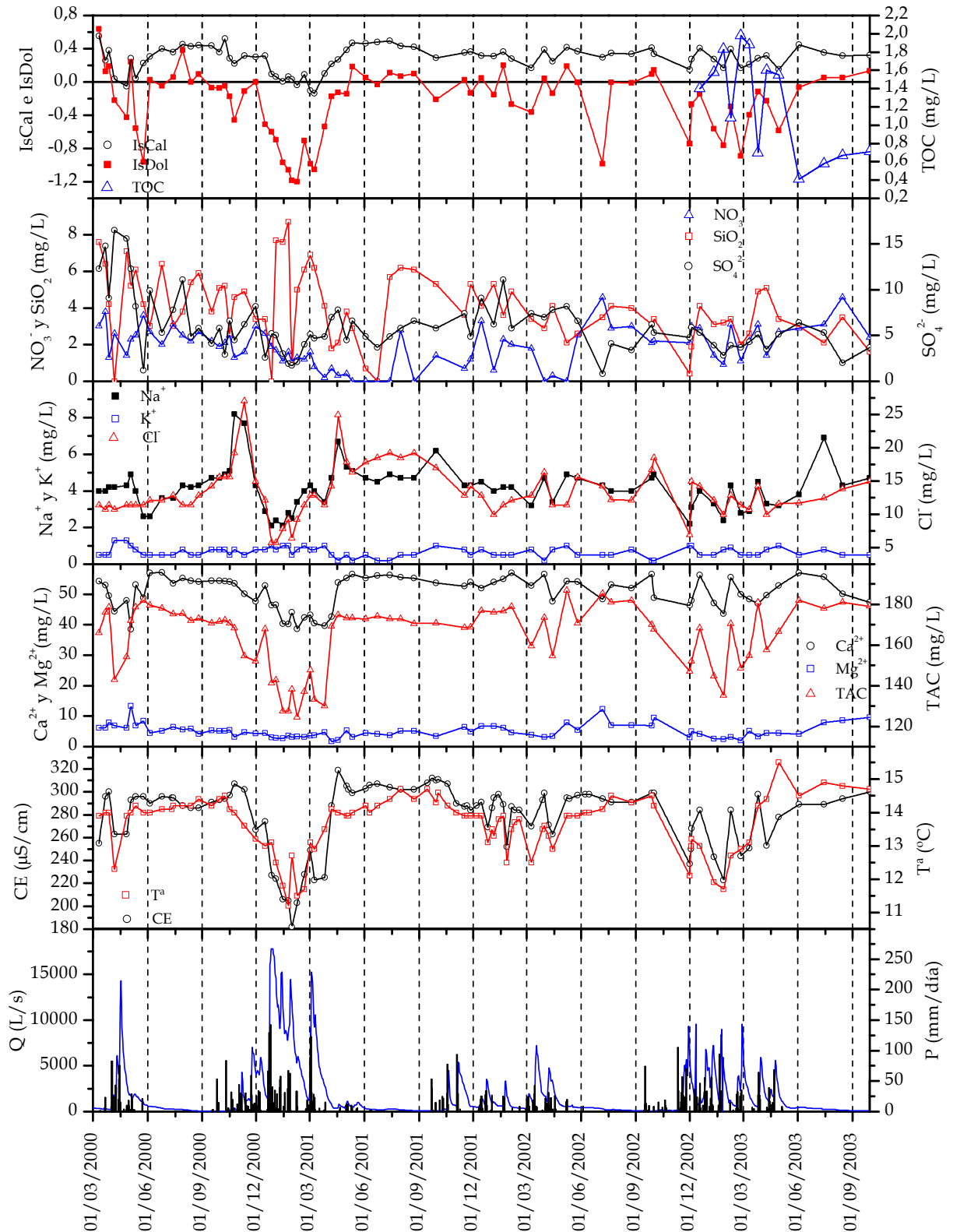


Figura 5.35. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de la Cueva del Gato durante el período de investigación.

Las crecidas de principios de año hidrológico en el manantial de la Cueva del Gato llevan asociado un aumento de la mineralización del agua, debido a que aumentan los contenidos en Cl^- y Na^+ , aunque disminuye la temperatura, la TAC y el contenido en Ca^{2+} . Esto pone de manifiesto la llegada de agua almacenada en la franja epikárstica de la zona no saturada, que ha estado concentrándose por evaporación durante el estiaje, y ahora es enfriada y empujada por las primeras lluvias del año hidrológico (“efecto pistón” de la zona no saturada). No obstante, resulta llamativo, que dicho efecto pistón de la zona no saturada sólo se detecte de manera clara para el año hidrológico 2000/2001, mientras que en la evolución hidroquímica de las aguas del manantial de Benaoján, se observa para todos los años hidrológicos.

Durante los estiajes, se detecta una tendencia ligeramente descendente de la conductividad eléctrica que va acompañada de la disminución en TAC y del contenido en Ca^{2+} (Figura 5.35), posiblemente debido a la precipitación de calcita, aunque se desconoce qué proceso explicaría la desgasificación (pérdida de CO_2) que provocaría la precipitación de calcita. Además, la tendencia ascendente de los contenidos en Cl^- y Na^+ , sobre todo durante los estiajes de los años hidrológicos 1999/2000 y 2000/2001, muestra la existencia de cierto grado de participación de la zona no saturada en los flujos hacia el manantial.

Durante las crecidas hidrodinámicas más importantes del manantial de la Cueva del Gato se detectan pequeñas disminuciones en la evolución general del contenido en SO_4^{2-} y aumento de los contenidos en SiO_2 y en K^+ (Figura 5.35), lo cual podría relacionarse con la entrada de sólidos en suspensión, de naturaleza arcillosa (flysch), como consecuencia de la infiltración del Río Gadares desde el embalse de Montejaque. Además, los mayores valores de TOC, durante el año hidrológico 2002/2003, se producen en épocas de recarga, por la aportación de carbono orgánico desde la cuenca del Río Gadares. Los mínimos relativos de TOC son progresivamente más bajos y más similares a los que se detectan en el manantial durante el estiaje (cuando no hay aportación del Río Gadares). Por último, cabe señalar que durante el agotamiento se insinúa una tendencia ligeramente ascendente del contenido en TOC (Figura 5.35).

En cuanto a los índices de saturación, las aguas de la Cueva del Gato están siempre sobresaturadas en calcita, aunque en época de recarga están próximas al equilibrio (Figura 5.35). El índice de saturación en dolomita está próximo al equilibrio excepto en época de recarga, cuando las aguas están claramente subsaturadas.

A partir de los datos hidroquímicos correspondientes a 73 muestras de agua tomadas en el manantial de la Cueva del Gato, se ha realizado un ACP (Figura 5.36), que explica un bajo porcentaje de la varianza total, ya que los dos ejes principales sólo dan cuenta del 55% de la varianza. La matriz de correlación refleja la importante correlación de la conductividad eléctrica con la temperatura, TAC y el contenido en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ (Figura 5.36).

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	0,7719	1										
pH	0,2228	0,3238	1									
TAC	0,7956	0,8991	0,2887	1								
Cl ⁻	0,4379	0,6695	0,3146	0,3764	1							
SO ₄ ²⁻	0,1473	0,2381	-0,0844	0,1636	-0,0076	1						
NO ₃ ⁻	0,2148	0,1359	-0,0151	0,2972	-0,1953	0,0483	1					
SiO ₂	-0,0694	-0,1275	-0,0895	-0,1255	-0,0734	0,0437	0,0394	1				
Ca ²⁺	0,6041	0,7287	0,3208	0,7536	0,4163	0,1309	0,0809	-0,1136	1			
Mg ²⁺	0,4563	0,4154	0,1245	0,5084	0,0279	0,2021	0,4771	0,0058	0,0358	1		
Na ⁺	0,4838	0,6507	0,1711	0,4295	0,7785	0,1683	-0,1171	0,0054	0,3655	0,1855	1	
K ⁺	-0,3679	-0,4598	-0,3820	-0,4692	-0,4798	0,1606	0,0873	0,1393	-0,4847	-0,0395	-0,2296	1

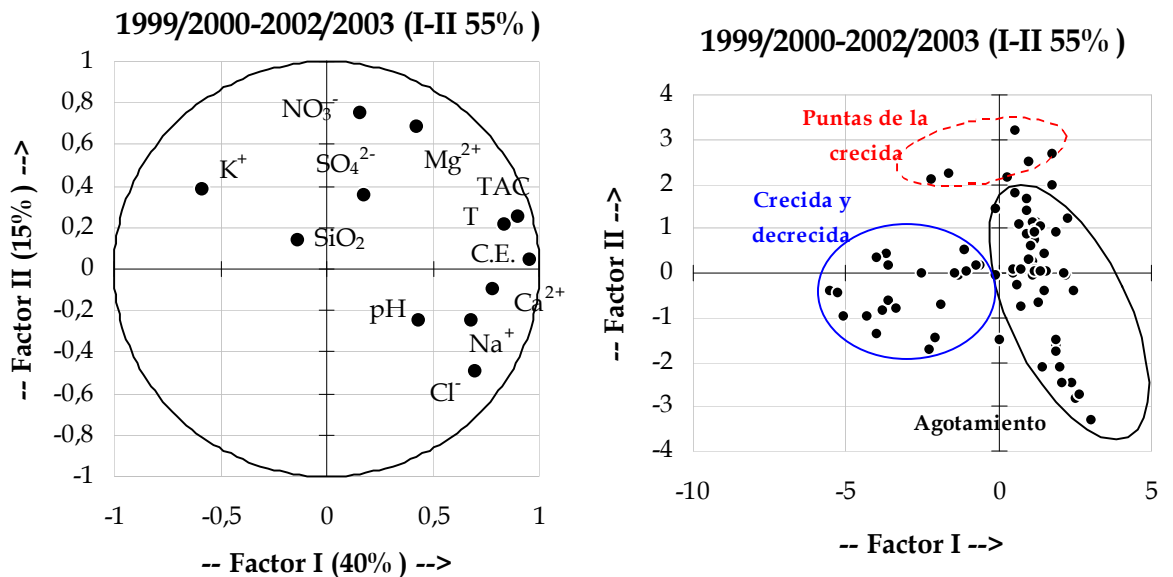


Figura 5.36. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de la Cueva del Gato durante todo el periodo de estudio (n= 74).

En el campo de las variables (Figura 5.36), el factor I representa la *mineralización* de las aguas, mientras que el factor II está caracterizado por la variable NO_3^- en su parte positiva.

En el campo de las observaciones pueden diferenciarse dos familias de aguas (Figura 5.36):

- Aguas de crecida y decrecida: presentan la menor mineralización y corresponden a los principales periodos de recarga, con influencia de las aguas infiltradas desde del embalse de Montejaque.
- Aguas de agotamiento: son las que presentan mayor mineralización y temperatura y corresponden a las situaciones de estiaje, cuando más bajo es el caudal del manantial.

5.3.3. Curvas de frecuencias

Las curvas de frecuencia correspondientes a la conductividad eléctrica, TAC, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y NO_3^- se muestran en la figura 5.37. La interpretación clásica de este tipo de gráficos (Bakalowicz, 1979; Mudry, 1987) es que las curvas plurimodales y con mayor rango de variación del parámetro hidroquímico considerado son características propias de acuíferos kársticos.

Como se observa en la figura 5.37, tanto la curva de la conductividad eléctrica como las curvas de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico (TAC, Ca^{2+} y Mg^{2+}), muestran una moda principal correspondiente a las aguas que se drenan durante la mayor parte del periodo de registro (agotamiento). No obstante, el rango de variación es diferente para cada manantial. Así, el manantial de la Cueva del Gato muestra un rango de variación mucho mayor, con modas secundarias correspondientes a las diluciones por la entrada de aguas desde el embalse de Montejaque. Las curvas de frecuencia de los contenidos en Cl^- y Na^+ , en ambos manantiales, muestran también un importante rango de variación, lo cual pone de manifiesto la influencia de los procesos de concentración por evaporación y, por tanto, de la franja epikárstica de la zona no saturada, en el funcionamiento del acuífero.

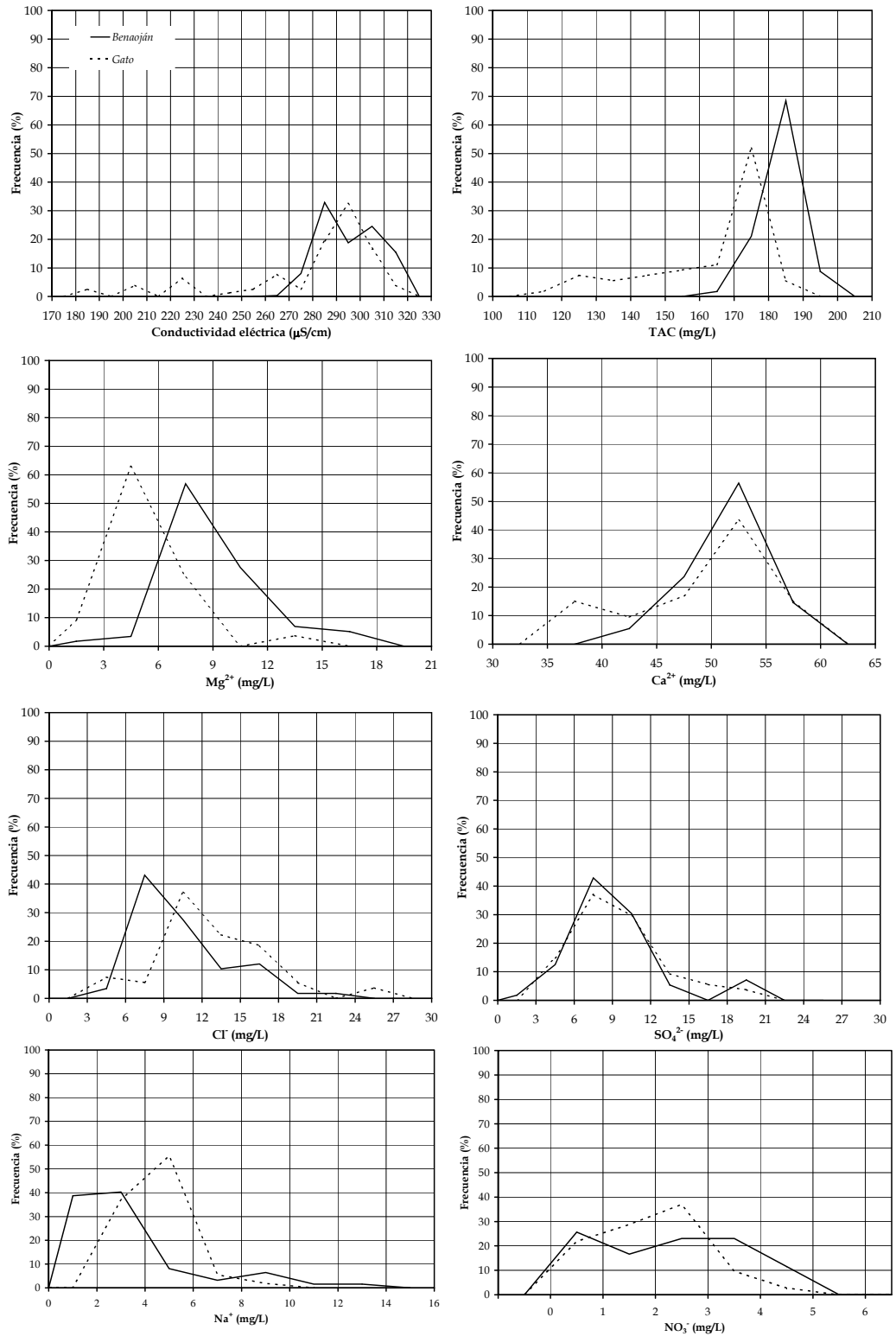


Figura 5.37. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato.

5.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

La evolución de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas del manantial de Benaoján y de las aguas de precipitación del área de recarga de Sierra de Lívar, no muestra tendencia alguna durante el período de estudio (Figura 5.38). El valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ del agua drenada por el manantial de Benaoján es de $-7,20\text{‰}$, mientras que la media aritmética es algo más baja ($-7,06\text{‰}$). En cambio, las muestras de agua de lluvia de la Sierra de Lívar para el mismo periodo, presentan un contenido medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ de $-6,34\text{‰}$ y una media aritmética mucho más baja $-5,71\text{‰}$. Esta diferencia entre los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ de entrada y salida, sugiere un empobrecimiento de este isótopo en el agua del manantial, debido a la evapotranspiración de las lluvias menos negativas (Margrita *et al.*, 1983 y Plata, 1994).

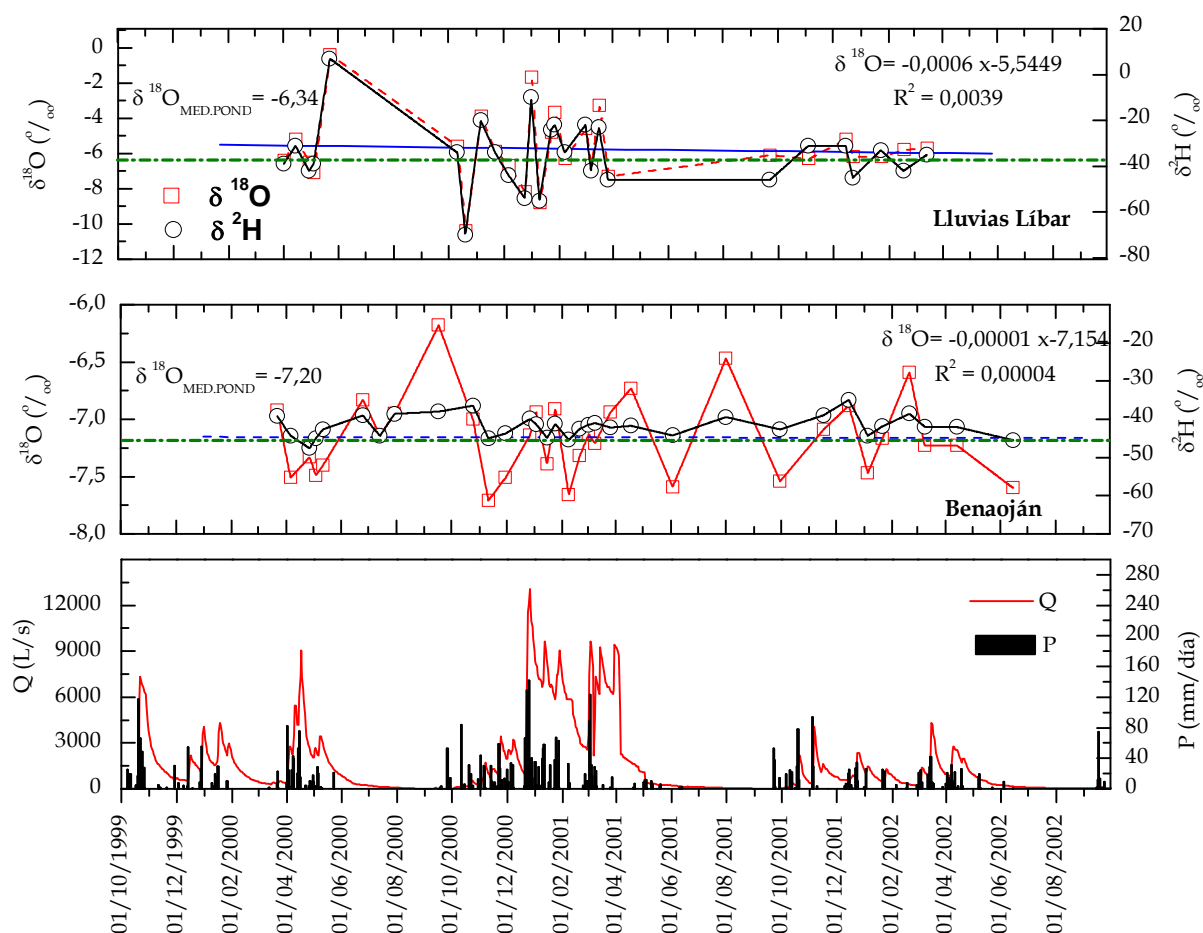


Figura 5.38. Evolución temporal de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de Lívar y del agua drenada por el manantial de Benaoján. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$.

Las curvas de frecuencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas drenadas por el manantial de Benaoján muestran un destacable rango de variación, con varias modas de escasa frecuencia (Figura 5.39). De acuerdo con la interpretación clásica de este tipo de curvas (Bakalowicz *et al.*, 1974; Bakalowicz, 1979; Andreo, 1997; Liñán, 2003), se confirma la existencia de un cierto desarrollo de la karstificación funcional del sector de acuífero drenado por este manantial, aunque dicha karstificación limitaría y condicionaría la cantidad de agua de lluvia que participa en la mezcla, durante los eventos de recarga, como se ha deducido anteriormente mediante el análisis de las respuestas hidrodinámica e hidroquímica.

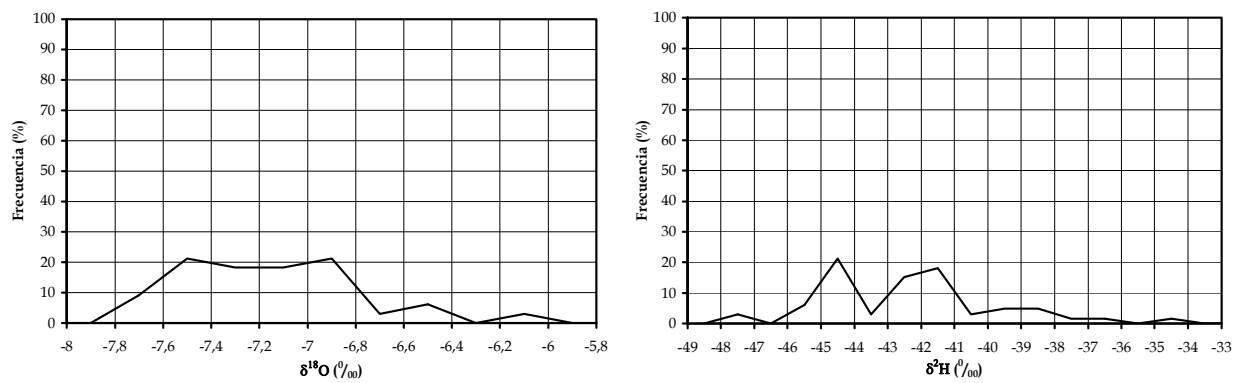


Figura 5.39. Curvas de frecuencia elaboradas a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial de Benaoján durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.

La evolución temporal de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ pone de manifiesto que, en la crecida hidrodinámica de mayor importancia del periodo de investigación, registrada entre Enero y Marzo de 2001, las variaciones del $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia se repiten simultáneamente en el manantial de Benaoján (Figura 5.38). Se trata de respuestas inmediatas del agua del manantial, lo cual permite corroborar la existencia de infiltración rápida del agua de lluvia durante las crecidas importantes, sin que se produzca una mezcla completa con el agua subterránea de la zona saturada, puesto que se conservan las variaciones relativas de la señal de entrada. Por tanto, hay una parte de la recarga que se drena rápidamente, lo cual demuestra la escasa capacidad reguladora del acuífero.

5.5. ENSAYO DE TRAZADORES EN AGUAS ALTAS (NOVIEMBRE DE 2002)

Como complemento al análisis hidrodinámico, hidroquímico e isotópico, durante noviembre de 2002, se realizó un ensayo multitrazador, cuyo objetivo esencial era conocer la conexión hidráulica entre los poljes y los principales puntos de descarga (manantiales), así como determinar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior del acuífero de la Sierra de Líbar. Los resultados obtenidos permiten corroborar y/o precisar algunas de las hipótesis sobre el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, deducido a partir de las metodologías aplicadas anteriormente. Para alcanzar estos objetivos, se ha llevado a cabo la determinación de parámetros como el tiempo de tránsito del trazador, la concentración máxima del mismo y la persistencia de su concentración en los puntos de descarga, parámetros éstos de relevancia cuando se investiga mediante trazadores (e.g., Antigüedad *et al.*, 1990; Käss, 1998; González-Yélamos, 1999).

Por otra parte, los resultados de este ensayo han permitido verificar las cartografías de vulnerabilidad a la contaminación aplicadas a la Sierra de Líbar (Longo *et al.*, 2001; Brechenmacher, 2002; Vías *et al.*, 2002; Andreo *et al.*, 2004a; Vías *et al.*, 2004), aspectos no recogidos en el marco de esta investigación, que han permitido catalogar a este acuífero como muy vulnerable (Jiménez, 2007), especialmente en los sumideros kársticos y en los campos de lapiaz desprovistos de suelo. El ensayo de trazadores realizado en el marco de esta tesis es el resultado de la colaboración científica de los grupos de hidrogeología de las universidades de Málaga, Karlsruhe (Alemania) y Neuchâtel (Suiza) y, como tal, ha sido objeto de publicaciones conjuntas (Andreo *et al.*, 2004c y 2006a).

5.5.1. Características del ensayo multitrazador

Para llevar a cabo este ensayo, simultáneamente al control hidrodinámico de los manantiales de la Cueva del Gato y de Benaoján y de la cantidad de precipitación sobre el acuífero (pluviómetro de la Cueva de la Pileta y pluviógrafo del Polje del Pozuelo), también se han controlado los caudales de los otros dos puntos de descarga natural, manantiales de Jimera de Líbar y del Charco del Moro

(Figura 5.3), a partir de aforos químicos con NaCl. En el caso del manantial del Charco del Moro, que emerge directamente en el cauce del Río Guadiaro, los valores de caudal se obtuvieron por un aforo diferencial aguas arriba y aguas abajo del punto de descarga.

Los trazadores utilizados para el ensayo han sido Uranina (Acid Yellow 73, CI: 45 350, CAS: 518-47-8), Sulforodamina-B (Acid Red 52, CI: 45 100, CAS: 3520-42-1) y Eosina (Acid Red 87, CI: 45 380, CAS: 17372-87-1). El criterio de elección de los trazadores se estableció, de manera que, los tres trazadores en las aguas a muestrear no presentaran problemas durante la detección y separación por el método analítico. Se inyectaron 3 kg de cada uno de los trazadores en los puntos de inyección, los cuales se seleccionaron teniendo en cuenta los conocimientos geomorfológicos, estructurales e hidrogeológicos disponibles. Así, la Uranina se vertió en uno de los sumideros donde se infiltra el arroyo que circula por el polje de los Llanos de Líbar (Figura 5.2), mientras que la Sulforodamina-B se inyectó en la Sima del Republicano, donde se infiltra el Arroyo de los Álamos. Los caudales estimados que se estaban infiltrando eran de 30 y 20 L/s, respectivamente. En cambio, la inyección de la Eosina se realizó de forma artificial (mediante vaciado de una cisterna de agua), al haber dejado de ser activo el sumidero kárstico del polje de Pozuelo (Figura 5.2) en el momento de la inyección.

El muestreo de agua en los manantiales más cercanos a los puntos de inyección (manantiales de Cueva del Gato, Benaoján y Jimera de Líbar) se inició antes de la primera inyección, para caracterizar de forma inequívoca la llegada y el tránsito de los trazadores por el acuífero. En la surgencia de Charco del Moro se empezó a muestrear un día después de la primera inyección.; en este caso fue necesario tomar muestras en el Río Guadiaro aguas arriba y aguas debajo de la surgencias para determinar la cantidad de trazador aportada por el manantial. La duración del muestreo, así como el total de muestras recogidas en cada una de las surgencia aparece detallado en la tabla 5.8.

	Inicio muestreo	Fin muestreo	Número de muestras
Gato	25-nov-02	18-dic-02	48
Benaoján	25-nov-02	18-dic-02	61
Jimera de Líbar	25-nov-02	9-dic-02	48
Charco del Moro (Aguas arriba)	26-nov-02	18-dic-02	52
Charco del Moro (Aguas abajo)	26-nov-02	18-dic-02	52

Tabla 5.8. Periodos de muestreo y número total de muestras recogidas en los manantiales controlados durante el ensayo de trazador.

5.5.2. Resultados del ensayo

El análisis de los resultados obtenidos debe de tener en cuenta que la inyección de los trazadores en la Sierra de Líbar se llevó a cabo en un contexto hidrodinámico general de crecida en los manantiales (Figura 5.40). El conjunto de los resultados obtenidos a partir del análisis de los diferentes trazadores en las muestras de agua de los manantiales se resumen en la tabla 5.9 y en la figura 5.41.

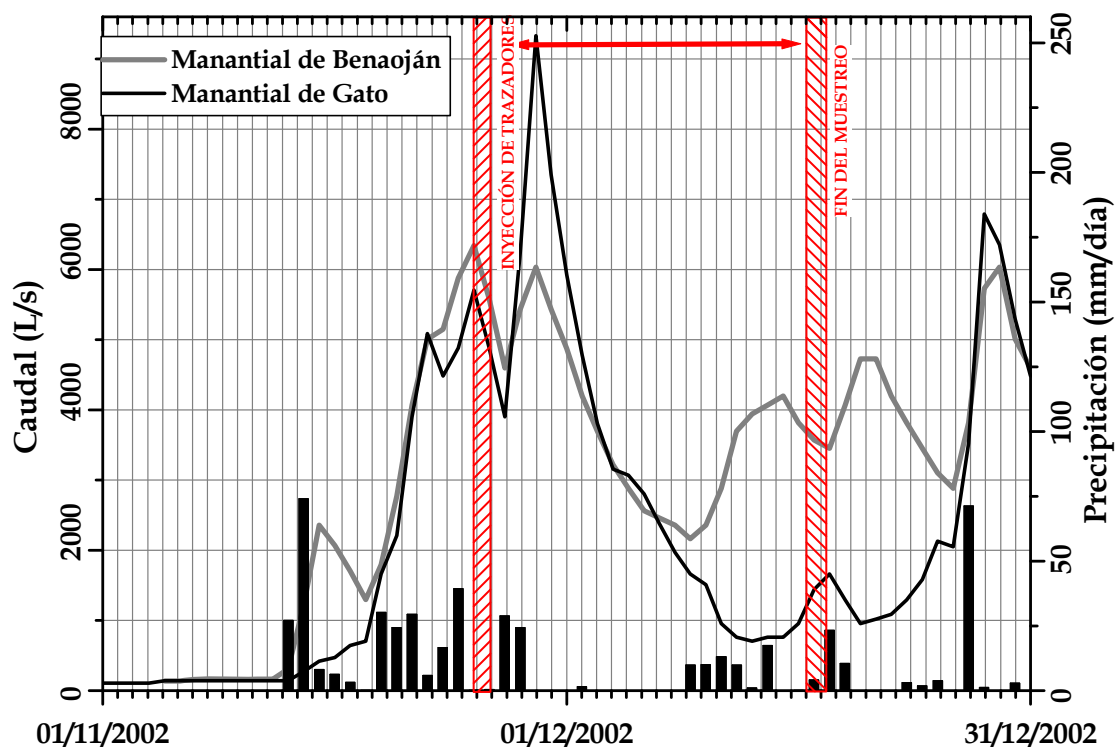


Figura 5.40. Hidrogramas de los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján e hietograma del pluviógrafo situado en Llanos del Pozuelo, durante el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 31 de diciembre de 2002.

En el manantial de la Cueva del Gato, solamente se detectó Eosina, con una velocidad de flujo dominante de 90 m/h (Tabla 5.9, Figuras 5.41 y 5.42). En cambio, en el manantial de Benaoján se registraron los trazadores Eosina y Uranina, con velocidades de flujo dominante de 53 y 36 m/h, respectivamente.

3 Kg Eosina [EOS]. Inyección en los Llanos del Pozuelo	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	5,2	3,8	4,5	18,5	km
Tiempo de primera detección	58	72	-	-	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	58	72	-	-	h
Máxima concentración	0,81	0,65	-	-	µg/L
Mayor velocidad de flujo	90	53	-	-	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	90	53	-	-	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	10,2	2,7	-	-	%

3 Kg Uranina [URN]. Inyección en los Llanos de Líbar	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	11,5	9,5	5,0	12,2	km
Tiempo de primera detección	-	223	65	-	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	-	262	65	-	h
Máxima concentración	-	0,73	22,88	-	µg/L
Mayor velocidad de flujo	-	43	77	-	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	-	36	77	-	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	-	14,1	23,8	-	%

3 Kg Sulforodamina B [SRB]. Inyección en la Sima del Republicano	Manantiales				Unidad
	Cueva del Gato	Benaoján	Jimera de Líbar	Charco del Moro	
Distancia al punto de inyección	10,5	9,0	6,0	14,5	km
Tiempo de primera detección	-	-	-	122	h
Tiempo hasta conc. max (pico)	-	-	-	134	h
Máxima concentración	-	-	-	0,85	µg/L
Mayor velocidad de flujo	-	-	-	119	m/h
Velocidad flujo dominante (pico)	-	-	-	108	m/h
Caudal medio manantiales	4,40	3,45	0,70	9,3*	m ³ /s
Tasa de recuperación	-	-	-	73,7**	%

Tabla 5.9. Principales parámetros hidráulicos deducidos del ensayo de trazador. Leyenda, *:Caudal aproximado, **: Tasa de recuperación aproximada.

En la surgencia del manantial de Jimera de Líbar sólo se ha detectado Uranina, con una velocidad de flujo dominante de 77 m/h. Las muestras recogidas en el Río Guadiaro aguas arriba del manantial de Charco del Moro, contenían Uranina y Eosina, debida al aporte de los manantiales de Cueva del Gato, Benaoján

y Jimera de Líbar. Aguas abajo del punto de surgencia, las concentraciones de ambos trazadores pueden ser congruentes con la dilución provocada por un caudal de descarga superior a $9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 5.9), por lo que no se ha podido constatar que la Uranina y la Eosina hayan salido por el manantial de Charco del Moro. Sin embargo, la Sulforodamina B sólo se detectó aguas abajo, lo que indica que la salida se ha producido por este manantial. Las velocidades de llegada del trazador a este manantial han sido las mayores del ensayo (velocidad de flujo dominante 108 m/h).

Por otra parte, la concentración de Eosina que se determinó aguas arriba del manantial del Charco del Moro fue mayor que la analizada en las aguas del manantial de Benaoján o de Cueva del Gato, hecho que sólo puede ser debido a una descarga no controlada hacia el Río Guadiaro, posiblemente aguas arriba del manantial de Jimera de Líbar, en el cual no se reconoció Eosina (Figura 5.41).

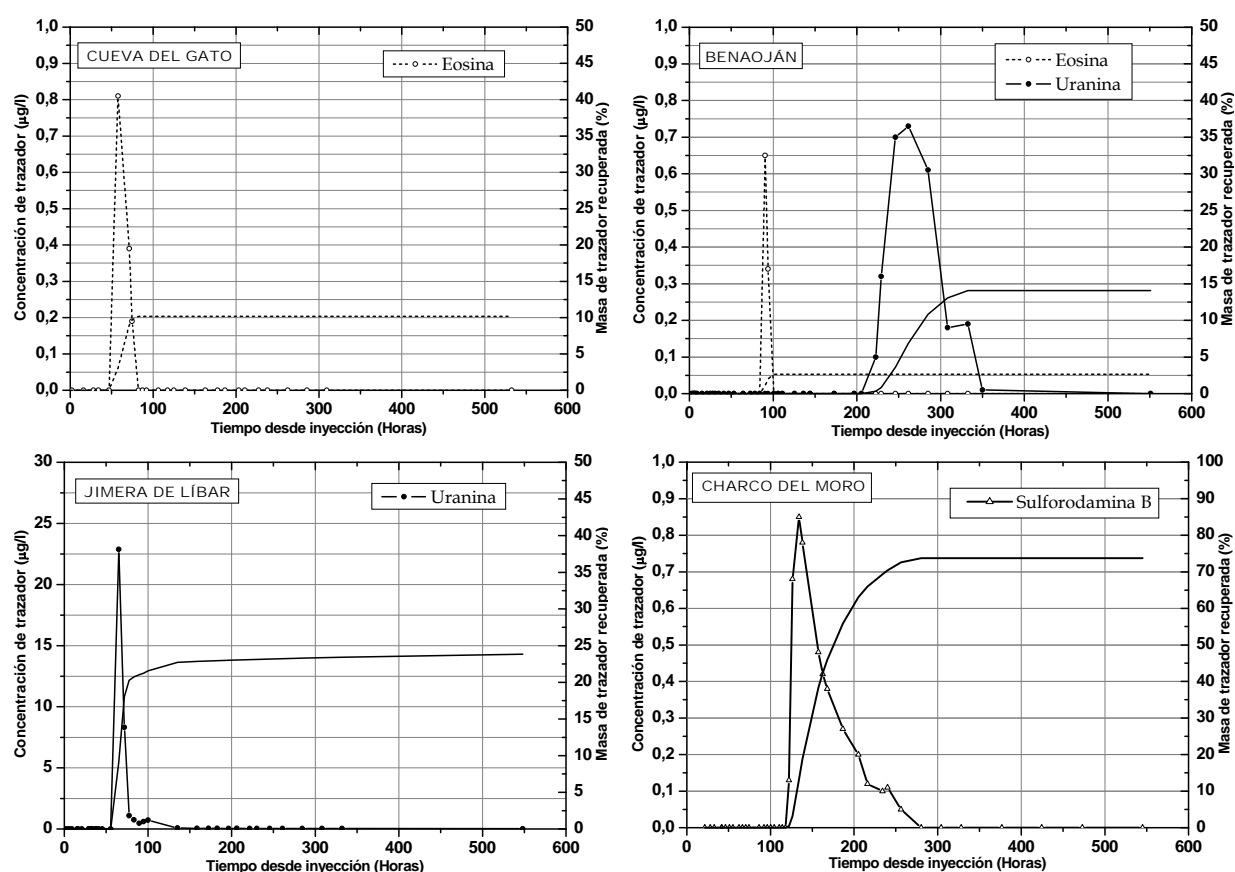


Figura 5.41. Curvas de concentración y de masa recuperada de trazador en los principales manantiales controlados durante el ensayo.

La tasa de recuperación del trazador ha sido variable, entre un 13% para la Eosina y un 74% para la Sulforodamina B. Este último dato es aproximado dado el carácter estimativo del caudal medido mediante aforo químico en el manantial de Charco del Moro (Figura 5.41).

5.5.3. Interpretación hidrodinámica

El ensayo de trazadores ha permitido constatar que, durante una situación de aguas altas o de crecida hidrodinámica, la mayor parte de los afloramientos carbonáticos de la Sierra de Líbar constituyen el área de recarga de los manantiales que existen en su borde este y que vierten sus aguas al cauce del Río Guadiaro (Figura 5.43). Así, a los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato llega agua del tercio más septentrional del acuífero. El sector central de la sierra se drena, principalmente, por el manantial de Jimera de Líbar, aunque también hay flujos (de menor cuantía) hacia el de Benaoján. Por su parte, la surgencia de Charco del Moro es el principal punto de descarga del agua que se infiltra en la Sima del Republicano (Arroyo de los Álamos) y de los afloramientos carbonatados del sector meridional del acuífero. Las altas velocidades de flujo obtenidas corroboran el funcionamiento kárstico del acuífero de la Sierra de Líbar.

El flujo de agua subterránea hacia los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato puede estar condicionado por la ligera inmersión hacia el NE de los ejes de los pliegues que constituyen la estructura de la sierra; es decir, la disposición estructural de los estratos parece haber condicionado la karstificación y el flujo subterráneo actual. No obstante, también deben haber jugado un papel importante, las fracturas NW-SE. El manantial de la Cueva del Gato, situado a la cota 462 m, parece ser un punto de descarga del sistema relativamente más antiguo que el manantial de Benaoján (450 m).

Las curvas de trazador registradas en los manantiales de la Cueva del Gato y Benaoján, muestran, en general, distribuciones propias de acuíferos kársticos, con ascensos y descensos muy acusados de la curva de respuesta (Figura 5.41), lo que indica un tránsito rápido del flujo proveniente de las áreas de inyección (áreas

de recarga). El hecho de que la Eosina llegara antes al manantial de la Cueva del Gato que al de Benaoján, que se detectara en mayor concentración y durante más tiempo y que presente tasas de recuperación cinco veces superior, a pesar de que el primero está más lejos del punto de inyección (Figura 5.42), implica que la karstificación funcional está más desarrollada hacia la Cueva del Gato, lo cual está en consonancia con la interpretación efectuada previamente a partir de otros métodos hidrogeológicos.

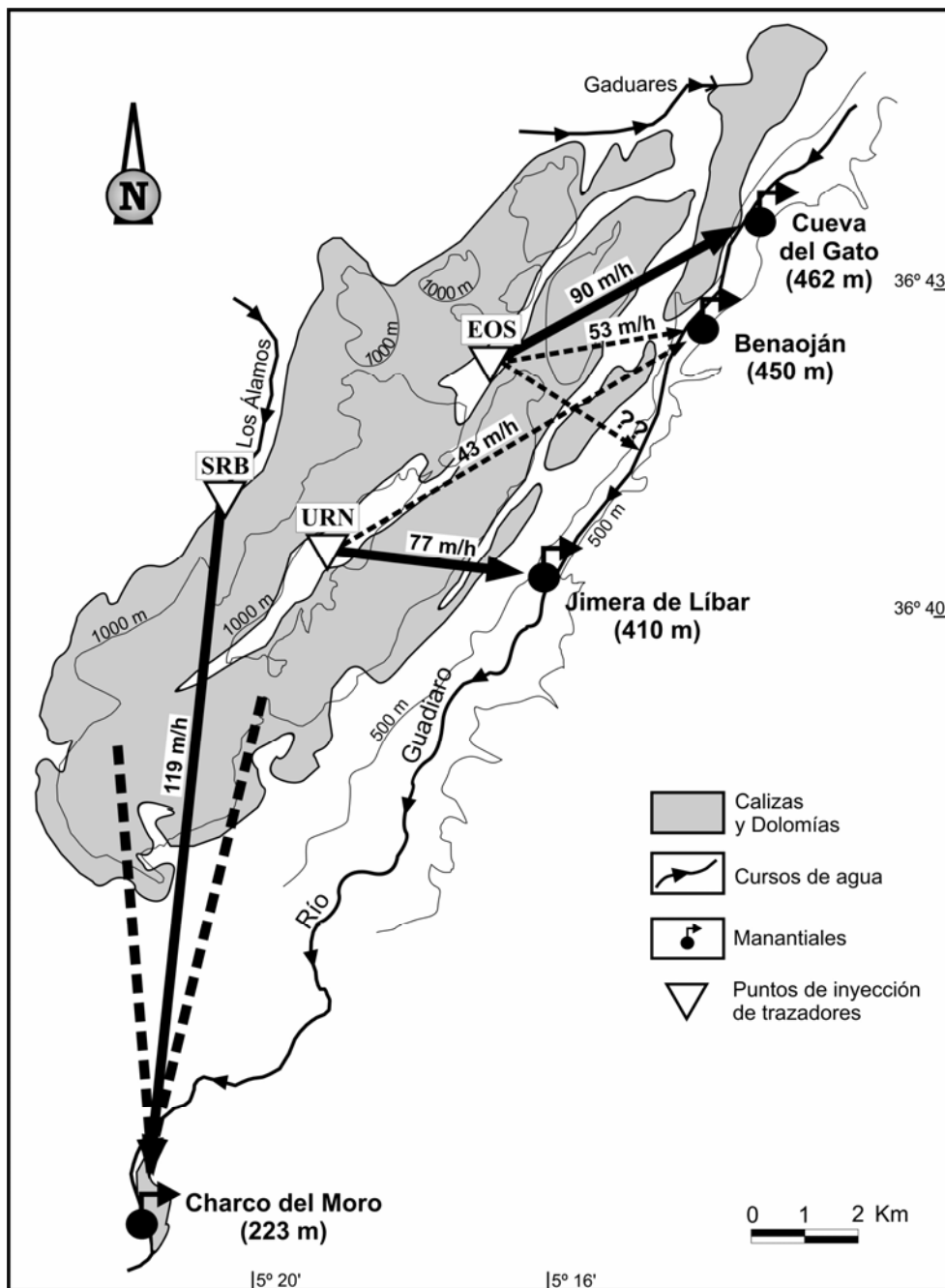


Figura 5.42. Conexiones hidrogeológicas entre los puntos de inyección (EOS: Eosina, URN: Uranina y SRB: Sulfurodamina B) y los puntos de control, deducidas del ensayo de trazadores.

No se ha recuperado el 100% de los trazadores inyectados, lo cual puede ser debido a la existencia de descargas no controladas hacia el Río Guadiaro, de las que no se conoce el caudal. La masa de trazador drenada por éstas, puede estar afectada también, de una potencial dilución y/o retención de los trazadores en el medio. Concretamente, la baja recuperación de la Eosina ha debido estar relacionada con la inyección artificial, realizada cuando los sumideros kársticos ya no estaban activos de modo natural y, posiblemente, el trazador quedó retenido en el medio y se drenó con posterioridad al periodo de muestreo (en otras crecidas) por los manantiales de Cueva del Gato y Benaoján. Esta hipótesis apoyaría gran parte de las afirmaciones enunciadas durante el análisis hidrodinámico respecto a que el sector drenado por estas dos surgencias es característico de un sistema kárstico con una compleja organización de drenaje.

6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE LA SIERRA DE LAS NIEVES

6.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

El acuífero de la Sierra de las Nieves (Figura 6.1), con una superficie aproximada de 109 km², constituye el extremo occidental de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves, que se ubica en el interior de un enclave natural declarado Parque Natural y Reserva de la Biosfera de la UNESCO. Este sistema, definido por Liñán (2003), 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), él más alto de la provincia de Málaga.

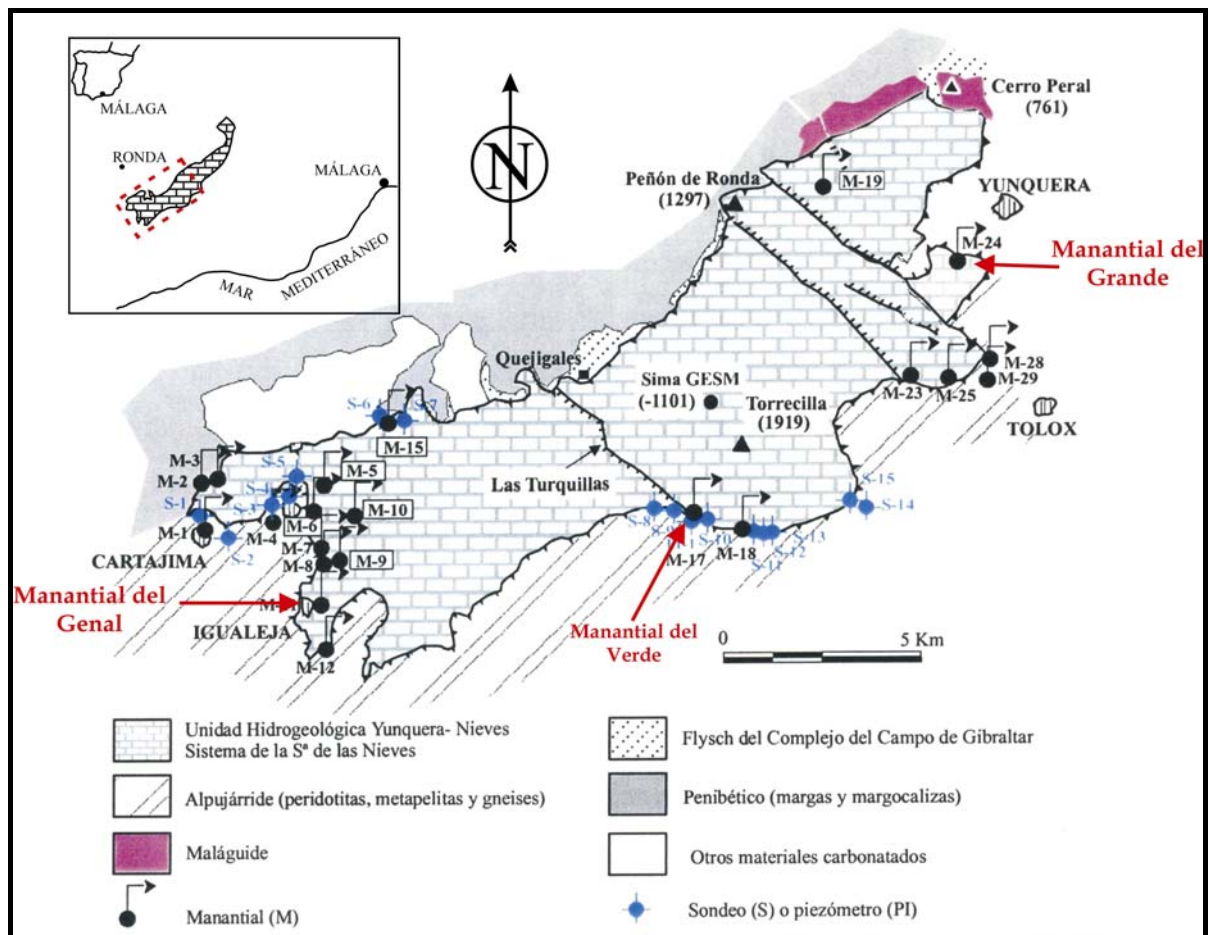


Figura 6.1. El sistema de la Sierra de las Nieves (tomada de Liñán, 2003)

Desde el punto de vista geológico, el acuífero está formado por materiales dolomíticos y calizos de edad triásica y liásica (Figura 6.2), pertenecientes a la Unidad de las Nieves (Dürr, 1967 y Martín Algarra, 1987), cuya potencia supera

1200 m en algunos sectores. Dicha Unidad está situada en el sector occidental de la Cordillera Bética, en el frente de la Zona Interna. La estructura geológica está constituida por un sinclinal tumbado vergente al NW (Figura 6.3).

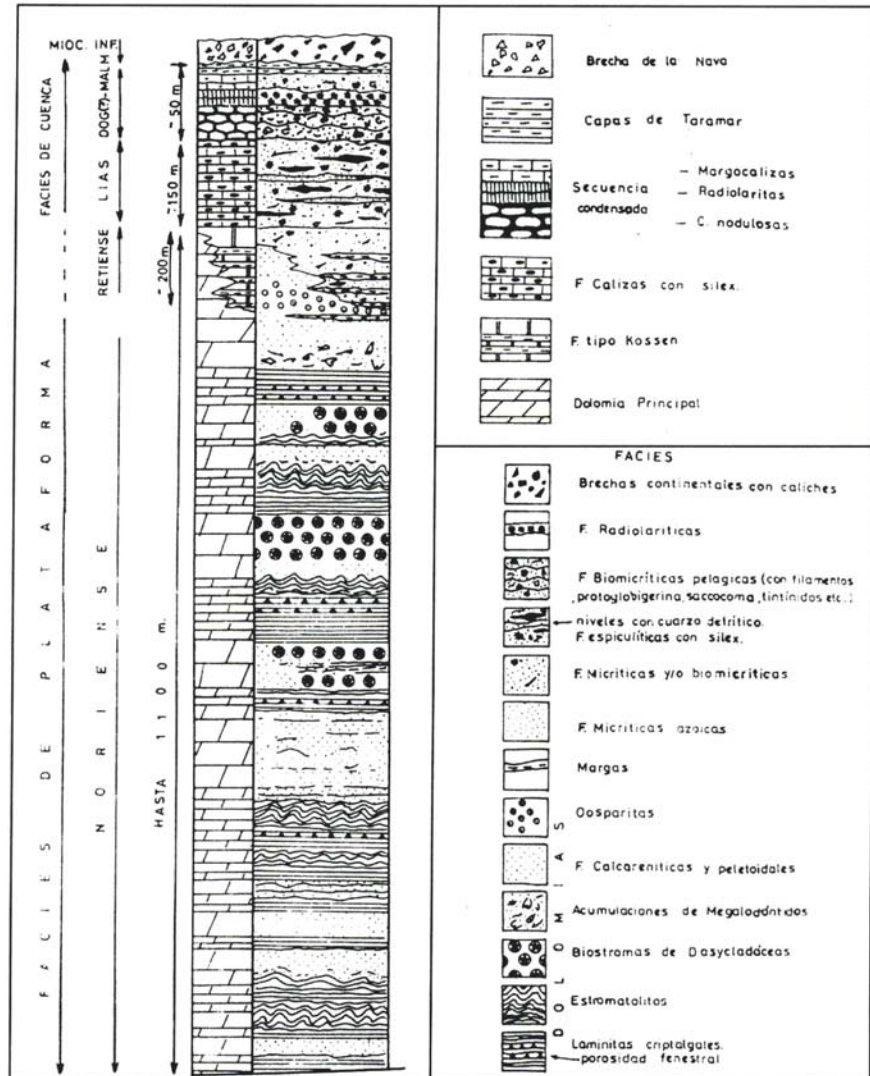


Figura 6.2. Serie estratigráfica de la Unidad de las Nieves (tomada de Martín Algarra, 1987).

El sistema está limitado, al Norte, por el contacto de cabalgamiento de la Unidad de las Nieves sobre los materiales del Flysch del Campo de Gibraltar, que constituyen el sustrato del acuífero carbonático (Figura 6.3). Al Sur, queda delimitado por el cabalgamiento que pone en contacto los materiales acuíferos con materiales alpujárrides de baja permeabilidad (fundamentalmente peridotitas, gneises y metapelitas de la Unidad de los Reales). Al Este, por el sistema de fallas de dirección N130E, que discurren entre las poblaciones de Tolox y Yunquera (Figura 6.3). Al Oeste, la unidad tectónica de las Nieves se estrecha a la altura de la

población de Cartajima, donde los materiales acuíferos pierden continuidad por la existencia de una serie de fracturas transversales y por el cabalgamiento de materiales alpujárrides de baja permeabilidad (Pistre *et al.*, 2002).

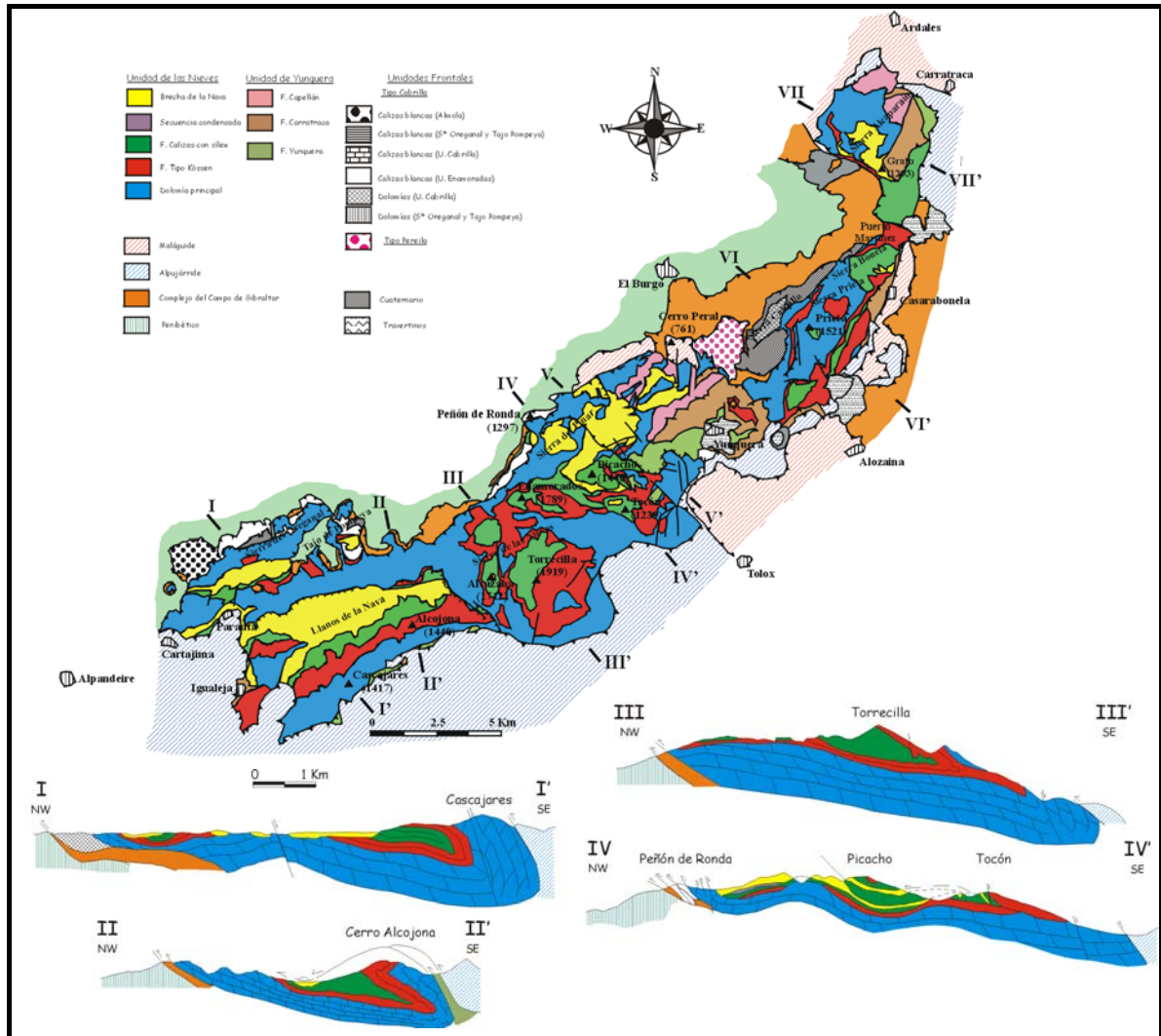


Figura 6.3. Mapa y cortes geológicos de la Sierra de las Nieves (tomada de Liñán, 2003, original de Martín-Algarra, 1987).

En el macizo de la Sierra de las Nieves pueden encontrarse magníficos ejemplos de formas kársticas, tanto exokársticas como endokársticas. Además, existen formas ligadas a la esorrentía superficial, formas periglaciales y formas poligenéticas (Delannoy, 1987; Delannoy y Guendon, 1987). Las formas exokársticas se localizan mayoritariamente en el sector central y meridional del macizo. Las más características son las dolinas que se ubican al NW del vértice Torrecilla (Figura 6.3), el semipolje de los Llanos de la Nava y los campos de lapiaz repartidos por toda la Sierra. Las principales formas endokársticas

corresponden a sumideros y cavidades. Los primeros suelen aparecer en dolinas de dimensiones variables, sobre todo en el sector oriental. Las cavidades, más de 100 inventariadas en toda la sierra, presentan un trazado esencialmente vertical, como el caso de la sima G.E.S.M. (Figura 6.1), la más profunda del Sur de la península Ibérica, con más de 1.100 m de desnivel explorados (Sociedad Excursionista de Málaga, 1990) y la sima del Aire, la segunda cavidad de Andalucía en desnivel, con 650 m (Ferrer, 2003).

La recarga del acuífero se produce por infiltración del agua de lluvia y, ocasionalmente, de fusión nival. Las formas kársticas antes citadas permiten que esta infiltración pueda producirse rápidamente, pues favorecen la conexión directa entre la superficie y la zona saturada. La descarga se realiza, principalmente, a través de manantiales que constituyen la cabecera de los ríos Grande, Verde y Genal. La surgencia del Río Grande emerge en el extremo NE del sistema (Figura 6.1), ligada a una importante fractura plurikilométrica de dirección NW-SE y constituye uno de los puntos de descarga a cota más baja del sistema (450 m s.n.m.). El manantial del Río Verde (675 m s.n.m.) se localiza en el borde meridional, en el contacto con las peridotitas alpujárrides y está ligado a otra importante fractura de dirección NW-SE, la falla de Las Turquillas (Figura 6.1). El nacimiento del Río Genal se sitúa en el extremo SW del sistema, a una cota de 700 m s.n.m. (Figura 6.1.).

El manantial del Río Grande drena aguas con valores más negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ que las surgencias de los Ríos Genal y Verde, debido a la mayor altitud de su área de recarga, en la que se encuentra el pico Torrecilla (Liñán, 2003; Andreo *et al.*, 2004). Los ensayos de trazador realizados en la sima G.E.S.M. (Durán y López Martínez, 1992) y en la sima del Aire (Andreo *et al.*, 2005) corroboran esta hipótesis, ya que la fluoresceína y eosina vertida en los sifones finales de las simas G.E.S.M. y del Aire, respectivamente, no se detectaron en el manantial del Río Verde y sí en el manantial del Río Grande. Por tanto, el sector oriental del acuífero, desde La falla de la Turquillas hacia el Este, se drena por el manantial del Río Grande (Figura 6.1). El sector occidental se drena por los manantiales del Río Verde y Río Genal.

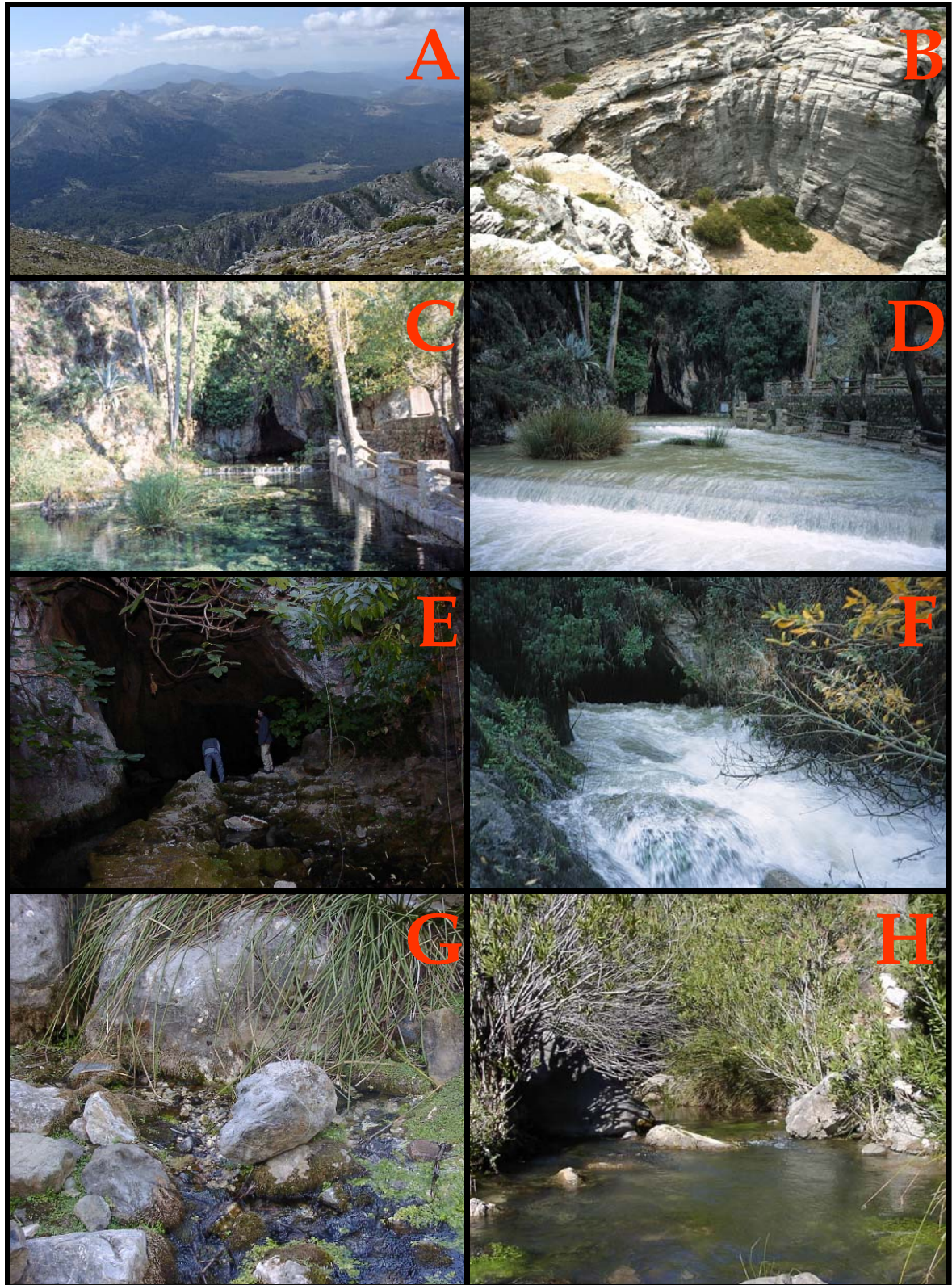


Lámina 6.1. A- Panorámica del Polje de la Nava, B- Sima, C- Manantial del Río Genal (aguas bajas), D- Manantial del Río Genal (aguas altas), E- Manantial del Río Grande (aguas bajas), F- Manantial del Río Grande (aguas altas), G- Manantial del Río Verde (aguas bajas), H- Manantial del Río Verde (aguas altas).

6.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

Para llevar a cabo la caracterización de la respuesta hidrodinámica del acuífero de la Sierra de las Nieves se han analizado las series de caudales medios diarios de los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande.

La serie del manantial del Río Genal comprende desde Noviembre de 1999 hasta Septiembre de 2003. Los valores de caudal medio diario se han obtenido a partir de la aplicación de la curva de gastos calculada por Liñán (2003) a los datos de altura media diaria de la lámina de agua en un limnógrafo instalado en la surgencia. La figura 6.4 muestra la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos estudiada, cuyo caudal medio ha sido 344 L/s.

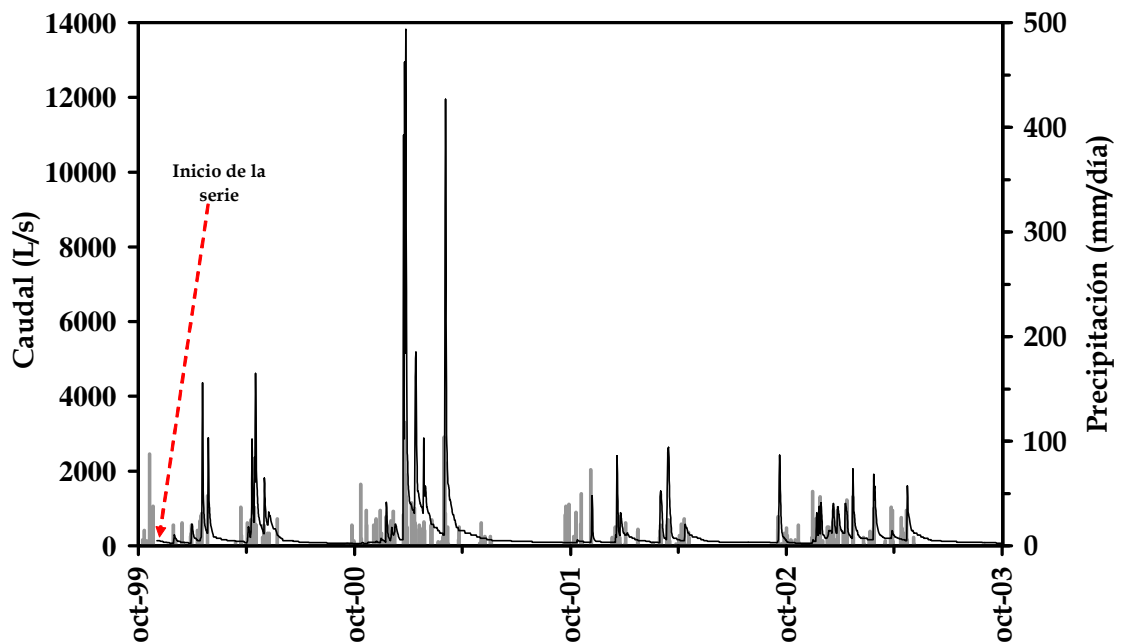


Figura 6.4. Hidrograma del manantial del Río Genal entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.

La serie del manantial del Río Verde comprende desde Octubre de 1999 hasta Septiembre de 2003 (Figura 6.5). Los valores de caudal se han calculado mediante la aplicación de la curva de gastos de Liñán (2003) a los datos de altura media diaria de la lámina de agua registrados en el limnógrafo de una estación de aforos que se encuentra 300 metros aguas abajo de la surgencia. La evolución temporal de los caudales muestra importantes variaciones de caudal para toda la serie de datos estudiada, cuyo caudal medio ha sido 344 L/s. No obstante, entre la

surgencia y la estación de aforos existen varios arroyos, de pequeña cuenca vertiente, que vierten sus aguas al Río Verde durante períodos de intensas y elevadas precipitaciones. Durante estos periodos, una pequeña parte del caudal aforado en la estación de aforos corresponde a aguas de escorrentía superficial.

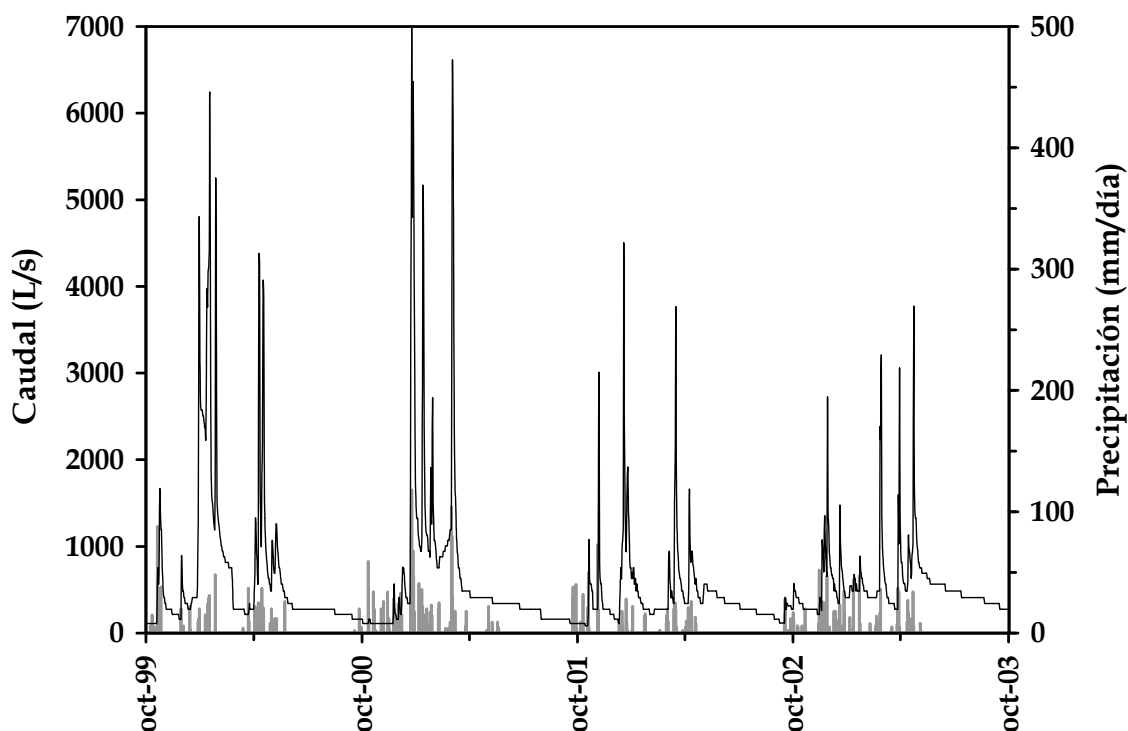


Figura 6.5. Hidrograma del manantial del Río Verde entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandei.

Del manantial del Río Grande no se dispone de datos de caudal, sólo se han podido recopilar los datos del caudal circulante por la estación de aforos nº 35 (Las Millanas) del Distrito Hidrográfico Mediterráneo de la Agencia Andaluza del Agua (AAA). Dicha estación se encuentra en el cauce del Río Grande, 5 kilómetros aguas abajo del manantial. El caudal medido en la estación de aforos incluye, por un lado, las aguas subterráneas del manantial del Río Grande y de otros acuíferos (manantial del Río Jorox y manantial del Plano) y, por otro lado, agua de escorrentía superficial de la cuenca vertiente. La serie de datos analizada comprende desde Octubre de 1999 hasta Septiembre de 2003. El caudal medio registrado en la estación durante este periodo ha sido de 1003 L/s. La figura 6.6 muestra la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos estudiada con la misma escala que se ha representado la surgencia del Río Genal.

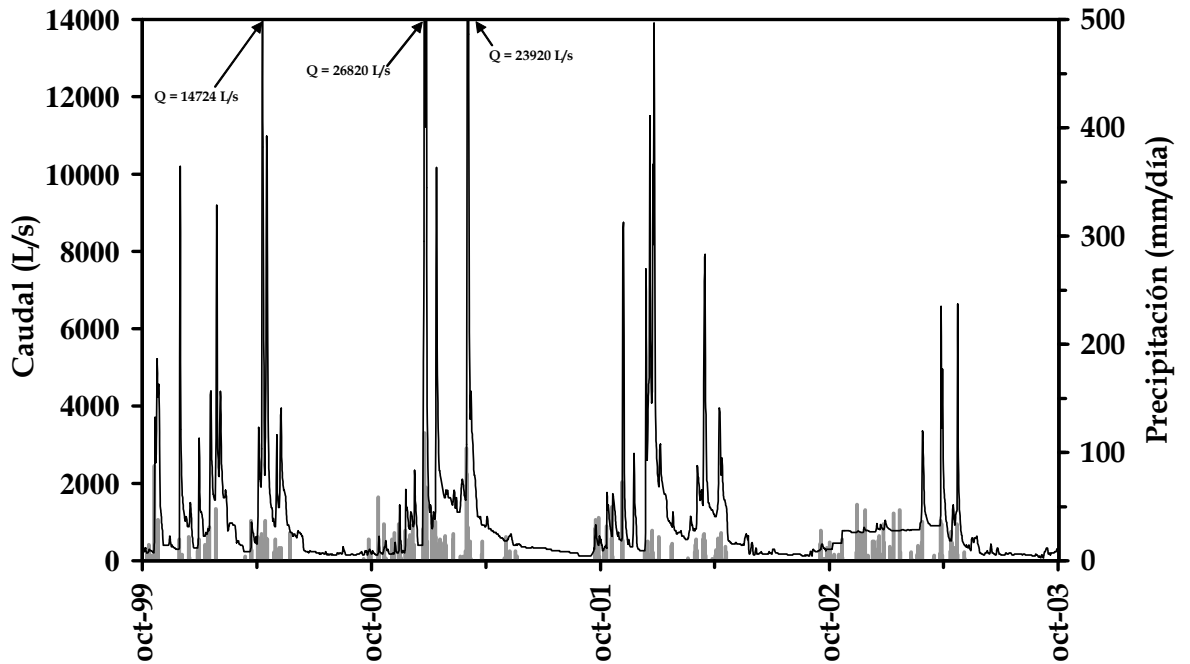


Figura 6.6. Hidrograma del Río Grande en la estación de Las Millanas (AAA) entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpendeire.

6.2.1. Análisis del hidrograma

6.2.1.1. Manantial del Río Genal

El hidrograma del manantial del Río Genal muestra varias crecidas por cada año hidrológico, en respuesta a los diferentes eventos pluviométricos (Figura 6.7). Los aumentos de caudal son muy rápidos y, en la mayoría de los casos, proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones. Las diferencias de caudal entre el final del agotamiento y la punta de la crecida suelen ser importantes. Los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria).

Los hidrogramas anuales se caracterizan por tiempos de base y de crecida del orden de 15 y 5 días (Figura 6.7), respectivamente, excepto para el hidrograma del año hidrológico 2000/2001. Las crecidas de comienzos de año hidrológico tienen lugar cuando se han producido varios episodios lluviosos de cierta duración e importancia. Son necesarios valores acumulados de precipitación de más de 200 mm para que se observen incrementos de caudal importantes.

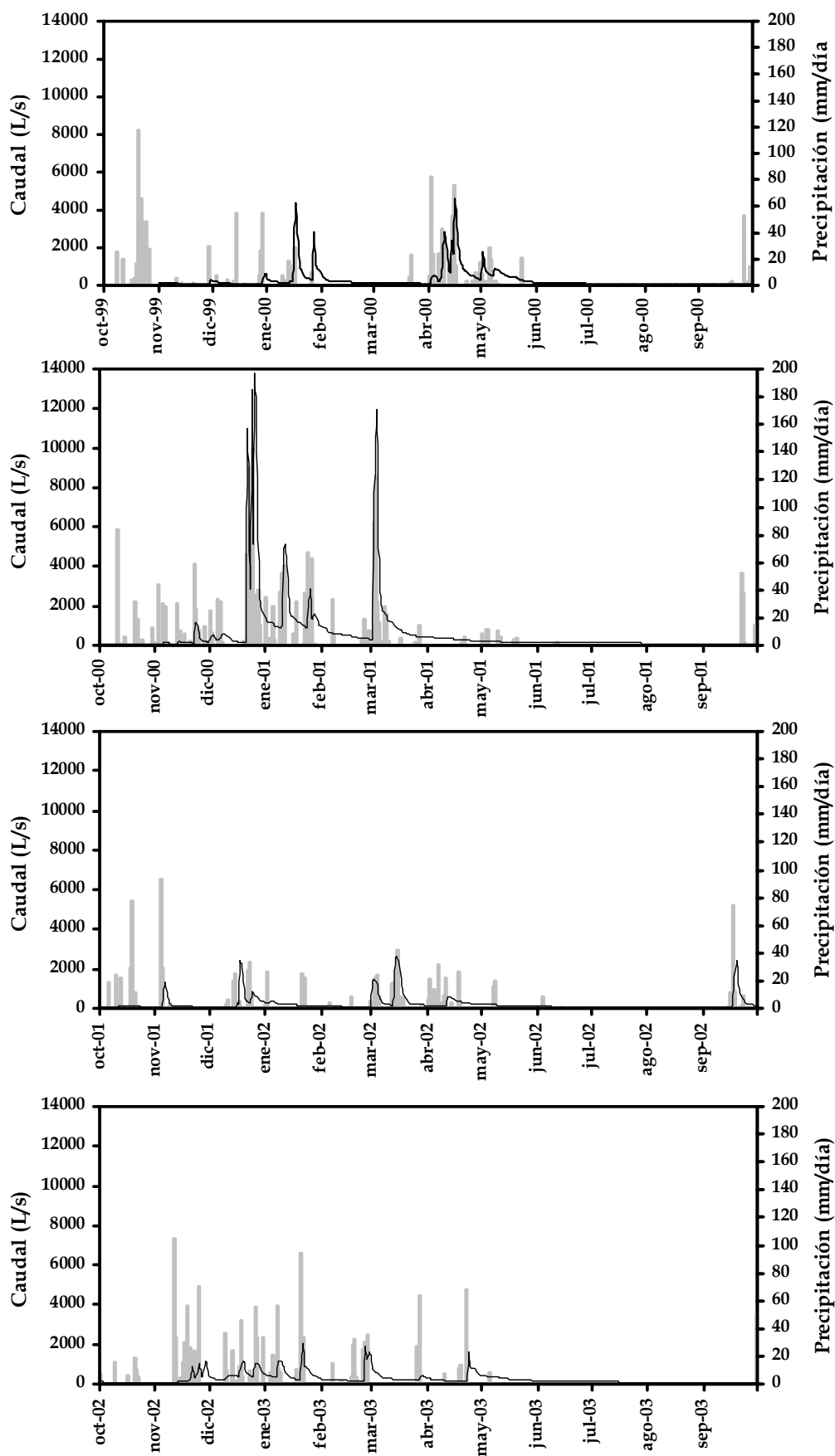


Figura 6.7. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial del Río Genal para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.

Las crecidas más importantes son las invernales. En el año hidrológico 2000/2001 y como respuesta a las abundantes precipitaciones de Diciembre de 2000 (390 mm) se produjo la crecida más significativa de todo el período de estudio. Así, el hidrograma del año hidrológico 2000/2001 muestra aumentos significativos y continuados de caudal (Figura 6.7). En este hidrograma es difícil diferenciar los tiempos de base y crecida, ya que el manantial se encuentra en condiciones de crecida, prácticamente, durante todo el tiempo.

En la tabla 6.1 se indican los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años hidrológicos considerados en el manantial del Río Genal. El valor obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 86. Si se comparan los valores de la relación Q_{max} / Q_{min} para cada año hidrológico con los valores de precipitación anual, se pone de manifiesto que en el año hidrológico 2000/2001 la precipitación es aproximadamente del doble que el resto de años hidrológicos considerados, mientras que el valor de la relación Q_{max} / Q_{min} para este año hidrológico es hasta 7 veces superior al obtenido para los otros tres años.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	<i>Precipitación</i>
1999/2000	4615	58	80	875
2000/2001	13812	58	238	1412
2001/2002	2635	83	32	676
2002/2003	2049	69	30	922
<i>media</i>	<i>5778</i>	<i>67</i>		<i>971</i>

$\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$
86

Tabla 6.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Genal y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Alpandei re para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).

6.2.1.2. Manantial del Río Verde

En el hidrograma del manantial del Río Verde también se observan varias crecidas por cada año hidrológico (Figura 6.8), que reflejan una clara respuesta hidrodinámica a los eventos pluviométricos. No obstante, en esta surgencia también se observan diferencias entre las crecidas de principios de año

hidrológico, de menor importancia en cuanto a los valores máximos de caudal, y el resto de crecidas. Ello se debe a que las lluvias acaecidas durante dicho periodo recargan el epikarst y la zona no saturada. Así, durante las crecidas invernales y primaverales, con precipitaciones de menor cuantía, se registran importantes incrementos de caudal.

Los hidrogramas anuales con mayores diferencias de caudal muestran importantes diferencias en cuanto a los tiempos de base y de crecida (Figura 6.8). Así, la mayor parte de los hidrogramas presentan un tiempo de base del orden de los 20-25 días y de crecida de aproximadamente 5-10 días. Sin embargo, para las crecidas de Febrero-Marzo de 2001 y Diciembre de 2001, los tiempos de crecida y base aumentan considerablemente, con valores aproximados de 25 y 55 días, respectivamente. Estos dos tipos de respuesta, ya fueron puestos de manifiesto por Liñán (2003). Tanto el estado hidrodinámico del acuífero como los valores totales de precipitación y su distribución temporal son factores que controlan la aparición de uno u otro tipo de respuesta.

La relación de los caudales máximos y mínimos presenta valores muy similares para cada uno de los años hidrológicos (Tabla 6.2), excepto el año hidrológico 2002/2003, en el cual los caudales mínimos registrados durante el periodo de agotamiento son los más altos de toda la serie analizada. El valor medio obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 37.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	<i>Precipitación</i>
1999/2000	6244	110	57	875
2000/2001	7018	110	64	1412
2001/2002	4447	85	52	676
2002/2003	3776	275	14	922
<i>media</i>	<i>5371</i>	<i>145</i>		<i>971</i>

$$\frac{\overline{Q_{max}}}{\overline{Q_{min}}} = 37$$

Tabla 6.2. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Verde y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Alpandei para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).

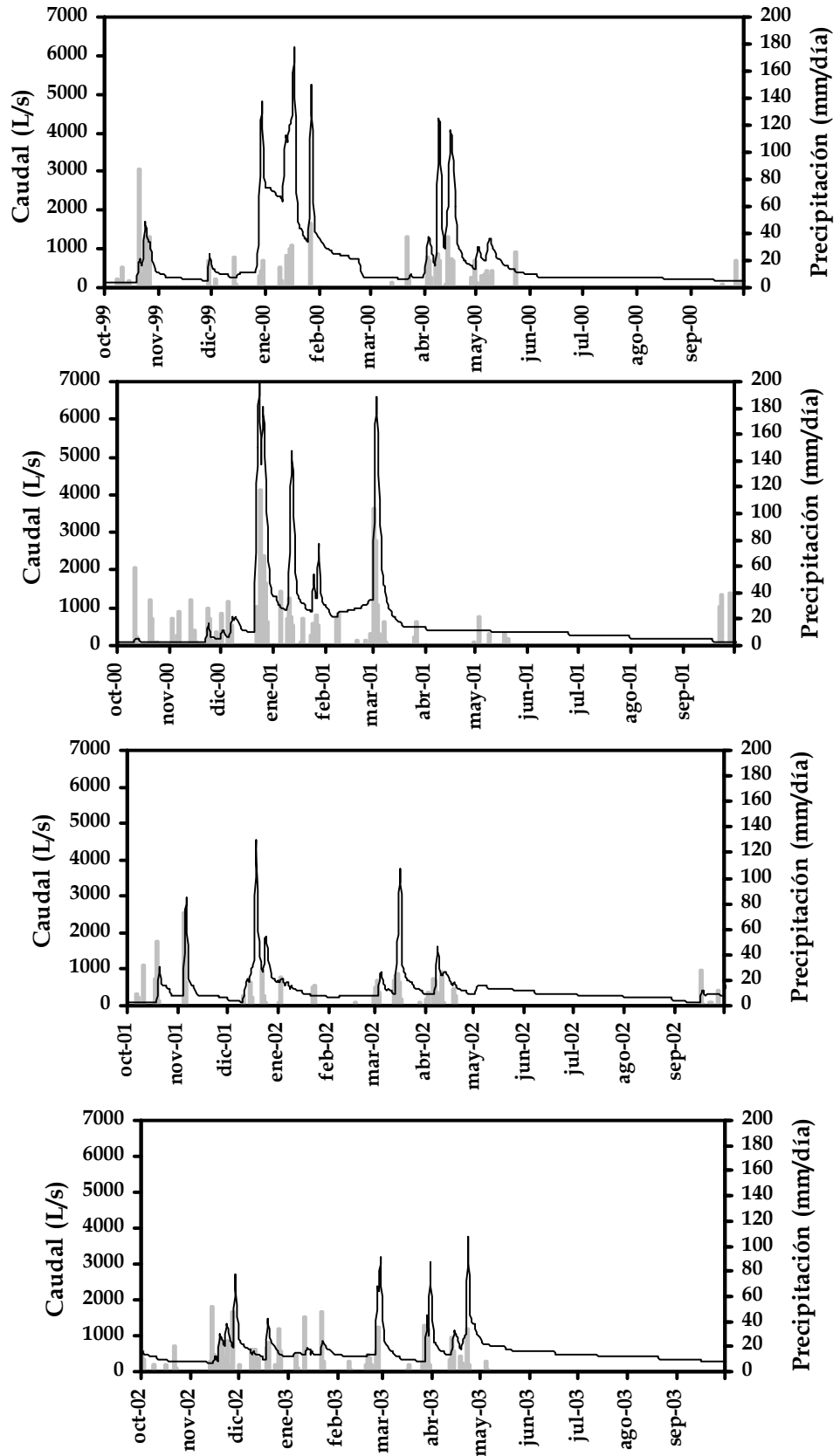


Figura 6.8. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial del Río Verde para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpandeire.

6.2.1.3. Manantial del Río Grande

El hecho de que el hidrograma del Río Grande (Figura 6.9) incluya agua de escorrentía superficial, así como de origen subterráneo procedente de otros puntos de descarga, no permite hacer consideraciones sobre los tiempos de respuesta, base y crecida, sobre la forma del hidrograma o sobre los caudales máximos.

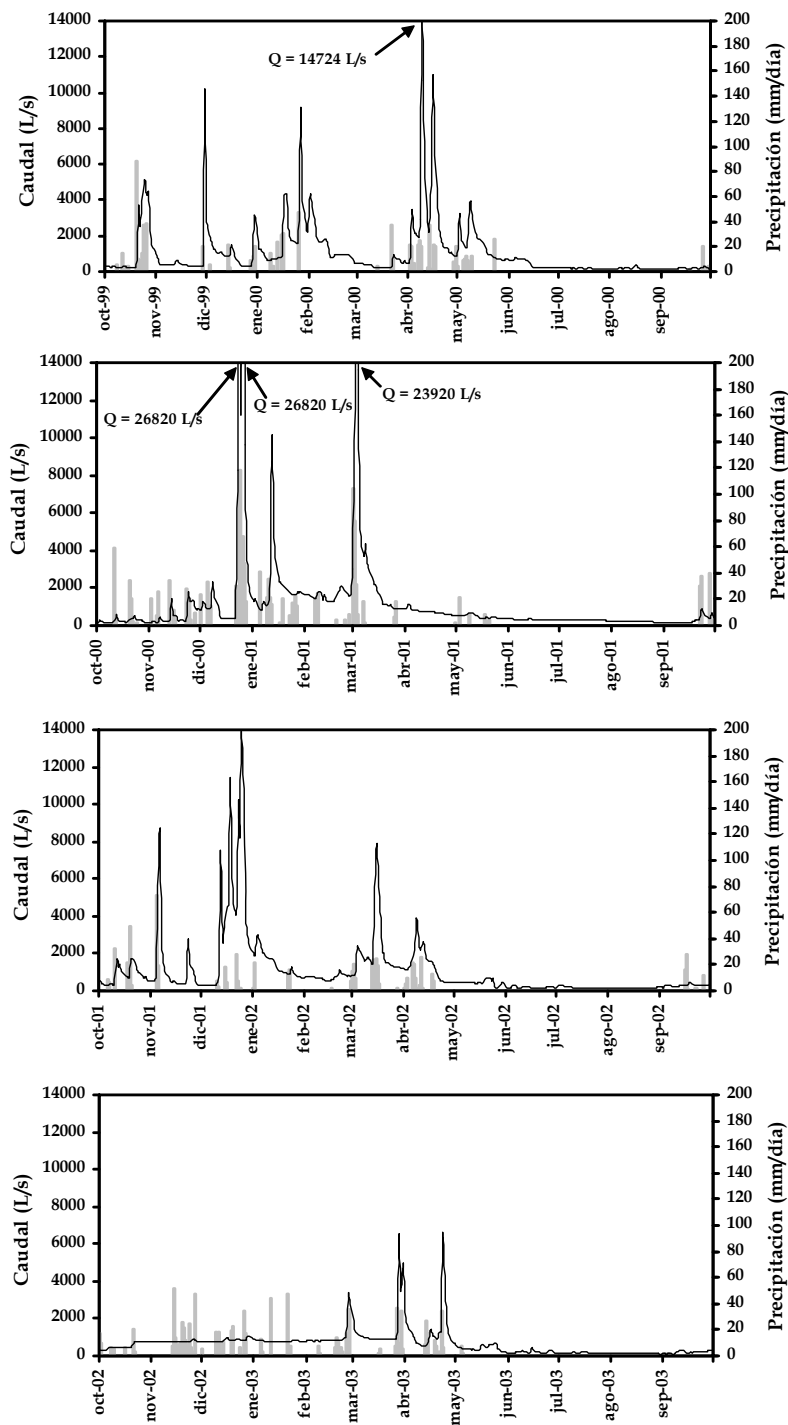


Figura 6.9. Hidrogramas anuales, con datos diarios, del Río Grande en la estación de Las Millanas (AAA) para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Alpanseire.

6.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

6.2.2.1. Manantial del Río Genal

Se han analizado cuatro curvas de recesión correspondientes al manantial del Río Genal (Figura 6.10), una por cada año hidrológico del periodo de estudio (1999/2000- 2002/2003). Los diferentes parámetros obtenidos mediante el método de Mangin (1970, 1975), para cada uno de los hidrogramas unitarios analizados, se recogen en la tabla 6.3.

Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) y del coeficiente de heterogeneidad (ϵ) evidencian que la decrecida se produce rápidamente (Tabla 6.3). Estos valores dan lugar a una cierta concavidad en las curvas de la función y (Figura 6.10), lo cual traduce un decrecimiento relativamente rápido de los caudales del manantial del Río Genal durante la decrecida. Ello se debe, probablemente, a que la karstificación funcional está desarrollada en la zona no saturada del acuífero.

Los valores del parámetro i para cada una de las curvas (calculados a partir de los datos de η y ϵ), son superiores a 0'50 (Tabla 6.3). Según Mangin (1975) se trataría de un sistema complejo y de grandes dimensiones.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ϵ (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999-2000	21	0,0476	0,1048	0,75	119	7,46E-03	1,91	0,18
2000-2001	22	0,0455	0,3636	0,53	181	8,78E-03	4,86	0,45
2001-2002	31	0,0323	0,1355	0,74	125	4,24E-03	3,28	0,30
2002-2003	41	0,0244	0,2369	0,65	120	5,96E-03	2,61	0,24
Media	29	0,0374	0,2102	0,66	136	6,61E-03	3,16	0,29

Tabla 6.3. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Genal (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ϵ coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.

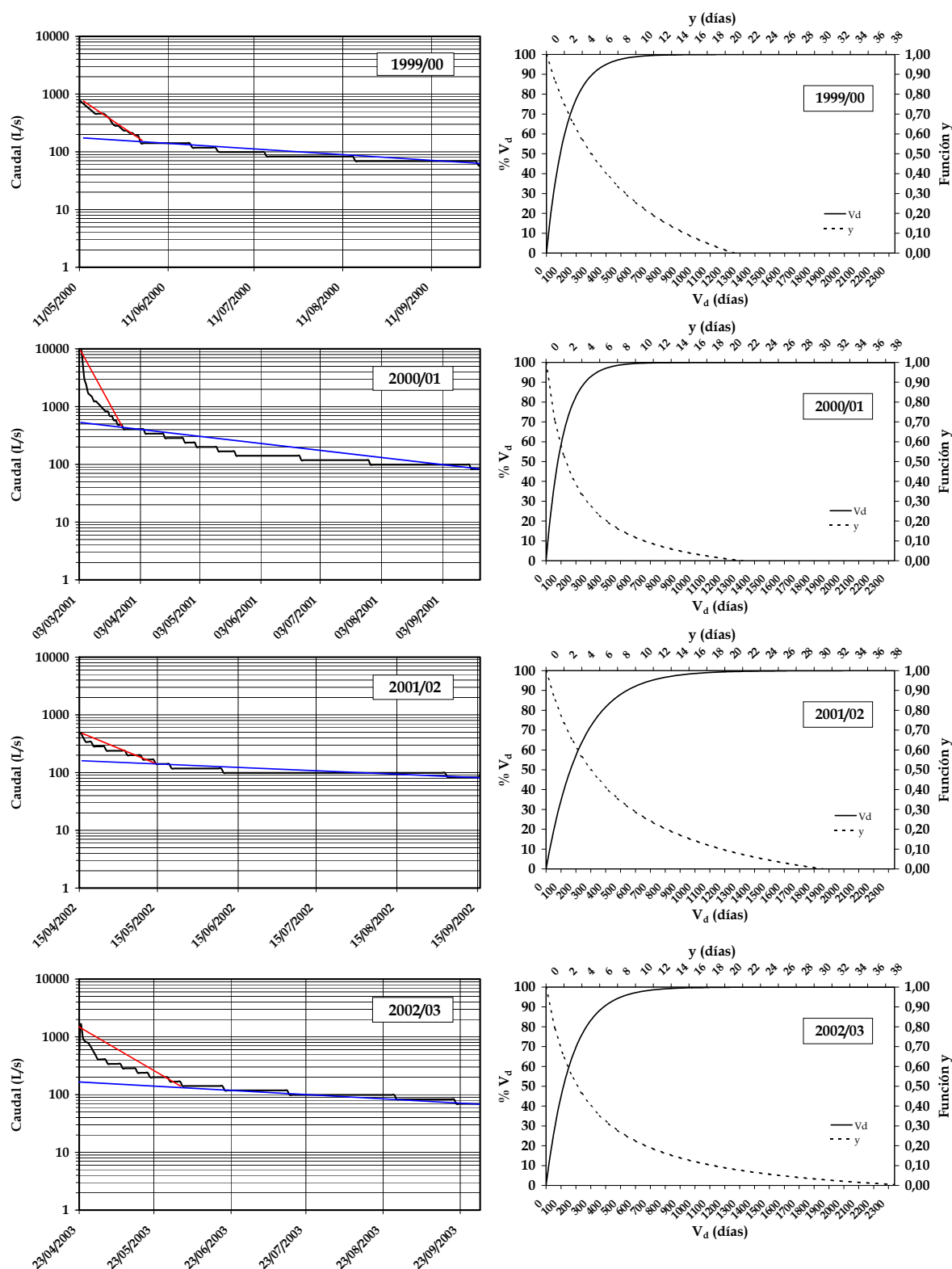


Figura 6.10. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Genal para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores del orden de 7×10^{-3} días⁻¹, lo que significa que el agotamiento se produce de manera relativamente rápida e indicativo de que el sector del acuífero de la Sierra de las Nieves drenado por esta surgencia debe presentar una zona saturada moderadamente karstificada.

La representación del porcentaje del volumen dinámico (Vd) que puede drenar esta surgencia (Figura 6.10) en función del tiempo permite estimar que se necesitarían entre 90 y 210 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento) para drenar el 50% del volumen dinámico. Estos resultados ponen de manifiesto una cierta capacidad reguladora del mismo. El volumen de tránsito anual (Vt), calculado para el sector drenado por este manantial, es de 11'0 hm³. Así, el valor del parámetro k (Vd/Vt) presenta valores inferiores a 0'50 (Tabla 6.3) que, según Mangin (1975), son característicos de un sistema de tipo kárstico.

6.2.2.2. Manantial del Río Verde

Se han analizado 4 curvas de recesión del manantial del Río Verde correspondientes al periodo de estudio (1999/2000 - 2002/2003), una para cada año hidrológico (Figura 6.11). De las cuatro curvas analizadas, tres de ellas corresponden a recesiones de crecidas primaverales, al igual que la mayor parte de curvas estudiadas en otras surgencias, mientras que la recesión de Noviembre de 2001 corresponde a una crecida invernal. Los diferentes parámetros obtenidos mediante el método de Mangin (1970, 1975), para cada uno de los hidrogramas analizados se recogen en la tabla 6.4.

Un primer análisis de la decrecida permite observar que la duración media de ésta (D_d) es muy corta (13 días) y varía poco de unos años a otros. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración para las cuatro curvas analizadas (η) están comprendidos entre 0'1250 días⁻¹ (año 2002/2003) y 0'0625 días⁻¹ (2000/2001). En cambio, el coeficiente de heterogeneidad (ϵ) varía entre 0'1010 (1999/2000) y 0'8254 días⁻¹ (2001/2002). De las 4 recesiones analizadas, la correspondiente a la crecida invernal (2001/2002) presenta una concavidad más marcada en la curva de la función y (Figura 6.11), lo cual es indicativo de que la

disminución del caudal en el manantial del Río Verde durante este periodo se produce de manera más rápida.

Los valores de η y ε para cada una de las curvas analizadas han permitido calcular el parámetro i , que presenta un valor medio de 0'62, que según Mangin (1975), es característico de los sistemas complejos y de grandes dimensiones.

<i>Año Hidrológico</i>	D_a (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999-2000	14	0,0714	0,1010	0,71	127	7,41E-03	5,30	0,29
2000-2001	16	0,0625	0,1875	0,64	183	6,06E-03	7,62	0,42
2002-2003	8	0,1250	0,2500	0,50	153	7,12E-03	10,50	0,58
Media	13	0,0863	0,1795	0,62	154	6,86E-03	7,81	0,43
2001-2002	7	0,1429	0,8254	0,27	28	3,27E-02	0,91	0,05

Tabla 6.4. Resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Genal (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.

La duración del agotamiento es parecida para todos los casos analizados, excepto para el año hidrológico 2001/2002, ya que al tratarse de una crecida invernal, el periodo de agotamiento se interrumpe rápidamente por crecidas posteriores. Los coeficientes de agotamiento (α) obtenidos presentan valores del orden de $6-7 \times 10^{-3}$ días⁻¹ en las recesiones primaverales y del orden 10^{-2} días⁻¹ para la curva invernal. Estos resultados ponen de manifiesto el agotamiento se produce de manera relativamente rápida.

Los volúmenes dinámicos (Vd) calculados para los agotamientos de las curvas primaverales varían entre 5,30 hm³ (1999/2000) y 10,50 hm³ (2002/2003). Al cabo de 100 días sin alimentación, desde el comienzo del agotamiento, se drenaría más del 50% de estos volúmenes (Figura 6.11). El parámetro k presenta valores muy diferentes de unas curvas a otras, lo que refleja un comportamiento heterogéneo durante el agotamiento. No obstante, el valor medio obtenido para este parámetro ($k=0'43$) es propio de un sistema acuífero de tipo kárstico (Mangin, 1970, 1975).

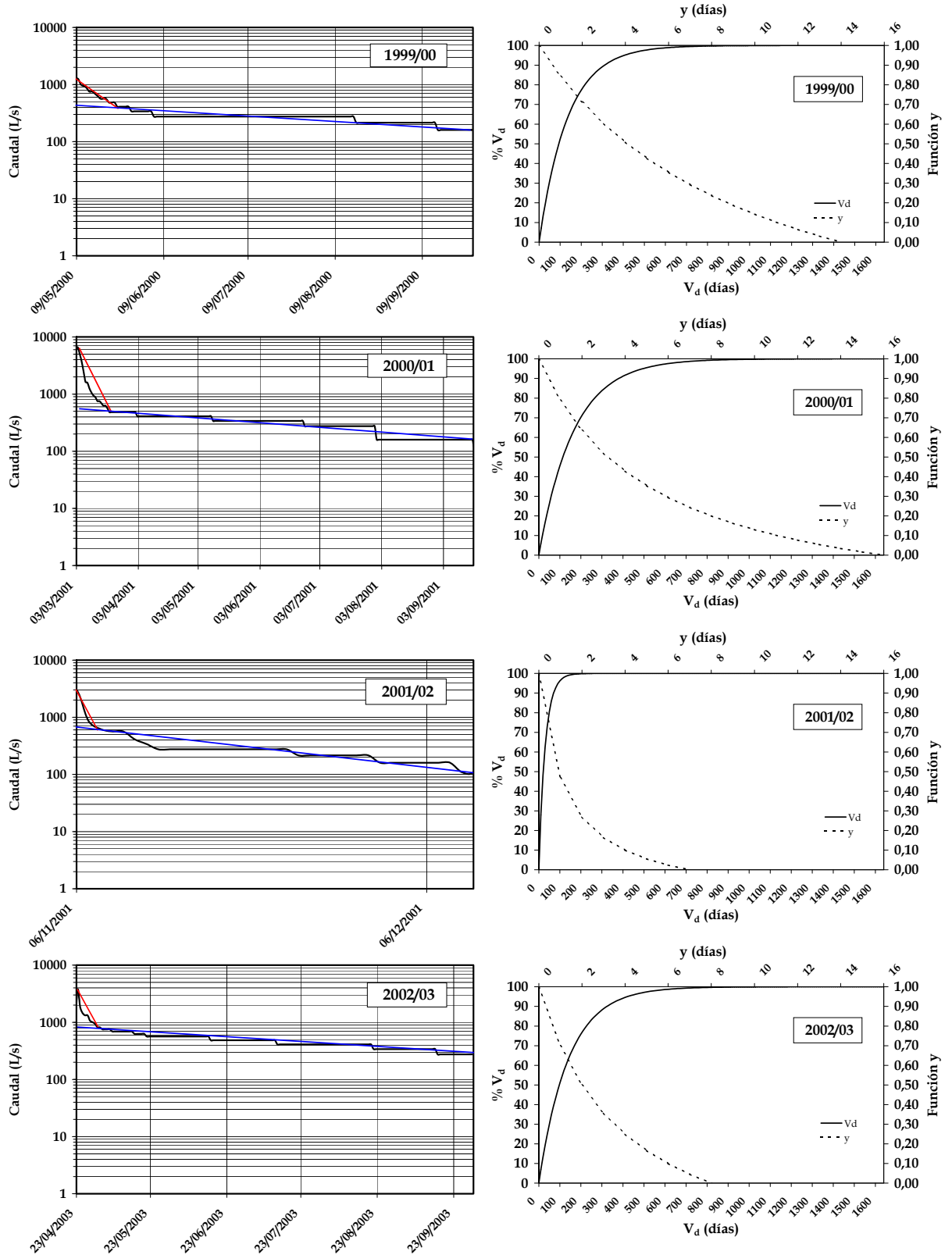


Figura 6.11. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Verde para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t=2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

La representación de los parámetros k e i de dos de los manantiales principales del acuífero de las Nieves en el gráfico de Mangin (1975) permite contemplar que los resultados no cambian excesivamente para las diferentes curvas analizadas (Figura 6.12). Estos manantiales se sitúan, fundamentalmente, en el dominio IV, que según el autor antes mencionado, es característico de un sistema de tipo kárstico, complejo y de grandes dimensiones, lo cual está en consonancia con los datos geológicos e hidrogeológicos disponibles.

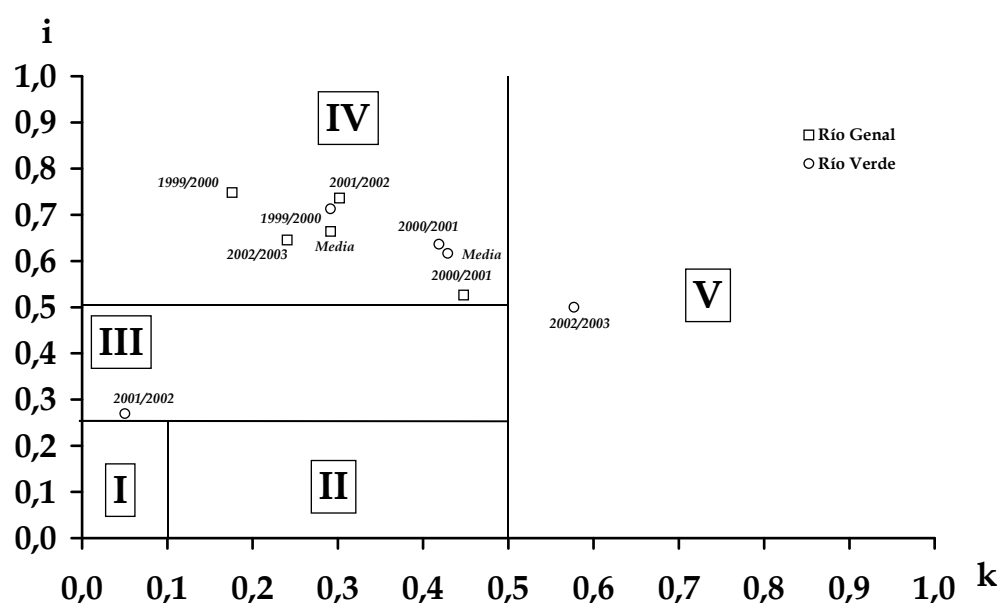


Figura 6.12. Gráfico i - k propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales del Río Genal y del Río Verde.

6.2.2.3. Manantial del Río Grande

En este caso, como ya se ha comentado anteriormente, se dispone de una serie de caudales medios diarios que incluyen aportes subterráneos y superficiales. Se ha realizado el estudio de 4 curvas de recesión siguiendo la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975), aunque sólo se ha analizado el agotamiento, ya que la interferencia de la escorrentía superficial durante la decrecida puede dar lugar a interpretaciones erróneas. En la tabla 6.5 se recogen los resultados obtenidos de cada una de las curvas de agotamiento seleccionadas (Figura 6.13).

<i>Año Hidrológico</i>	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999-2000	79	2,32E-02	4,35	0,22
2000-2001	124	9,56E-03	5,14	0,26
2001-2002	130	1,11E-02	4,74	0,24
2002-2003	108	9,18E-03	4,15	0,21
Media	110	1,33E-02	4,60	0,23

Tabla 6.5. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curva de agotamiento del manantial del Río Grande (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento, Vd volumen dinámico y k parámetro de Mangin (1970, 1975).

La duración del agotamiento (D_a) es desigual para cada una de las curvas estudiadas, varía entre 79 (1999/2000) y 130 días (2001/2002). El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores del orden de 10⁻² días⁻¹, lo cual indica que el agotamiento se produce de forma rápida.

Los volúmenes dinámicos (V_d) calculados para los agotamientos estudiados están comprendidos entre 4,15 hm³ (2002/2003) y 5,14 hm³ (2000/2001); el valor medio es de 4,60 hm³.

Al representar el porcentaje del volumen dinámico drenado en función del tiempo (Figura 6.13), se observa que al cabo de 100 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento) se drena, al menos, el 50% de dicho volumen. Estos valores son indicativos de una limitada capacidad de filtro por parte del sistema. El volumen de tránsito anual, calculado por Liñán (2003), ha permitido estimar el valor del parámetro k para cada una de las curvas analizadas. Así, los valores obtenidos, en todos los casos, son inferiores a 0'30, lo que evidencia que el sector de acuífero drenado por esta surgencia es de tipo kárstico, con escaso poder regulador.

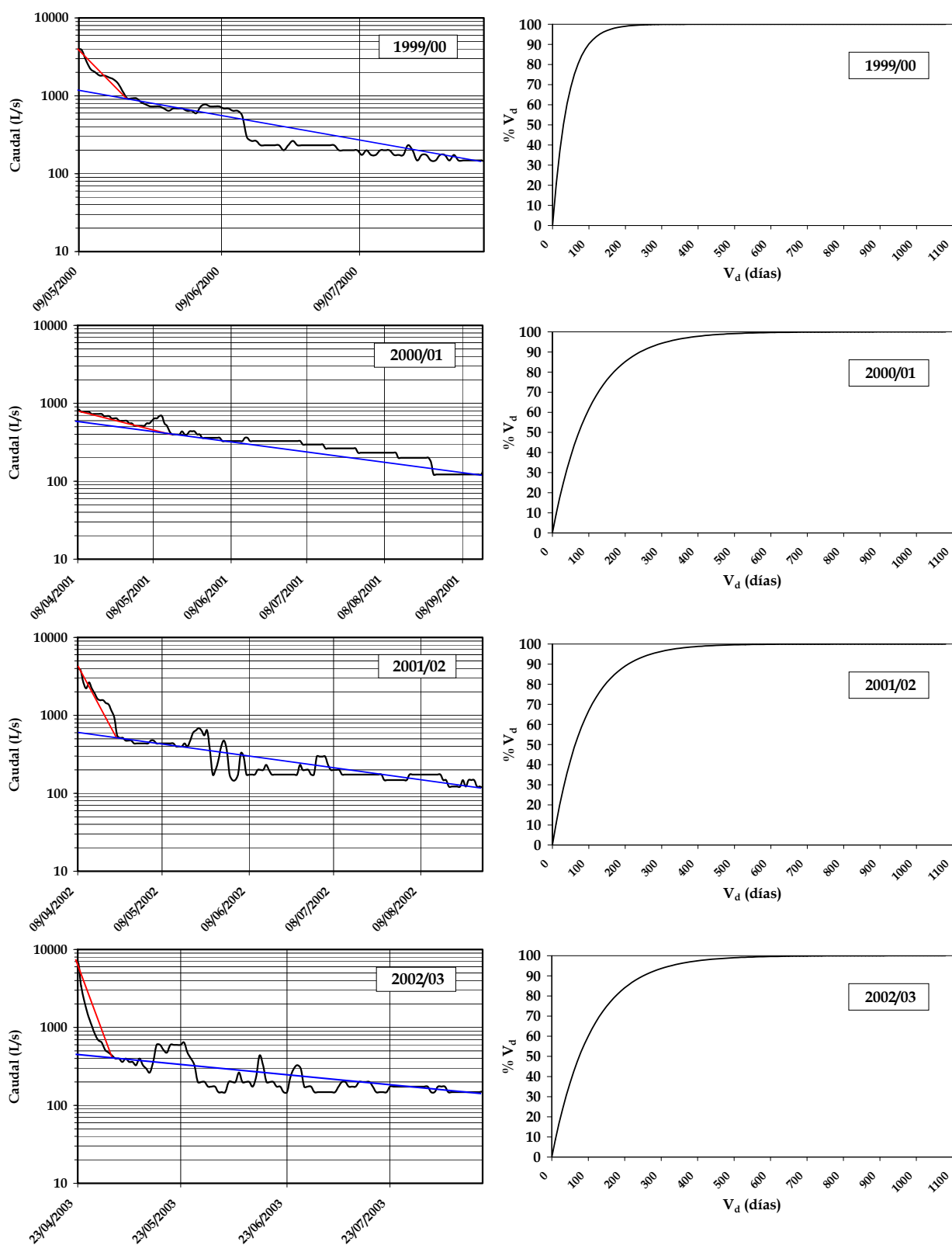


Figura 6.13. A la izquierda, curvas de recesión del Río Grande para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráfico del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

6.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral

Los datos utilizados para este tratamiento corresponden al periodo 01/11/1999 - 30/09/2003 en el caso del manantial del Río Genal, mientras que en los manantiales del Río Verde y del Río Grande (estación de Las Millanas) se ha considerado el periodo 01/10/1999 - 30/09/2003. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de Alpandei. Dada la serie de los datos empleados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. 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).

6.2.3.1. Análisis simple

Los correlogramas simples de caudales de las surgencias de los ríos Genal, Verde y Grande (Figura 6.14A) muestran un rápido descenso, indicativo de una escasa inercia del sistema. El efecto memoria obtenido para las tres surgencias es de 10, 23 y 12 días, respectivamente. Liñán (2003), en el tratamiento de los caudales medios diarios de cuatro años hidrológicos (1994/1995–1997/1998) de la surgencia del Río Verde, obtuvo resultados muy diferentes, pues de la forma del correlograma, mucho más tendido, se dedujo un efecto memoria de 41 días.

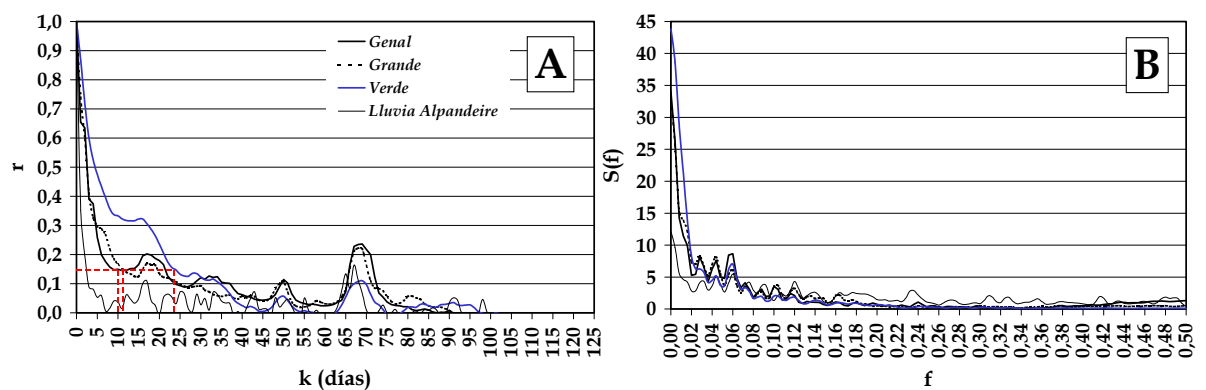


Figura 6.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de la precipitación registrada en la estación de Alpandei entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

Las diferencias antes citadas son consecuencia de las distintas condiciones climáticas en las que se han encuadrado cada una de las investigaciones. La recarga del sistema y el estado hidrodinámico, del sector drenado por el manantial de Río Verde, han sido distintos en ambos periodos de investigación, aspectos que hay que tener en cuenta al utilizar este método de análisis de la respuesta hidrodinámica.

En el espectro simple de caudales de los tres manantiales (Figura 6.14B) aparecen prácticamente todos los picos que se observan en el espectro simple de lluvia, lo cual indica que el acuífero drenado por estas surgencias apenas filtra la señal de entrada. Los tiempos de regulación son muy cortos, 17 días para el manantial del Río Genal, 16 días en el Río Grande y 22 días para el manantial del Río Verde, lo que contrasta con el obtenido por Liñán (2003) para este último punto de descarga (40 días). Los resultados ponen de manifiesto una capacidad de regulación muy limitada para el conjunto del acuífero, aunque algo mayor para el sector drenado por la surgencia del Río Verde. La frecuencia de corte presenta un valor de 0'20 (Figura 6.14B), para los tres espectros, lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 5 días.

Con respecto al análisis a largo término, en los tres correlogramas de las series de caudal, para valores de $k < 100$ días, se observan los mismos picos que en el correlograma de las precipitaciones. Esta coincidencia pone de manifiesto que se produce un tránsito rápido del agua de lluvia hasta los manantiales, a través de conductos kársticos bien desarrollados, de manera que se conserva la información contenida en la señal de entrada (Figura 6.15A). Los espectros de las series de caudal muestran la periodicidad anual (Figura 6.15B), similar a la que se observa en el espectro simple de la lluvia. Si se compara el valor del espectro de densidad de varianza de las series de caudales y de precipitación, para la frecuencia anual, se deduce que el sector drenado por el manantial del Río Verde es el que muestra un valor más alto.

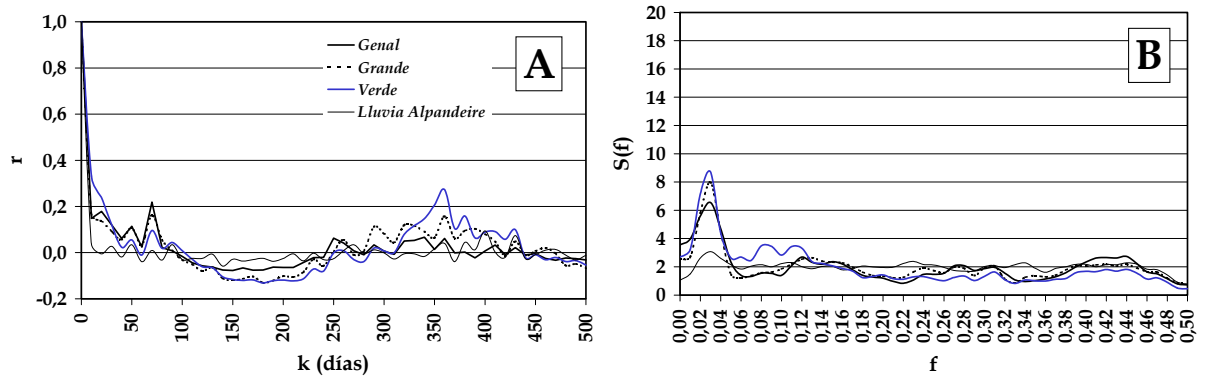


Figura 6.15. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación en la estación pluviométrica de Alpendeire entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia (f), f frecuencia.

6.2.3.2. Análisis cruzado

Los correlogramas cruzados de las series de datos de lluvia y de caudal de los ríos Genal, Grande y Verde (Figura 6.16A) presentan un pico, para un valor de $k = 2$ días, con valores máximos del coeficiente de correlación de 0'540, 0'520 y 0'500, respectivamente. Estos resultados son indicativos de un gran desarrollo del drenaje kárstico, que permite una respuesta rápida, al menos de la zona no saturada. Tras el pico de correlación máxima, en los tres correlogramas, se observa una disminución rápida de la correlación hasta un valor de $r_{xy} = 0'05$, a partir del cual el descenso se ralentiza para el resto de la ventana de observación (Figura 6.16A). Esta segunda respuesta sugiere la existencia de sectores donde se produce una circulación más lenta del agua, probablemente debido a que la karstificación se encuentra menos desarrollada en ellos. El resto de picos de los correlogramas cruzados, que también se detectan en los correlogramas simple de caudales (Figura 6.14B), pueden indicar la existencia de subsistemas de diferente inercia y capacidad reguladora. Esto pone de manifiesto la diversidad de tipos de respuesta (desfases) en la señal de salida, lo cual es indicativo del grado de complejidad que presenta el funcionamiento del acuífero drenado por estos manantiales.

Las funciones de amplitud cruzada (Figura 6.16B) indican la buena relación existente entre la lluvia y el caudal de los tres manantiales para frecuencias bajas,

hasta la frecuencia de corte (0'20), mientras que las frecuencias restantes aparecen bastante filtradas, lo que se puede traducir como una buena capacidad reguladora del sistema a largo término. Las funciones de fase permiten calcular un desfase para los sucesos periódicos de 35, 27 y 14 días, observados en el análisis a corto término, de 3, 1 y 1 días en el manantial del Río Genal, de 4, 2 y 1 días en la surgencia del Río Grande y de 5, 3 y 1 días en el manantial del Río Verde. Para sucesos con periodicidad anual, el desfase calculado entre la entrada y la salida es de 25 días en Genal, 27 días en Grande y 32 en Verde.

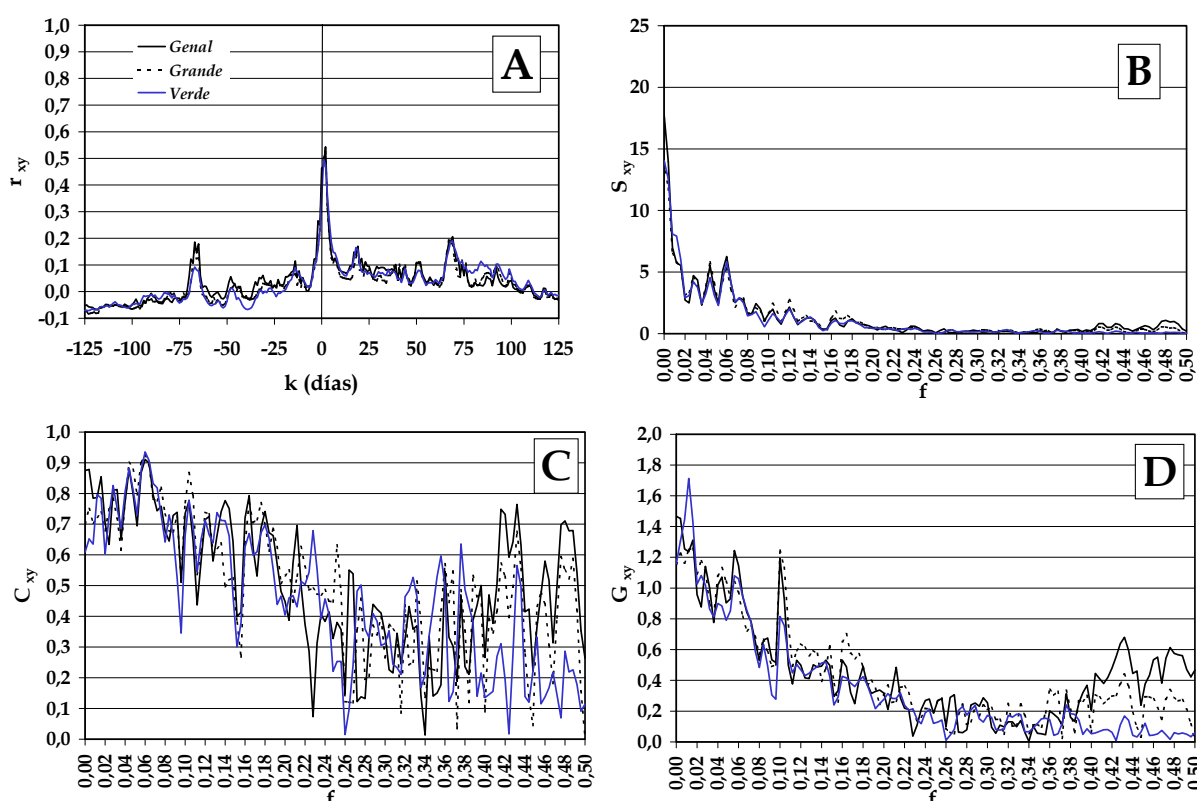


Figura 6.16. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Alpanseire para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

A largo término, tanto los correlogramas cruzados (Fig. 6.17A) como las funciones de amplitud cruzada (Fig. 6.17B), muestran fundamentalmente la componente periódica anual.

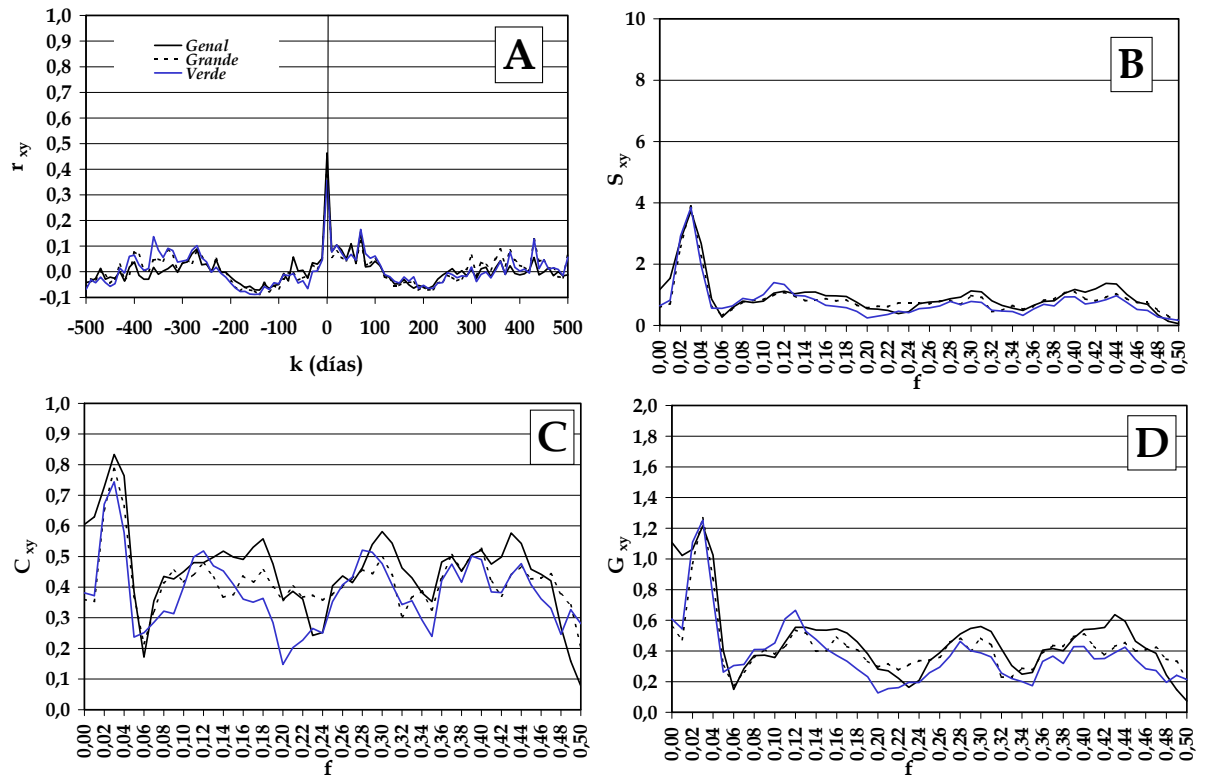


Figura 6.17. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales del Río Genal, Río Verde y Río Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Alpandeire para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

Los valores de la función de coherencia obtenidos del análisis de las series de datos de los tres manantiales (Figura 6.16C) indican que el sistema es bastante lineal para las bajas frecuencias, con un valor de la función $C_{xy} = 0,8$. A partir de la frecuencia de corte ($0,20$), el sistema es poco lineal. Esta baja linealidad para las altas frecuencias se observa también en el análisis a largo término (Figura 6.17C), ya que sólo los sucesos de periodicidad anual muestran valores de coherencia importantes.

Las funciones de ganancia (Figura 6.16D) también evidencian que el sistema amplifica las frecuencias muy bajas ($f < 0,02$; 50 días) y produce atenuación a corto y medio plazo. El análisis de larga duración (Figura 6.17D), muestra que todas las periodicidades se atenúan considerablemente, excepto la anual.

6.2.4. Análisis de Caudales Clasificados

6.2.4.1. Manantial del Río Genal

El análisis de caudales clasificados se ha realizado con la serie de datos de caudal de este manantial, correspondiente a casi cuatro años hidrológicos (01/11/1999 a 30/09/2003). En la figura 6.18A se representa la frecuencia acumulada correspondiente a cada intervalo de caudal, considerando clases de 100 L/s, con ambos ejes en escala aritmética. La curva resultante muestra que durante el 70% del tiempo, el manantial drena caudales iguales o inferiores a 300 L/s, con variaciones pequeñas en las frecuencias acumuladas para los caudales elevados, lo que es característico de sistemas de tipo kárstico.

La representación de la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 6.18B), permite diferenciar tres tramos con distinta pendiente:

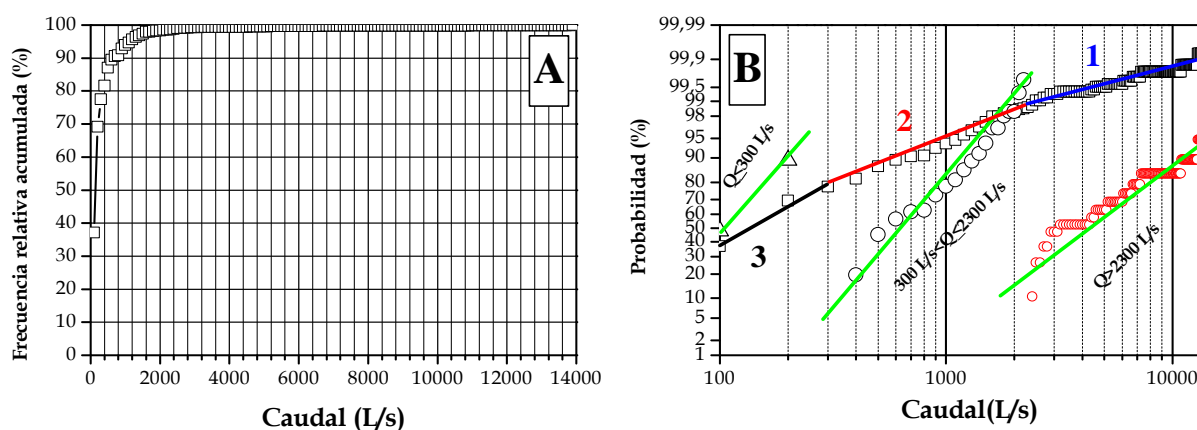


Figura 6.18. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Genal, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(1) Tramo de caudales superiores a 2300 L/s, que corresponden a la crecida del manantial (punta de la crecida). Presenta una menor pendiente que el tramo de inferior caudal, lo cual indica que las variaciones de caudal de la surgencia se producen de manera más rápida. Ello podría deberse al aporte de agua infiltrada en los sumideros kársticos existentes del semipolje de La Nava.

(2) Tramo intermedio, con caudales entre 2300 y 300 L/s, que corresponde a la situación de decrecida, durante la cual hay una reserva de agua que puede ser drenada en un ciclo posterior o durante el agotamiento.

(3) Tramo, de aguas bajas, con caudales inferiores a 300 L/s, correspondiente a la situación de agotamiento del manantial. El hecho de que presente una pendiente algo mayor que los tramos de caudales superiores indica que durante el agotamiento se drena la reserva de agua formada durante la crecida del manantial.

El mismo tratamiento se ha llevado a cabo para cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 6.18B). De acuerdo con la metodología propuesta por Padilla (1990), se ha calculado el porcentaje del volumen desaguado, con respecto al total, durante cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 6.6). Los resultados muestran que el sector de la Sierra de las Nieves drenado por el manantial del Río Genal presenta una inercia escasa, pues en el agotamiento se drena sólo un 30% del volumen total.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 300$ L/s	105	30
300 L/s < $Q \leq 2300$ L/s	630	48
$Q > 2300$ L/s	4570	22

Tabla 6.6. Resultados obtenidos del cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Genal, a partir del análisis de caudales clasificados.

6.2.4.2. Manantial del Río Verde

La serie de caudales diarios del manantial del Río Verde, correspondientes a los cuatro años hidrológicos entre el 1999/2000 y el 2002/2003, se han clasificado en 71 intervalos de 100 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase o intervalo (Figura 6.19A). En la figura 6.19B se representa la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica. En esta última figura se distinguen tres tramos con diferentes pendientes:

(1) Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 3800 L/s, que se registran durante la situación de crecida y el inicio de las decrecidas de los años hidrológicos 1999/2000 y 2000/2001. Presenta una pendiente mayor que el tramo

de inferior caudal, lo cual indica que las variaciones de caudal de la surgencia se producen de manera más lenta y podría deberse a que, durante esta fase, se produce un almacenamiento de agua que se drena posteriormente en la decrecida.

(2) Tramo de caudales entre 3800 y 500 L/s, que corresponde fundamentalmente a la situación de decrecida.

(3) Tramo de caudales inferiores o iguales a 500 L/s, durante la situación de agotamiento del manantial. Este tramo muestra una mayor pendiente que el tramo anterior de mayor caudal, por lo que corresponde al drenaje del agua previamente almacenada.

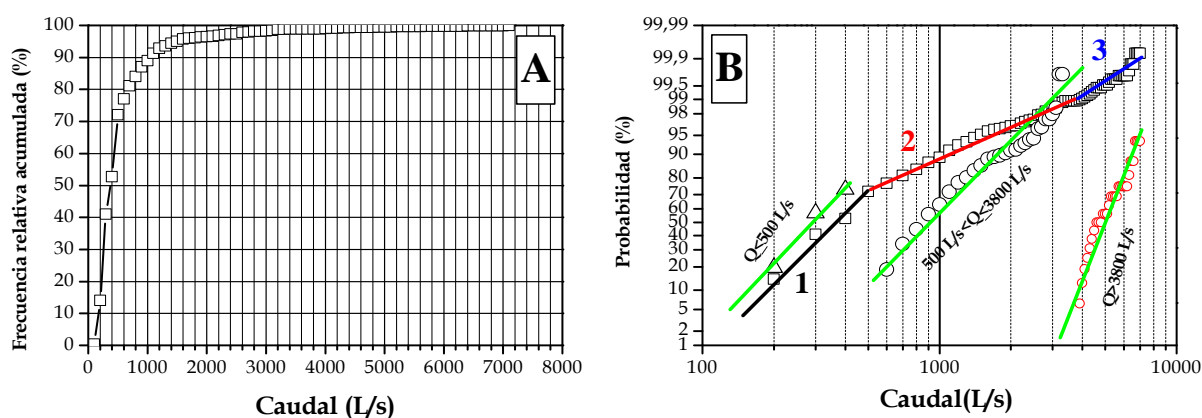


Figura 6.19. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Verde, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

Se ha llevado a cabo el análisis independiente de cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados del manantial del Río Verde (Figura 6.19B). Así, se ha podido calcular el porcentaje del volumen desaguado en cada situación hidrodinámica (Tabla 6.7). Los resultados reflejan que la capacidad de regulación del manantial del Río Verde es más elevada que la del manantial del Río Genal, ya que durante el agotamiento se drenan más de dos terceras partes del volumen total desaguado por el manantial.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 500$ L/s	290	68
$500 \text{ L/s} < Q \leq 3800$ L/s	910	14
$Q > 3800$ L/s	5060	18

Tabla 6.7. Resultados obtenidos del cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Verde, a partir del análisis de caudales clasificados.

6.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

En este apartado se presentan los resultados de aplicar la transformada continua *wavelet* y el análisis cruzado de la transformada *wavelet* entre las series de datos de caudal de los manantiales del Río Genal, Río Grande (estación de Las Millanas) y Río Verde y la de precipitación en la estación de Alpandeire.

El espectro continuo de los datos de precipitación (Figura 6.20A) muestra componentes con periodicidad menor a 1 mes, con mayor intensidad, durante el año hidrológico de mayor pluviometría (2000/2001). Estas componentes de alta frecuencia aparecen, durante este año hidrológico, claramente amplificadas en los espectros continuos de caudal de los manantiales (Figuras 6.21A, 6.21C y 6.21E).

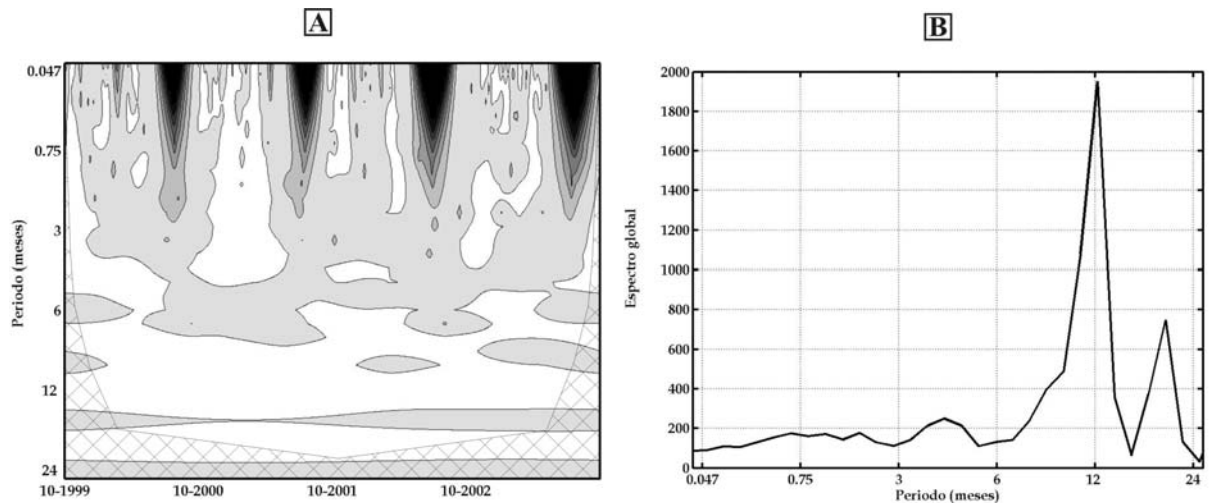


Figura 6.20. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Alpandeire, para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La señal anual se evidencia en los tres espectros continuos de las series de caudal (Figuras 6.21), aunque con mayor intensidad para el manantial del Río Grande, como ponen de manifiesto los espectros globales continuos. Además, tanto para las precipitaciones (Figura 6.20B) como para la serie de caudal del Río Genal (Figura 6.21B) aparece una componente plurianual de aproximadamente 1’5 años, que no ha sido tomada en cuenta por tratarse muy probablemente de una componente artificial debida a su proximidad al “cono de influencia”.

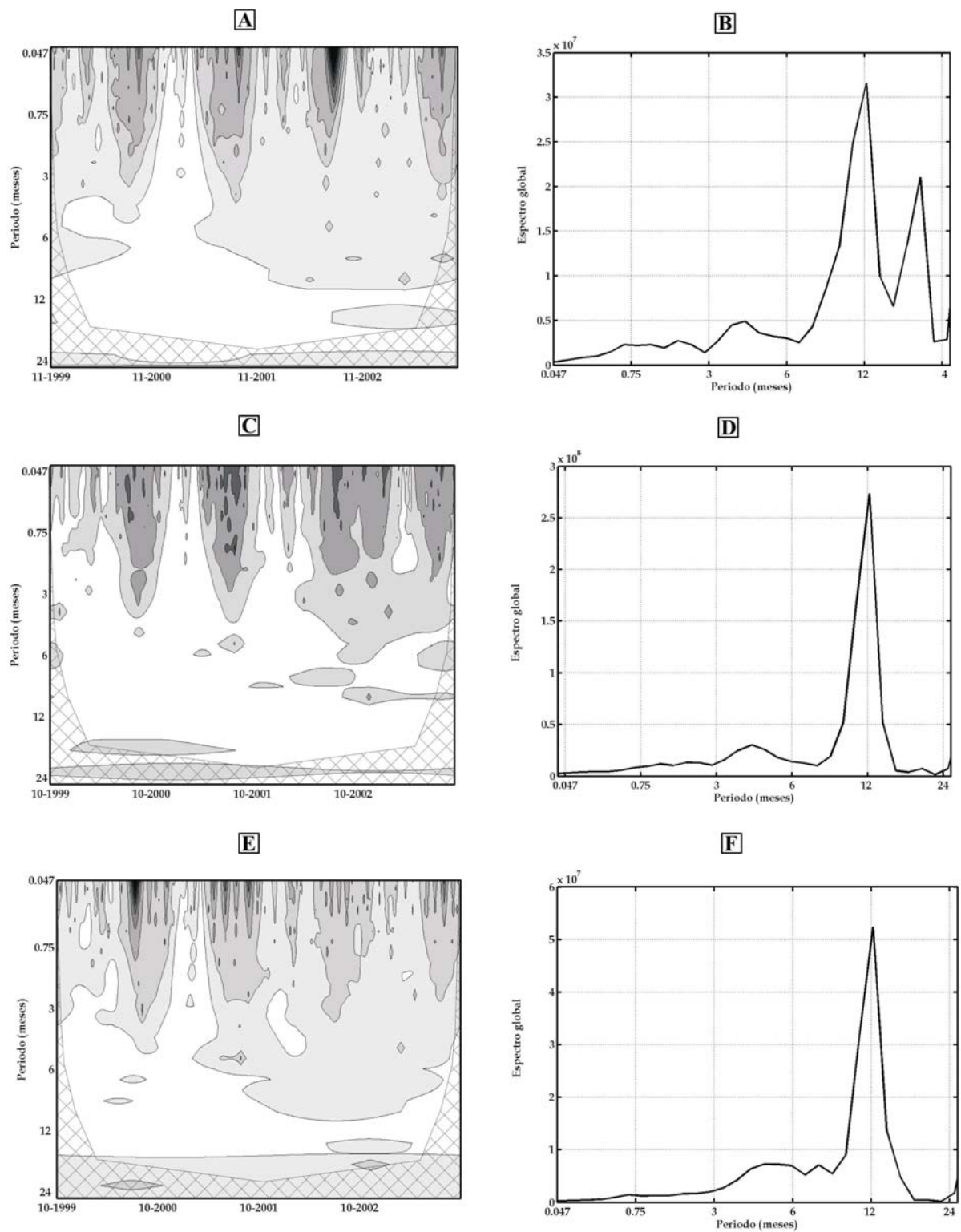


Figura 6.21. Espectros continuos y globales de la transformada *wavelet* de los datos de caudal medio diario en los manantiales del Río Genal (A, B), Río Grande (C, D) y Río Verde (E, F) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La componente anual se muestra, prácticamente homogénea a escala temporal, en las series de caudales (Figura 6.21). Al mismo tiempo, los tres espectros continuos de caudal muestran que en el año hidrológico 2000/2001, el más húmedo del periodo analizado, la señal anual evoluciona hacia periodicidades inferiores a la anual.

Un análisis a corto término permite constatar la existencia de una componente cuatrimestral en los espectros globales de los tres manantiales (Figura 6.21), aunque en el caso del manantial del Río Verde (Figura 6.21E), esta componente cuatrimestral se yuxtapone a otra componente semestral. En el espectro continuo de la serie de caudales del manantial del Río Grande (Figura 6.21C) se observan componentes inferiores a 1 mes, que corresponden a la escorrentía superficial medida en la estación de aforos.

Los espectros cruzados continuos de las series de caudal de los manantiales de Río Genal, Río Grande y Río Verde (Figura 6.22) coinciden en gran medida con los resultados del análisis simple (Figura 6.21), de manera que la fuerte influencia de la elevada pluviometría del año hidrológico 2000/2001 y la periodicidad anual, vuelven a revelarse como los fenómenos más destacables de las series de caudal aquí analizadas.

A corto término, sólo la componente cuatrimestral junto con una componente inferior a la mensual se observan en los tres espectros cruzados globales (Figura 6.22), aunque con mayor intensidad para la serie de caudales del manantial del Río Grande. Asimismo, para el espectro cruzado global del manantial del Río Genal (Figura 6.22B) también aparece una componente de aproximadamente 1'5 años, que no ha sido tenida en cuenta en los resultados obtenidos, porque se trata de una componente artificial.

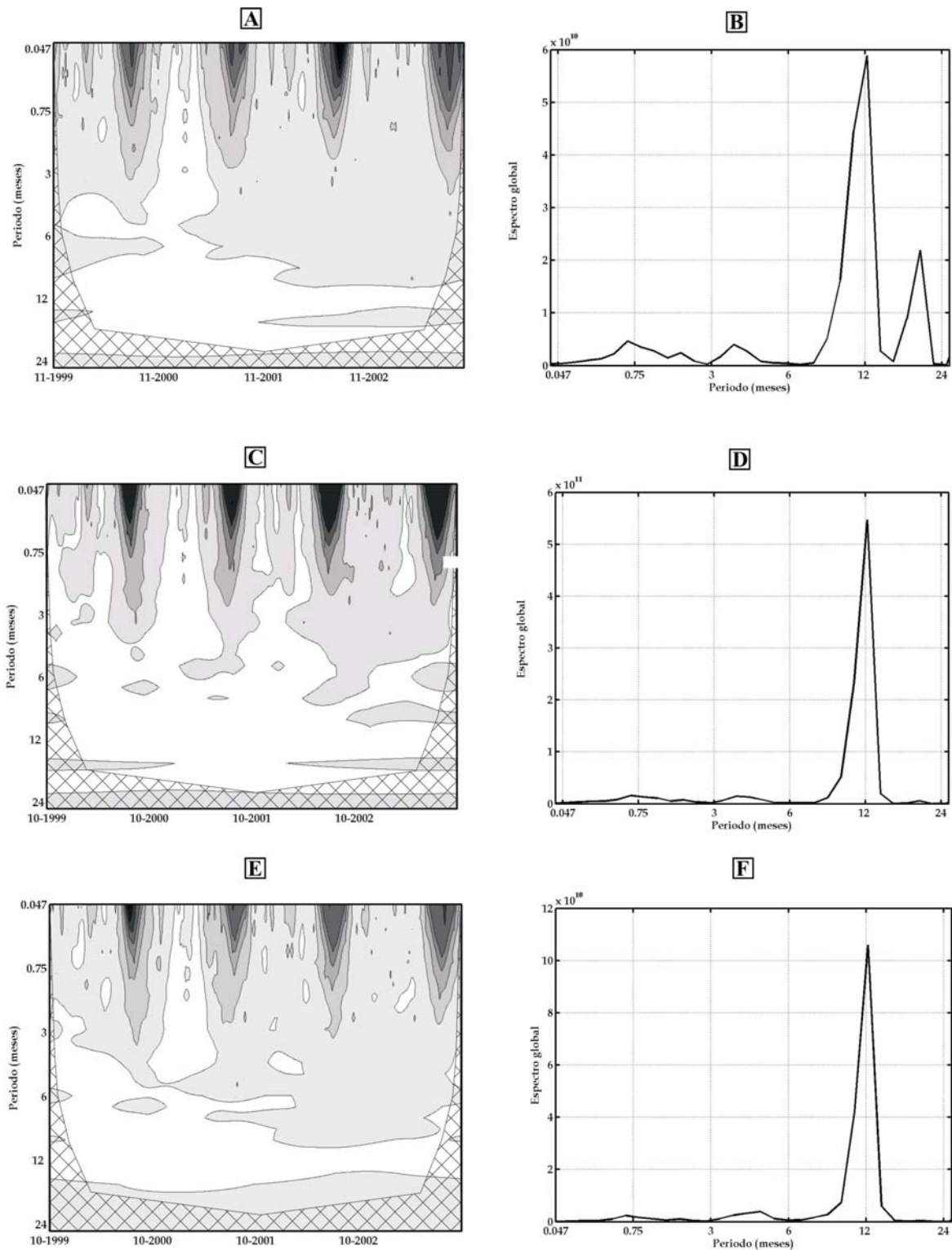


Figura 6.22. Espectros continuos cruzados y globales de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Alpandeire y de los datos de caudal medio diario en los manantiales del Río Genal (A, B), Río Grande (C, D) y Río Verde (E, F) para el periodo comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el "cono de influencia" donde los efectos de borde son importantes.

6.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico

Los hidrogramas anuales de los manantiales de los ríos Genal y Verde muestran varias crecidas, por cada año hidrológico, como respuesta a los diferentes eventos pluviométricos. En general, el tiempo de base de las crecidas es de 15 días para el manantial del Río Genal y de prácticamente un mes para el manantial del Río Verde, mientras que los tiempos de crecida se aproximan a los 5 y 10 días, respectivamente. Sin embargo, en las crecidas del año hidrológico de 2000/2001, los tiempos de base y crecida aumentan considerablemente en los hidrogramas de ambas surgencias. Los dos manantiales registran variaciones de caudal en función de la magnitud e intensidad de los eventos pluviométricos, pero el hidrograma del manantial del Río Verde muestra crecidas de principios de año hidrológico de menor importancia, en cuanto a los valores máximos de caudal, probablemente porque las lluvias otoñales son más filtradas por el epikarst y la zona no saturada. Todos estos resultados, junto con los valores superiores de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ en la surgencia del Río Genal, indican que el sector de la Sierra de las Nieves drenado por dicho manantial presenta un comportamiento hidrogeológico algo más kárstico que el drenado por manantial del Río Verde.

El análisis de las curvas de recesión de los hidrogramas mediante la metodología propuesta por Mangin (1971, 1975) pone de manifiesto, según los parámetros característicos de la decrecida, un alto grado de karstificación funcional de la zona no saturada, aparentemente algo mayor en el sector drenado por el manantial del Río Verde que en el drenado por la surgencia del Río Genal. Los valores de los coeficientes de agotamiento son próximos a 10^{-2} días⁻¹, indicativos de que el sistema drenado por estos manantiales presenta vaciados relativamente rápidos durante los periodos de estiaje. El gráfico de los parámetros *k* e *i* correspondientes a los manantiales de los Ríos Genal y Verde muestra que el sector sector occidental de la Sierra de las Nieves tiene un funcionamiento de tipo kárstico, con una compleja organización de drenaje, lo cual está en consonancia con los datos geológicos e hidrogeológicos disponibles.

Los resultados obtenidos tras la aplicación del análisis correlatorio y espectral simple a los datos diarios de caudal de los manantiales de los ríos Genal, Verde y Grande permiten corroborar que el sistema de las Nieves presenta un comportamiento escasamente inercial, si bien, el sector drenado por el manantial del Río Verde muestra cierta capacidad reguladora. Como complemento del análisis simple, los resultados del análisis cruzado son indicativos, por un lado, de que el acuífero de la Sierra de las Nieves presenta un gran desarrollo del drenaje kárstico que permite una respuesta rápida, probablemente, de la zona no saturada y, por otro lado, se observa un segundo tipo de respuesta que sugiere la existencia de sectores donde se produce una circulación más lenta del agua, quizás debido a que la karstificación se encuentra menos desarrollada en dichos sectores.

El análisis de caudales clasificados de la serie de datos del manantial del Río Genal pone de manifiesto que el agua infiltrada a través de los sumideros kársticos existentes en el semipolje de La Nava influyen, de manera importante, en la variación de los caudales en la surgencia, sobre todo durante la fase de decrecida. La curva de frecuencias relativa acumulada frente a los intervalos de caudal del manantial del Río Verde permite concluir que, durante las crecidas más importantes (> 3800 L/s), en el sector drenado por esta surgencia se forma una reserva de agua que se drena, posteriormente, durante la fase de decrecida. Además, los porcentajes de volumen desaguado en cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas, muestran, nuevamente, que el sector del acuífero de las Nieves drenado por el manantial del Río Verde presenta un mayor poder regulador que el sector drenado por la surgencia del Río Genal.

La aplicación de la transformada *wavelet* a los datos diarios de precipitación y de caudal de los principales puntos de descarga del sistema de las Nieves ha permitido corroborar y completar las periodicidades deducidas del análisis correlatorio y espectral. Además ha puesto de manifiesto la fuerte influencia de la elevada pluviometría del año hidrológico 2000/2001 sobre las componentes de alta frecuencia que aparecen durante este año hidrológico. Esto es indicativo, nuevamente, de que el acuífero presenta un destacable grado de karstificación funcional.

6.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

6.3.1. Composición química de las aguas del sistema de la Sierra de las Nieves

Las aguas drenadas por el manantial del Río Genal presenta facies exclusivamente bicarbonatada cálcica, mientras que las aguas del Río Grande muestran facies bicarbonatada cálcica o cálcico -magnésicas (Figura 6.23).

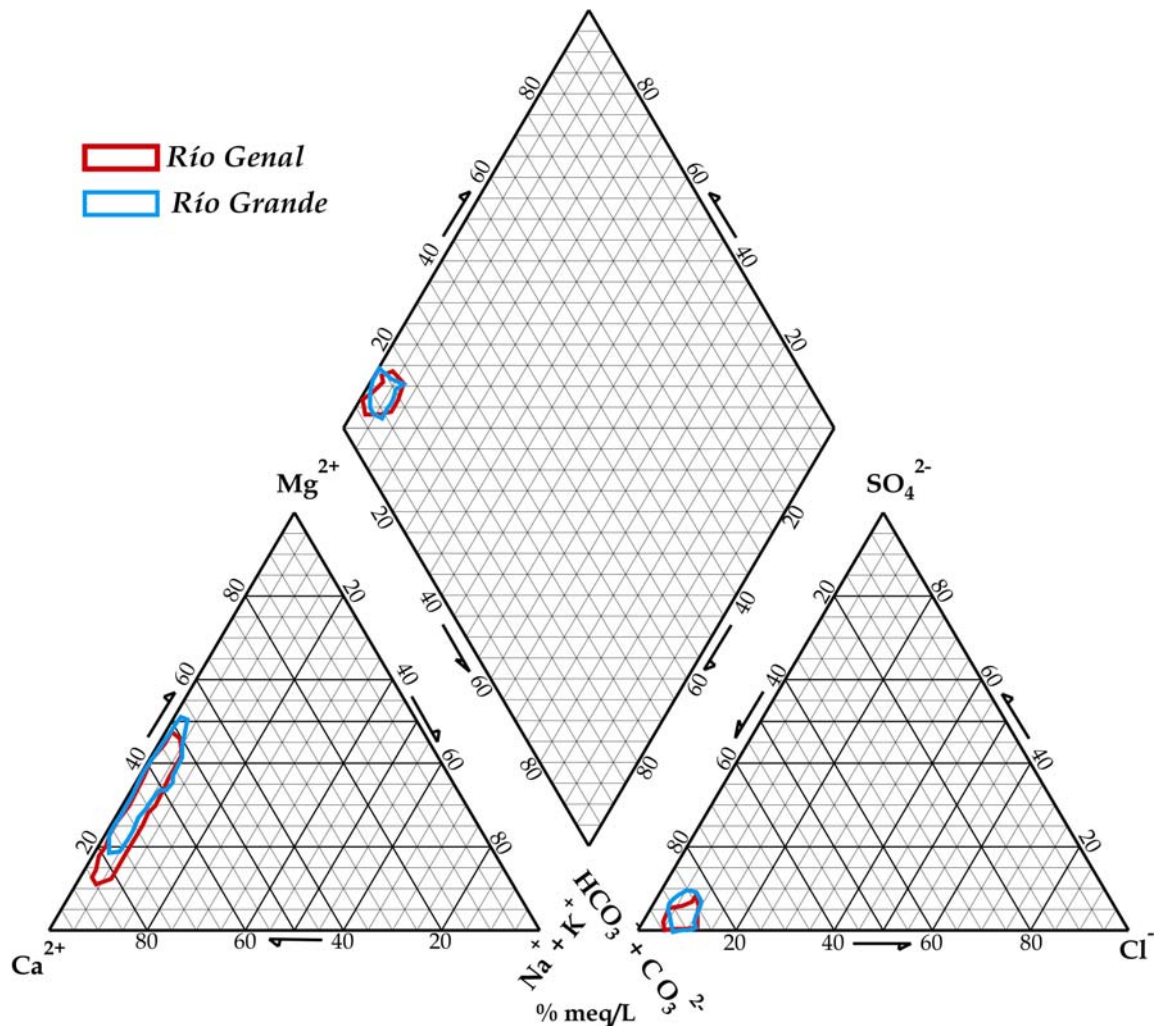


Figura 6.23. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogidas en los manantiales del Río Genal y del Río Grande.

Las diferencias en la composición química media de las aguas drenadas por estas dos surgencias son muy pequeñas, tan sólo se observa que las aguas del manantial del Río Genal presentan mayores valores de TAC. Los valores medios de conductividad eléctrica de las aguas subterráneas son muy parecidos en ambos manantiales (Tabla 6.8). Sin embargo, el coeficiente de variación de este parámetro

alcanza un valor mucho más alto en la surgencia del Río Grande (14,7%) que en la del Río Genal (4,7%). Los coeficientes de variación del resto de componentes químicos del agua drenada por estas dos surgencias presentan valores superiores al 10%, por tanto, según el criterio de Shuster y White (1971, 1972) el sistema de la Sierra de las Nieves sería del tipo *conduit flow*.

Las aguas drenadas por los manantiales del Río Genal y Río Grande muestran un valor medio del índice de saturación en calcita característico de que están en equilibrio con respecto a este mineral, mientras que ambos manantiales drenan aguas subsaturadas en dolomita (Tabla 6.8).

	Manantial (periodo)	T (°C)	C.E. (µS/cm)	pH	TAC (mg/L)	Cl (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	IS _{CAL}	IS _{DOL}	TOC (mg/L)
n		80	80	77	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	12
m		13,5	354	7,49	236,1	8,9	5,1	1,6	3,6	54,0	16,0	1,8	0,4	-0,021	-0,424	0,5
max	Río Genal	14,5	376	7,78	250,1	13,1	17,3	5,3	10,4	64,1	23,4	2,4	1,0	0,237	0,164	0,9
min		13,2	286	7,16	203,3	6,4	1,8	0,0	0,0	41,2	4,6	1,1	0,2	-0,378	-1,075	0,4
v(%)		1,9	4,7	1,45	4,6	17,8	65,8	80,8	75,3	11,5	23,5	16,1	52,9	-615,4	-55,9	22,5
m		13,4	348,7	7,5	234,5	8,6	4,7	1,2	5,3	49,4	16,7	1,9	0,4	-0,058	-0,446	
max	Río Genal (2000/2001)	13,7	370,0	7,8	249,1	11,4	7,2	3,7	10,4	53,8	20,0	2,2	0,8	0,196	0,164	
min		13,2	286,0	7,3	203,3	6,4	1,9	0,0	0,0	41,2	4,6	1,3	0,2	-0,234	-1,075	
v(%)		0,9	6,9	1,72	5,6	17,7	35,8	97,4	43,9	8,1	21,6	11,8	46,9	-191,5	-60,8	
m		13,4	357,5	7,5	236,7	9,1	4,1	0,6	0,1	54,7	15,6	1,6	0,4	-0,048	-0,490	
max	Río Genal (2001/2002)	13,9	376,0	7,6	250,1	13,1	6,3	2,1	1,3	62,6	19,3	2,1	0,5	0,115	-0,195	
min		13,2	328,0	7,3	207,4	7,1	1,8	0,0	0,0	42,5	9,9	1,2	0,2	-0,170	-0,730	
v(%)		1,1	3,6	0,88	4,8	20,1	31,8	142,4	283,4	8,5	17,8	11,6	40,4	-153,0	-27,6	
m		13,7	352,0	7,5	237,0	9,1	3,3	2,3	3,6	59,0	15,8	1,7	0,4	0,076	-0,261	0,5
max	Río Genal (2002/2003)	14,3	372,0	7,7	250,0	12,4	4,2	4,0	7,0	64,1	19,3	2,3	1,0	0,237	0,082	0,9
min		13,3	325,0	7,4	210,0	7,1	2,3	0,9	0,9	49,0	11,9	1,1	0,2	-0,121	-0,527	0,4
v(%)		2,5	4,3	1,04	5,1	20,2	15,6	42,6	47,7	8,1	17,2	21,9	69,3	138,2	-64,0	22,5
n		70	70	70	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	12
m		13,5	328	7,65	218,0	8,6	6,7	1,9	5,8	47,9	17,0	2,2	0,3	0,057	-0,189	0,7
max	Río Grande	15,4	397	7,97	354,1	12,8	16,9	4,3	11,2	58,1	28,6	4,0	0,8	0,459	0,702	0,9
min		12,3	213	7,32	139,1	4,3	0,4	0,4	1,7	34,5	6,7	1,2	0,2	-0,300	-1,090	0,5
v(%)		4,9	14,7	1,69	15,9	21,1	43,9	46,6	41,3	14,5	25,7	23,0	46,7	301,4	-191,4	15,1
m		13,5	332,1	7,7	217,6	8,7	7,8	1,8	6,4	49,4	16,0	2,1	0,3	0,071	-0,208	
max	Río Grande (2000/2001)	14,8	397,0	7,8	258,4	12,1	13,1	4,3	11,2	58,1	22,5	2,7	0,8	0,230	0,255	
min		12,3	213,0	7,5	139,1	4,3	0,4	0,4	2,1	37,0	6,7	1,2	0,2	-0,243	-1,090	
v(%)		4,7	18,0	1,07	17,5	24,3	44,1	58,9	47,0	14,3	30,1	21,9	53,1	175,0	-165,4	
m		13,4	326,5	7,6	221,5	8,5	5,3	1,9	5,5	45,4	17,6	2,1	0,3	-0,002	-0,265	
max	Río Grande (2001/2002)	14,3	390,0	7,8	354,1	11,2	8,2	3,0	9,8	58,1	28,6	2,8	0,5	0,169	0,135	
min		12,5	273,0	7,5	176,4	5,8	1,8	1,1	2,6	34,8	10,6	1,5	0,2	-0,300	-0,847	
v(%)		3,7	11,6	1,43	18,4	20,3	33,1	29,8	30,4	16,4	23,3	17,0	46,0	-7270,0	-105,9	
m		13,8	318,3	7,8	211,3	8,4	6,0	1,7	5,0	50,2	16,4	2,1	0,3	0,204	0,071	0,7
max	Río Grande (2002/2003)	15,4	376,0	8,0	241,3	10,7	9,0	2,4	8,1	56,8	23,4	2,6	0,5	0,459	0,702	0,9
min		12,5	259,0	7,5	171,8	6,9	3,1	0,9	2,5	43,9	8,2	1,5	0,2	-0,083	-0,669	0,5
v(%)		6,6	13,6	1,92	12,1	12,0	29,6	31,0	36,7	7,2	27,2	19,9	33,8	80,0	530,9	15,1

Tabla 6.8. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas del manantial del Río Genal y del manantial del Río Grande. Leyenda, *n* número de muestras, *m* media aritmética, *max* valor máximo, *min* valor mínimo y *v* coeficiente de variación.

6.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos

6.3.2.1. Manantial del Río Genal

La evolución de la conductividad eléctrica de la surgencia del Río Genal (Figura 6.24) muestra que los aumentos de caudal en la surgencia producen diluciones en la composición química del agua que drena. Estas diluciones llegan a ser de $\approx 85 \mu\text{S}/\text{cm}$, aproximadamente el 23% del valor máximo. Este tipo de evolución indica un significativo grado de karstificación funcional del sistema.

Un análisis general de la evolución hidroquímica pone de manifiesto que durante las crecidas de principios de año hidrológico (Figura 6.24), generalmente de pequeña cuantía, se drena agua más mineralizada, relacionados con mayores valores de TAC y contenidos relativamente más elevados en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ . Este tipo de evolución muestra la llegada a la surgencia de agua de la franja epikárstica de la zona no saturada que ha estado concentrándose por evaporación durante el estiaje y, aunque no se observa claramente en todos los años hidrológicos, este efecto pistón de la zona no saturada se muestra como una respuesta característica del sistema frente a las primeras lluvias de cada año hidrológico. Tras el efecto pistón de la zona no saturada, la conductividad eléctrica experimenta una disminución relativamente importante porque disminuyen, sobre todo, la TAC y el contenido en Ca^{2+} . A partir de entonces, se inicia una tendencia ligeramente ascendente de los tres parámetros anteriores que se interrumpe de forma brusca por diluciones ocurridas durante los eventos de recarga de mayor magnitud (Figura 6.24).

Por tanto, después de varias pequeñas crecidas otoñales, que empujan el agua almacenada en la zona no saturada dando lugar a los efectos pistón, el agua de lluvia infiltrada durante el año hidrológico en curso llega al manantial a través de conductos, que pueden penetrar o no en la zona saturada, sin llegar a mezclarse con las aguas almacenadas en ésta. Posteriormente, a medida que los eventos de recarga son de mayor importancia, el agua infiltrada alcanza la zona saturada y se mezcla con el agua en ella almacenada, dando lugar a las disminuciones claras y puntuales del quimismo del agua del manantial.

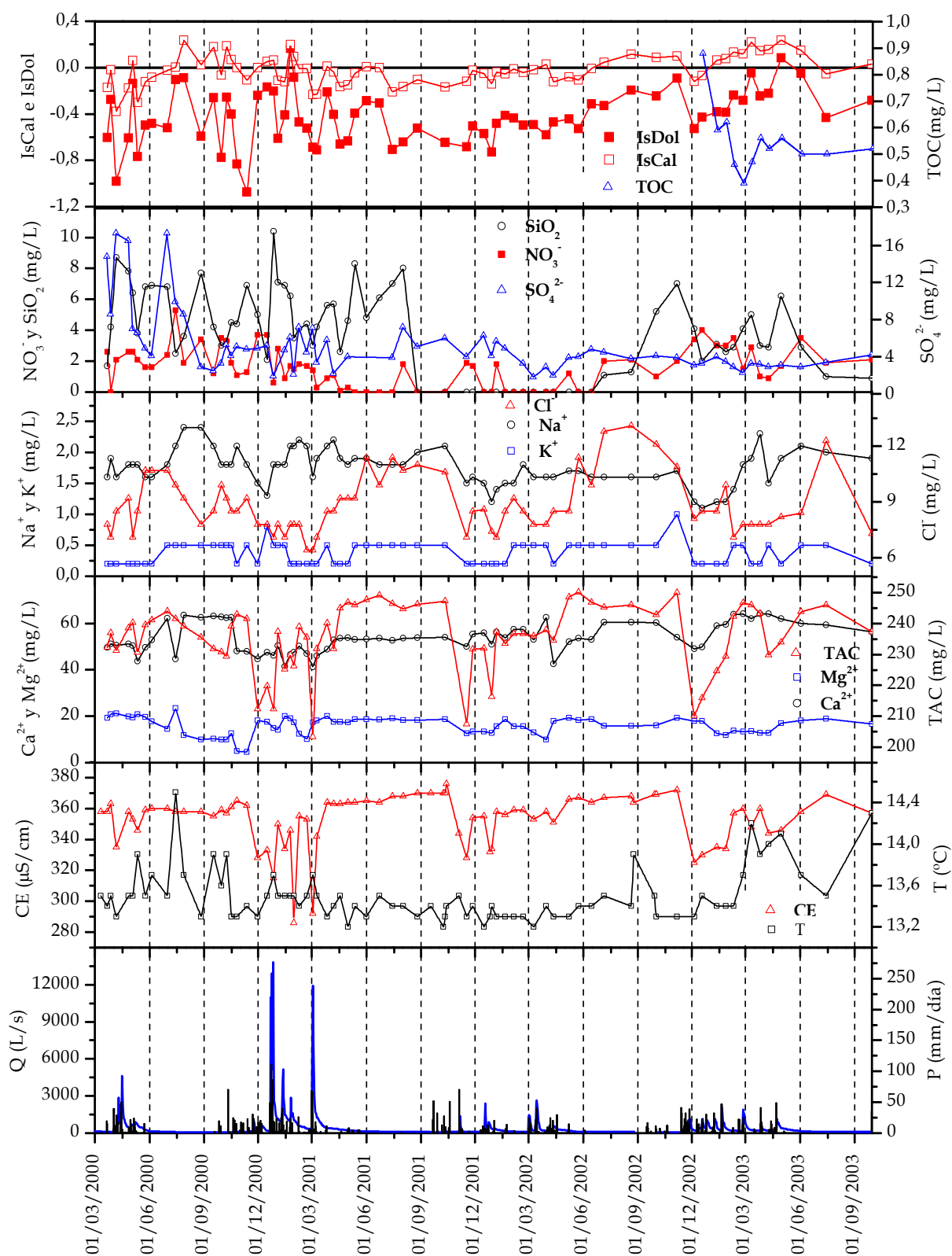


Figura 6.24. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Genal durante el período de investigación.

La nula correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal (Figura 6.25), no permite establecer hipótesis sobre el tiempo de permanencia del agua en el epikarst y, por tanto, de la participación de la zona no saturada en el quimismo de las aguas drenadas por este manantial.

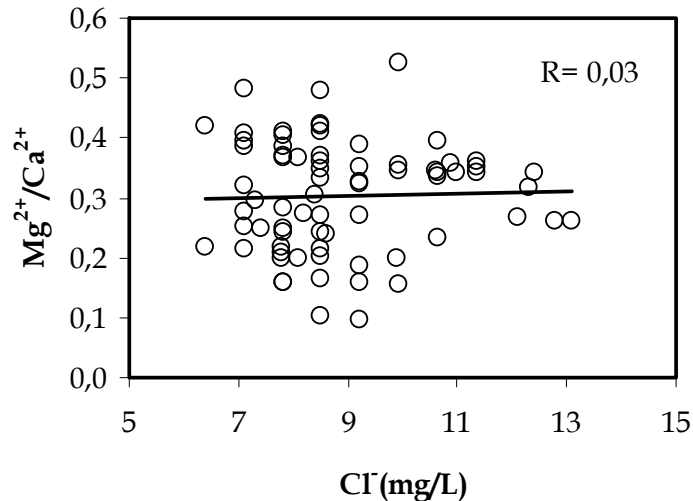


Figura 6.25. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal.

En general, durante el periodo de aguas altas aumenta la temperatura mientras que la conductividad eléctrica es menor como consecuencia de la disminución de la TAC y de los contenidos en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ (Figura 6.24). Sin embargo, el contenido en NO_3^- suele ser más elevado durante estos periodos de crecida, probablemente por la lixiviación que se produce de este componente en la franja epikárstica de la zona no saturada. Es decir, en aguas altas se produce un tránsito rápido del agua desde la zona no saturada hacia el manantial, a través de conductos kársticos que existen en la zona saturada que son especialmente activos durante las épocas de recarga importante (Liñán, 2003), lo que explicaría que el manantial drenará agua menos mineralizada y con temperatura relativamente más alta.

Durante los periodos de estiaje (Figura 6.24), los valores de conductividad eléctrica son más elevados y, al igual que para el periodo de aguas altas, esta evolución se debe al aumento de la TAC y de los contenidos en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ .

El índice de saturación en calcita presenta valores próximos al equilibrio que disminuyen hasta valores indicativos de subsaturación coincidiendo con algunos periodos de crecida y también de estiaje (Figura 6.24). En el primer caso por dilución del agua de la zona saturada con agua de recarga menos mineralizada y, en el segundo, probablemente porque se produce precipitación de calcita. En cuanto al índice de saturación en dolomita, las aguas están siempre subsaturadas, sobre todo en periodos de aguas altas.

La evolución temporal del contenido en TOC para el año hidrológico de 2002/2003 muestra los valores más elevados durante las primeras crecidas del año hidrológico (Figura 6.24) y, progresivamente, va disminuyendo hasta alcanzar los valores más bajos en invierno. No obstante, coincidiendo con alguna de las crecidas, se constatan aumentos relativos de TOC, paralelos al aumento del contenido en Cl^- , que indican la influencia de la franja epikárstica de la zona no saturada durante los eventos de recarga. Además, la evolución constante del TOC en el estiaje pone de manifiesto la participación de la zona no saturada durante esta fase hidrodinámica.

La matriz de correlación efectuada con los datos hidroquímicos de las 72 muestras de agua del manantial del Río Genal refleja la importante correlación de la conductividad eléctrica con la TAC y el contenido en Cl^- (Figura 6.26). Los resultados del ACP muestran que el eje I podría representar la *mineralización*, mientras que el eje II parece representar la *respuesta de la zona saturada* ya que se encuentra caracterizada por la temperatura y el pH en la parte positiva y los contenidos en SO_4^{2-} y Mg^{2+} en la negativa.

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	-0,1134	1										
pH	0,3103	-0,2297	1									
TAC	-0,0187	0,8406	-0,1724	1								
Cl ⁻	-0,1193	0,5501	-0,2458	0,5682	1							
SO ₄ ²⁻	0,0016	0,0413	-0,3136	0,0243	0,0327	1						
NO ₃ ⁻	0,3647	-0,2221	0,2521	-0,2537	-0,0768	0,2092	1					
SiO ₂	0,1068	-0,0651	0,0412	0,0309	-0,0151	0,2255	0,1777	1				
Ca ²⁺	0,1576	0,4105	0,1492	0,3850	0,2722	-0,1593	0,0773	-0,1520	1			
Mg ²⁺	0,0336	0,0094	-0,2357	0,1062	0,2061	0,2658	-0,0369	0,0854	-0,4139	1		
Na ⁺	0,2640	0,3105	0,1361	0,4221	0,0502	0,0383	-0,1067	0,3035	0,0841	-0,0413	1	
K ⁺	-0,0626	0,3805	0,1024	0,3828	0,5007	-0,1547	-0,0046	0,0767	0,2904	0,0169	0,1148	1

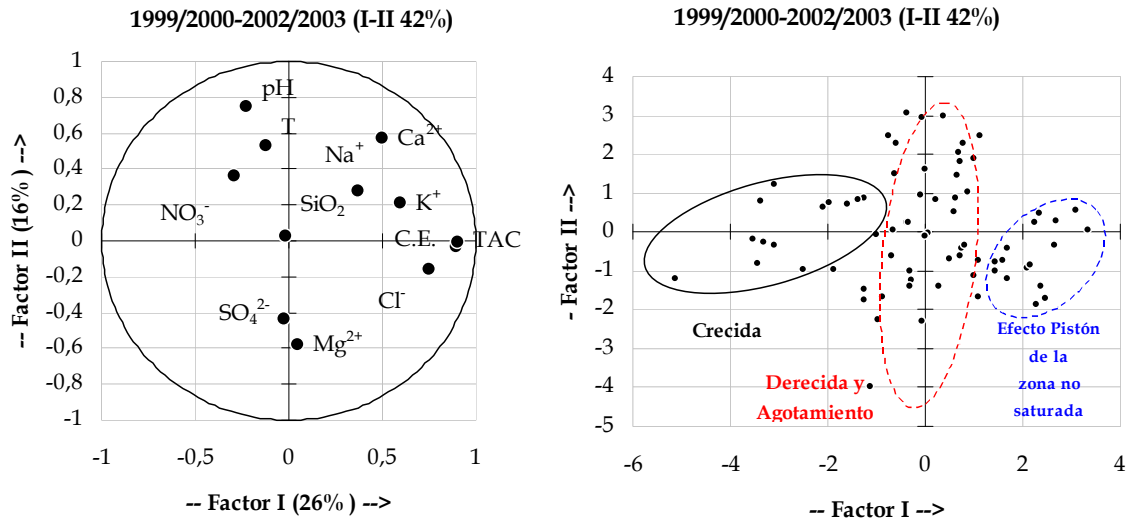


Figura 6.26. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal durante todo el periodo de estudio (n= 72).

En el campo de las observaciones pueden diferenciarse, al menos, tres familias de aguas (Figura 6.26):

- Aguas de los efectos pistón de la zona no saturada: presentan la mayor mineralización, mayor contenido en Cl⁻ y corresponden a las crecidas de principios de año hidrológico.
- Aguas de agotamiento y decrecida: se produce una transición gradual entre ambas fases que no permiten diferenciar la agrupación correspondiente a cada una de ellas.
- Aguas de crecida: menos mineralizadas, que presentan los contenidos más bajos en la mayor parte de los componentes químicos analizados por efecto de la dilución que provoca los eventos de recarga invernales.

6.3.2.2. Manantial del Río Grande

La surgencia del Río Grande muestra una variación hidroquímica mayor que la del Río Genal (Figura 6.27). En este manantial, durante las crecidas hidrodinámicas se observan importantes procesos de dilución por mezcla del agua de lluvia con las aguas almacenadas dentro del acuífero, que se ponen de manifiesto por descensos claros de los valores de conductividad eléctrica. El valor máximo de estas diluciones, para todo el periodo de registro, es muy elevado, aproximadamente del 45% en relación al valor máximo, indicativo de que el sector del sistema de las Nieves drenado por esta surgencia muestra un grado de karstificación funcional mayor que en el caso del sector occidental, drenado por la surgencia del Río Genal.

Un análisis general de la evolución hidroquímica del agua drenada por el manantial del Río Grande (Figura 6.27) pone de manifiesto que, durante la época de aguas altas, las disminuciones de conductividad eléctrica, paralelas a los descensos de temperatura, están relacionados con la disminución de la TAC y de algunos de los componentes químicos mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y Na^+). También se observa un descenso de los índices de saturación en calcita y dolomita y, en menor medida, de los contenidos en SO_4^{2-} y SiO_2 , componentes éstos, sobre todo la SiO_2 , asociados a flujos lentos a través de la zona saturada. Al igual que ocurre en el manantial del Río Genal, el contenido en NO_3^- es mayor en la época de aguas altas, probablemente también debido al lavado que se produce en la franja epikárstica de la zona no saturada.

Las crecidas otoñales o de principios de año hidrológico muestran un aumento de la mineralización del agua (Figura 6.27), debido a que aumentan la TAC y los contenidos en Cl^- , Na^+ y Ca^{2+} , análogamente a lo que ocurre en la surgencia del Río Genal. Esto pone de manifiesto, nuevamente, la llegada de agua almacenada en el epikarst y en el resto de la zona no saturada, que ha estado concentrándose por evaporación y disolviendo carbonatos durante el estiaje, hasta que es empujada por las primeras lluvias del año hidrológico (“efecto pistón” de la zona no saturada).

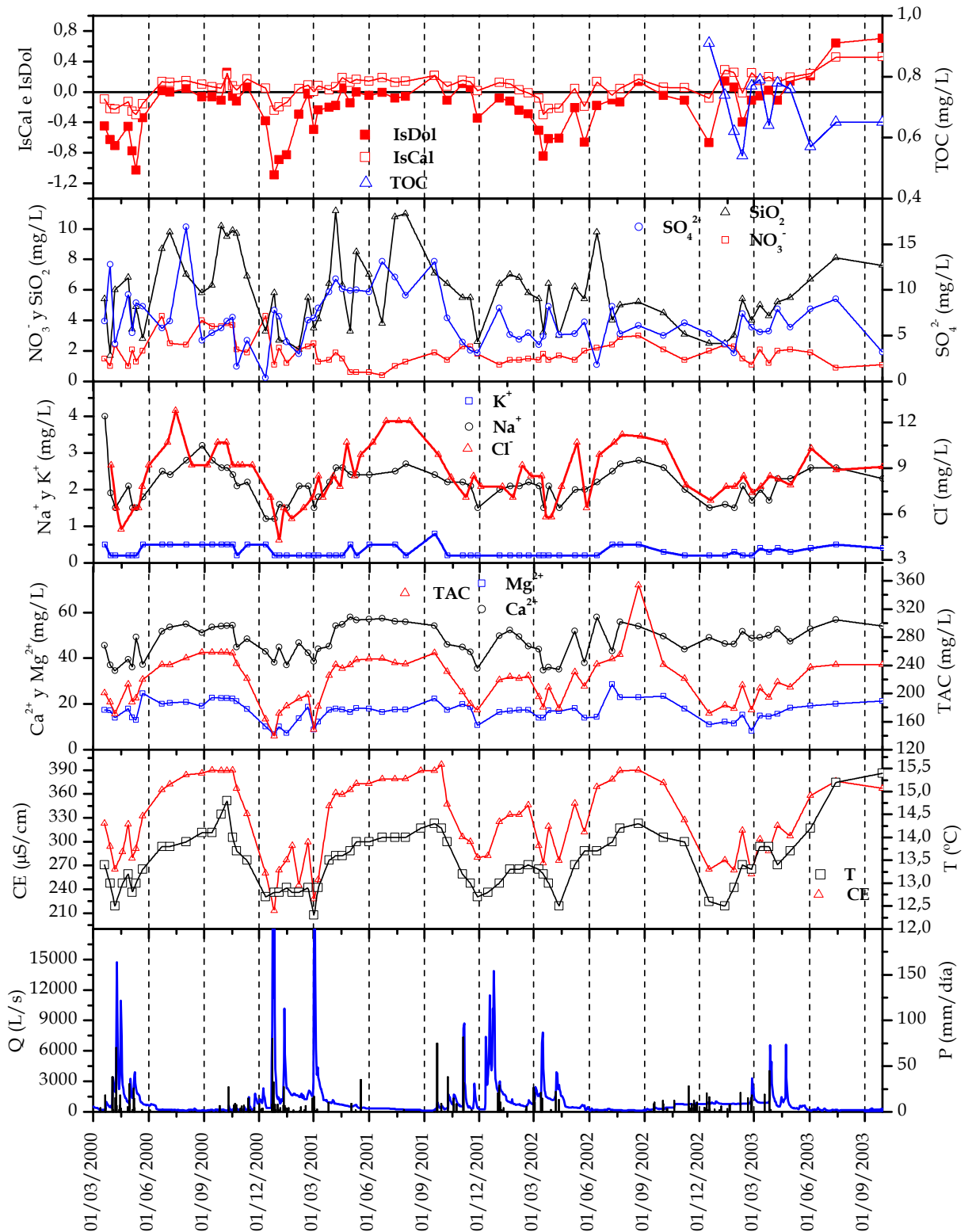


Figura 6.27. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Grande durante el período de investigación.

La correlación existente entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- (Figura 6.28), parece indicar la gran influencia que tienen tanto la zona no saturada como la zona saturada en el quimismo de las aguas, ya que en el

manantial aparecen aguas que han permanecido almacenadas en el epikarst un tiempo lo suficientemente prolongado como para incrementar su contenido en Cl^- (evaporación) pero también aguas con mayor tiempo de residencia (valores altos de $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$).

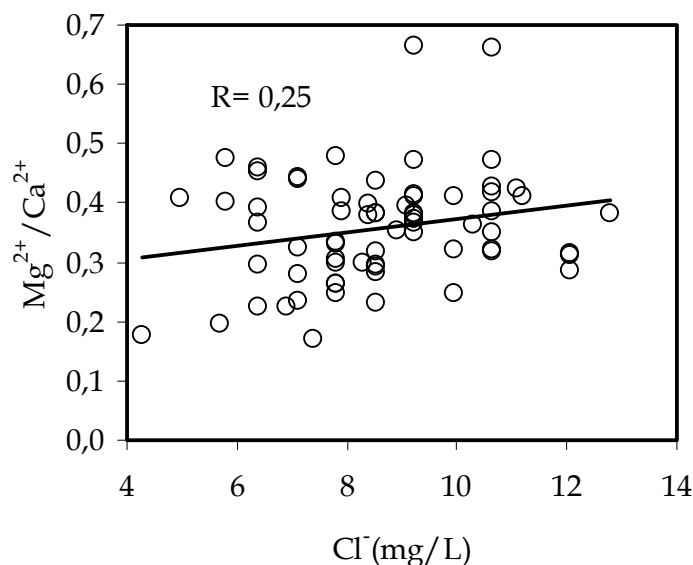


Figura 6.28. Correlación entre la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Grande.

Después de la crecida de principios de año hidrológico, se inicia una tendencia decreciente en la evolución de la temperatura y de la conductividad eléctrica relacionada con la disminución de la TAC y de los contenidos en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y Na^+ , hasta registrar los valores mínimos en las crecidas hidrodinámicas de mayor importancia (Figura 6.27). A partir de entonces, es decir, durante el estiaje, todos los parámetros citados anteriormente muestran una tendencia ascendente que se interrumpe durante algunos eventos de recarga primaveral. Además, los índices de saturación en calcita y dolomita presentan una evolución similar, lo que pone de manifiesto que los eventos de recarga de mayor importancia producen la llegada de agua de infiltración rápida a la zona saturada, donde se mezcla con el agua almacenada en ésta. A medida que disminuye el agua infiltrada, o aumenta el tiempo de permanencia de ésta en el interior del acuífero, y aumenta la participación de las aguas de la zona saturada, se produce un aumento de la mineralización del agua del manantial durante el agotamiento.

Durante los periodos de aguas altas de Enero y Febrero de 2001 (Figura 6.27), se registran dos máximos en la conductividad eléctrica, después de crecidas de importancia menor. Estos aumentos podrían corresponder a sendos efectos pistón de la zona saturada, similares a los descritos por Liñán (2003), pero es difícil de confirmar por la periodicidad de muestreo (quincenal, aproximadamente) considerada en este trabajo.

La evolución del contenido en TOC muestra, en general, valores más elevados en época de aguas altas que en época de estiaje (Figura 6.27), lo que refuerza la hipótesis de la importante participación de la zona no saturada durante el periodo de aguas altas. Los posibles efectos pistón de la zona saturada en época de aguas altas, durante el año hidrológico 2002/2003, coinciden, en un caso, con un descenso del contenido en TOC y en otros casos con aumentos relativos de éste. Teniendo en cuenta que la periodicidad de muestreo puede ser un factor importante y a falta de datos más concluyentes, se deduce que la influencia de la zona no saturada durante la época de aguas altas es muy variable.

A partir de los datos hidroquímicos correspondientes a 67 muestras de agua del manantial del Río Grande, se ha realizado un ACP (Figura 6.29), que explica un alto porcentaje de la varianza total, ya que los dos ejes principales engloban el 64% de la misma. La matriz de correlación refleja la importante correlación de la conductividad eléctrica con la temperatura y con la mayor parte de parámetros hidroquímicos (Figura 6.29).

En el campo de las variables (Figura 6.29), el factor I explica el 52 % de la varianza total y representa claramente la *mineralización general* de las aguas, mientras que el factor II está caracterizado por la variable NO_3^- en su parte positiva y al contenido en SO_4^{2-} en su parte negativa.

En el campo de las observaciones tan sólo pueden diferenciarse dos familias de aguas (Figura 6.29):

- Aguas de crecida: presentan la menor mineralización, relacionada con una disminución general de los contenidos de la mayor parte de parámetros hidroquímicos.

- Aguas de agotamiento y decrecida: corresponden, en realidad, a toda la situación de aguas bajas (pequeñas crecidas, decrecidas y estiaje). Las muestras correspondientes a la situación de agotamiento presentan mayor mineralización y temperatura aunque difícil de diferenciar dentro del campo de las observaciones.

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	0,8128	1										
pH	0,0765	-0,2138	1									
TAC	0,7686	0,9256	-0,2403	1								
Cl ⁻	0,5879	0,7756	-0,0694	0,7257	1							
SO ₄ ²⁻	0,2359	0,3394	-0,2182	0,2846	0,2164	1						
NO ₃ ⁻	0,0354	0,1324	-0,0571	0,1741	0,1366	-0,3844	1					
SiO ₂	0,5594	0,6547	-0,0864	0,5540	0,4840	0,1853	0,1185	1				
Ca ²⁺	0,6823	0,7127	0,0766	0,6899	0,7069	0,2904	0,0132	0,5588	1			
Mg ²⁺	0,6742	0,8190	-0,1871	0,7780	0,6089	0,2313	0,2458	0,4447	0,4027	1		
Na ⁺	0,6697	0,7844	-0,1438	0,7418	0,6429	0,3247	0,1235	0,5027	0,6139	0,6773	1	
K ⁺	0,6107	0,5958	0,0193	0,5649	0,5539	0,2657	0,3396	0,2501	0,4993	0,5548	0,5393	1

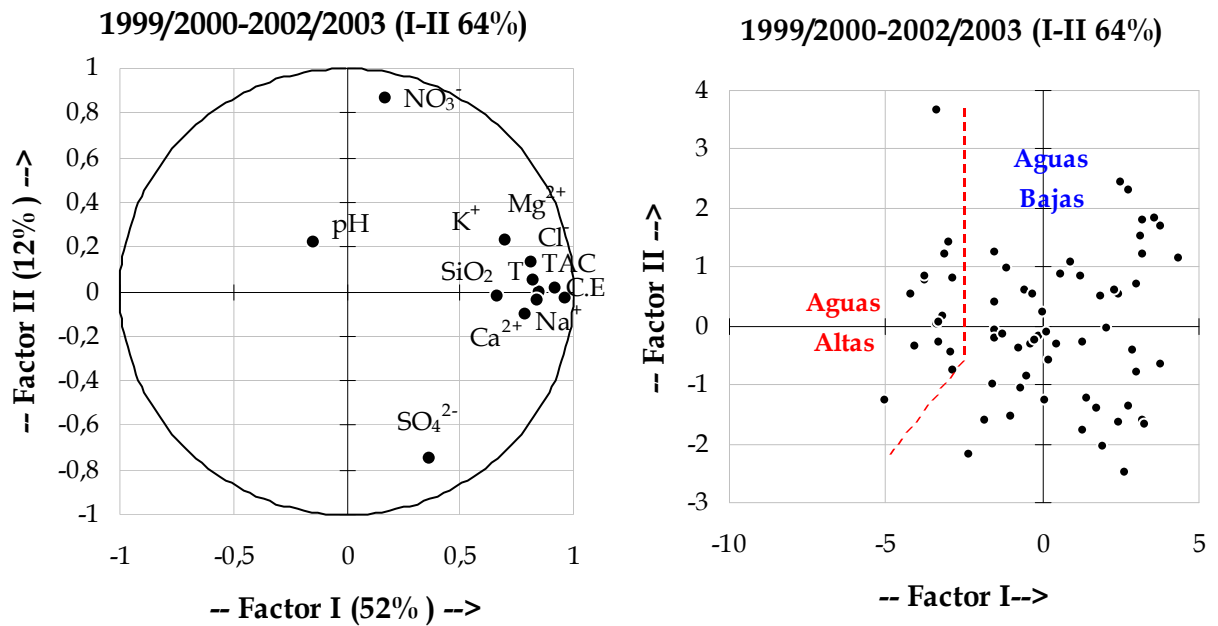


Figura 6.29. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Grande durante todo el periodo de estudio (n= 67).

6.3.3. Curvas de frecuencias

En la figura 6.30 se presentan las curvas de frecuencia correspondientes a la conductividad eléctrica, TAC y contenidos en Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ y NO₃⁻ de las aguas drenadas por los manantiales del Río Genal y del Río Grande.

Las curvas de la conductividad eléctrica y de la TAC muestran una moda principal, de menor importancia para la surgencia del Río Grande, que caracteriza las aguas drenadas durante la mayor parte del tiempo (agotamiento y, al menos en parte, decrecida), es decir, una mezcla de aguas de la zona saturada y no saturada. Además, ambas curvas presentan una asimetría hacia los valores más bajos de conductividad eléctrica, que corresponden a las diluciones del agua del acuífero por mezcla con el agua de infiltración menos mineralizada. No obstante, las curvas del manantial del Río Grande muestran un rango de variación mucho mayor que las del manantial del Río Genal, indicativo, como ya se ha puesto de manifiesto anteriormente, de un mayor grado de karstificación funcional del sector de acuífero drenado por la surgencia del Río Grande. Asimismo, en la curva de conductividad eléctrica del manantial del Río Grande se observan modas secundarias en el tramo de valores bajos, indicativas de que durante los eventos de recarga no se produce una mezcla completa entre las aguas infiltradas y las almacenadas.

Las curvas del resto de parámetros del sistema calcocarbónico (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y del contenido en SO_4^{2-} presentan una moda principal y un amplio rango de variación para los dos manantiales estudiados, que demuestran, nuevamente, la importancia de los procesos de dilución del agua de la zona saturada debido a la mezcla con el agua de infiltración, menos mineralizada. La curva de frecuencias del contenido en Mg^{2+} del manantial del Río Grande muestra una moda principal centrada con tendencia simétrica hacia los valores más bajos de conductividad eléctrica (procesos de dilución) e, igualmente, hacia los valores más altos. Esta última tendencia podría corresponder a los efectos pistón de aguas más mineralizadas (mayor tiempo de residencia en la zona no saturada del acuífero).

Los amplios rangos de variación de las curvas de Cl^- y NO_3^- ponen de manifiesto la influencia de las aguas de la franja epikárstica de la zona no saturada y de los procesos de concentración debido a fenómenos de evapotranspiración. En el caso de la curva de frecuencias del contenido en Na^+ , aún siendo claramente unimodal, muestra un rango de variación relativamente importante lo que podría

estar en relación con los procesos de evapotranspiración en la zona no saturada del sistema.

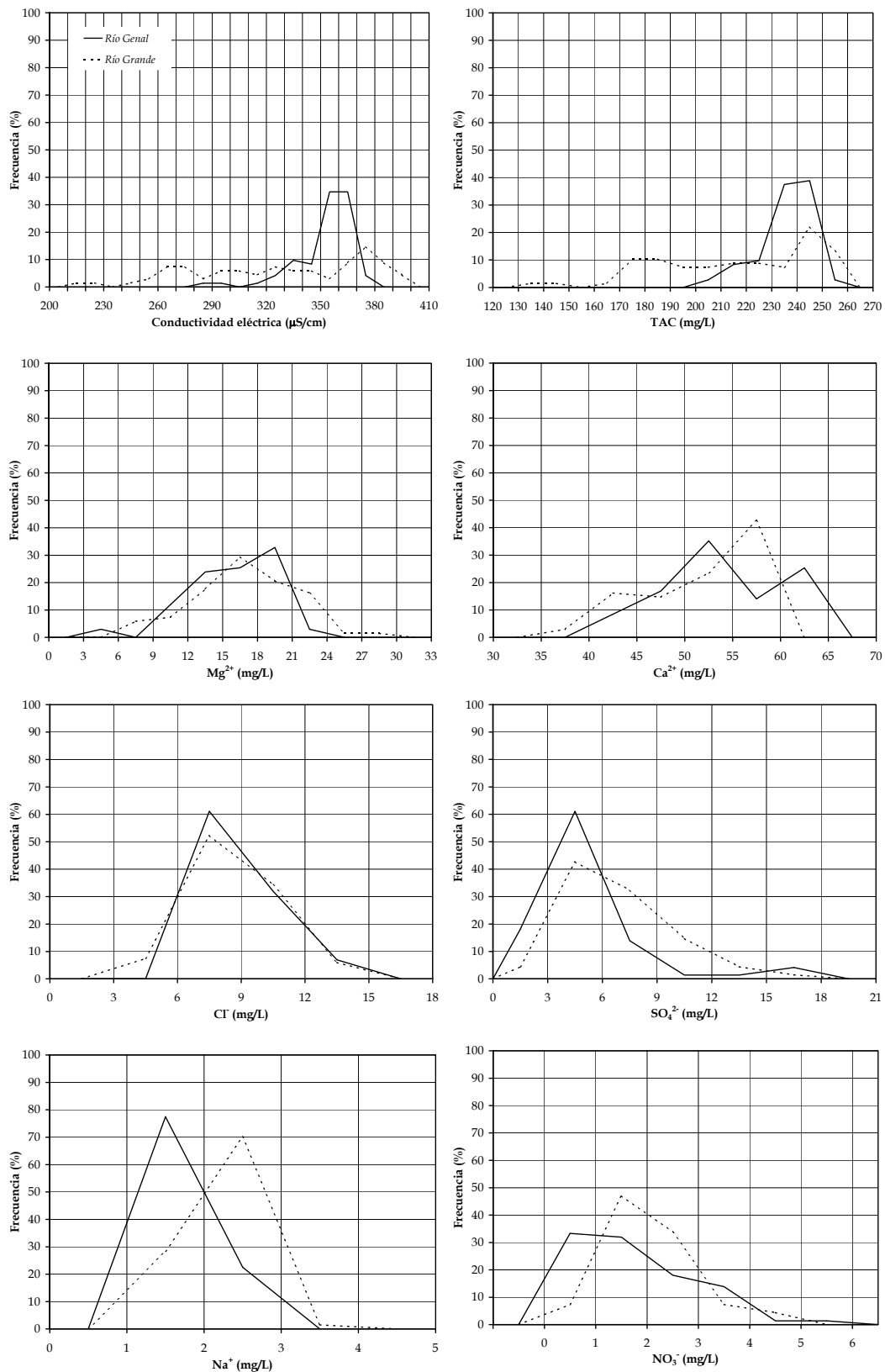


Figura 6.30. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales del Río Genal y del Río Grande.

6.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas muestreadas en el manantial del Río Genal no siguen tendencia alguna durante el período de estudio (Figura 6.31). El valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ del agua drenada por este manantial es de $-7,23\text{‰}$, mientras que la media aritmética es algo más baja ($-7,17\text{‰}$). Por el contrario, las muestras de agua de lluvia de la Sierra de las Nieves para el mismo periodo, presentan un contenido medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ de $-6,42\text{‰}$.

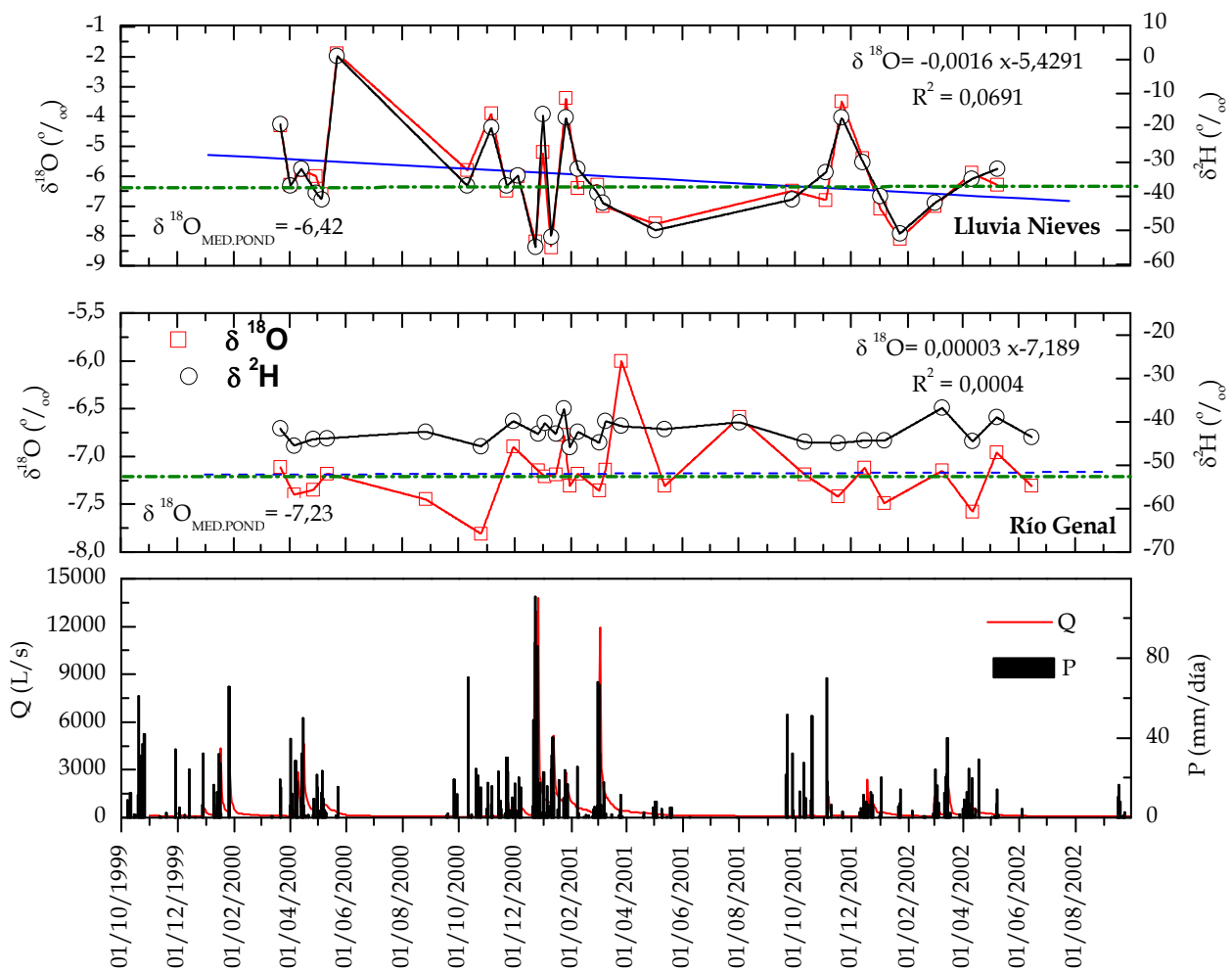


Figura 6.31. Evolución temporal de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de las Nieves y del agua drenada por el manantial del Río Genal. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$.

La diferencia entre los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ de entrada y salida, indica un empobrecimiento en el agua del manantial, debido a la evapotranspiración de las lluvias menos negativas (Figura 6.31).

El agua del manantial del Río Genal muestra variaciones significativas de los contenidos isotópicos en respuesta a los episodios de recarga registrados durante el período de investigación (Figura 6.31). En general, se aprecia que la evolución de $\delta^{18}\text{O}$ del agua del manantial repite, aunque amortiguadas, las variaciones relativas del $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia. No obstante, no se observa un patrón claro ya que unas veces la repetición es coetánea y en otros momentos existe un cierto desfase, en parte, porque la periodicidad de muestreo impide hacer precisiones más detalladas.

Se han realizado las curvas de frecuencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas drenadas por el manantial del Río Genal (Figura 6.32). En ambos casos, se obtienen curvas con un amplio rango de variación y una forma plurimodal, indicativo de la existencia de un importante grado de karstificación funcional en el sector del sistema acuífero de la Sierra de las Nieves drenado por esta surgencia.

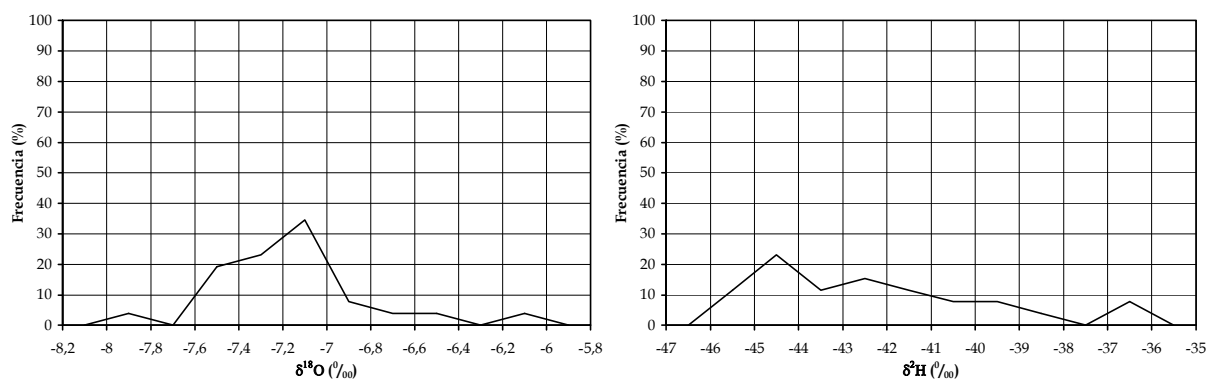


Figura 6.32. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial del Río Genal durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.

6.5. ENSAYO DE TRAZADOR EN AGUAS BAJAS

Al igual que en la Sierra de Líbar y como complemento de las investigaciones hidrogeológicas realizadas mediante otras técnicas (hidrodinámicas, hidroquímicas e isotópicas), durante agosto y septiembre de 2003, se realizó un ensayo de trazador en la Sierra de las Nieves, en condiciones

hidrodinámicas de final de estiaje. Se realizó en esta época porque existía agua circulando por el interior de la cavidad (sima del Aire) y se podía acceder a ella. Este tipo de investigación tenía como objetivos conocer la conexión hidráulica entre uno de los sifones activos de la sima del Aire, y los principales manantiales del acuífero, así como estimar el orden de magnitud de las velocidades de flujo en el interior de este acuífero. El ensayo de trazador pretendía, además, corroborar y/o precisar algunas de las hipótesis sobre el funcionamiento hidrodinámico del acuífero deducidas por otros métodos. Este ensayo de trazadores, al igual que el realizado en la Sierra de Líbar, es el resultado de la colaboración científica de los grupos de hidrogeología de las universidades de Málaga, Karlsruhe (Alemania) y Neuchâtel (Suiza) y, como tal, ha sido objeto de una publicación conjunta (Andreo *et al.*, 2005).

Durante este ensayo de trazador, además del control hidrodinámico de los manantiales de los ríos Genal, Verde y Grande, se aforó periódicamente el manantial del Río Horcajos (Figura 6.33) y se controló en continuo la precipitación diaria en el área de Los Quejigales. Además, paralelamente al muestreo de agua de los manantiales para determinar la concentración de trazador, se tomaron muestras para análisis químicos. En los puntos más alejados, donde era menos previsible que se detectara el trazador (manantial de Genal y sondeos de Arroyo de la Parra) se colocaron bolsas de carbono para constatar la posible presencia de trazador.

El trazador empleado fue Eosina (Acid Red 87, CI: 45 380, CAS: 17372-87-1), del cual se inyectaron, el 29 de agosto de 2003, 2 kg en el sifón de la sima del Aire situado a 640 m de profundidad, cuando circulaba un caudal aproximado de 5 L/s. No obstante, los espeleólogos de la Sociedad Excursionista de Málaga, que fueron quienes hicieron la inyección del trazador, estimaron un caudal de varias decenas de L/s durante la campaña de exploración de esta sima en el mes de abril del mismo año.

El muestreo de agua en las diferentes surgencias se inició antes de la inyección (28/08/2003), para así poder caracterizar de forma inequívoca la llegada

y el tránsito de los trazadores por el acuífero. El total de muestras recogidas durante el ensayo fue de 187 en cada punto.

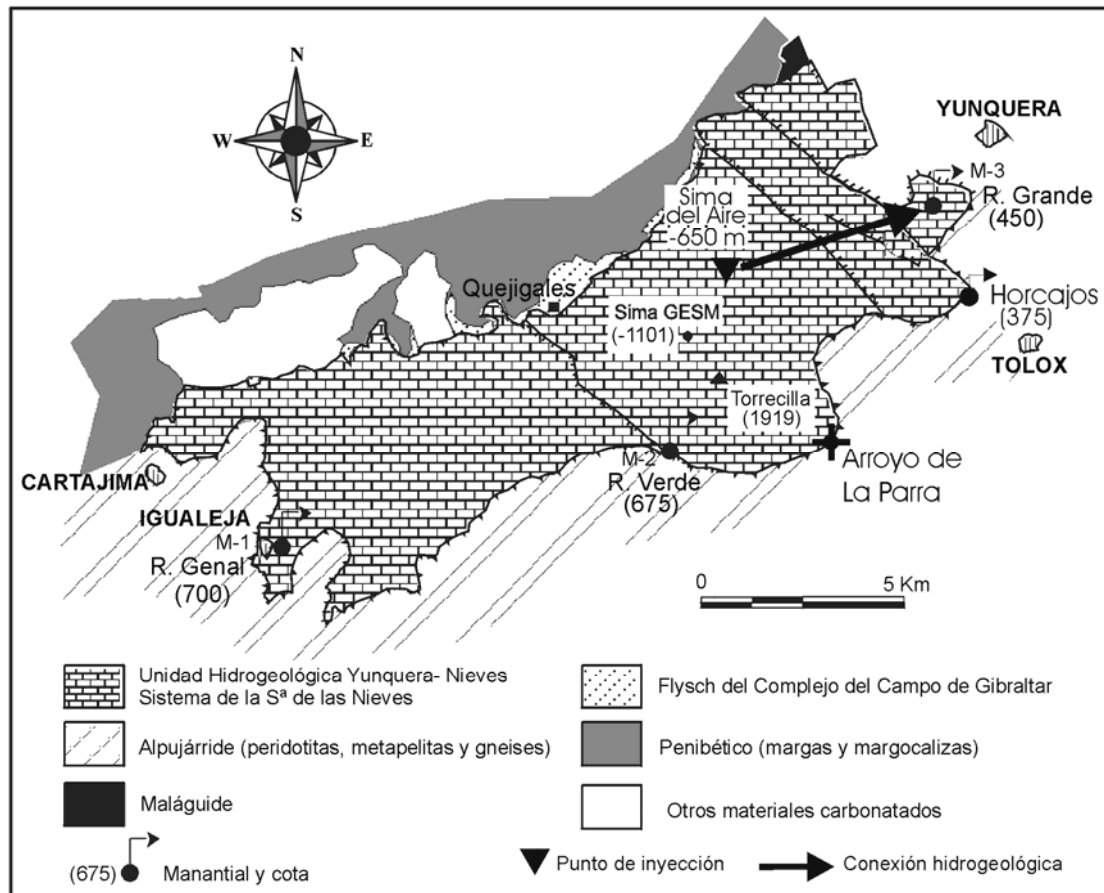


Figura 6.33. Situación del punto de inyección y de los puntos controlados dentro del esquema hidrogeológico del acuífero de la Sierra de las Nieves.

Como el ensayo de trazador se realizó en condiciones de estiaje, no se detectaron variaciones significativas del caudal de los manantiales durante el mismo (Figura 6.34). Las primeras lluvias del año hidrológico 2003/2004, no produjeron variaciones de caudal y sólo en la estación de aforos de Las Millanas se registró un ligero aumento de caudal el día 20 de Octubre, en respuesta a las lluvias caídas los días previos (Figura 6.34). Durante el periodo final del ensayo, los manantiales mostraron aumentos de caudal como consecuencia de las importantes precipitaciones registradas entre los días 25 y 31 de Octubre, con un total de 246 mm.

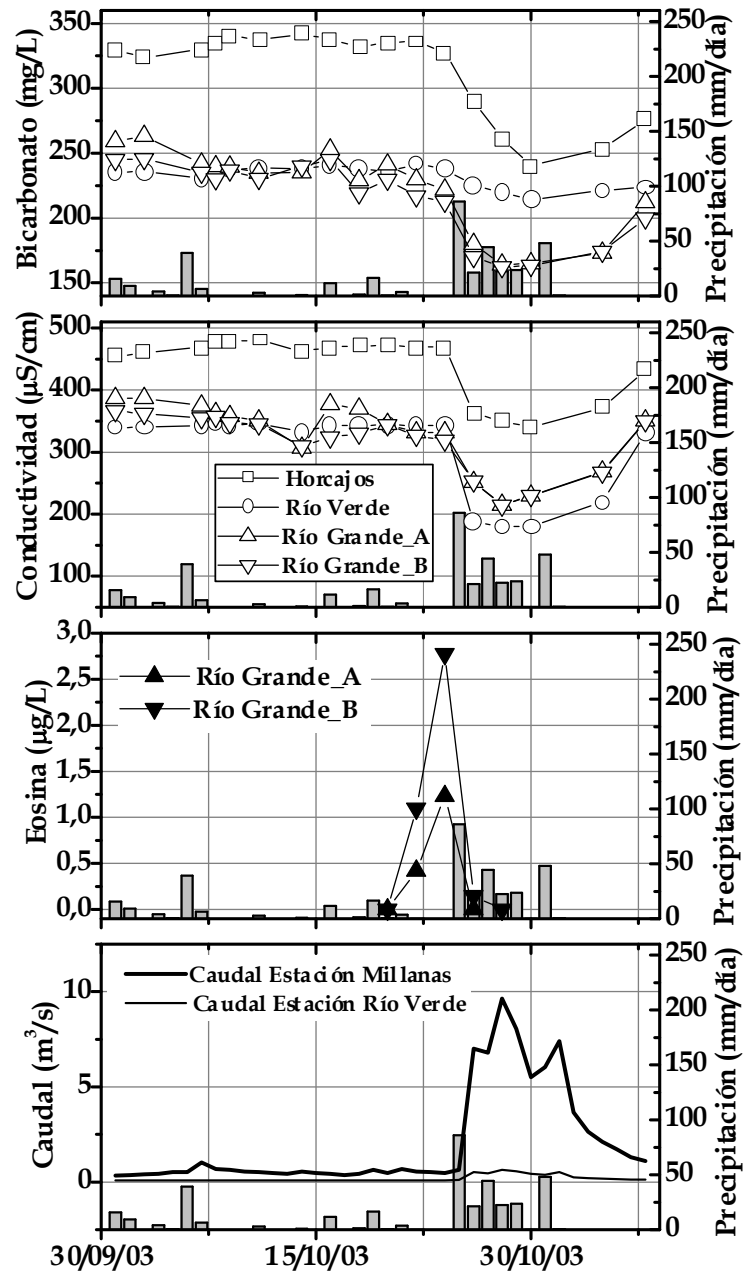


Figura 6.34. Evolución de la conductividad eléctrica y del contenido en bicarbonato en el agua de los manantiales de Horcajos, Río Verde y de las dos surgencias del nacimiento de Río Grande durante el ensayo de trazador. Se ha representado también los datos de concentración de Eosina en las dos surgencias del nacimiento de Río Grande así como la evolución de la precipitación en la estación de Los Quejigales y del caudal en el Río Grande (Estación de Las Millanas) y en el manantial de Río Verde.

El trazador sólo se detectó, entre los días 22 y 26 de Octubre de 2003, en los dos puntos de surgencia controlados en el nacimiento del Río Grande (Figuras 6.33 y 6.34). La primera detección (22/10/03) y la concentración máxima de Eosina (24/10/03) se registraron antes del máximo de precipitación del día 25, por lo que el flujo de agua que forzó la salida de trazador del sistema se infiltró durante los

periodos lluviosos anteriores. Las curvas de paso del trazador son propias de acuíferos kársticos, con ascensos y descensos muy acusados de la curva de respuesta (Figura 6.34). En el resto de manantiales no se detectó el trazador. Las precipitaciones del día 25 provocaron una dilución generalizada de los parámetros hidroquímicos en el agua de todos los manantiales.

Como no ha sido posible realizar un control adecuado de los caudales drenados por los dos puntos de surgencia en el nacimiento del Río Grande, no se ha podido calcular la cantidad total de trazador recuperada. Sin embargo, se ha podido estimar una velocidad máxima de flujo de 93 m/día ($\sim 3'9$ m/hora) y una velocidad de flujo dominante de 89 m/día ($\sim 3'7$ m/hora). Estos datos son poco significativos de la velocidad de flujo en el acuífero de la Sierra de las Nieves, en condiciones de estiaje, ya que el trazador hubiera tardado más tiempo en drenarse por los manantiales de no haberse producido las lluvias de Septiembre y Octubre.

Desde el punto de vista del funcionamiento hidrogeológico general del sistema acuífero, la conexión hidrogeológica entre la sima del Aire y el manantial de Río Grande pone de manifiesto que el flujo subterráneo sigue la dirección estructural marcada por el sinclinal de la Torrecilla (NE), como ya pusieron de manifiesto otros autores (Durán y López Martínez, 1992; Liñán *et al.*, 1999; Liñán, 2003; Andreo *et al.*, 2004b), según los cuales el área del vértice Torrecilla forma parte del área de recarga del nacimiento de Río Grande.

Desde el punto de vista del análisis de la descarga del sistema de la Sierra de las Nieves, se ha puesto de manifiesto que en condiciones de estiaje existe un flujo relativamente lento a través de la potente zona no saturada del acuífero (del orden de 1 km de espesor). Sin embargo, la curva de trazador registrada en los puntos de descarga del manantial del Río Grande junto con la rápida respuesta del sistema ante las precipitaciones, con aumentos de caudal y diluciones de la composición química del agua de los manantiales, constatan la existencia de una red kárstica en su interior que permite el drenaje rápido en condiciones de recarga, lo cual está en consonancia con la interpretación efectuada previamente a partir de otros métodos hidrogeológicos.

7. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA PRIETA-BONELA-ALCAPARAÍN

7.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

El sistema acuífero Prieta-Bonela-Alcaparaín definido por Liñán (2003), constituye el sector más septentrional de la unidad hidrogeológica Yunquera-Nieves y presenta una superficie de 44 km² (Figura 7.1). Como su propio nombre indica en él se incluyen las sierras Prieta, Bonela y Alcaparaín y está formado, fundamentalmente, por materiales de la denominada unidad tectónica de Nieves (Martín-Algarra, 1987), constituida por dolomías, calizas y brechas (véase apartado 6.1.). En el sector más septentrional del sistema, también afloran las rocas metamórficas de la Unidad de Yunquera: mármoles, micaesquistos y gneises.

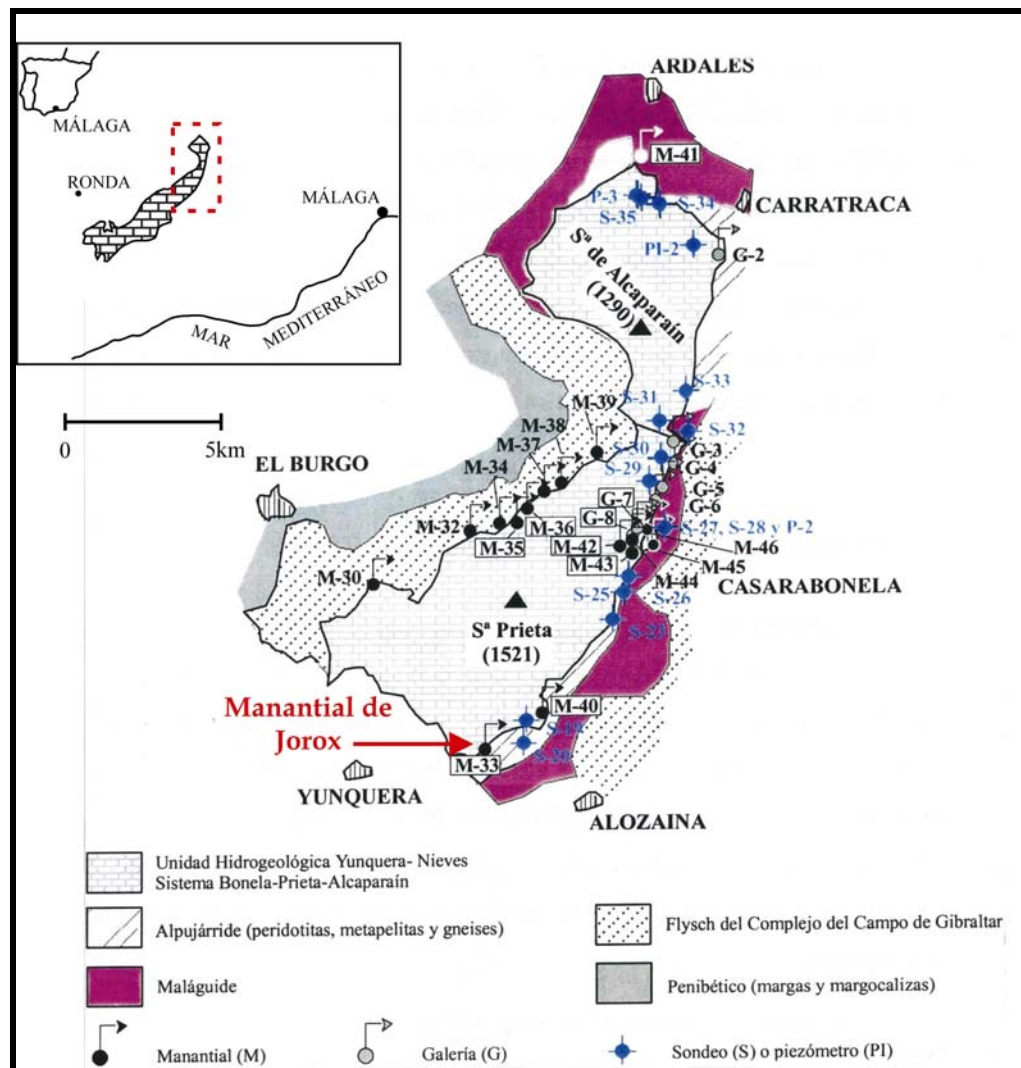


Figura 7.1. El sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín (tomado de Liñán, 2003).

En las Sierras Prieta, Bonela y Alcaparaín, a diferencia del sistema de la Sierra de las Nieves, no existe un gran desarrollo de formas exokársticas. Las escasas formas endokársticas existentes son pequeñas cavidades de reducido desarrollo vertical y horizontal situadas en la parte central y meridional de este sistema acuífero.

La recarga del acuífero se produce por infiltración del agua de lluvia y, ocasionalmente, de nieve. La descarga se realiza a través de manantiales situados en el borde meridional (manantial del Río Jorox) y oriental (manantiales de Carratraca y Fuente Quebrada). El manantial del Río Jorox (530 m s.n.m.) surge ligado a una de las importantes fracturas plurikilométricas (Figura 7.1.), de dirección NW-SE, que atraviesan la Unidad Hidrogeológica.



Lámina 7.1. A- Panorámica de Sierra de Prieta, B- Panorámica de Sierra Alcaparaín, C- Manantial del Río Jorox (aguas bajas), D- Manantial del Río Jorox (aguas medias-altas).

7.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

La caracterización de la respuesta hidrodinámica del sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín se ha realizado a partir de la serie de caudales medios diarios del principal punto de descarga de este acuífero, el manantial del Río Jorox.

La serie analizada comprende desde el 20 de Febrero de 2000 hasta el 30 Septiembre de 2003. Los valores de caudal medio diario se han obtenido a partir de la aplicación de la curva de gastos calculada por la Agencia Andaluza del Agua a los datos de altura media diaria de la lámina de agua en la estación de aforos situada en el mismo manantial. El caudal medio del manantial durante el periodo considerado ha sido de 104 L/s. En la figura 7.2 se representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos.

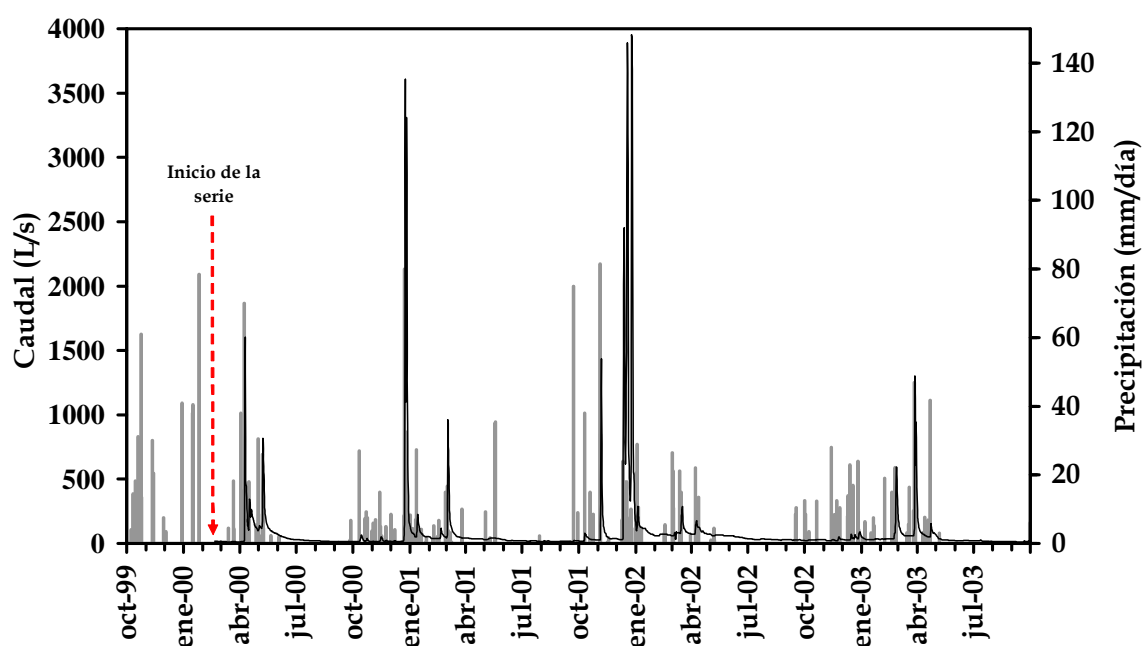


Figura 7.2. Hidrograma del manantial de Río Jorox entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. Precipitaciones registradas en la estación pluviométrica de Casarabonela.

7.2.1. Análisis del hidrograma del manantial del Río Jorox

Los hidrogramas anuales del manantial del Río Jorox muestran varias crecidas, para cada año hidrológico, como respuesta a los diferentes eventos pluviométricos (Figura 7.3). Las crecidas son rápidas y muy puntiagudas, es decir, hay importantes diferencias de caudal entre el final del agotamiento y la punta de la crecida. Esta respuesta en los caudales drenados por la surgencia, indicativa *a priori* de una infiltración rápida del agua de lluvia, ya fue puesta de manifiesto por Liñán *et al.* (2001) y Liñán (2003).

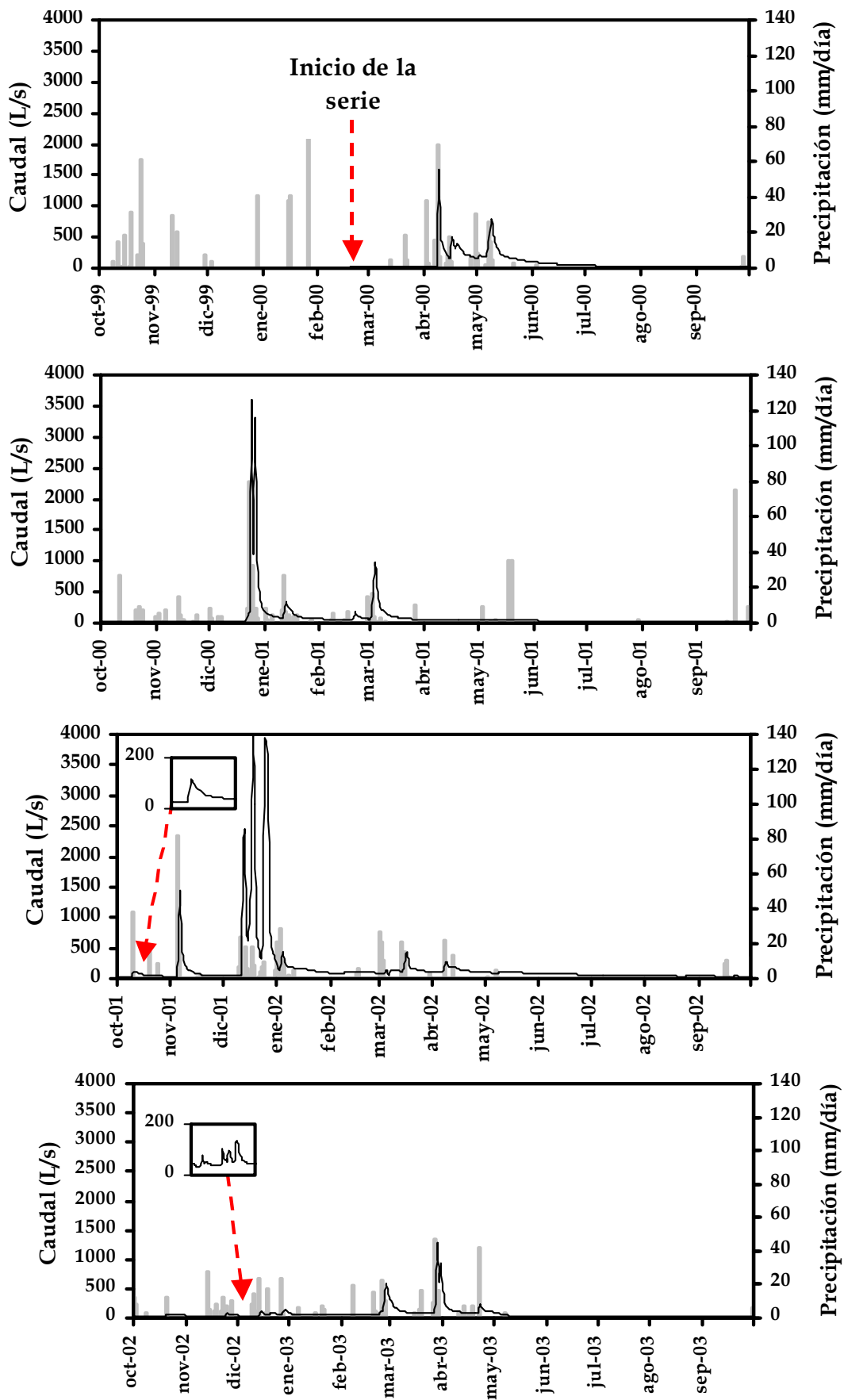


Figura 7.3. Hidrogramas anuales, a paso de tiempo diario, del manantial del Río Jorox durante el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Casarabonela.

Las crecidas del manantial son, en la mayor parte de los hidrogramas analizados, proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones (Figura 7.3). Los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria).

No obstante, las primeras lluvias de los años hidrológicos 2000/2001 y 2002/2003, producen un escaso o nulo aumento de los caudales de la surgencia (Figura 7.3). Este tipo de respuesta coincide con el hecho de que el inicio de ambos años hidrológicos viene precedido de un importante estiaje, de manera que las primeras lluvias otoñales infiltradas durante estos periodos, se emplean en recargar el volumen de agua drenado durante el agotamiento anterior.

La mayoría de los hidrogramas anuales del manantial del Río Jorox se caracterizan por presentar tiempos de base menores de 15 días y tiempos de crecida aproximados de 5 días (Figura 7.3).

La diferencia importante entre los caudales extremos registrados, cada año hidrológico, se pone claramente de manifiesto, a través de los datos recogidos en la tabla 7.1. El valor obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 119.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	<i>Precipitación</i>
1999/2000	1595	17	94	707
2000/2001	3600	24	150	584
2001/2002	3980	28	142	503
2002/2003	1292	17	76	516
<i>media</i>	2617	22		578

$$\frac{\overline{Q_{max}}}{\overline{Q_{min}}} = 119$$

Tabla 7.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial del Río Jorox y valores de precipitación anual en la estación de Casarabonela para el periodo entre 1999 y 2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).

7.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

Del periodo de estudio 1999/2000 - 2002/2003 se han analizado 4 curvas de recesión correspondiente al manantial del Río Jorox, una para cada año hidrológico. En la figura 7.4 se muestran las curvas seleccionadas y en la tabla 7.2 se recogen los datos relativos a las mismas y los resultados obtenidos de su análisis.

El análisis de la decrecida permite observar que la duración media de ésta (D_d) es relativamente alta (33 días) y varía considerablemente de unos años a otros, de manera que, los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) están comprendidos entre $0'0164$ días⁻¹ (2001/2002) y $0'2000$ días⁻¹ (año 2000/2001). Estos resultados tan variables ponen de manifiesto la heterogeneidad del comportamiento de la zona no saturada de este acuífero, según la cantidad e intensidad de las precipitaciones y el estado hidrodinámico precedente del acuífero. El coeficiente de heterogeneidad (ε) varía entre $0'2222$ (2002/2003) y $0'9672$ días⁻¹ (2001/2002). Estos valores de ε dan lugar a una importante concavidad de la curva de la función y (Figura 7.4), lo cual significa que, la disminución del caudal en el manantial del Río Jorox se produce de manera muy rápida. Los valores del parámetro i obtenidos a partir de η y ε (Tabla 7.2) son característicos, según los criterios de Mangin (1975), de un sistema complejo y de grandes dimensiones que sufre retrasos en los aportes.

El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores del orden de 10^{-2} a 10^{-3} días⁻¹, con una media de $1,04 \times 10^{-2}$ días⁻¹. La representación del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado para cada hidrograma en función del tiempo (Figura 7.4), permite estimar que, excepto para la curva 2002/2003, al cabo de 100 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se habría drenado más del 50% de dicho volumen. Todos estos datos indican que el agotamiento se produce de forma relativamente rápida, por tanto, la capacidad de regulación natural de este acuífero es escasa. El volumen de tránsito anual (V_t) calculado para el sector de acuífero drenado por este manantial es de $3,3$ hm³. El cociente V_d/V_t

permite calcular el parámetro k , que presenta valores inferiores a 0'50 para todas las curvas analizadas, excepto para la recesión del año 1999/2000, lo que según Mangin (1975) es característico de un sistema de tipo kárstico.

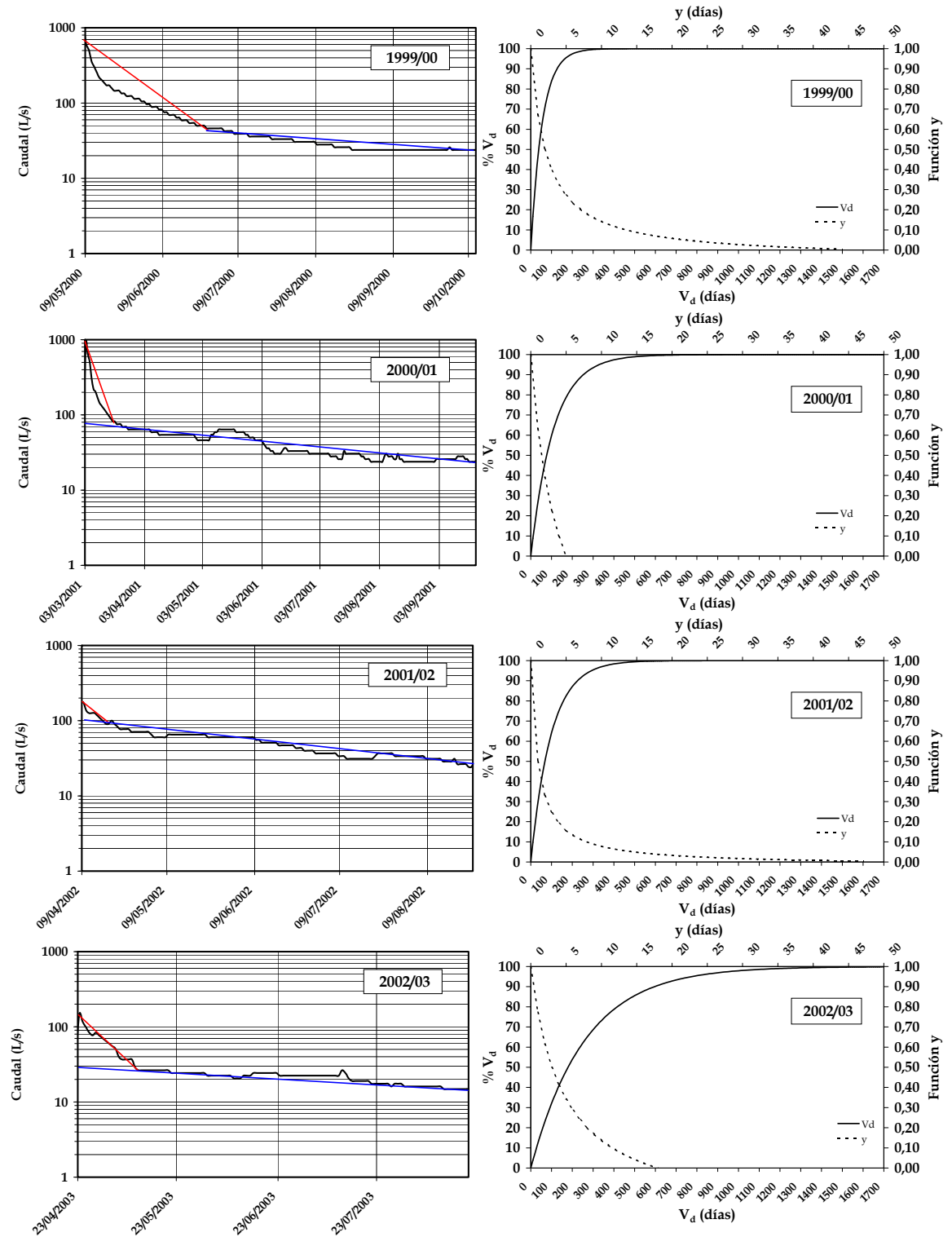


Figura 7.4. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial del Río Jorox para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999/2000	49	0,0204	0,4592	0,50	108	1,82E-02	1,99	0,61
2000/2001	5	0,2000	0,2667	0,39	198	9,12E-03	1,45	0,44
2001/2002	61	0,0164	0,9672	0,33	77	1,04E-02	1,25	0,38
2002/2003	18	0,0556	0,2222	0,50	132	3,87E-03	0,96	0,29
Media	33	0,0731	0,4788	0,43	129	1,04E-02	1,41	0,43

Tabla 7.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial del Río Jorox (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.

La figura 7.5 muestra que el funcionamiento hidrogeológico del sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín cambia de un ciclo a otro, aunque se sitúa fundamentalmente en el dominio III, característico según Mangin (1970, 1975) de sistemas con una karstificación más desarrollada en el subsistema infiltración y con retardos en la alimentación.

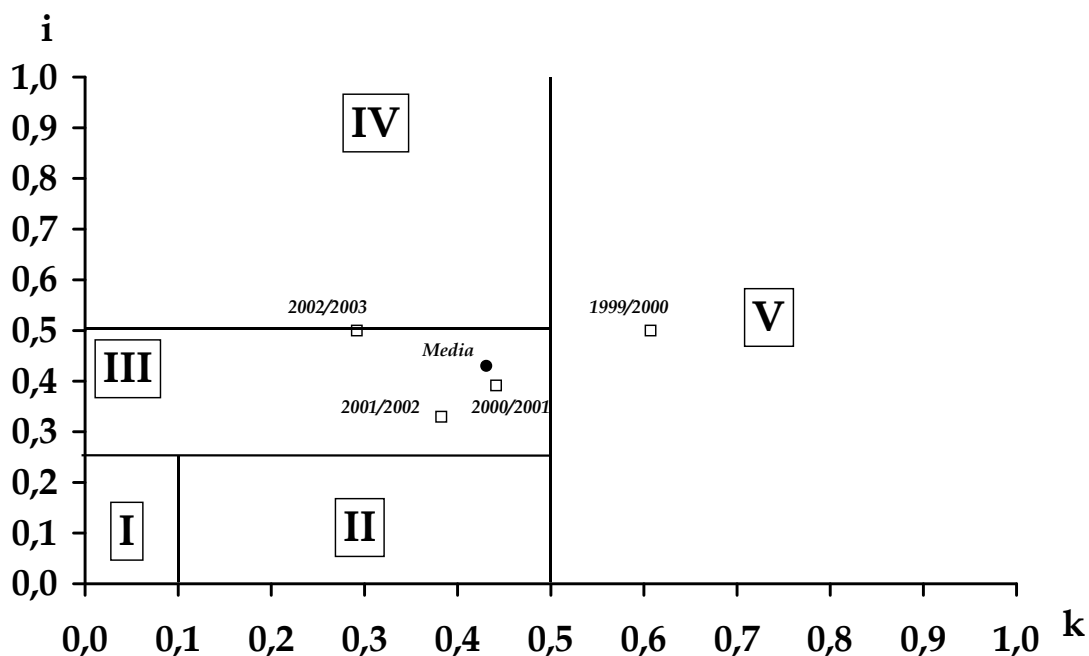


Figura 7.5. Gráfico $i-k$ propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión del manantial del Río Jorox.

7.2.3. Análisis correlatorio y espectral

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral realizado con la serie de datos registrados entre 20/02/2000 y 30/09/2003. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de Casarabonela y la de salida a los caudales medios diarios en la estación de aforos del manantial del Río Jorox. Fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. El tratamiento se ha realizado a corto término (ventana de observación de 125 días y paso de un día) y larga término (ventana de observación de 500 días y paso de 10 días).

7.2.3.1. Análisis simple

El correlograma de la serie de caudales diarios de este manantial es muy poco tendido (Figura 7.6A), con un efecto memoria muy bajo (10 días), valor igual al obtenido por Liñán (2003) para el año hidrológico 1997/1998. Se observan picos a los 6 y 13 días, que también se detectan en el correlograma simple y en el espectro simple de la lluvia (Figura 7.6A y 7.6B).

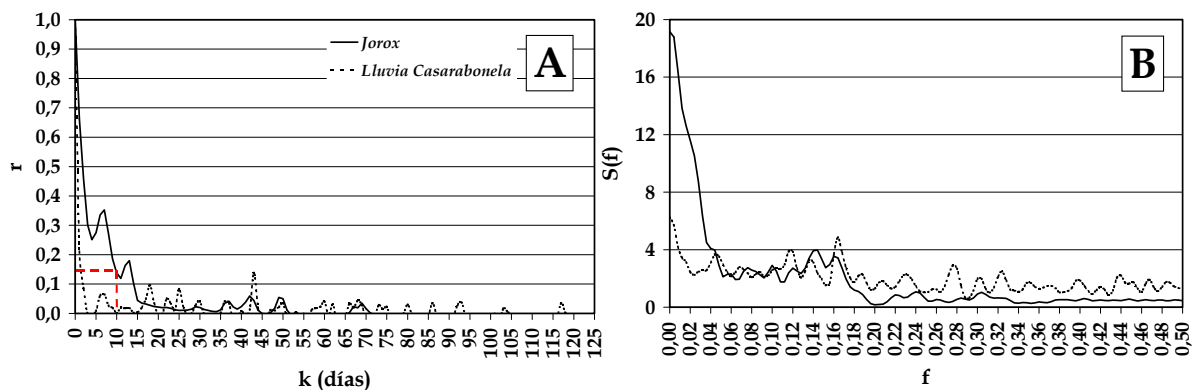


Figura 7.6. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de la precipitación registrada en la estación de Casarabonela entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

El espectro de densidad de varianza de los datos de caudal (Figura 7.6B) permite calcular un tiempo de regulación muy bajo (8 días), indicativo de una escasa capacidad reguladora del sector del acuífero Prieta-Bonela-Alcaparaín drenado por el manantial del Río Jorox. La anchura de la banda espectral o

frecuencia de corte es de 0'18 (Figura 7.6B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 5 días.

En el correlograma obtenido mediante del análisis a largo término, apenas se observa la existencia de una periodicidad anual (Figura 7.7A). No obstante, el espectro para el análisis de larga duración (Figura 7.7B), muestra un pico para la componente anual, al igual que se detecta para las precipitaciones; por tanto, parece claro que el origen de esta periodicidad anual es de origen climático.

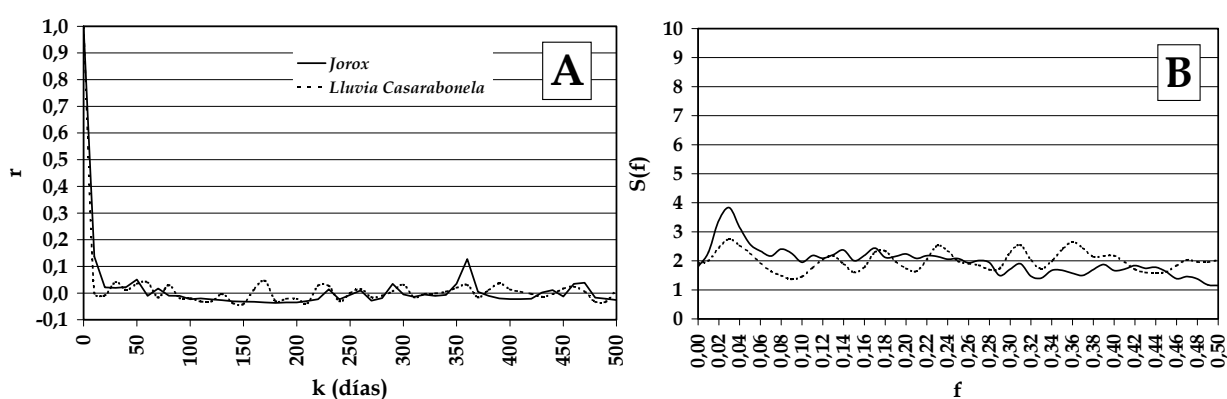


Figura 7.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de la precipitación registrada en la estación de Casarabonela entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

7.2.3.2. Análisis cruzado

El análisis simple se ha completado con un análisis cruzado de los datos de caudal y de precipitación. El correlograma cruzado obtenido es puntiagudo y estrecho (Figura 7.8A), con valores máximos del coeficiente de correlación de 0,432 para un valor de k de 1 día, lo que traduce un modelo poco inercial, como ya se ha puesto de manifiesto anteriormente con los resultados del análisis correlatorio simple.

El correlograma cruzado de larga duración (Figura 7.9A) muestra, únicamente, una periodicidad anual difusa. Este resultado, en comparación con los obtenidos en los manantiales anteriormente estudiados, refleja una menor inercia del sistema, ya que las señales a largo término se amortiguan frente a las

señales a corto término, hecho éste puesto de manifiesto por Obartí (1987) y Mugerza (2001) para otros acuíferos peninsulares.

La función de amplitud cruzada (Figura 7.8B) muestra los mismos picos que se observaban en el espectro simple de lluvia (6, 13 y 23 días), lo que pone de manifiesto una capacidad de filtro escasa y, por lo tanto, corrobora la hipótesis de una respuesta rápida asociada a una red kárstica relativamente desarrollada. La función de fase permite calcular un desfase comprendido entre 1 y 2 días para los sucesos periódicos observados en el análisis a corto plazo. Del análisis a largo término se deduce un desfase de 11 días para sucesos con periodicidad anual.

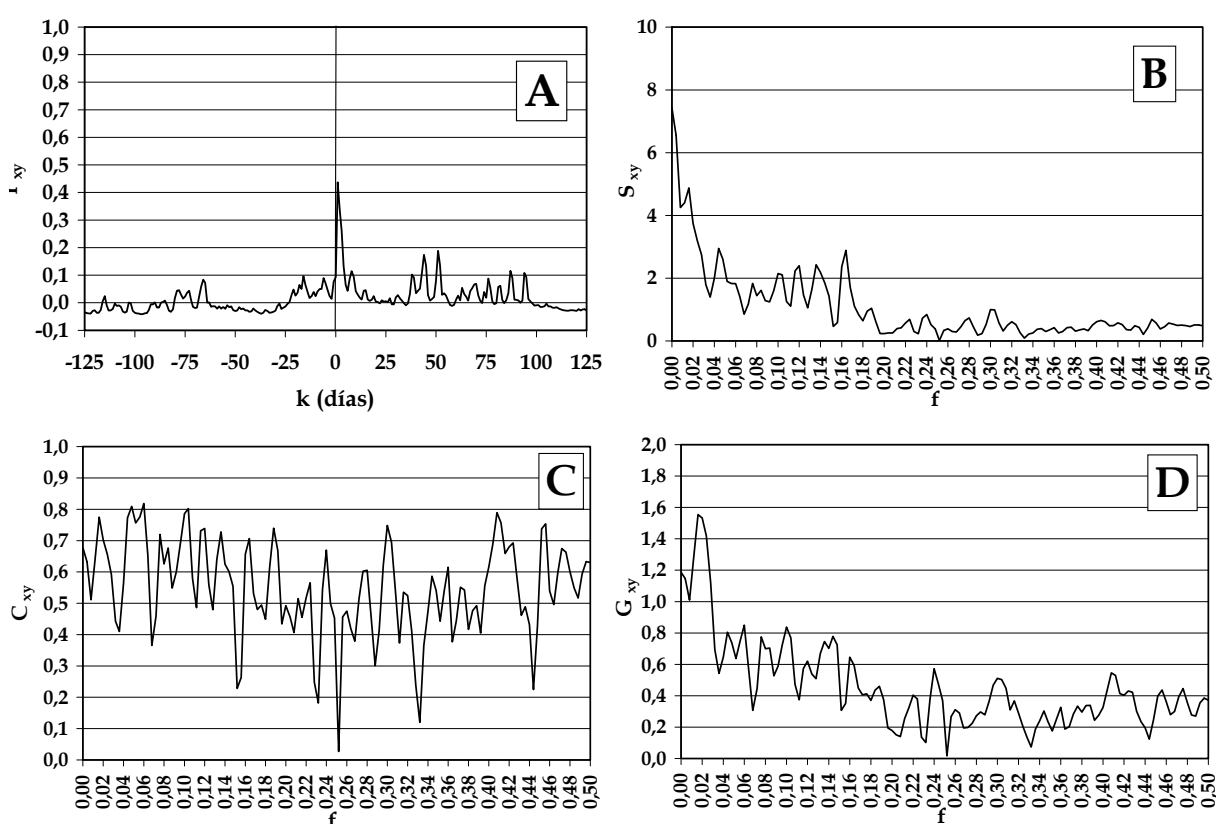


Figura 7.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Casarabonela para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

En la figura 7.8C se observa que el sistema es relativamente lineal para gran parte de las frecuencias, lo cual demuestra la estrecha relación existente entre las entradas y las salidas. El análisis de larga duración indica que la respuesta del manantial no es lineal para las frecuencias analizadas (Figura 7.9C). Las funciones

de ganancia del análisis a corto y largo término (Figura 7.8D y 7.9D) muestran que únicamente se produce amplificación de la señal de entrada para sucesos de alta periodicidad (bajas frecuencias) y se atenúa la señal de entrada para las frecuencias altas. Este resultado es coherente con el comportamiento kárstico del sistema deducido a partir de los otros parámetros.

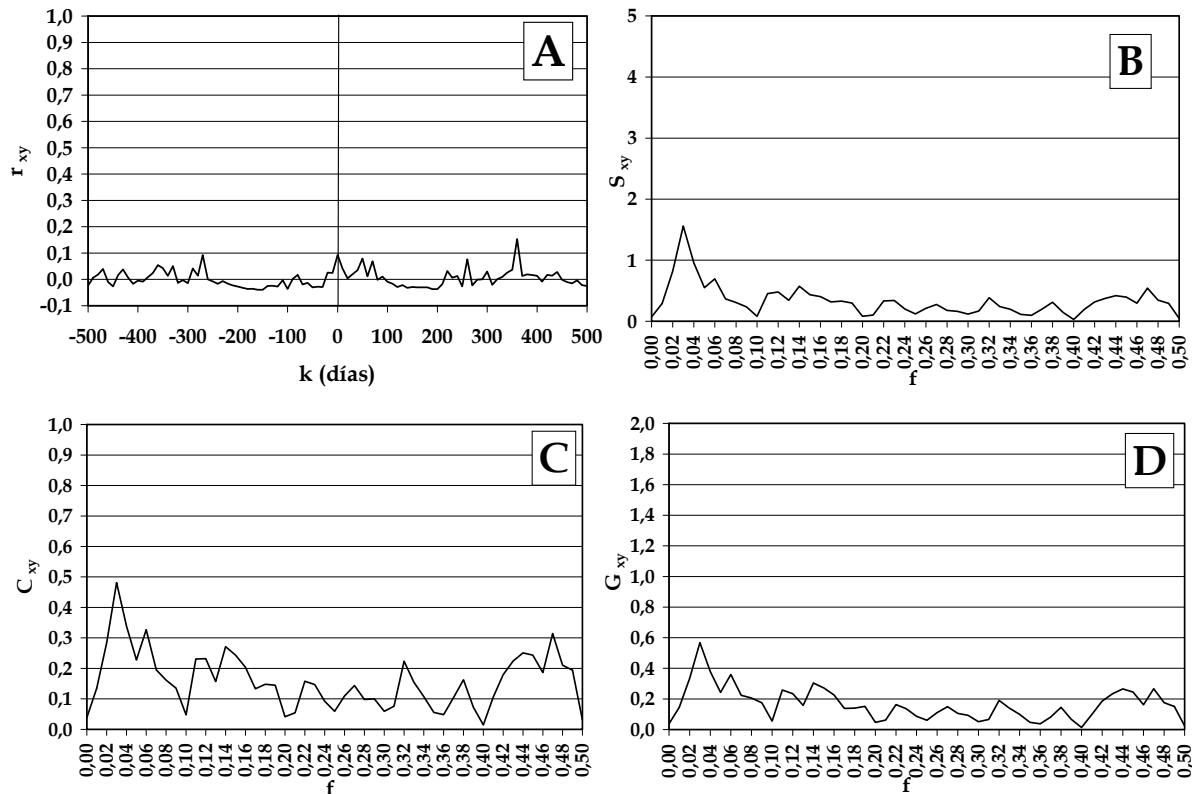


Figura 7.9. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por el manantial del Río Jorox y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Casarabonela para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

7.2.4. Análisis de caudales clasificados

La serie de caudales diarios en el manantial del Río Jorox se ha dividido en clases de 50 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase. La figura 7.10A muestra que durante casi el 70% de los datos, son inferiores a 150 L/s. Además, también se observa que para los elevados caudales apenas existen variaciones en las frecuencias acumuladas, comportamiento característico, de sistemas de tipo kárstico. La representación de la frecuencia

relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 7.10B), permite diferenciar la existencia de tres tramos principales:

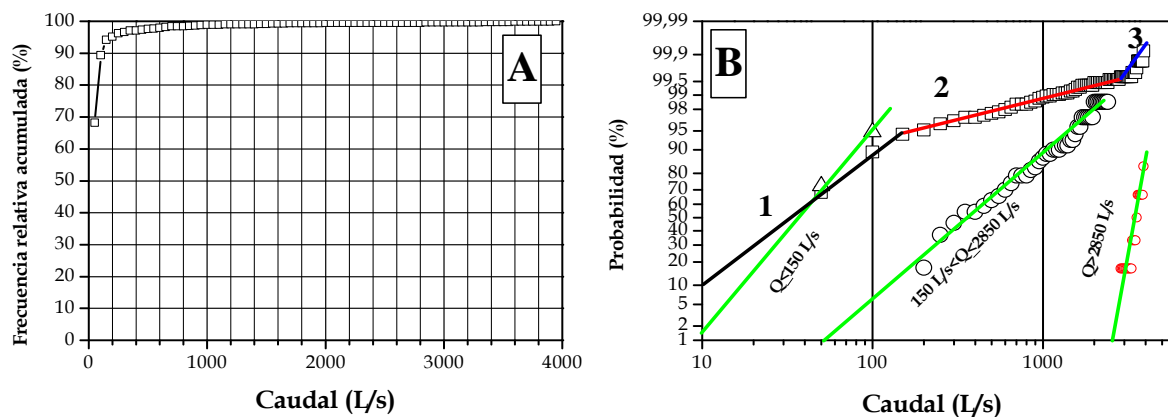


Figura 7.10. Gráfico de caudales clasificados del manantial del Río Jorox, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(1) Tramo de caudales inferiores a 150 L/s, que incluye la parte final de la curva de decrecida, sobre todo de crecidas primaverales, junto con la situación de agotamiento del manantial.

(2) Tramo de caudales entre 150 y 2850 L/s, que constituye, fundamentalmente, la crecida y decrecida s.s. del hidrograma manantial.

(3) Tramo de caudales superiores a 2850 L/s, correspondiente a las puntas de las crecidas (Diciembre de 2000 y 2001). El hecho de que presente una mayor pendiente podría indicar que durante estas crecidas entre en funcionamiento otro punto diferente que drene parte del agua infiltrada en el sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín (trop-plein) o aumente la descarga por el sector oriental de este sistema acuífero (manantiales de Carratraca y Fuente Quebrada).

El tratamiento llevado a cabo para el conjunto de la serie de datos, también se ha realizado para cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 7.10B). Además, se ha calculado el porcentaje del volumen desaguado con respecto al total, para cada una, de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 7.3). Los resultados reflejan que durante el agotamiento y parte de la decrecida se drena un 50% del volumen total desaguado por esta surgencia durante el periodo de estudio. El hecho de que casi el 25% del volumen

sea drenado en dos crecidas hidrodinámicas muy excepcionales pone de manifiesto el comportamiento eminentemente kárstico que posee el sistema.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 150$ L/s	37	50
150 L/s $\leq Q < 2850$ L/s	350	27
$Q > 2850$ L/s	3600	23

Tabla 7.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen de agua que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial del Río Jorox a partir del análisis de caudales clasificados.

7.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

En este apartado se presentan los resultados de aplicar la transformada continua *wavelet* y el análisis cruzado de la transformada *wavelet* a las mismas series de datos que el análisis correlatorio y espectral.

El espectro continuo de los datos de precipitación (Figura 7.11A) muestra componentes para periodos menores de 1 mes, que no aparecen tan marcadas en el espectro de caudales de la surgencia del Río Jorox (Figura 7.12A).

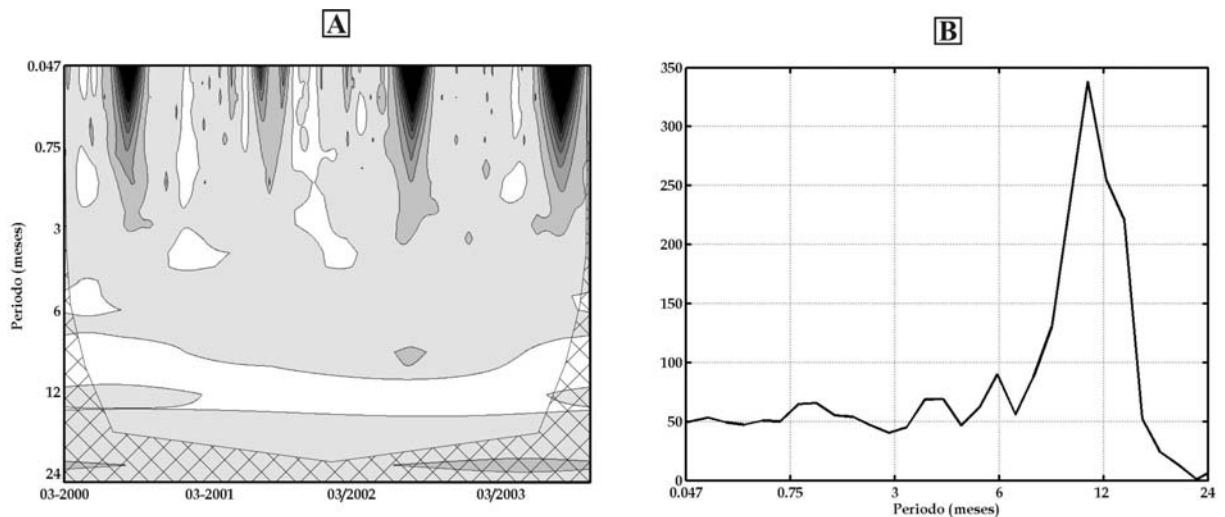


Figura 7.11. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Casarabonela para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el "cono de influencia" donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La periodicidad anual es la más destacada en el espectro continuo global de las precipitaciones (Figura 7.11B). No obstante, como se puede comprobar en el

espectro continuo (Figura 7.11A), esta periodicidad anual aparece para el intervalo 10-12 meses, sobre todo durante la primera parte del registro de precipitaciones. Esta señal anual no se observa, *a priori*, en el espectro continuo de la serie de caudal (Figura 7.12A), aunque sí se pone de manifiesto destacadamente en el espectro global continuo (Figura 7.12B). Además de la periodicidad anual, en el espectro global de caudales se observan periodicidades inferiores a ésta (Figura 7.12B): una componente semestral y cuatrimestral.

El espectro de la serie de caudales (Figura 7.12A) no permite analizar la variabilidad de la componente anual, mientras que para la señal de entrada, no se observa variación de la periodicidad anual (Figura 7.11A).

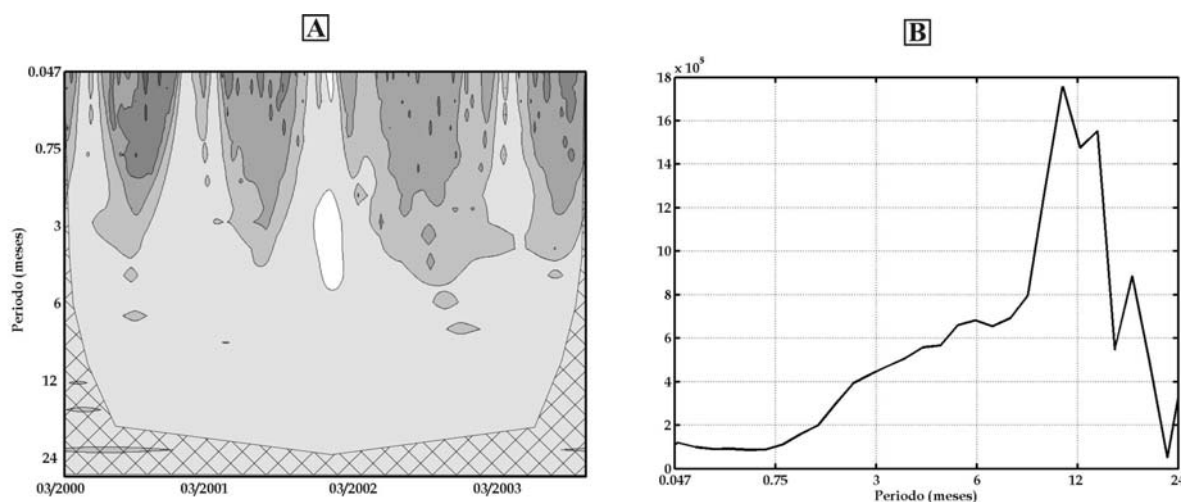


Figura 7.12. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de caudal medio diario en el manantial del Río Jorox para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

El espectro cruzado continuo de la serie de caudal y de precipitación (Figura 7.13A) permite constatar la existencia de componentes menores de la anual, aunque ésta es la más destacable. Se observa cierta variabilidad temporal de la componente anual que desaparece del espectro cruzado continuo para el periodo comprendido entre Febrero de 2003 y Septiembre de 2003. El espectro cruzado global (Figura 7.13B) refleja nuevamente que es la componente anual la más marcada, aunque también se observan componentes secundarias (1, 3-4 y 6 meses) para frecuencias más altas.

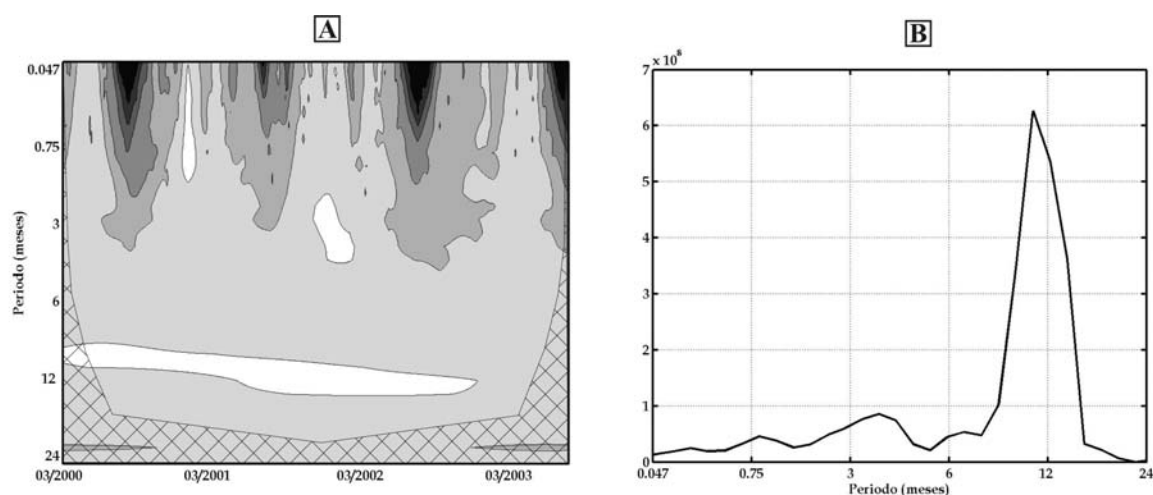


Figura 7.13. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada wavelet de los datos de precipitación diaria en la estación de la Casarabonela y de los datos de caudal medio diario en el manantial del Río Jorox para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

7.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico

El análisis hidrodinámico de los caudales del manantial del Río Jorox pone de manifiesto que en un mismo año hidrológico se producen varias crecidas, generalmente muy rápidas y puntiagudas, como respuesta a los diferentes eventos pluviométricos. En contraposición a este comportamiento general, se advierte que con las primeras lluvias de algunos años hidrológicos, los cuales están precedidos de un agotamiento prolongado, no producen aumento de los caudales de la surgencia, ya que las primeras lluvias otoñales infiltradas durante estos periodos sirven para restituir el volumen de agua drenado durante el agotamiento anterior. Los valores bajos de los tiempos de base y de crecida, así como el alto valor de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ revelan un comportamiento hidrogeológico escasamente inercial del sistema acuífero de Prieta-Bonela-Alcaparaín.

La aplicación de la metodología propuesta por Mangin (1971, 1975) para el análisis de las curvas de recesión, demuestra que las decrecidas del manantial del Río Jorox son del orden de 33 días, aunque varían considerablemente de unos años a otros. Ello es indicativo de la heterogeneidad del comportamiento de la zona no saturada, dependiendo de la cantidad e intensidad de las precipitaciones y del estado hidrodinámico precedente del acuífero.

El agotamiento del manantial está caracterizado por un coeficiente (α) del orden de 10^{-2} - 10^{-3} días⁻¹, por lo que al cabo de 100 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se habría drenado más del 50% de todo el volumen susceptible de ser descargado, por tanto, la capacidad de regulación de este acuífero es relativamente escasa.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral demuestra que el sector del acuífero Prieta-Bonela-Alcaparín drenado por el manantial de Jorox funciona como un sistema con escasa capacidad de filtro ante las precipitaciones. Presenta unos valores de efecto memoria y tiempo de regulación ínfimos (10 y 8 días, respectivamente), que junto con los resultados del análisis cruzado reflejan el comportamiento kárstico del sistema.

La curva de frecuencias relativas acumulada frente a los intervalos de caudal de la surgencia del Río Jorox (análisis de caudales clasificados), muestra que por encima de los 2850 L/s, dentro del contexto de una crecida excepcional, debe de entrar en funcionamiento otro punto diferente (trop-plein) o aumentar la descarga por el sector oriental de este sistema acuífero. El análisis de cada uno de los tramos diferenciados para todo el conjunto del periodo de estudio, refleja, por un lado, que el manantial del Río Jorox drena el 50% del volumen total desaguado bajo condiciones de decrecidas estivales y agotamiento y, por otro lado, que casi el 25% del volumen se drena en crecidas muy excepcionales.

El análisis *wavelet* ha puesto de manifiesto la existencia de componentes de alta frecuencia durante todo el periodo de estudio lo cual es indicativo de un alto grado de karstificación funcional, lo que ha permitido corroborar que el sistema Prieta-Bonela-Alcaparín presenta un comportamiento escasamente inercial.

7.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

7.3.1. Composición química de las aguas del manantial del Río Jorox

Las muestras recogidas en el manantial del Río Jorox son de facies bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcico-magnésica (Figura 7.14).

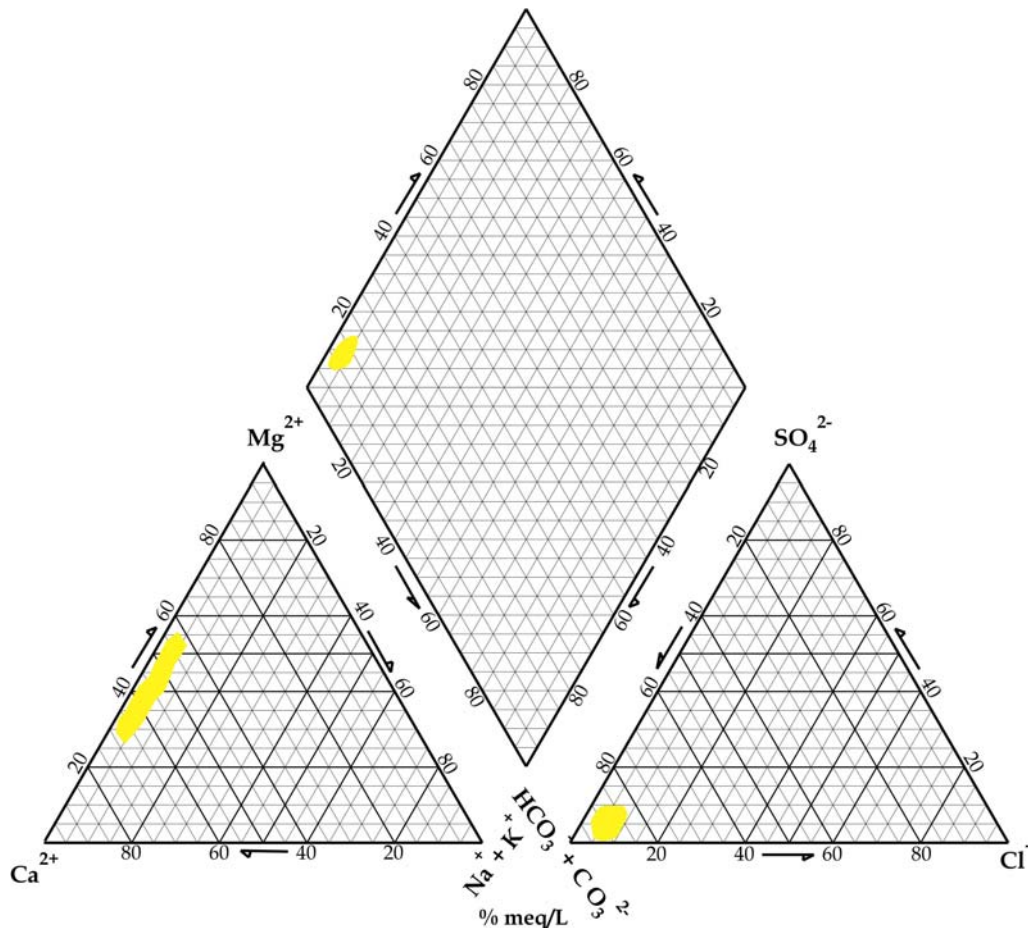


Figura 7.14. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en el manantial del Río Jorox.

Los valores de conductividad eléctrica de las aguas (Tabla 7.4) presentan un coeficiente de variación del orden del 7%. Para el resto de componentes químicos del agua drenada por esta surgencia, los coeficientes de variación están comprendidos entre 6'8 y el 54'1 % (Tabla 7.4), aunque en su mayor parte son superiores al 10%; por tanto, según el criterio de Shuster y White (1971, 1972) se trataría de un sistema de tipo *conduit flow*.

	Manantial (periodo)	T (°C)	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	TAC (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	IS _{DOL}	IS _{CAL}	TOC (mg/L)
n		70	70	70	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	12
m		15,8	411	7,46	265,4	12,3	10,5	3,5	5,7	55,8	24,4	3,3	0,3	-0,099	0,037	0,7
max	Jorox	16,7	447	7,67	296,0	14,2	17,7	6,2	8,7	63,8	33,0	4,2	1,0	0,338	0,243	0,9
min		15,2	320	7,21	198,9	7,8	4,9	0,6	2,4	40,9	13,5	2,4	0,2	-0,624	-0,262	0,5
v(%)		1,7	6,6	1,0	6,8	10,2	24,1	28,3	25,0	8,1	14,9	13,5	54,1	-208,3	260,3	17,5
m		15,8	409	7,42	264,5	10,9	12,3	3,4	6,2	53,1	26,2	3,3	0,4	-0,190	-0,035	
max	Jorox	16,0	427	7,54	276,5	12,8	17,7	4,5	6,6	58,1	29,7	4,0	0,5	0,144	0,124	
min	(1999/2000)	15,7	363	7,21	246,9	7,8	8,6	2,1	5,0	46,6	22,6	2,6	0,2	-0,624	-0,262	
v(%)		0,5	4,7	1,7	4,2	13,1	23,0	19,0	7,1	7,4	7,9	13,6	31,9	-145,7	-392,8	
m		15,8	406	7,48	263,5	12,7	10,5	3,4	6,3	56,6	22,5	3,2	0,3	-0,106	0,055	
max	Jorox	15,9	430	7,57	283,0	14,2	12,8	5,0	8,7	60,6	27,7	4,0	0,8	0,177	0,196	
min	(2000/2001)	15,5	320	7,39	198,9	10,7	4,9	0,6	2,7	44,6	13,5	2,4	0,2	-0,548	-0,167	
v(%)		0,6	8,1	0,8	8,4	9,4	18,2	31,4	27,7	6,6	15,2	13,1	66,3	-213,0	171,6	
m		15,7	422	7,44	271,1	12,6	11,8	3,9	4,9	55,6	26,5	3,6	0,4	-0,096	0,020	
max	Jorox	15,9	447	7,54	296,0	14,2	13,5	6,2	6,9	63,8	33,0	4,2	1,0	0,075	0,105	
min	(2001/2002)	15,2	358	7,32	229,4	10,7	8,1	2,1	3,1	40,9	22,0	2,8	0,2	-0,287	-0,083	
v(%)		1,0	6,4	0,9	7,7	7,8	12,7	29,7	22,5	11,6	10,8	12,3	58,2	-120,0	300,2	
m		16,1	407	7,50	264,0	12,4	7,6	3,4	5,3	56,9	24,2	3,2	0,3	0,156	0,055	0,7
max	Jorox	16,7	432	7,67	280,4	13,5	10,0	5,0	7,6	63,6	30,9	3,9	0,5	0,338	0,243	0,9
min	(2002/2003)	15,5	372	7,44	242,3	11,4	5,9	2,1	2,4	50,3	18,4	2,6	0,2	-0,267	0,011	0,5
v(%)		2,6	4,9	0,8	4,4	4,8	14,9	27,1	24,2	5,8	17,1	13,2	35,6	-860,7	66,7	17,5

Tabla 7.4. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas del manantial del Río Jorox. Leyenda: *n* número de muestras, *m* media aritmética, *max* valor máximo, *min* valor mínimo y *v* coeficiente de variación.

Con respecto a los parámetros característicos del sistema calcarbónico, los valores medios de los índices de saturación en calcita y dolomita muestran que las aguas están prácticamente en equilibrio con respecto a ambos minerales (Tabla 7.4).

7.3.2. Evolución temporal de parámetros físico-químicos del agua

Un análisis general del periodo de control del manantial del Río Jorox (Figura 7.15) permite constatar que, en las crecidas hidrodinámicas más importantes, se producen diluciones significativas por mezcla del agua de lluvia recién infiltradas con agua que presenta mayor tiempo de residencia dentro del acuífero. El valor máximo registrado de estas diluciones es de unos 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que supone una dilución de aproximadamente el 25% con respecto a la mineralización antes de la crecida y demuestra un grado de karstificación funcional relativamente alto del sistema.

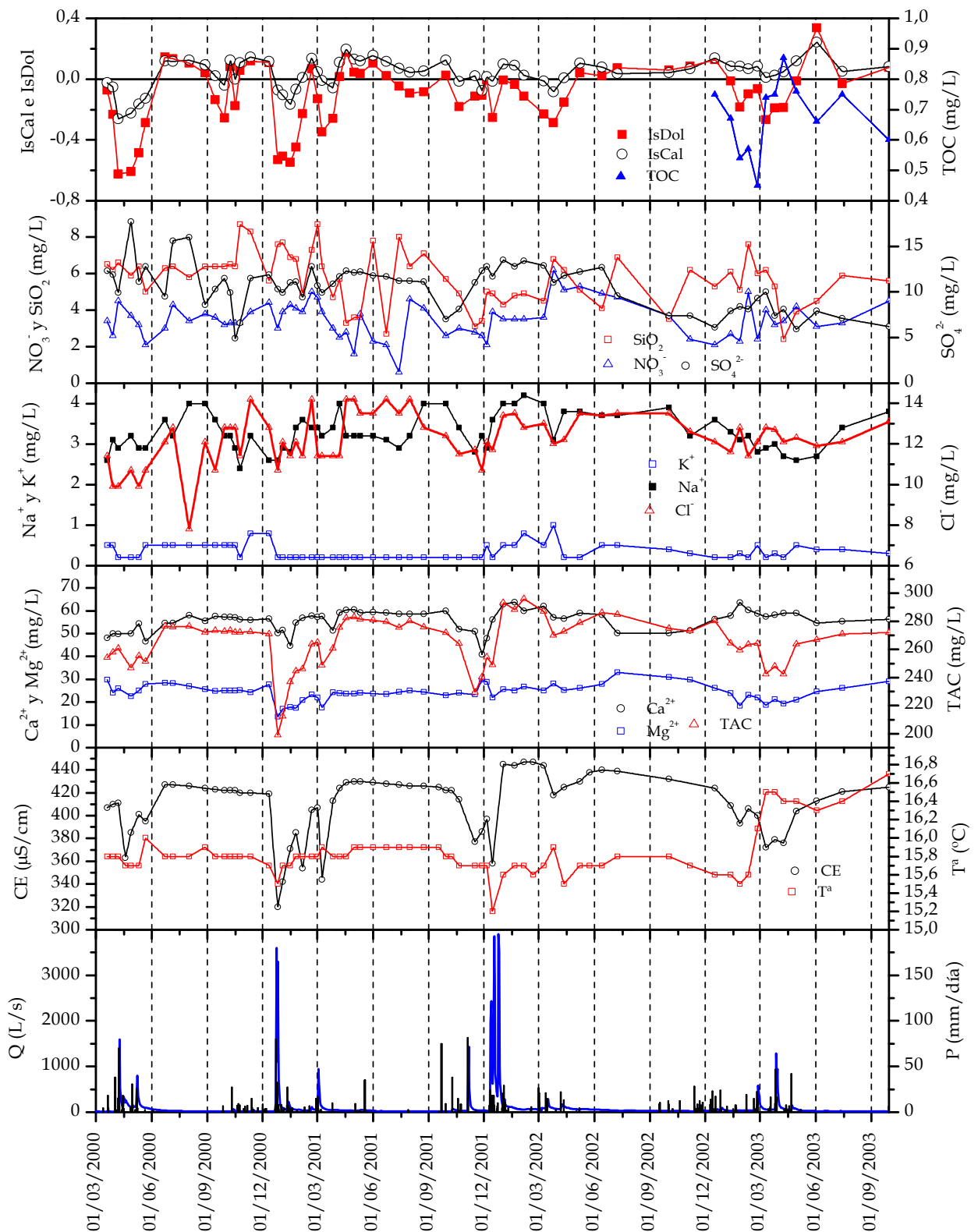


Figura 7.15. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el período de investigación.

Estas disminuciones de la conductividad eléctrica en respuesta a la recarga suelen estar relacionadas con el descenso de la TAC y de los contenidos en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- y Na^+ (Figura 7.15).

Además el bajo grado de correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- (Figura 7.16), no permite establecer hipótesis sobre el tiempo de permanencia del agua en el epikarst.

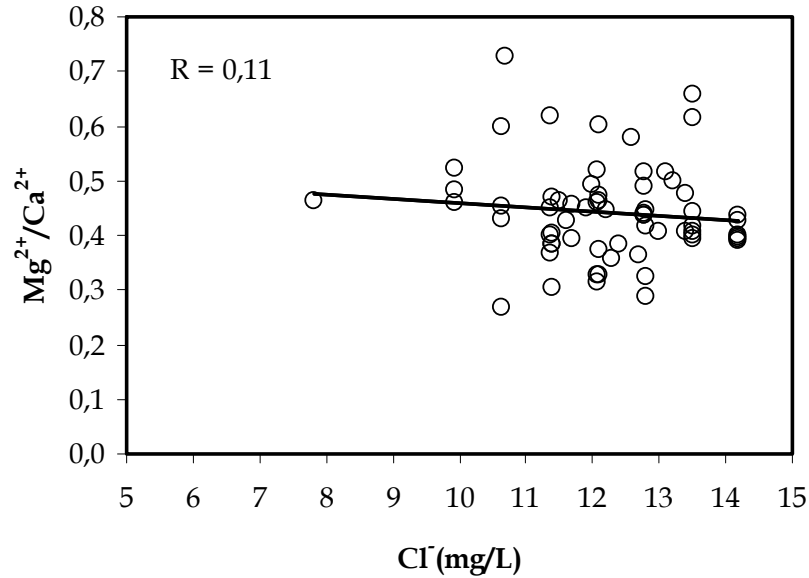


Figura 7.16. Correlación entre la relación Mg^{2+}/Ca^{2+} y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial del Río Jorox.

Un análisis algo más detallado de la importante crecida del año 2000/2001 muestra una disminución brusca de la conductividad eléctrica (Figura 7.17), indicativo de la llegada de la infiltración rápida (subsaturada o casi en calcita y mucho más en dolomita). A medida que tiene lugar la crecida, el agua continúa por el interior de los drenes kársticos hasta alcanzar la zona saturada y se mezcla con el agua en ella almacenada, dando lugar a la evolución progresivamente creciente (interrumpida en algunas crecidas) de la conductividad eléctrica (Figura 7.17).

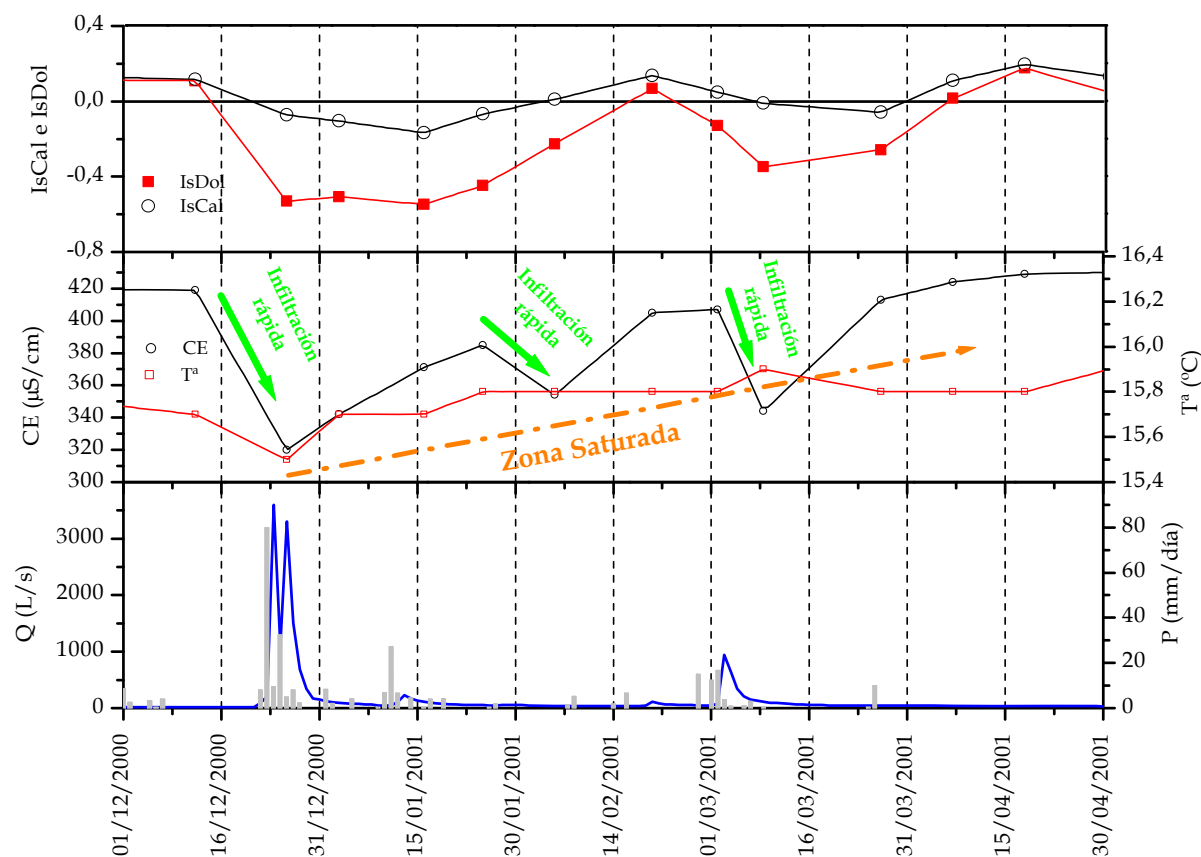


Figura 7.17. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el año hidrológico 2000/2001.

Durante los estiajes se registra una ligera disminución de la conductividad eléctrica (Figura 7.18), condicionado por una disminución de la TAC y, en menor medida, del contenido en Ca^{2+} . Ello se debe, probablemente, a la precipitación de calcita asociada a procesos de desgasificación en los conductos kársticos del interior del sistema. El hecho de que el índice de saturación en calcita (y también el de dolomita) disminuyan a lo largo de los estiajes está de acuerdo con la pérdida de Ca^{2+} por precipitación de calcita (Figura 7.16). Además, después de las diluciones hidroquímicas, correspondientes a las crecidas hidrodinámicas, se observan aumentos de conductividad eléctrica (Figura 7.18). Se trata de variaciones de conductividad eléctrica que pudieran estar ligadas a pequeños efectos pistón o al hecho de que durante esta fase no se produzca la precipitación de calcita.

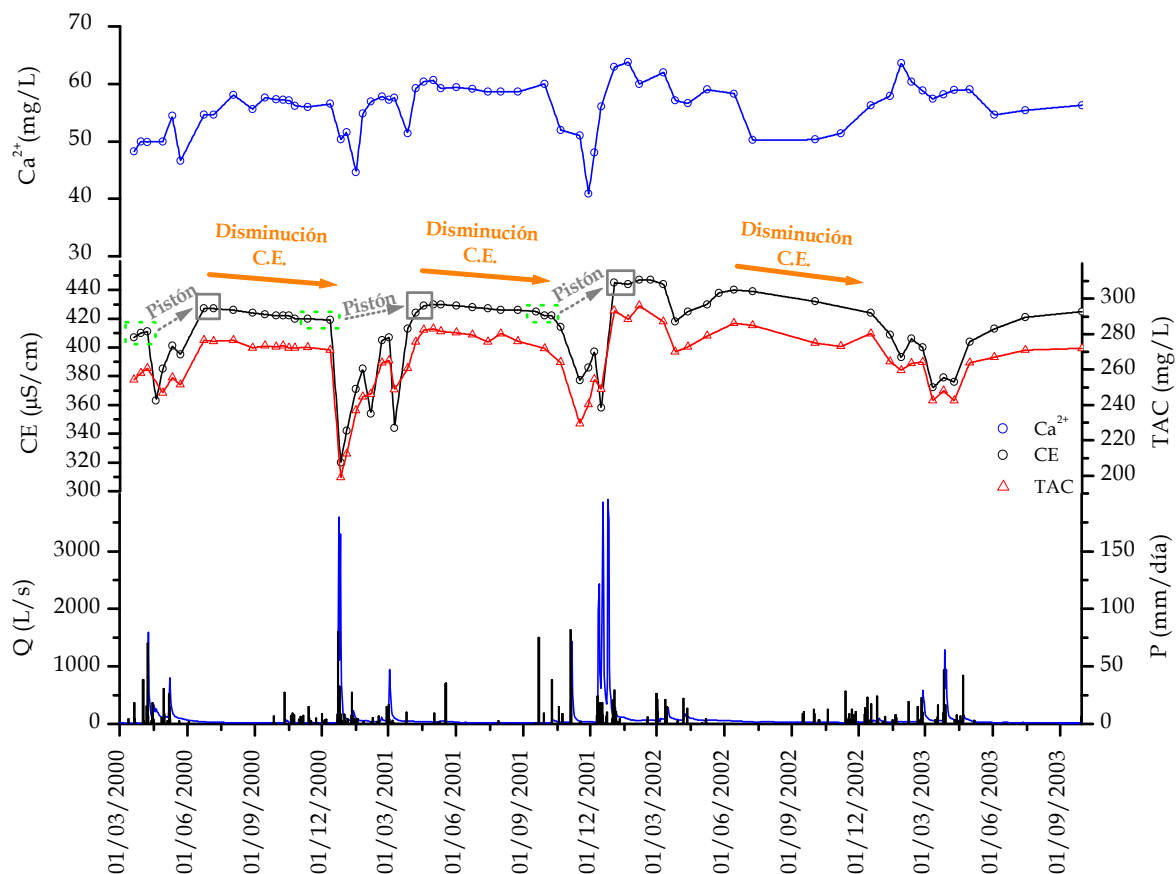


Figura 7.18. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, TAC y Ca^{2+} del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante todo el periodo de estudio.

En el año 2002/2003 (Figura 7.19) hay varios periodos de lluvia que apenas provocan aumento de caudal (entre Octubre y Febrero, ambos incluidos). Sin embargo, si se observa una disminución progresiva de los valores correspondientes a los parámetros hidroquímicos. Así, se pone de manifiesto que, durante este periodo, el agua del acuífero se mezcla con la procedente de los pequeños episodios lluviosos y da lugar a una disminución lenta de los diferentes parámetros hidroquímicos. Además, el hecho de que estos episodios lluviosos sean de pequeña cuantía producen una velocidad de flujo menor hacia el manantial, de manera que el TOC se mineraliza progresivamente y disminuya su concentración en las aguas del manantial. En cambio, durante la crecida de finales de Febrero, con caudales máximos de 500 L/s se observa una evolución descendente de la conductividad eléctrica y ascendente de la temperatura (Figura 7.19). La menor mineralización del agua ligada al aumento en el contenido en Cl^- y TOC (Figura 7.19) pone de manifiesto la importancia de la respuesta de la franja

epikárstica de la zona no saturada durante esta fase, de forma similar a como se ha descrito en el manantial del Río Genal (apartado 6.3.2.1.).

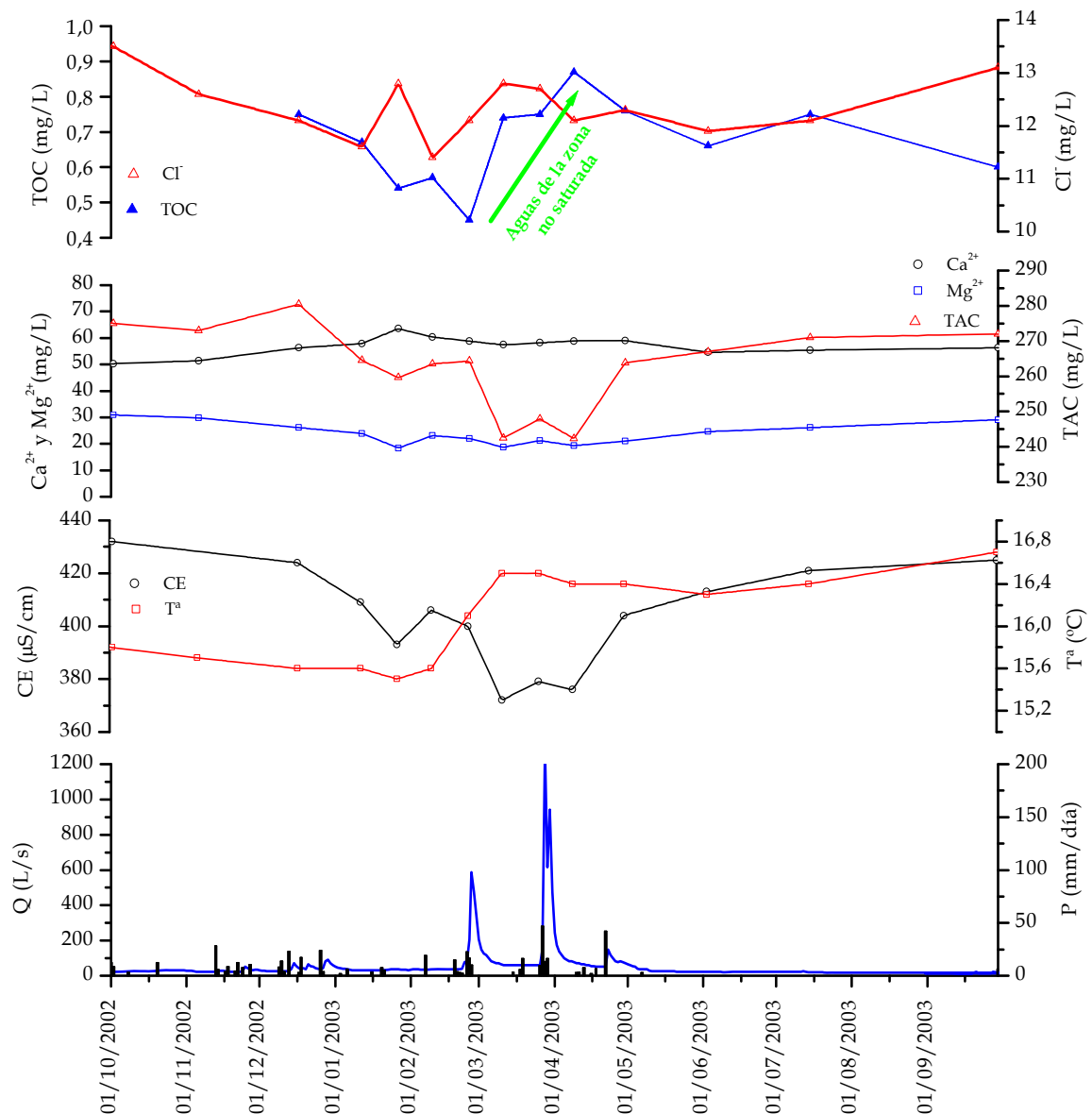


Figura 7.19. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial del Río Jorox durante el año hidrológico 2002/2003.

A partir de los datos hidroquímicos correspondientes a las 65 muestras de aguas tomadas en el manantial del Río Jorox, se ha realizado un ACP (Figura 7.20), que explica un porcentaje muy bajo de la varianza total, ya que los dos ejes principales sólo dan cuenta del 44% de la varianza.

La matriz de correlación refleja la importante correlación de la conductividad eléctrica con la TAC y el contenido en Mg²⁺ (Figura 7.20).

En el campo de las variables (Figura 7.20), el factor I representa la *mineralización* de las aguas, mientras que el factor II está caracterizado por la oposición entre la variable SO_4^{2-} en su parte positiva y la temperatura en la negativa.

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO_4^{2-}	NO_3^-	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
T	1											
C. E.	0,0322	1										
pH	0,1040	0,1374	1									
TAC	0,0165	0,9401	0,1355	1								
Cl ⁻	0,1537	0,3981	0,3123	0,4552	1							
SO_4^{2-}	-0,3877	0,0705	-0,2095	0,0674	-0,0962	1						
NO_3^-	0,0574	0,0229	-0,1905	0,0512	0,0932	0,0628	1					
SiO_2	-0,1280	-0,0895	-0,1017	-0,0994	-0,1264	-0,0371	0,1692	1				
Ca^{2+}	0,1076	0,3670	0,1061	0,5375	0,4511	-0,0705	0,0834	-0,0523	1			
Mg^{2+}	0,0230	0,7117	0,1253	0,6135	0,1288	0,0787	0,0590	-0,1422	-0,1880	1		
Na^+	-0,1603	0,4853	-0,0364	0,5442	0,1680	0,1621	0,1857	-0,1484	0,3475	0,3052	1	
K^+	0,0791	0,3833	0,0059	0,3600	0,1044	0,1319	0,2002	0,0144	0,0738	0,4516	0,0787	1

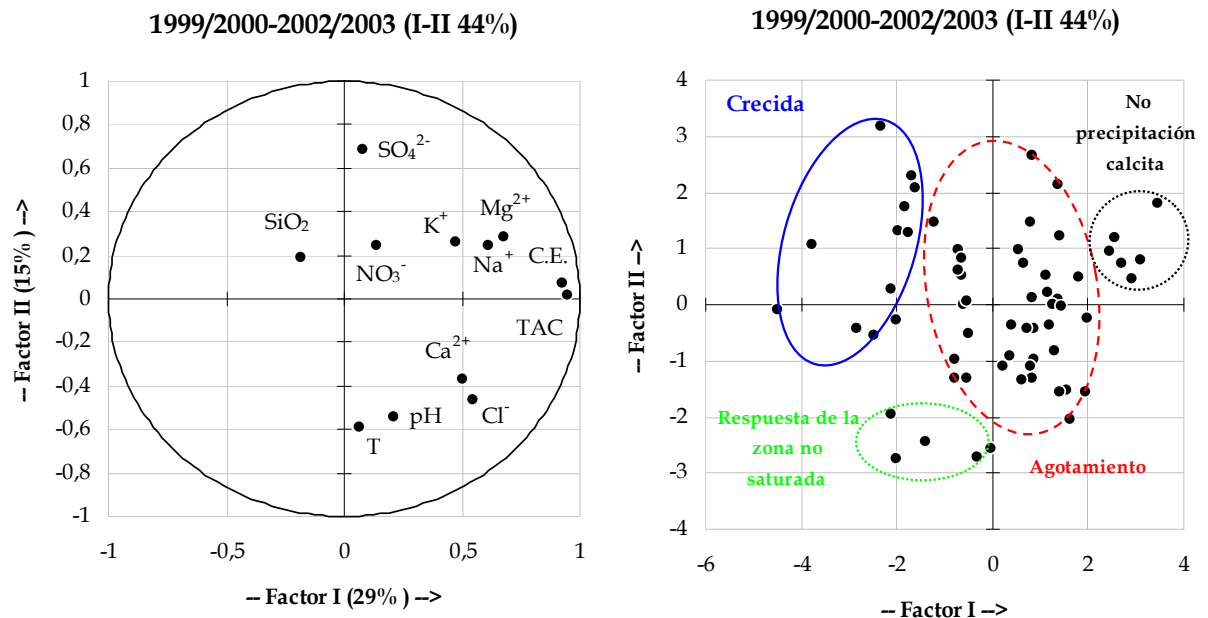


Figura 7.20. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial del Río Jorox durante todo el periodo de estudio (n= 65).

En el campo de las observaciones pueden diferenciarse cuatro grupos de aguas (Figura 7.20):

- Aguas de crecida: presentan la menor mineralización y menores contenidos en la mayor parte de los parámetros analizados.
- Aguas de estiaje: corresponden a la fase hidrodinámica de agotamiento y a parte de la decrecida.

- Aguas sin precipitación de calcita: presentan la mayor mineralización y corresponden a las aguas drenadas tras el pico de las crecidas más importantes de cada año hidrológico.
- Respuesta de la zona no saturada: corresponden a la crecida de Marzo de 2003 y atañen a las de menor mineralización.

7.3.3. Curvas de frecuencias

De acuerdo con la metodología propuesta por Bakalowicz (1979), las curvas de frecuencia de la conductividad eléctrica y de algunos de los componentes químicos mayoritarios (TAC, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y NO_3^-). Como se observa en la figura 7.21, la curva de frecuencia de la conductividad eléctrica presenta una moda principal, que caracteriza las aguas que se drenan durante parte de la decrecida y, sobre todo, en la fase de agotamiento del manantial. Además, se observan varias modas secundarias hacia los valores más bajos de conductividad eléctrica, que reflejan la importancia de los procesos de dilución del agua de la zona saturada, debido a la mezcla con el agua de infiltración (menos mineralizada).

El importante rango de variación de la curva de la conductividad eléctrica, al igual que el de la TAC (Figura 7.21) pone de manifiesto la existencia de diferentes tipos de aguas, que demuestran el significativo grado de karstificación funcional de este sistema acuífero. Las curvas de otros parámetros característicos del sistema calcocarbónico (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y del contenido en SO_4^{2-} , muestran una única moda principal pero también un importante rango de variación. Todos estos resultados son característicos de un acuífero de tipo kárstico.

El rango de variación de las curvas de frecuencia de Cl^- y Na^+ (Figura 7.21) muestra, como ya se ponía de manifiesto en la evolución temporal, que existen procesos de reconcentración debido a fenómenos de evapotranspiración. No obstante, la forma unimodal de ambas curvas pone de manifiesto que existe cierto grado de homogeneización de la señal de entrada debido a la circulación del agua de infiltración a través del acuífero. Este mismo tipo de comportamiento se

observa para el contenido en NO_3^- , otro parámetro característico de la zona no saturada.

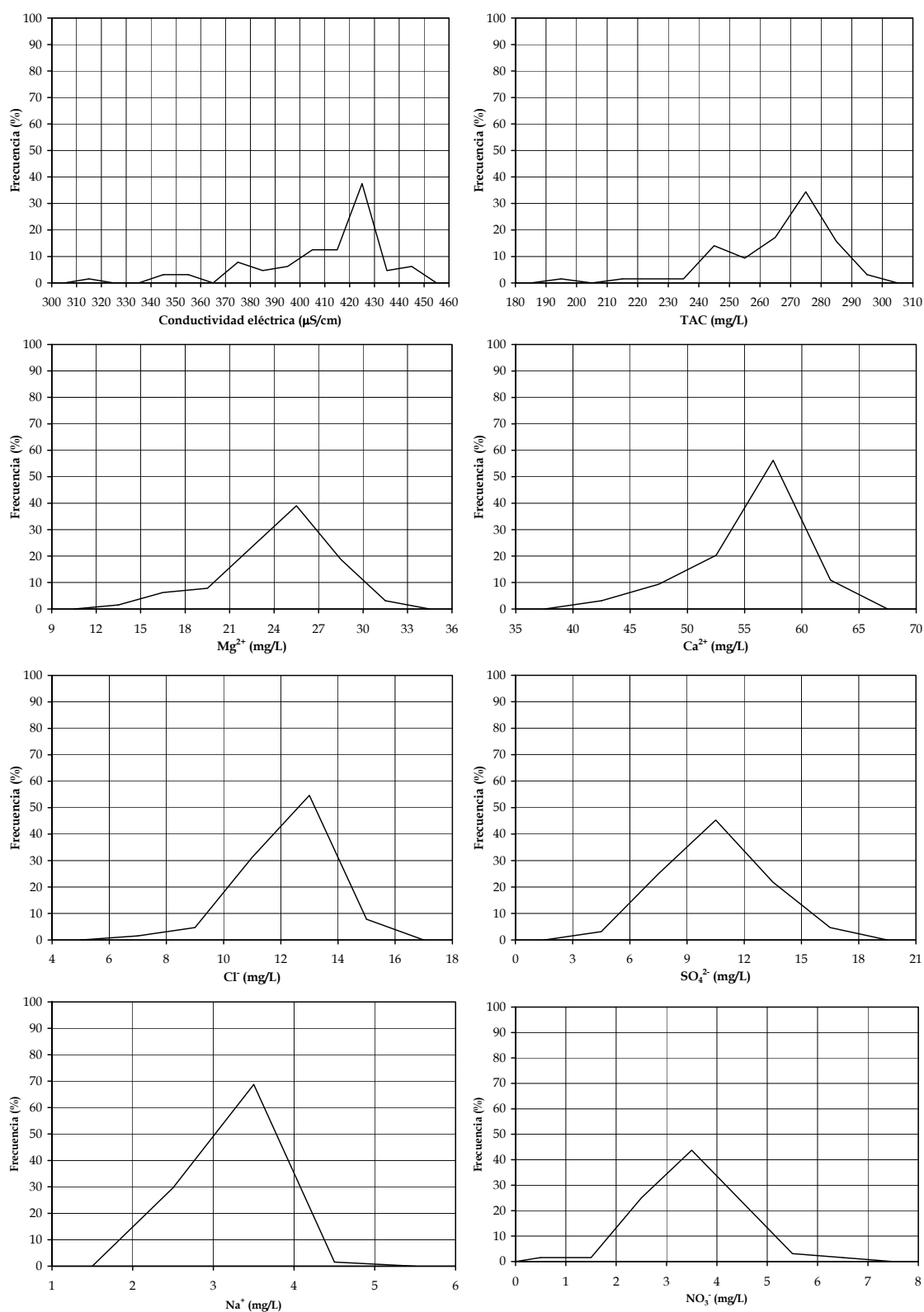


Figura 7.21. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas del manantial del Río Jorox.

8. CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR OCCIDENTAL DE SIERRA BLANCA: LOS SISTEMAS DE OJÉN Y MARBELLA

8.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

Dentro de la Unidad Hidrogeológica de Sierra Blanca, situada al norte de la Costa del Sol malagueña, se encuentra el sector occidental de Sierra Blanca. En este sector, al norte de la localidad de Marbella, se localizan dos de los acuíferos diferenciados por Andreo (1997): los sistemas de Marbella y Ojén.

Desde el punto de vista geológico, Sierra Blanca pertenece al Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética. La serie estratigráfica está constituida por un conjunto inferior metapelítico y otro superior de mármoles triásicos, entre los cuales existe un tránsito gradual. En esta última formación se pueden diferenciar dos tramos: uno inferior de mármoles dolomíticos y otro superior de mármoles calizos. Los mármoles inferiores dolomíticos, de aspecto masivo y con una potencia máxima del orden de los 300 m, muestran generalmente tonalidades blancas. Están constituidos mayoritariamente por dolomita, presentan un tamaño de grano grueso y, en algunos de los sectores, muestran un aspecto sacaroideo debido a la disgregación intergranular. Los mármoles calizos de la formación superior, con un espesor de 300 m, presentan tonalidades azules y grises, aparecen bien estratificados en bancos de espesor variable y aunque son de naturaleza predominantemente caliza, hacia el muro pueden ser dolomíticos e incluso presentar aspecto sacaroideo.

A grandes rasgos, la estructura geológica del sector occidental de Sierra Blanca está constituida por una interferencia de pliegues con direcciones N-S y E-W, que da lugar a una estructura característica en "caja de huevos" (Sanz de Galdeano y Andreo, 1994; Sanz de Galdeano y Andreo, 1995). Desde el punto de vista geomorfológico, tanto el exokarst como el endokarst, están poco desarrollados. Sólo cabe destacar la existencia de pequeñas áreas con lapiazes en surcos y algunas cuevas, la más importante de las cuales es la de Nagüeles, ubicada dentro del sistema acuífero de Marbella.

El primero de los acuíferos analizados ha sido el de Marbella, situado en el borde meridional de Sierra Blanca (Figura 8.1). Este acuífero presenta una superficie de 24 km², ocupada, en gran parte, por mármoles calizos triásicos. Está limitado al Sur y Oeste por fallas normales que ponen en contacto los mármoles con materiales de baja permeabilidad. Los límites septentrional y oriental están constituidos por núcleos anticlinales de la formación metapelítica, los cuales actúan como barrera hidrogeológica (Andreo, 1997).

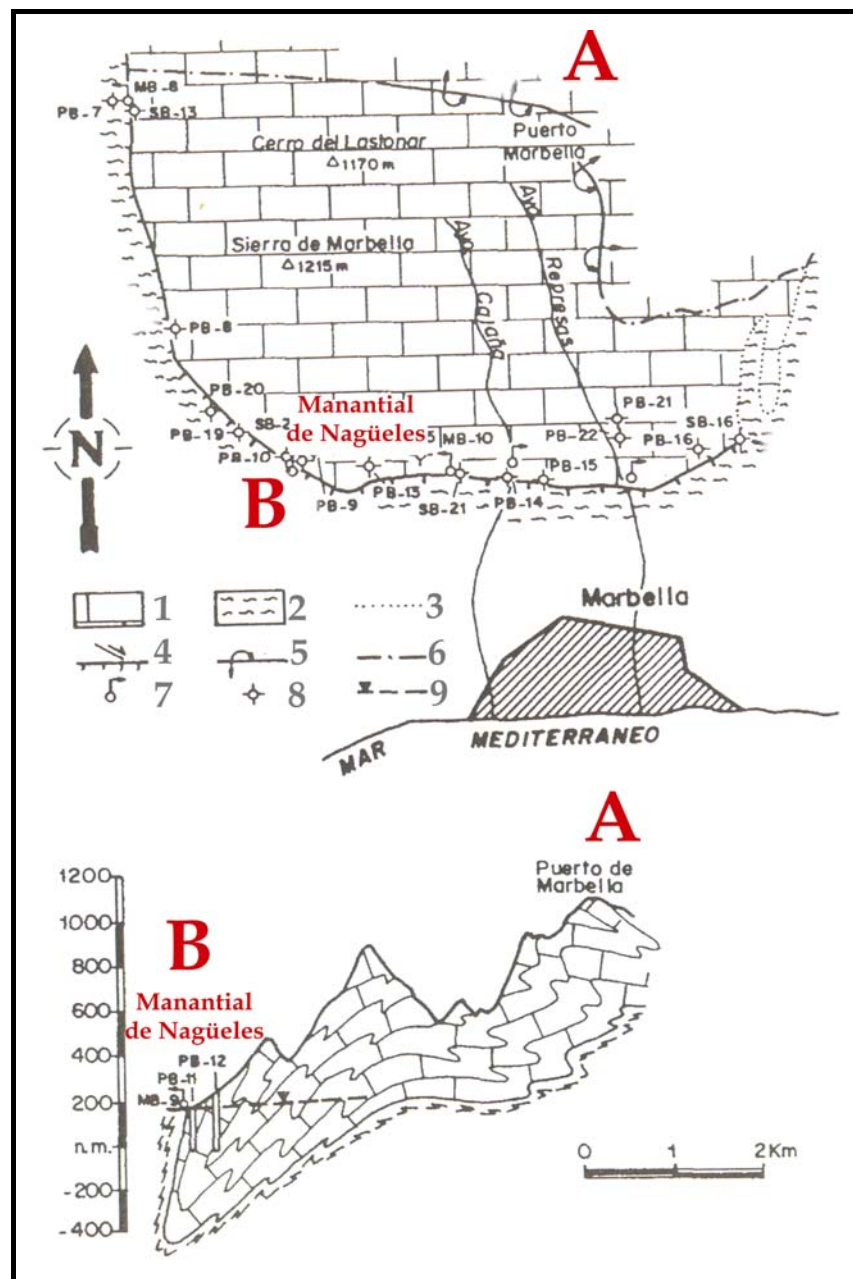


Figura 8.1. El acuífero de Marbella (tomado de Andreo, 1997). Leyenda: 1, mármoles; 2, gneises y pizarras; 3, contacto concordante; 4, falla normal; 5, anticlinal tumbado; 6, divisoria hidrogeológica; 7, manantial; 8, sondeo y 9, nivel piezométrico.

La geometría del acuífero está condicionada, básicamente, por el flanco normal de un sinclinal vergente al Norte (Figura 8.1), en cuyo núcleo se instala la zona saturada del acuífero, con un espesor que puede superar 500 m en el borde meridional. La recarga principal de este acuífero se produce por infiltración del agua de lluvia, mientras que la descarga tiene lugar a través de varios manantiales, el más importante de los cuales es el de Nagüeles (175 m s.n.m.). En condiciones de alta recarga, el manantial de Camoján (192 m s.n.m.) se comporta como un trop-plein del manantial de Nagüeles, con bruscas variaciones de caudal, desde 0 L/s hasta varios centenares de L/s.

El segundo sistema considerado dentro del sector occidental de Sierra Blanca es el acuífero de Ojén. Al igual que el de Marbella, se sitúa en la parte meridional de Sierra Blanca, al oeste del pueblo de Ojén. Este sistema ocupa una superficie de 13 km² (Figura 8.2) y está formado por mármoles blancos dolomíticos y azules calizos de edad triásica. Se encuentra delimitado, al Norte, por un anticlinal de dirección E-W, cuyo núcleo está constituido por materiales metapelíticos que afloran en el área del Juanar. El límite meridional, más difícil de determinar, estaría definido en su parte occidental por el anticlinal de dirección de E-W existente al sur de los Llanos de Juanar y, más al sur, por el contacto estratigráfico entre mármoles y metapelitas. El límite oeste está constituido por una estructura anticlinal N-S, mientras que el borde oriental está formado por el contacto estratigráfico existente entre los mármoles acuíferos y las metapelitas de su base.

El sistema de Ojén presenta la típica geometría en “fondo de saco” propia de los sinclinales tumbados (Figura 8.2).

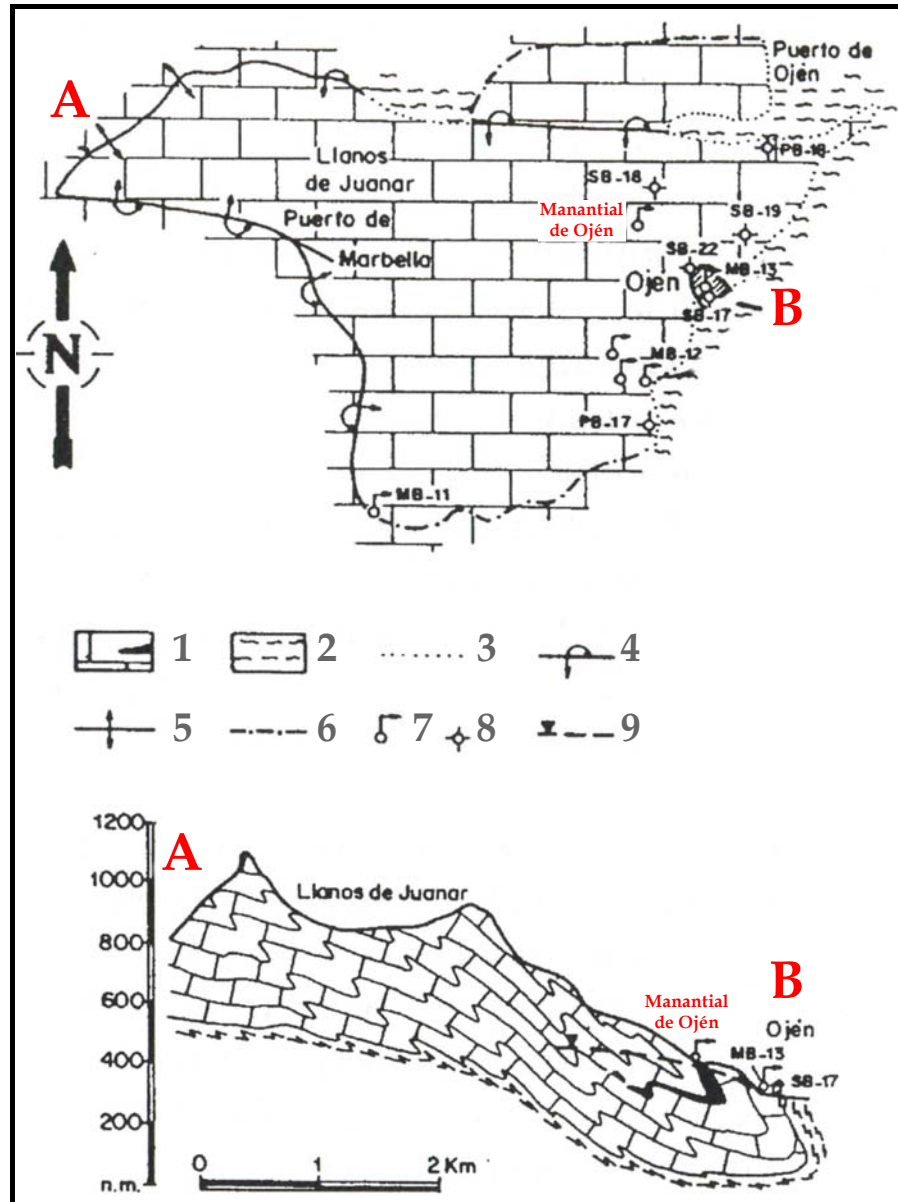


Figura 8.2. El sistema de Ojén (tomado de Andreo, 1997). Leyenda: 1, mármoles; 2, gneises; 3, contacto concordante; 4, anticlinal tumbado; 5, anticlinal; 6, divisoria hidrogeológica; 7, manantial; 8, sondeo y 9, nivel piezométrico.

La recarga del acuífero se produce por infiltración del agua de lluvia y la descarga se realiza a través de 4 manantiales situados en dos niveles de descarga bien diferenciados (Andreo, 1997). El manantial de Ojén constituye el principal punto de descarga del acuífero. La situación espacial de esta surgencia en el acuífero está condicionada por la presencia de una intercalación metapelítica entre los mármoles azules calizos y los mármoles blancos dolomíticos (Figura 8.2), que no presenta continuidad hacia el interior del sistema.

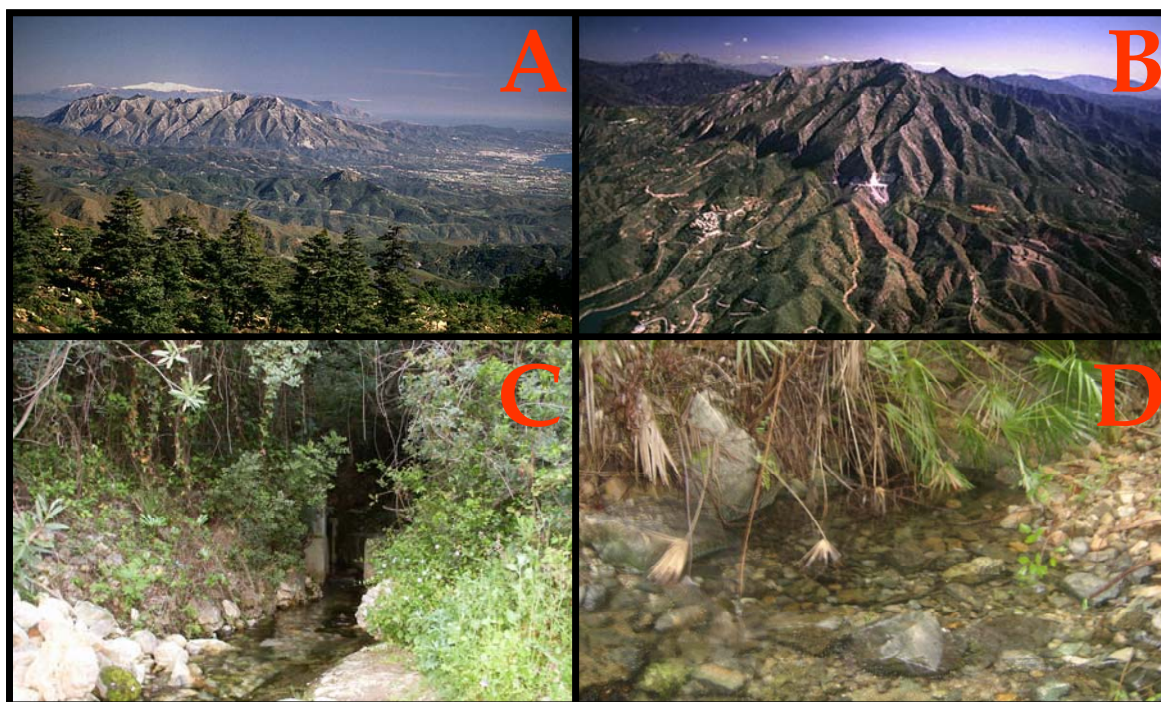


Lámina 8.1. A y B- Panorámicas de Sierra Blanca, C- Manantial de Ojén (aguas bajas), D- Manantial de Nagüeles (aguas bajas).

8.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

La caracterización de la respuesta hidrodinámica de los sistemas de Ojén y Marbella se ha llevado a cabo mediante el análisis de las series de caudales medios diarios de los manantiales de Ojén y Nagüeles, respectivamente. Aunque se trata de sistemas acuíferos claramente diferenciados, tanto el análisis hidrodinámico como el hidroquímico (epígrafe 8.3) se ha realizado conjuntamente, ya que, para ambos casos, se ha utilizado la misma señal de precipitación (estación pluviométrica de Ojén) y al tratarse de acuíferos con características muy parecidas (contexto climático, tamaño, litología, estructura y ámbitos geológicos) los resultados son comparables.

Las dos series analizadas comprenden desde Marzo de 2000 hasta Septiembre de 2003. Los valores de caudal medio diario se han obtenido a partir de la aplicación de la curva de gastos calculada por Andreo (1997) a los datos de altura de la lámina de agua registrados en las estaciones de aforos existentes en ambas surgencias. La figura 8.3 muestra la evolución temporal de los caudales de los dos puntos de descarga para toda la serie de datos estudiada. Los caudales

medios de las series analizadas han sido 33 L/s en el manantial de Ojén y 56 L/s en el de Nagüeles.

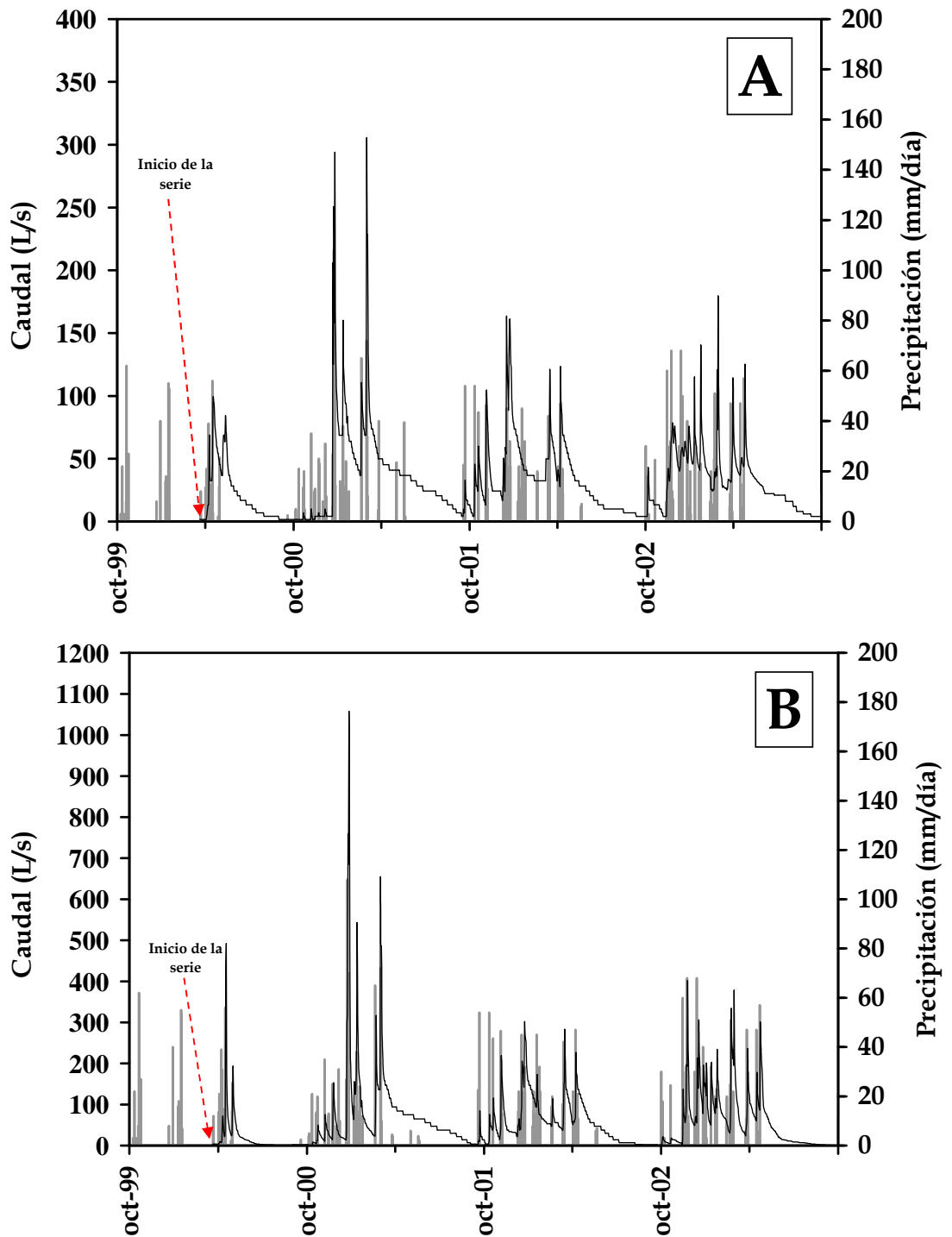


Figura 8.3. Hidrogramas del manantial de Ojén (A) y Nagüeles (B) entre 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.

8.2.1. Análisis del hidrograma

8.2.1.1. Manantial de Ojén

El hidrograma del manantial del Ojén muestra varias crecidas, por cada año hidrológico (Figura 8.4). Este tipo de respuesta, característica de la mayoría de los manantiales analizados hasta el momento, se registra cuando el intervalo de tiempo entre los aguaceros que dan lugar a la respuesta de los manantiales es de al menos un mes, lo cual permite que se inicien las condiciones de agotamiento.

Los aumentos de caudal son muy rápidos en relación con los períodos lluviosos y, en la mayoría de los casos, proporcionales a la magnitud e intensidad, de éstos. No obstante, en el año hidrológico 2000/2001, eventos pluviométricos de igual magnitud producen respuestas más tardías y de menor importancia a principios de año hidrológico que durante el período de aguas altas. Este comportamiento se debe a que el inicio del año hidrológico viene precedido de un importante vaciado en condiciones de agotamiento, de modo que las primeras lluvias otoñales recargan el volumen de agua drenado durante el agotamiento previo. Los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria).

Durante los años hidrológicos 1999/2000, 2000/2001 y 2001/2002 los hidrogramas anuales presentan tiempos de base y de crecida del orden de 15 y 3 días, respectivamente (Figura 8.4).

El hidrograma del año hidrológico 2002/2003 muestra aumentos significativos y continuados de caudal (Figura 8.3). En este hidrograma es difícil diferenciar los tiempos de base y crecida, ya que el manantial se encuentra en condiciones de aguas altas (varias crecidas consecutivas) durante buena parte del tiempo.

La relación de los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años hidrológicos (Figura 8.5) presenta valores muy similares, excepto para el año 2000/2001 donde se alcanzan los caudales más altos de toda la serie analizada. El valor medio obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 62.

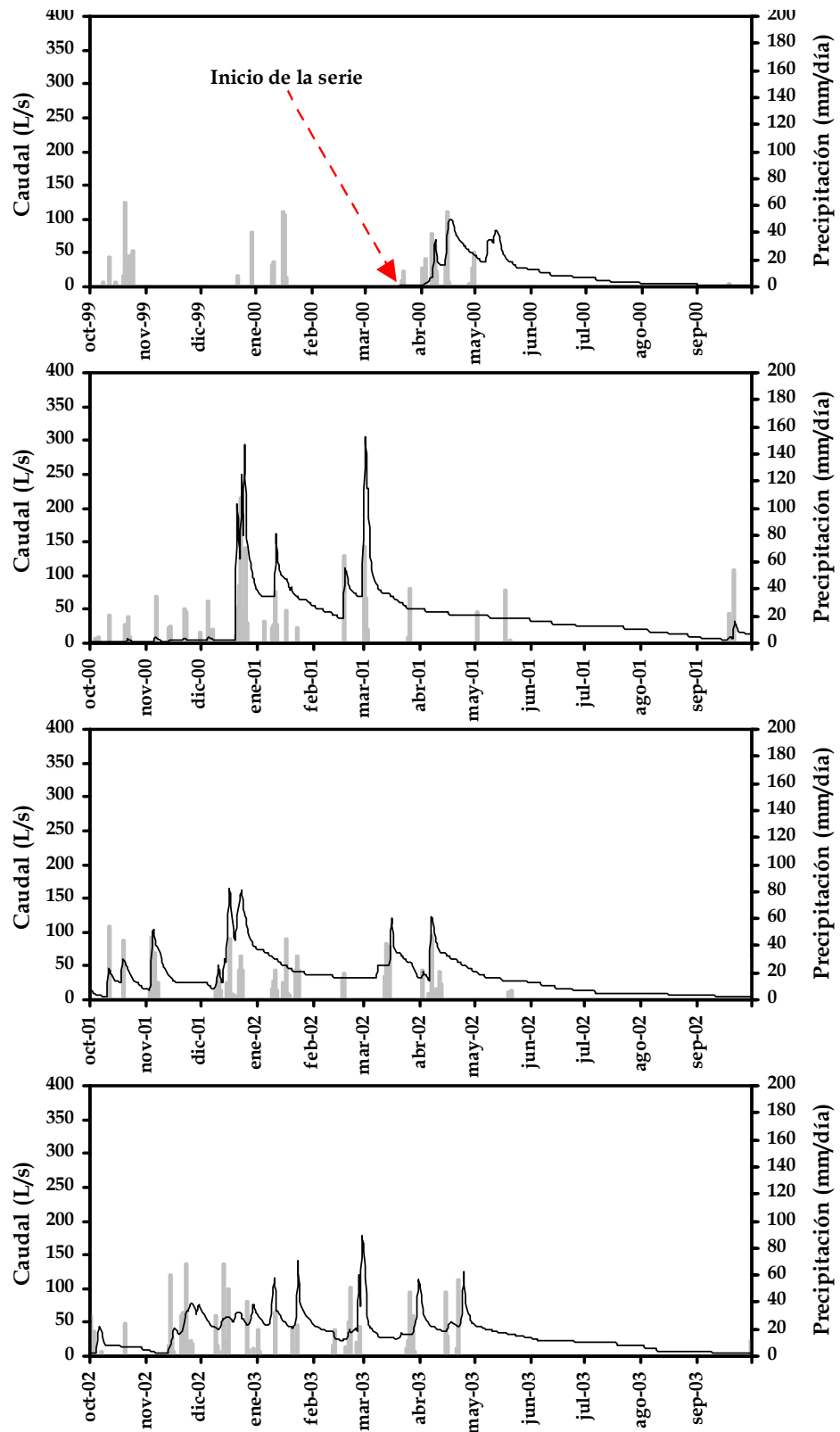


Figura 8.4. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial de Ojén para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.

El bajo grado de correlación entre la relación Q_{\max}/Q_{\min} y los valores de precipitación anual (Tabla 8.1) indica que la distribución de las precipitaciones a

largo del año hidrológico y/o el estado hidrodinámico del sistema influyen mucho más en los valores de caudal máximo registrado, que el propio valor de precipitación total anual recogida. Por tanto, el comportamiento de este acuífero está claramente condicionado, a priori, por la estacionalidad de las precipitaciones, lo cual es indicativo de un escaso poder de amortiguación de las precipitaciones por parte del sistema.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	Precipitación
1999/2000	99	2	50	642
2000/2001	301	2	151	1016
2001/2002	161	4	40	880
2002/2003	179	4	45	1053
<i>media</i>	185	3		898

$$\frac{\overline{Q_{max}}}{\overline{Q_{min}}} = 62$$

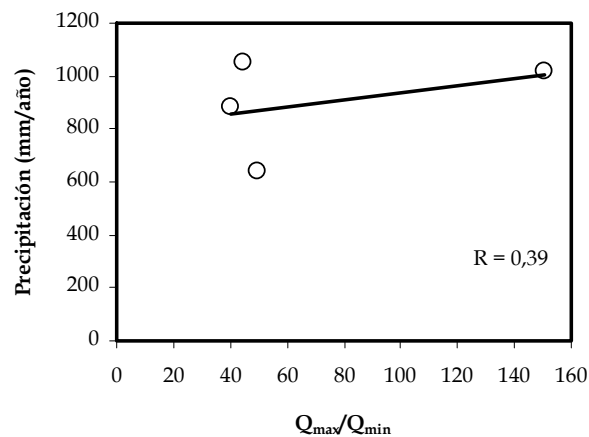


Figura 8.5. Relación de los caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Ojén y valores de la precipitación anual en la estación pluviométrica de Ojén para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm) y representación de la correlación (R) entre ambas variables.

8.2.1.2. Manantial de Nagüeles

Los hidrogramas anuales del manantial de Nagüeles muestran crecidas muy rápidas (Figura 8.6) en respuesta a las precipitaciones importantes. El caudal varía entre 1-2 L/s y centenares de L/s al día siguiente del principal evento lluvioso, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria). Estas crecidas súbitas

dan lugar a hidrogramas con morfologías muy puntiagudas. Este tipo de respuesta traduce, a priori, una infiltración rápida del agua de lluvia y una escasa capacidad de regulación que ya ha sido expuesta anteriormente por Andreo, (1997) y Andreo *et al.*, (2001 y 2002).

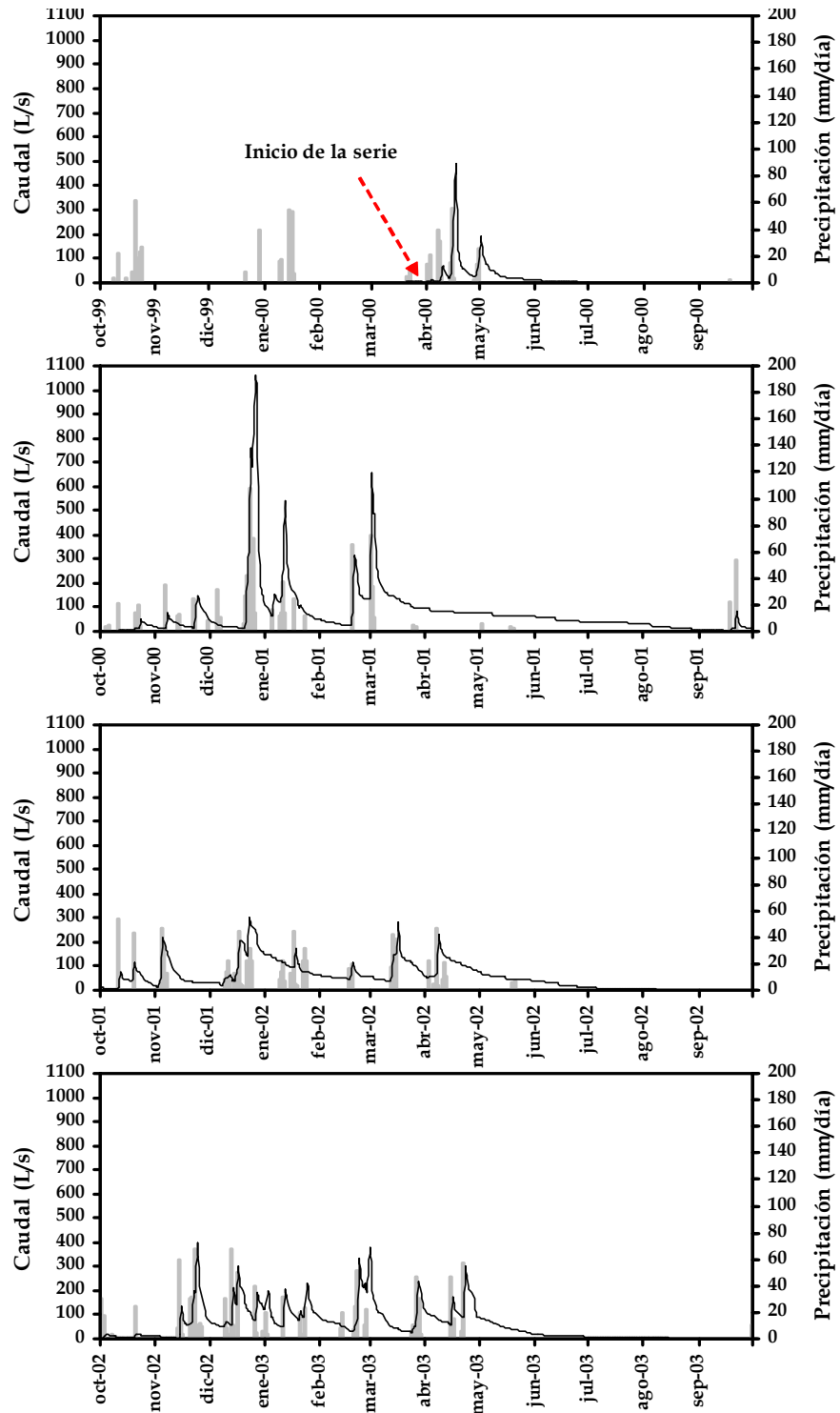


Figura 8.6. Hidrogramas anuales a paso de tiempo diario del manantial de Nagüeles para el periodo 1999-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Ojén.

Los hidrogramas anuales muestran varias crecidas por cada año hidrológico y se caracterizan por tiempos de base y de crecida del orden de 10 y 2 días (Figura 8.6), respectivamente. No obstante, para el año hidrológico 2002/2003, estos tiempos son aún menores, 8 días y 1 día, debido a que el manantial se encuentra en condiciones de aguas altas durante gran parte del año hidrológico.

El valor obtenido para la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ es de 448 (Figura 8.7). Este resultado elevado es consecuencia de los valores bajos de Q_{min} para todos los años hidrológicos analizados. Además, no existe correlación entre los valores de precipitación anual y la relación Q_{max}/Q_{min} del manantial de Nagüeles (Figura 8.7). Ello indica que en los caudales máximos y mínimos registrados, durante un determinado año hidrológico, no influye tanto el valor de precipitación total recogida como la distribución temporal de la misma y/o el estado hidrodinámico del acuífero a principios de año.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	Precipitación
1999/2000	488	1	488	642
2000/2001	1053	2	527	1016
2001/2002	300	1	300	880
2002/2003	401	1	401	1053
<i>media</i>	<i>561</i>	<i>1,25</i>		<i>898</i>

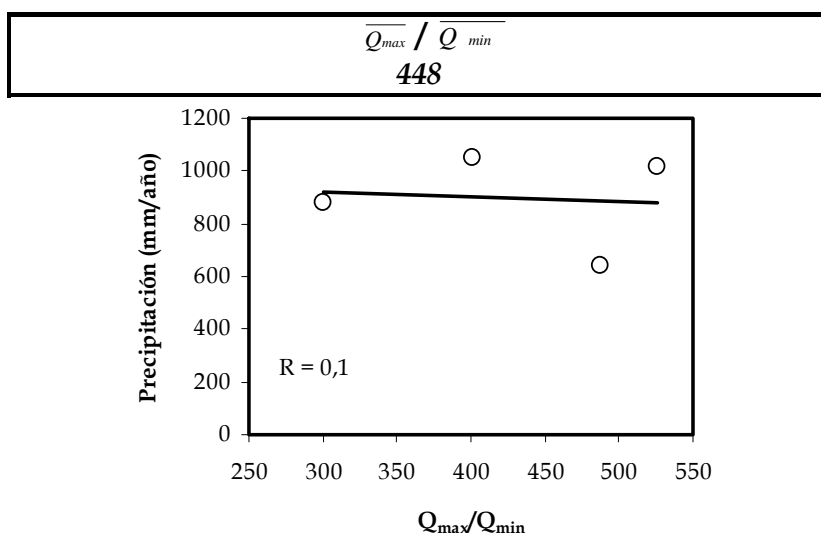


Figura 8.7. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en el manantial de Nagüeles y valores de precipitación anual en la estación pluviométrica de Ojén para los años hidrológicos entre 1999/2000 y 2002/2003 (Datos de caudal en L/s y de precipitación en mm) y representación de la correlación (R) entre ambas variables.

8.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

8.2.2.1. Manantial de Ojén

En el manantial del Ojén se han analizado cuatro curvas de recesión (Figura 8.8), una por cada año hidrológico del periodo de estudio. Los resultados obtenidos mediante el método de Mangin (1970, 1975), para cada uno de los hidrogramas unitarios analizados se recogen en la tabla 8.1.

La decrecida presenta una duración media (D_d) de 17 días, aunque, este valor es poco representativo ya que la duración de la decrecida para cada uno de los años analizados varía entre 5 y 32 días. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración para las cuatro curvas analizadas (η) son bastante heterogéneos y están comprendidos entre $0'2000$ días⁻¹ (año 2002/2003) y $0'0313$ días⁻¹ (2001/2002). No obstante, todos los valores indican que la velocidad de infiltración es muy rápida, sobre todo en la recesión analizada para el año 2002/2003, probablemente porque la zona no saturada de este acuífero presenta un alto grado de karstificación funcional.

El coeficiente de heterogeneidad (ϵ) varía entre $0'0476$ (1999/2000) y $0'1875$ días⁻¹ (2001/2002). De las 4 recesiones analizadas, dos de ellas presentan una concavidad menos marcada en la curva de la función y (Figura 8.8), lo cual es indicativo de que la disminución del caudal en el manantial de Ojén es algo más lenta durante las respectivas decrecidas.

Los valores del parámetro i para cada una de las curvas analizadas son iguales o superiores a $0'50$; según Mangin (1975) se trataría de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Este resultado no es coherente con el tamaño del acuífero drenado por el manantial (menos de 13 km²).

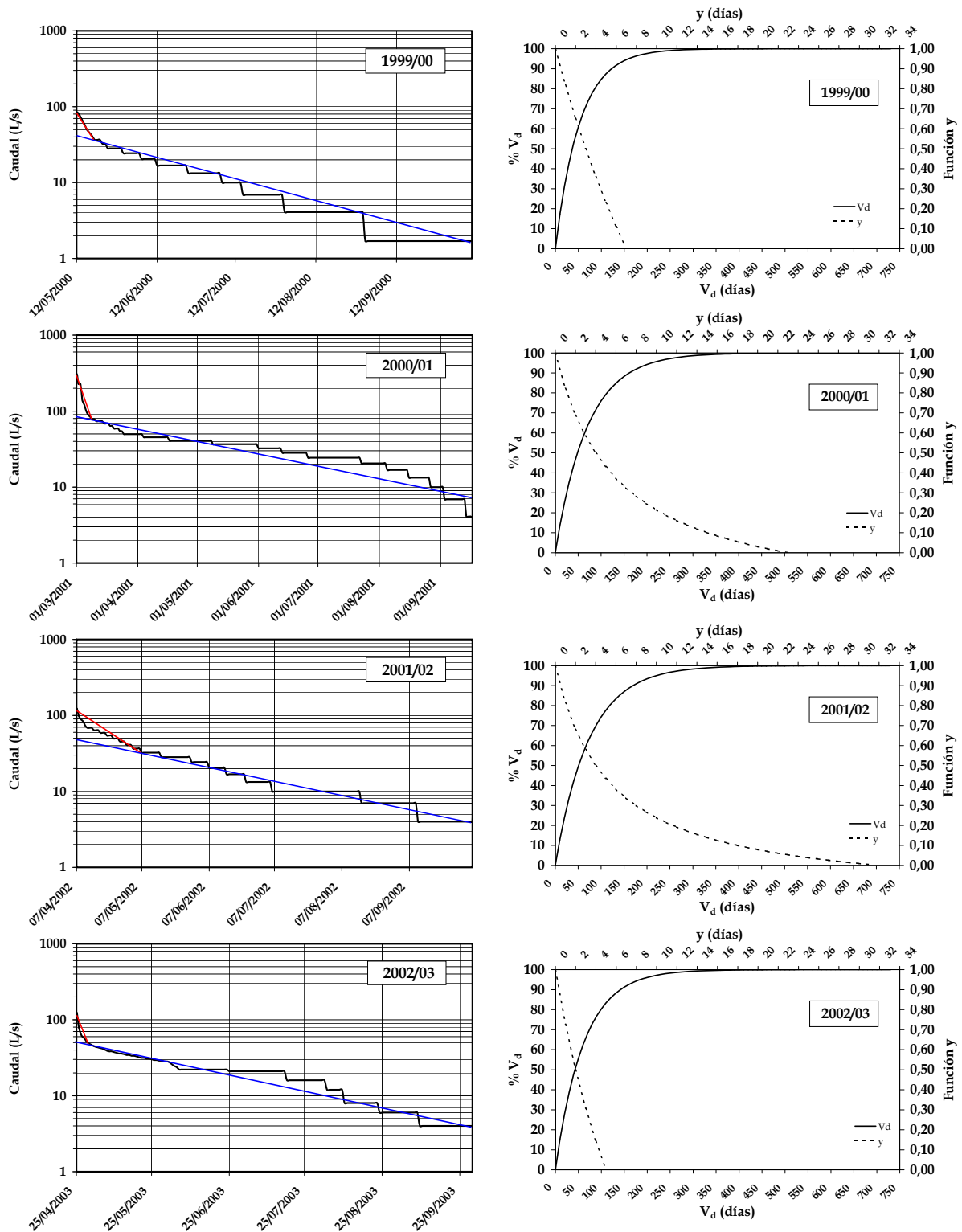


Figura 8.8. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Ojén para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

El coeficiente de agotamiento (α) presenta valores entre 1,4 y $1,9 \times 10^{-2}$ días⁻¹, lo que significa que el agotamiento se produce de manera rápida. Los volúmenes dinámicos calculados varían entre 0,19 hm³ (1999/2000) y 0,42 hm³ (2000/2001); el valor medio es de 0,30 hm³. La representación del porcentaje del volumen dinámico (Vd) en función del tiempo (Figura 8.5) permite estimar que, al cabo de 50 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se habría drenado casi el 50% de dicho volumen en la mayoría de los hidrogramas analizados. Estos valores son indicativos de la escasa capacidad de filtro del sistema. El volumen de tránsito anual (Vt) drenado por este manantial es de ≈ 1 hm³. El valor del parámetro k (Vd/Vt) presenta valores iguales o inferiores a 0,40 que, según Mangin (1975), es propio de un sistema acuífero de tipo kárstico.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k
1999/2000	7	0,1429	0,0476	0,65	155	1,88E-02	0,19	0,19
2000/2001	23	0,0435	0,1630	0,69	177	1,43E-02	0,42	0,40
2001/2002	32	0,0313	0,1875	0,68	153	1,36E-02	0,31	0,30
2002/2003	5	0,2000	0,1000	0,50	154	1,63E-02	0,28	0,27
Media	17	0,1044	0,1245	0,63	160	1,57E-02	0,30	0,29

Tabla 8.1. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de Ojén (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y Vd volumen dinámico.

8.2.2.2. Manantial de Nagüeles

Se han analizado cuatro curvas de recesión en el manantial de Nagüeles (Figura 8.9) mediante el método de Mangin (1970, 1975). En la tabla 8.2 se resumen los resultados obtenidos para cada curva analizada junto con el valor medio de cada uno de los parámetros calculados.

Las cuatro curvas analizadas presentan valores similares en cuanto a la duración de la crecida (valor medio $D_d = 8$ días). El alto valor de los coeficientes de velocidad de infiltración (η) pone de manifiesto la existencia de flujos rápidos del

agua infiltrada hacia el manantial, lo cual es indicativo de que la zona no saturada de este acuífero debe de presentar un alto grado de karstificación funcional.

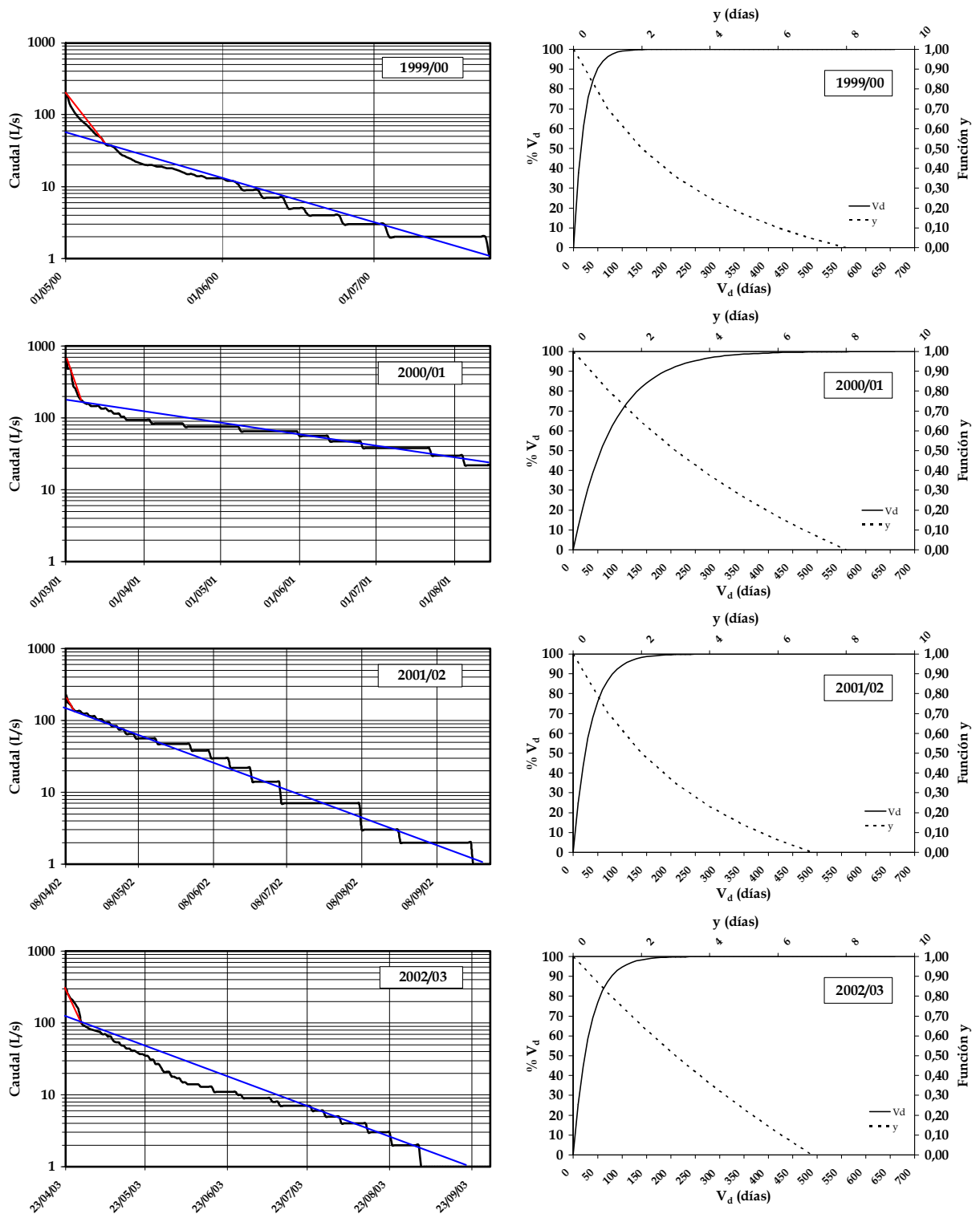


Figura 8.9. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en el manantial de Nagüeles para el período comprendido entre 1999 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

Los valores del coeficiente (ε) varían entre 0'0476 (2002/2003) y 0'2681 días⁻¹ (1999/2000). La infiltración se realiza de manera rápida pero, la escasa concavidad en la curva de la función y (Figura 8.9) de los años hidrológicos 2000/2001 y 2002/2003 indica que la decrecida se produce de forma más bien lenta.

Los valores de η y ε para cada una de las curvas analizadas han permitido calcular el parámetro i , que presenta un valor medio de 0'58, característico de los sistemas complejos y de grandes dimensiones (según Mangin, 1975), pero el acuífero de Marbella sólo tiene 24 km².

<i>Año Hidrológico</i>	D_a (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	V_d (hm ³)	k
1999/2000	8	0,1250	0,2681	0,49	77	4,72E-02	0,10	0,06
2000/2001	8	0,1250	0,0833	0,64	175	1,78E-02	0,88	0,50
2001/2002	7	0,1429	0,1772	0,53	169	2,86E-02	0,46	0,26
2002/2003	7	0,1429	0,0476	0,65	154	2,94E-02	0,33	0,19
Media	8	0,1339	0,1441	0,58	144	3,07E-02	0,44	0,25

Tabla 8.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión del manantial de Nagüeles (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_a duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.

La duración del agotamiento es parecida en todos los hidrogramas analizados, excepto para el año hidrológico 1999/2000 (Tabla 8.2). Sin embargo, los coeficientes de agotamiento (α) presentan valores similares para todas las curvas, del orden de $1-5 \times 10^{-2}$ días⁻¹, lo que significa que el agotamiento se produce de manera relativamente rápida. Los volúmenes dinámicos (V_d) calculados para los agotamientos estudiados varían entre 0,10 hm³ (1999/2000) y 0,88 hm³ (2000/2001), cuyo vaciado se produce de forma rápida (Figura 8.9), pues en 100 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se habría drenado, en todos los hidrogramas analizados, más del 70%. Además, se ha calculado un volumen de tránsito anual (V_t) drenado por este manantial de 1'77 hm³ (caudal medio de 56 L/s). El parámetro k (V_d/V_t) de Mangin (1975) presenta valores muy diferentes en todas las curvas analizadas, lo que refleja un comportamiento bastante heterogéneo durante el agotamiento. No obstante, el

valor medio obtenido para este parámetro ($k=0'25$) es propio de un sistema acuífero de tipo kárstico (Mangin, 1970, 1975).

En la figura 8.10 se observa que, independientemente del contexto climatológico que da lugar a las diferentes curvas de recesión analizadas (caudales punta más altos o eventos pluviométrico de mayor cuantía), el comportamiento hidrogeológico de los sistemas de Ojén y Marbella, según la casuística definida por Mangin (1970, 1975), es el mismo para todos los casos analizados (dominio IV), característico según este autor de un sistema de tipo kárstico, complejo y de grandes dimensiones.

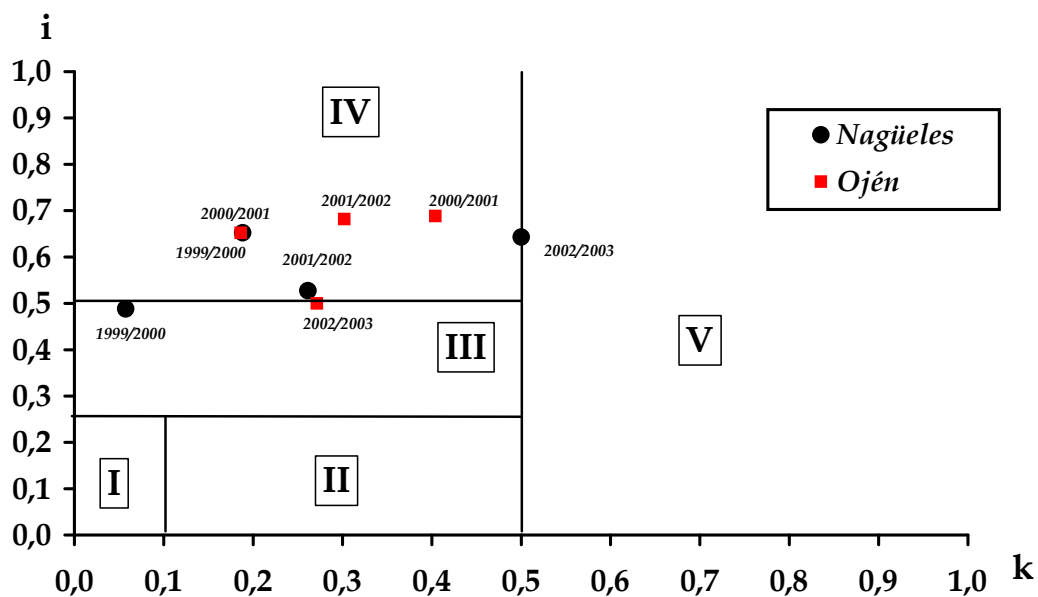


Figura 8.10. Gráfico i-k propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los puntos correspondientes a las curvas de recesión analizadas en los manantiales de Nagüeles y Ojén.

No obstante, como ya se ha indicado en el apartado 8.1 de esta memoria, el acuífero de Ojén y el acuífero de Marbella presentan una superficie de 13 y 24 km², respectivamente, por lo que no deberían de considerarse de grandes dimensiones, al menos, en comparación con otros sistemas investigados en esta memoria. En cambio, sí podría afirmarse, en el caso del acuífero de Ojén, que se trata de un sistema algo complejo, no tanto en cuanto a la geometría o a la superficie de recarga del mismo, sino más bien al diferente comportamiento hidrogeológico de los mármoles calizos, mucho más karstificados, frente a los dolomíticos,

generalmente menos karstificados. En el sistema de Marbella, la complejidad del sistema pudiera estar relacionada con una importante jerarquización de la red de drenaje.

8.2.3. Análisis correlatorio y espectral

A continuación se muestran los resultados del tratamiento efectuado con las series de datos diarios de caudal de los manantiales de Ojén y Nagüeles, correspondientes al periodo 20/03/2000 - 30/09/2003, y la serie de precipitaciones diarias en la estación de Ojén, para el mismo periodo. Los análisis se han realizado a corto y largo término y, dado el paso de tiempo considerado, no pueden ser deducidos fenómenos de periodicidad inferior a 2 días.

8.2.3.1. Análisis simple

El correlograma simple de la serie de caudales del manantial de Ojén presenta una morfología más tendida que el obtenido para el manantial de Nagüeles (Figura 8.11A), de manera que el efecto memoria obtenido para ambos manantiales es diferente, 71 y 35 días, respectivamente. El efecto memoria, calculado como el valor de k correspondiente a un valor del coeficiente de correlación r entre 0,1 y 0,2 (Mangin, 1984), sería mucho menor en el caso del manantial de Ojén (50 días), si el valor de k se obtiene para un coeficiente de correlación $r = 0,2$. Independientemente del valor de efecto memoria que se tome para el manantial de Ojén (71 ó 50 días), ambos son muy diferentes al presentado por Andreo (1997) a partir del análisis de la serie de caudales drenados por este mismo manantial, durante el año hidrológico 1993/1994, que fue de 30 días. No obstante, la forma de los correlogramas aquí obtenidos y la deducida por Andreo (1997) es similar, ya que en todos los correlogramas se constata que, tras un rápido descenso de los valores de correlación, para los primeros valores de k , se produce un decrecimiento más lento de los valores de correlación, que en el caso de la serie

de datos aquí analizada tiene lugar, aproximadamente, a partir del valor de $k=15$ días.

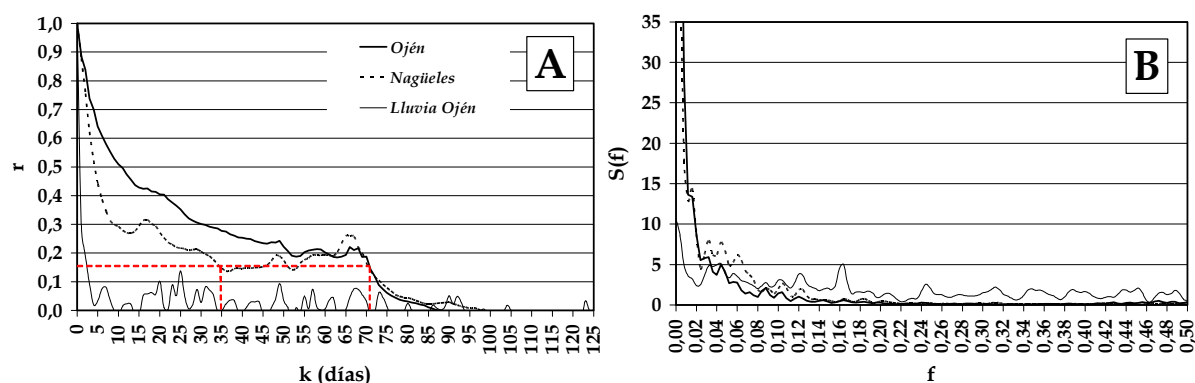


Figura 8.11. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de la precipitación registrada en la estación de Ojén entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlogramas, B) Espectros de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

En el espectro simple de caudales (Figura 8.11B) aparecen prácticamente todos los picos que se observan en el espectro simple de lluvia, lo que muestra que los acuíferos drenados por estas surgencias apenas filtran la señal de entrada. No obstante, los espectros de densidad de varianza permiten calcular tiempos de regulación relativamente altos, 30 días en el manantial de Nagüeles y 41 días en la surgencia de Ojén. Estos resultados son indicativos de una cierta capacidad reguladora, sobre todo en el sistema de Ojén. La anchura de la banda espectral o frecuencia de corte es de 0,13 para ambas surgencias (Figura 8.11B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 8 días.

Con respecto al análisis a largo término, los correlogramas de las series de caudal muestran la existencia de una importante periodicidad anual (Figura 8.12A), aunque esta periodicidad no se observa tan claramente en el correlograma de la lluvia. Sin embargo, el espectro de la serie de precipitación sí muestra esta señal anual (Figura 8.12B), que también se observa en los espectros de las dos series de caudal, aunque algo más acentuada en la del manantial de Ojén.

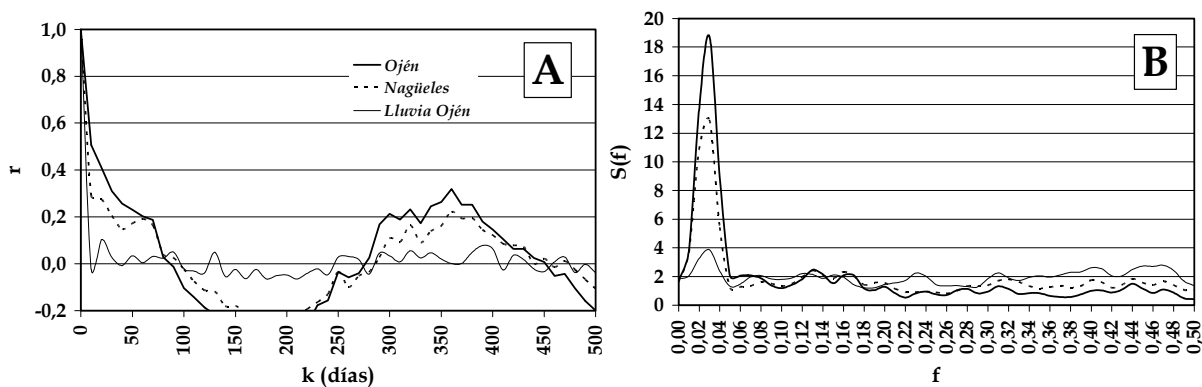


Figura 8.12. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de las series de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación en la estación pluviométrica de Ojén entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, para una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlogramas, B) Espectros de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

8.2.3.2. Análisis cruzado

Los correlogramas cruzados (Figura 8.13A) presentan, para un valor de k de 1 día, un pico del coeficiente de correlación de 0'38 en Ojén y 0'52 en Nagüeles, indicativo del desarrollo del drenaje kárstico que permite una respuesta relativamente rápida la zona no saturada, sobre todo en el sistema de Nagüeles. Tras el pico de correlación máxima, se observa un descenso rápido de los valores en ambos correlogramas cruzados, hasta un valor de $r_{xy} = 0'10-0'15$ ($k \approx 15$ días), a partir del cual se muestra un decrecimiento más lento, con una forma mucho más suave. La forma de ambos correlogramas cruzados (Figura 8.13A) es parecida a la del análisis simple de las series de caudales. Los resultados muestran, por un lado, una transmisión rápida de la señal de entrada (precipitaciones) atribuible a un importante desarrollo de la karstificación, probablemente mayor en la zona no saturada, y, por otro lado, la existencia de un cierto poder regulador quizás en relación con el flujo por la zona no saturada.

Este tipo de respuesta puede deberse a la existencia de subsistemas o sectores, dentro del acuífero, con capacidad reguladora y poder inercial diferentes, que producen varios tipos de respuestas. En el caso del sistema de Ojén, estos tipos de respuesta pueden atribuirse, como ya se puso de manifiesto anteriormente, al diferente comportamiento hidrogeológico de los mármoles azules calizos, más karstificados, frente a los mármoles dolomíticos, más

fisurados. En el acuífero de Marbella, Andreo (1997) puso de manifiesto, a partir de información procedente de columnas de sondeos, que este acuífero es un ejemplo de acuífero carbonático cuya red de drenaje kárstico está jerarquizada. Así, los flujos subterráneos dentro del sistema se producen, fundamentalmente, a través de una serie de drenes kársticos principales, mientras que el resto del sistema está constituido por mármoles que presentan una permeabilidad menor. Esta dualidad en el comportamiento hidrogeológico explicaría los resultados obtenidos para la surgencia principal del sistema de Marbella, el manantial de Nagüeles.

En las funciones de amplitud cruzada a corto término (Figura 8.13B) se observan las mismas componentes que en el espectro simple de la señal de entrada, lo que pone de manifiesto que los dos acuíferos filtran escasamente la señal de las precipitaciones. Las funciones de fase permiten calcular, para sucesos con una periodicidad anual, un desfase entre la señal de entrada y la salida de 37 días para la surgencia de Ojén y 24 días para la surgencia de Nagüeles.

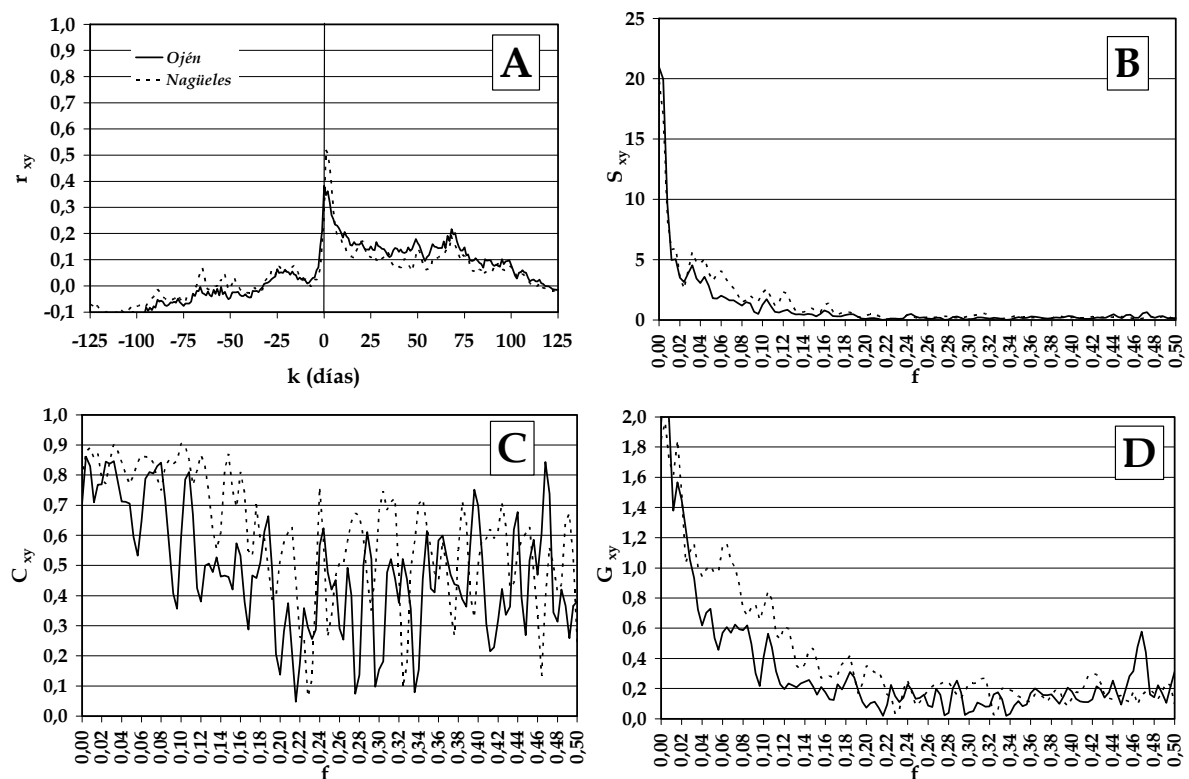


Figura 8.13. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre los años hidrológicos

1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

Los correlogramas cruzados de larga duración (Figura 8.14A) y las funciones de amplitud cruzadas (Figura 8.14B) muestran, nuevamente, la importancia de la periodicidad anual.

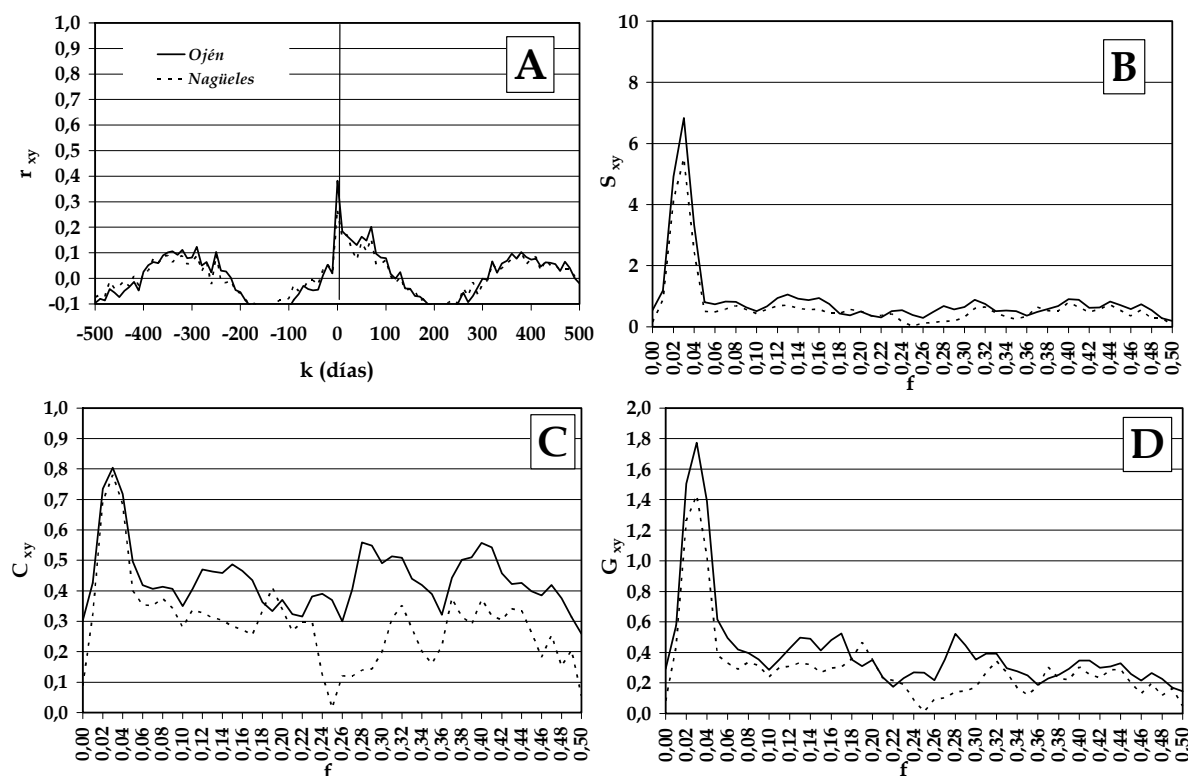


Figura 8.14. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de las series temporales de caudales diarios drenados por los manantiales de Ojén y Nagüeles y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

De la función de coherencia de ambos manantiales se deduce que los dos son lineales para las frecuencias bajas (Figura 8.13C), aunque en el de Ojén también para las frecuencias altas se observa cierta linealidad, lo que refleja, nuevamente, la yuxtaposición de comportamientos diferentes para el sistema de Ojén. En cambio, el análisis a largo término, refleja que tan sólo la frecuencia anual (Figura 8.14C) muestra cierta linealidad, con valores de la coherencia próximos a 0,8 para las dos surgencias.

La función de ganancia a corto término (Figura 8.13D) evidencia que los dos sistemas amplifican las frecuencias muy bajas ($f < 0'03$; ≈ 30 días) y atenúa las señales a corto y medio plazo. El análisis de larga duración (Figura 8.14D), muestra que todas las periodicidades, a excepción de la anual, se atenúan considerablemente en ambas surgencias.

8.2.4. Análisis de caudales clasificados

8.2.4.1. Manantial de Ojén

La serie de caudales diarios del manantial de Ojén entre el 20/03/2003 y el 30/09/2003 se ha clasificado en 31 intervalos de 10 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase. La figura 8.15A muestra que, para caudales mayores de 100 L/s, apenas existen variaciones en las frecuencias acumuladas. La representación de la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 8.15B), permite diferenciar de tres tramos principales:

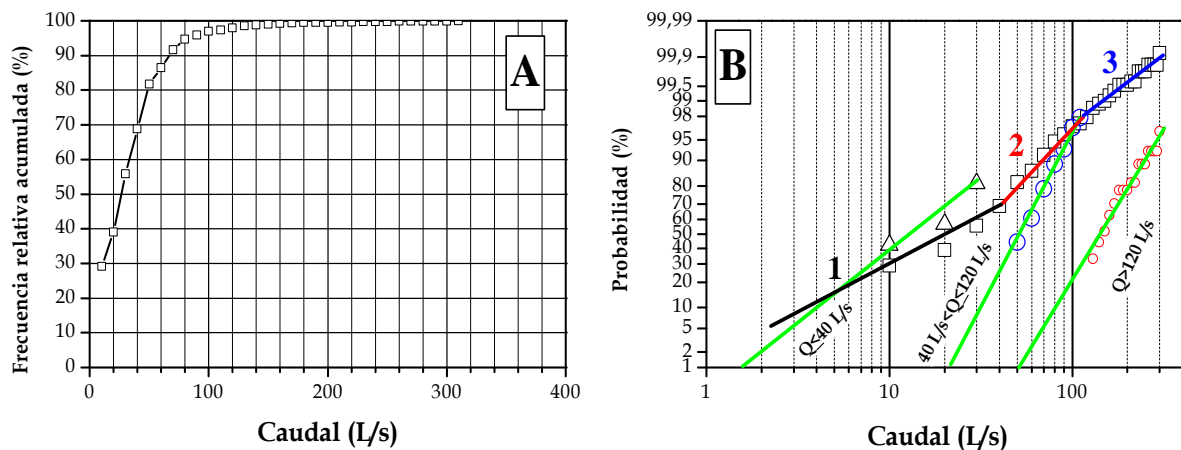


Figura 8.15. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Ojén, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(1) Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 120 L/s, correspondiente a las decrecidas de comienzos de 2001, aunque también incluye la mayor parte de las puntas de las crecidas de menor magnitud registrados en el manantial. No obstante, como ya demostró Andreo (1997), el caudal máximo

drenado por esta surgencia de Ojén es de 320 L/s, ya que a partir de este valor entran en funcionamiento puntos de descarga situados a cota más alta (*trop-plein*).

(2) El segundo tramo, entre 40 y 120 L/s, presenta un cambio de pendiente con respecto al tramo de caudales altos, lo cual denota el drenaje de una reserva de agua almacenada durante la fase anterior.

(3) Tramo de caudales inferiores o iguales a 40 L/s, que corresponde a la situación de agotamiento del manantial.

Estos resultados, en comparación con los obtenidos por Andreo (1997), sólo difieren en los caudales que definen los tramos. Así, por encima de los 120 L/s, el manantial descarga hasta un caudal máximo de 320 L/s, valor a partir del cual empieza a funcionar los *trop-pleins*. Por debajo de 120 L/s, el sistema no está en carga, es decir, la red de drenaje que alimenta la surgencia tiene la capacidad de drenar caudales menores o iguales a este valor sin que se colapse.

Por último, el análisis independiente de cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 8.15B), ha permitido calcular el porcentaje del volumen desaguado, con respecto al total, en cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 8.3). Los resultados demuestran que durante el agotamiento sólo se drena una tercera parte del volumen total desaguado por el manantial, mientras que las dos terceras partes restantes se drenan en condiciones de aguas medias-altas. Ello corrobora la escasa capacidad de regulación del acuífero.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 40 \text{ L/s}$	12	33
$40 \text{ L/s} < Q \leq 120 \text{ L/s}$	50	57
$Q > 120 \text{ L/s}$	129	10

Tabla 8.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Ojén a partir del análisis de caudales clasificados.

8.2.4.2. Manantial de Nagüeles

La serie de caudales diarios en el manantial de Nagüeles entre el 20/03/2003 y el 30/09/2003 se ha clasificado en 54 intervalos de 20 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase o intervalo. Al igual que para el manantial de Ojén, se diferencian tres tramos con distintas pendientes en la representación de la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 8.16B):

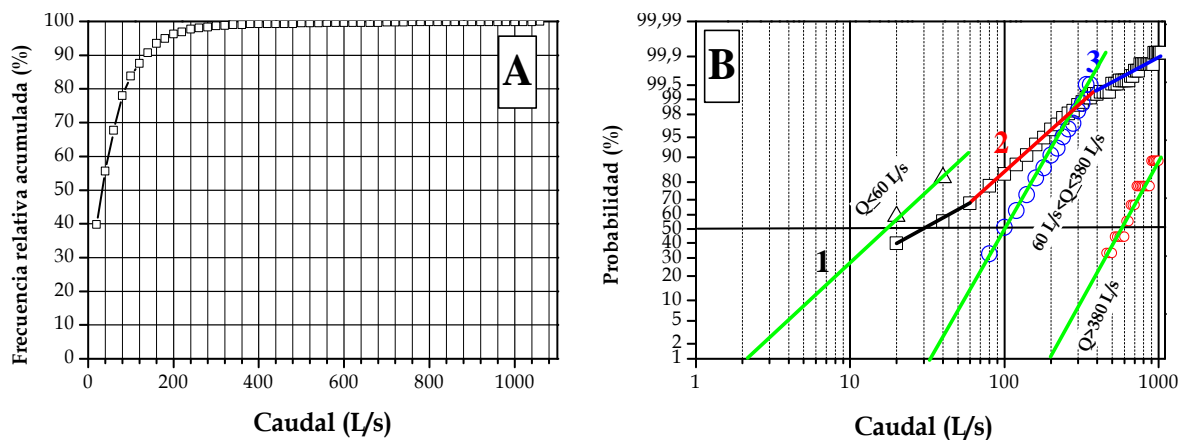


Figura 8.16. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Nagüeles, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

- Tramo de aguas altas, con caudales superiores a 380 L/s (3), que corresponde, fundamentalmente, a las puntas de las crecidas y al inicio de las decrecidas del año hidrológico 2000/2001.
- El segundo tramo, de caudales comprendidos entre 380 y 60 L/s (2), muestra una pendiente mayor que el anterior y corresponde a la situación de decrecida, cuando se forma una reserva que podría ser restituida al flujo en un ciclo posterior o durante el agotamiento.
- El tramo de caudales inferiores o iguales a 60 L/s (1) corresponde a la situación de agotamiento del manantial.

El análisis independiente de cada uno de los tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 8.16B) ha permitido calcular el porcentaje del volumen desaguado, con respecto al total, para cada una de las situaciones

hidrodinámicas (Tabla 8.4). Los resultados demuestran una escasa inercia del acuífero, ya que durante el agotamiento sólo se drena un 26% del volumen total.

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 60 \text{ L/s}$	18	26
$60 \text{ L/s} < Q \leq 400 \text{ L/s}$	100	67
$Q > 400 \text{ L/s}$	595	7

Tabla 8.4. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en el manantial de Nagüeles a partir del análisis de caudales clasificados.

8.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de la transformada continua *wavelet* y el análisis cruzado de la transformada *wavelet* entre las series de datos de caudal de los manantiales de Ojén y Nagüeles y la de precipitación en la estación pluviométrica de Ojén. Este tratamiento permite estudiar la variabilidad temporal de la relación entre precipitación y caudal.

Al igual que la mayoría de las series pluviométricas analizadas en capítulos anteriores, en el espectro continuo de los datos de precipitación (Figura 8.17A) se observan componentes para periodos menores de un mes. Estas componentes se observan en el espectro de caudales del manantial de Ojén (Figura 8.13A) aunque filtradas por éste.

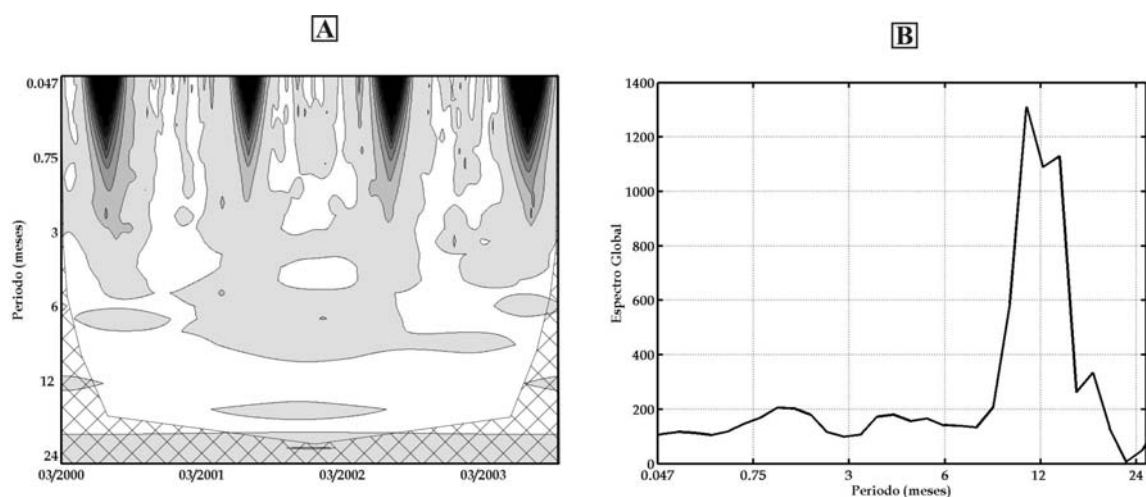


Figura 8.17. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación pluviométrica de Ojén para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La periodicidad anual es claramente visible en el espectro continuo global de las precipitaciones de la estación de Ojén (Figura 8.17B). No obstante, tanto en este espectro como en el espectro continuo (Figura 8.17A) se observa que la señal anual aparece para el intervalo 10-14 meses.

El análisis de las series de caudal (Figuras 8.18A y 8.18C) muestra la señal anual para el mismo rango y también se observa en los espectros globales continuos (Figura 8.18B y 8.18D). Esta componente anual se muestra prácticamente homogénea, a escala temporal, en las series de caudal (Figuras 8.18A y 8.18C). Además, en los espectros continuos globales de las precipitaciones y de los caudales (Figuras 8.17B, 8.18B y 8.18D) aparece una componente plurianual de aproximadamente 1'5 años, que no ha sido tomada en cuenta, por tratarse de una posible componente artificial dada su proximidad al “cono de influencia”.

A corto término, se constata la existencia de componentes semestral y cuatrimestral en el espectro global de caudales de la surgencia de Ojén (Figura 8.18B), mientras que en el espectro global de la serie de caudal del manantial de Nagüeles (Figura 8.18D) detecta una importante componente cuatrimestral, así como una serie de componentes para periodos menores de 1 mes aunque mucho menos evidentes.

El hecho de que no se atenúen por completo ciertas periodicidades inferiores a la anual (6, 4 meses y < 1 mes) en los espectros de caudales de las dos surgencias (Figura 8.18), refleja que ambos acuíferos no tienen la capacidad de filtrar gran parte de las señales a corto término, sobre todo el sistema de Marbella.

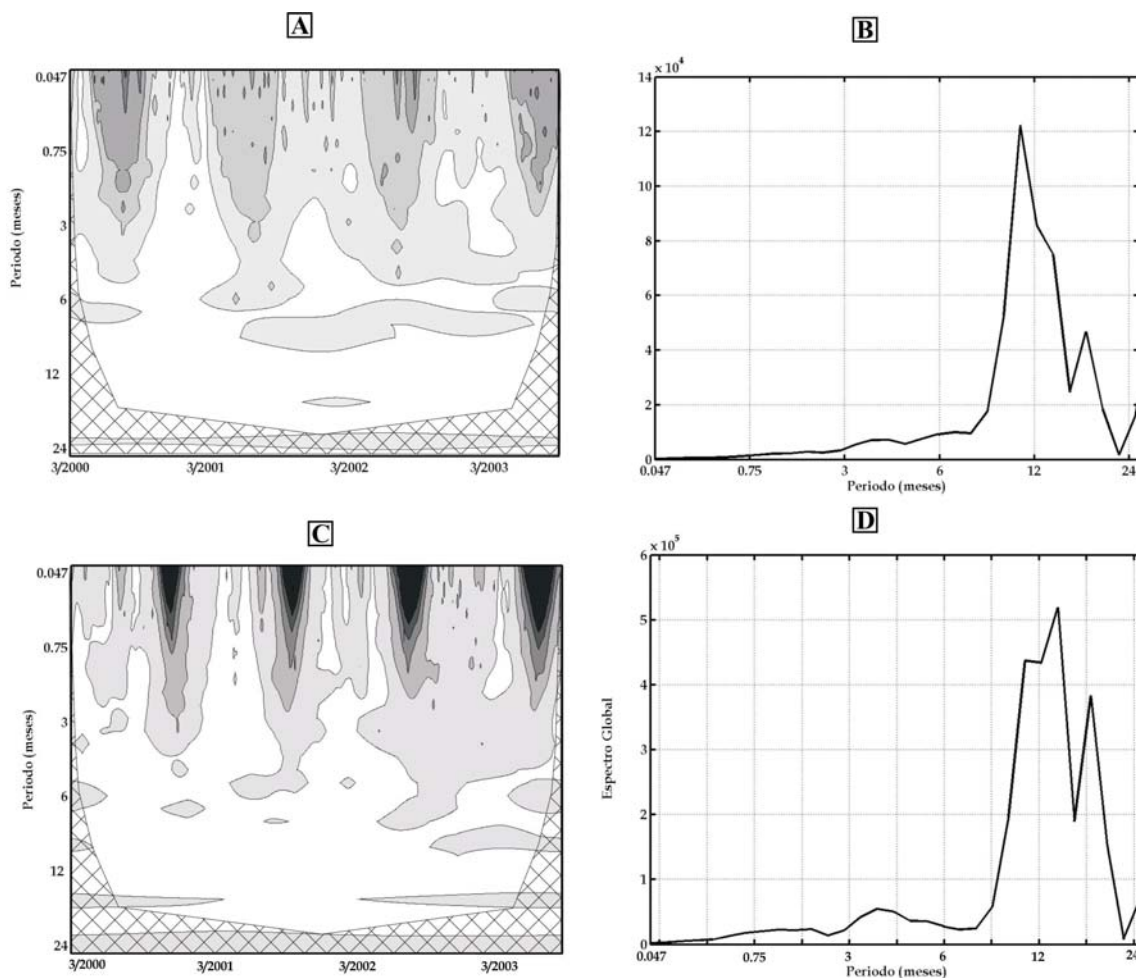


Figura 8.18. Espectros continuos y globales de las transformadas *wavelet* de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Ojén (A, B) y Nagüeles (C, D) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

Los espectros cruzado continuo y global de las dos surgencias (Figura 8.19) permiten constatar, nuevamente, la existencia de componentes menores de la anual, sobre todo una componente cuatrimestral para las dos surgencias y una componente menor de un mes más marcada en el manantial de Nagüeles (Figuras 8.19C y 8.19D). Además, estos resultados concuerdan en gran medida con los resultados del análisis simple (Figura 8.18), de manera que tanto la importancia de la periodicidad anual como el intervalo en el que ésta se muestra (10-14 meses),

vuelven a ponerse de manifiesto como los fenómenos más reseñables. Asimismo, aparece una componente plurianual, de aproximadamente 1'5 años, que no ha sido tomada en cuenta en los resultados obtenidos, por tratarse de una componente artificial.

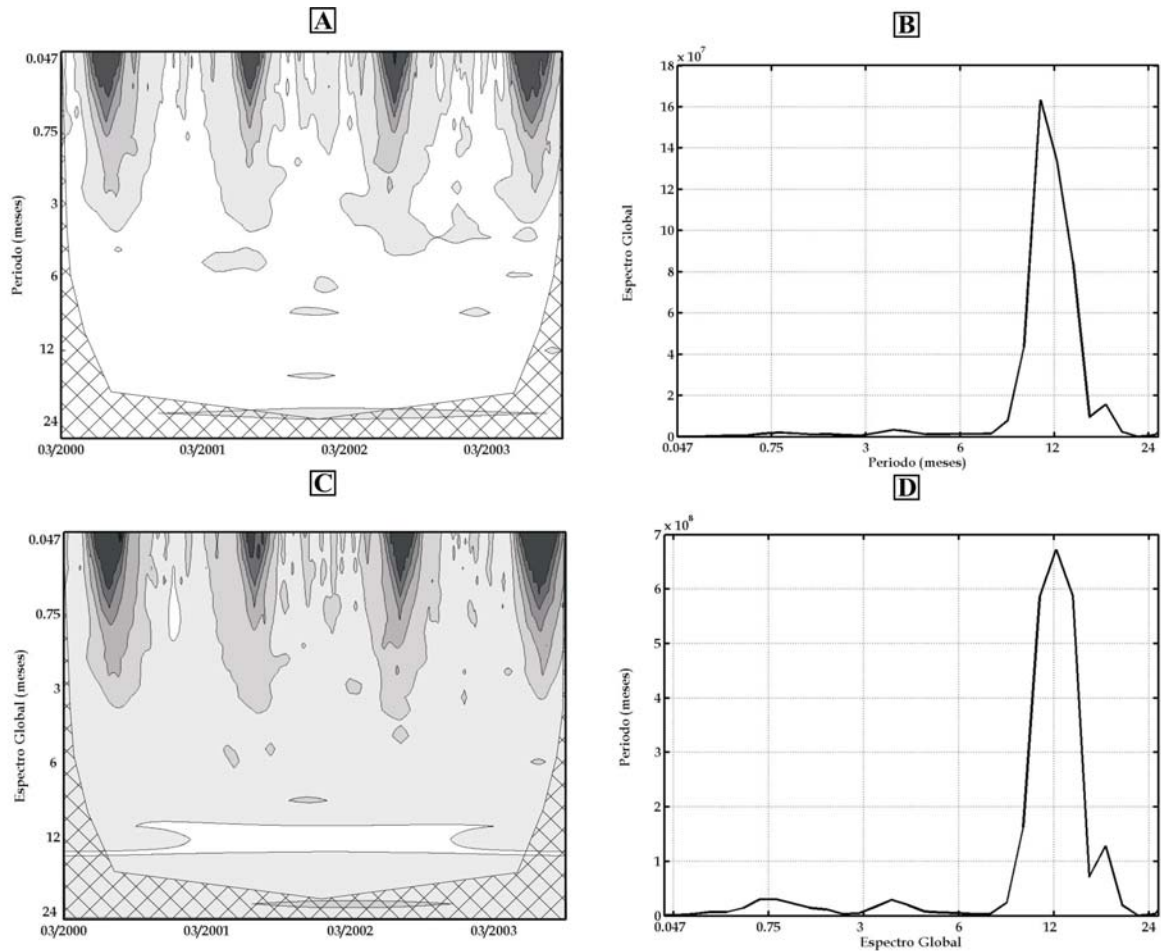


Figura 8.19. Espectros continuos cruzado y global de las transformadas *wavelet* de los datos de caudal medio diario en los manantiales de Ojén (A, B) y Nagüeles (C, D) para el período comprendido entre 1999 y 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

8.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico

El análisis de los hidrogramas anuales de los manantiales de Ojén y Nagüeles, principales puntos de descarga de los acuíferos de Ojén y Marbella, respectivamente, permite definir dos tipos de comportamientos hidrogeológicos. En los dos manantiales se producen rápidos e importantes variaciones de caudal en función de la magnitud e intensidad de los eventos pluviométricos, lo que demuestra, a priori, un escaso poder regulador. El comportamiento de estos

acuíferos está claramente condicionado por la estacionalidad de las precipitaciones. No obstante, en el hidrograma del manantial de Ojén se observan respuestas más tardías, indicativas de un cierto poder regulador del sistema. Los tiempos de base y de crecida, así como la relación $\overline{Q}_{max}/\overline{Q}_{min}$ ponen de manifiesto que el sistema de Marbella muestra un comportamiento hidrogeológico más kárstico que el sistema de Ojén.

El análisis de las curvas de recesión de los hidrogramas mediante la metodología propuesta por Mangin (1971, 1975), refleja nuevamente el comportamiento escasamente inercial de ambos sistemas. Los coeficientes de agotamiento (α) obtenidos presentan valores similares para todas las curvas, del orden 10^{-2} días⁻¹, indicativos de la existencia de una zona saturada que se vacía rápidamente. Además, en la mayor parte de las curvas analizadas el parámetro i presenta valores, que según Mangin (1975), serían característicos de sistemas complejos y de grandes dimensiones. Sin embargo, estos resultados no concuerdan con la realidad de los dos sistemas aquí analizados, ya que no pueden considerarse acuíferos muy extensos (13 y 24 km²). El grado de complejidad puede estar relacionado con el diferente comportamiento hidrogeológico de las litologías que constituyen ambos sistemas (mármoles calizos más karstificados frente a los dolomíticos). Además, en el sistema de Marbella esta complejidad podría ser consecuencia de la jerarquización de la red de drenaje kárstica.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a los datos diarios de caudal de los manantiales de Ojén y Nagüeles permite constatar una mayor capacidad reguladora del acuífero de Ojén en comparación con el de Marbella. Además, los resultados de esta metodología, tanto de forma simple como cruzada, corroboran las observaciones realizadas mediante el estudio de las curvas de recesión, en el sentido de que en ambos acuíferos se produce, por un lado, una transmisión rápida de la señal de entrada (precipitaciones) atribuible a un desarrollo de la karstificación importante, probablemente más significativa en la zona no saturada, y, por otro lado, la existencia de un cierto poder regulador como consecuencia del flujo por la zona saturada.

En lo que respecta al análisis de caudales clasificados, la curva de frecuencias relativa acumulada frente a los intervalos de caudal del manantial de Ojén permite concluir que por encima de los 120 L/s el sistema entra en carga, hasta los 320 L/s, valor a partir del cual empieza a funcionar los trop-pleins. La curva del manantial de Nagüeles permite diferenciar las condiciones hidrodinámicas excepcionales del año hidrológico 2000/2001 de las crecidas medias y de las situaciones de agotamiento. Los resultados reflejan que la capacidad de regulación de ambos acuíferos es escasa, ya que durante el agotamiento sólo se drena una tercera parte del volumen total desaguado por el manantial de Ojén y una cuarta parte en el caso del de Nagüeles.

Por último, la aplicación de la transformada *wavelet* a los datos diarios de precipitación y de caudal de los principales puntos de descarga ha ratificado aún más las conclusiones puestas de manifiesto anteriormente, en el sentido de que los sistemas acuíferos de Ojén y Marbella presentan escasa capacidad de filtro frente a las precipitaciones. Ello demuestra un importante grado de karstificación funcional, mayor en el sistema de Marbella.

8.3. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

8.3.1. Composición química de las aguas de los sistemas de Ojén y Marbella

Las aguas drenadas por el manantial de Ojén son de facies bicarbonatada cálcica y cálcico-magnésica, mientras que las del manantial de Nagüeles son exclusivamente bicarbonatada cálcicas (Figura 8.20). Estos resultados ponen de manifiesto que en el sistema de Ojén, la circulación de las aguas infiltradas se realiza por mármoles calizos y también dolomíticos. En cambio, las aguas drenadas por el manantial de Nagüeles circulan predominantemente por mármoles calizos.

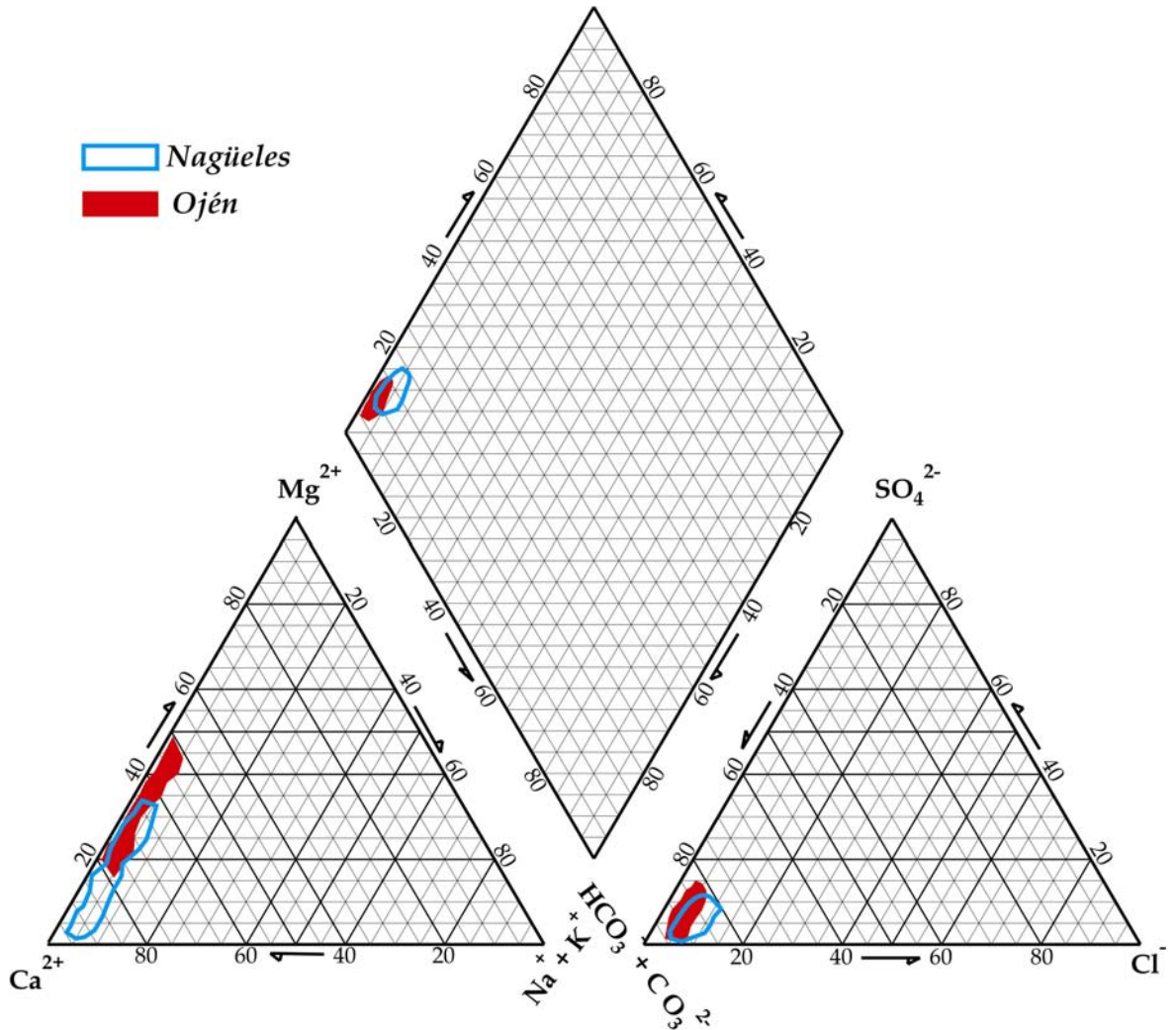


Figura 8.20. Diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogida en los manantiales de Ojén y Nagüeles.

En la tabla 8.5 se recogen los valores medios, para el conjunto de los datos y para cada año hidrológico, de los diferentes parámetros físico-químicos controlados en los manantiales de Ojén y Nagüeles. En una primera valoración no existen grandes diferencias en la composición química media de las aguas drenadas por ambos manantiales, aunque sí se detecta la influencia de las litologías que constituyen ambos acuíferos, ya que la surgencia de Ojén drena aguas con mayor TAC y contenido más elevado en Mg^{2+} . El contenido medio en Cl^- es ligeramente mayor en el manantial de Nagüeles, como consecuencia de que el contenido en Cl^- del agua de lluvia que se infiltra en el sistema de Marbella es mayor, debido a que está más próximo al mar y la altitud media del área de

recarga es menor. Con respecto a los parámetros característicos del sistema calcarbónico, los valores medios de los índices de saturación en calcita y dolomita muestran que las aguas del manantial de Ojén están ligeramente sobresaturadas en ambos minerales, mientras que las aguas del manantial de Nagüeles están prácticamente en equilibrio con respecto a la calcita y subsaturadas frente a la dolomita (Tabla 8.5).

	Manantial (periodo)	T (°C)	C.E. (µS/cm)	pH	TAC (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	IS _{PO3}	IS _{CAL}	TOC (mg/L)
n		81	306	81	79	79	77	79	79	79	79	79	79	77	77	12
m		15,5	436	7,66	296,2	11,1	7,0	1,2	5,3	56,0	25,7	2,6	0,4	0,350	0,265	0,5
max	Ojén	16,4	464	7,94	320,0	13,5	27,2	2,8	11,5	66,7	40,0	3,2	0,8	0,996	0,608	0,9
min		15,2	372	7,26	247,7	7,2	1,9	0,4	2,0	45,0	9,2	1,9	0,2	-1,695	-0,153	0,3
v(%)		1,6	5,5	1,5	6,4	11,8	57,6	44,3	35,2	9,1	25,7	9,9	37,7	109,0	49,8	36,5
m		15,5	433	7,65	288,4	10,9	11,8	1,4	7,3	55,1	26,8	2,7	0,5	0,358	0,243	
max	Ojén	15,5	447	7,80	305,2	12,8	27,2	2,8	9,4	66,7	29,9	3,2	0,5	0,659	0,386	
min	(1999/2000)	15,4	383	7,47	247,7	9,2	4,5	0,7	5,1	49,6	22,6	2,2	0,5	0,008	0,040	
v(%)		0,3	4,8	1,3	6,4	10,7	58,1	45,2	19,2	9,0	8,3	10,4	0,0	58,8	40,8	
m		15,4	436	7,67	297,5	11,3	7,4	1,1	5,7	59,2	21,6	2,7	0,4	0,298	0,304	
max	Ojén	15,7	462	7,94	317,9	12,8	11,7	2,4	11,5	64,4	27,1	3,1	0,8	0,996	0,608	
min	(2000/2001)	15,2	372	7,26	251,6	8,5	3,3	0,4	2,2	50,6	9,2	2,1	0,2	-1,695	-0,153	
v(%)		0,7	6,4	2,2	7,0	9,2	36,2	56,5	38,0	6,1	27,8	8,1	44,6	199,4	61,3	
m		15,3	435	7,65	295,5	11,4	5,6	1,1	4,8	56,3	27,2	2,6	0,4	0,357	0,255	
max	Ojén	15,5	461	7,76	314,0	13,0	10,1	2,0	7,8	63,9	40,0	2,9	0,8	0,620	0,401	
min	(2001/2002)	15,2	392	7,55	259,1	9,7	1,9	0,8	2,0	45,0	11,1	2,2	0,2	-0,141	0,106	
v(%)		0,6	5,2	0,8	5,9	8,5	46,4	24,0	30,6	10,1	27,6	7,7	37,5	57,6	34,3	
m		15,7	439	7,65	299,4	10,5	4,8	1,2	4,2	51,5	29,4	2,4	0,4	0,398	0,230	0,5
max	Ojén	16,4	464	7,79	320,0	13,2	8,0	2,2	7,2	56,1	40,0	2,9	0,8	0,744	0,371	0,9
min	(2002/2003)	15,2	374	7,49	252,1	7,2	2,4	0,4	3,1	45,3	17,9	1,9	0,2	-0,224	0,028	0,3
v(%)		2,7	5,3	0,9	6,3	17,5	37,1	38,2	23,6	5,7	18,4	11,6	43,8	51,4	35,1	36,5
n		81	81	81	79	79	76	79	79	79	79	79	79	76	76	9
m		19,5	382	7,42	228,3	13,3	12,9	1,0	7,4	66,4	9,5	3,6	0,6	-0,523	0,064	0,47
max	Nagüeles	19,6	415	7,63	243,8	19,9	23,5	2,7	76,8	80,1	16,9	4,7	1,0	-0,049	0,292	0,72
min		19,1	351	7,10	193,7	10,4	4,0	0,1	2,6	49,0	1,3	2,8	0,4	-1,564	-0,266	0,35
v(%)		1,3	3,6	1,2	4,5	13,4	29,9	39,0	118,8	9,3	39,0	11,0	26,1	62,0	155,4	26,4
m		19,6	379	7,36	228,7	13,1	15,9	0,9	7,0	65,4	9,8	3,6	0,7	-0,605	-0,004	
max	Nagüeles	19,6	385	7,51	236,7	19,9	23,5	1,4	10,4	70,6	15,6	4,7	1,0	-0,222	0,168	
min	(1999/2000)	19,4	364	7,10	212,3	10,7	8,2	0,3	4,6	59,6	6,1	2,8	0,5	-1,068	-0,266	
v(%)		1,0	3,3	1,1	2,7	13,4	12,2	57,6	210,6	11,4	47,0	10,0	26,6	67,3	226,3	
m		19,5	384	7,42	231,0	13,9	14,0	1,1	9,6	67,4	7,9	3,7	0,6	-0,631	0,075	
max	Nagüeles	20,2	415	7,63	240,6	17,0	20,2	2,7	76,8	80,1	16,9	4,7	1,0	-0,072	0,292	
min	(2000/2001)	19,2	355	7,26	216,2	11,4	11,2	0,1	2,6	53,2	1,3	3,2	0,5	-1,564	-0,090	
v(%)		1,3	3,3	1,1	2,7	11,3	14,2	44,1	153,8	11,0	58,3	9,7	28,3	63,6	112,8	
m		19,5	387	7,40	231,2	13,1	12,2	1,0	5,7	66,7	10,8	3,5	0,6	-0,455	0,058	
max	Nagüeles	20,2	409	7,53	243,8	17,0	19,5	1,8	7,2	74,0	15,6	3,8	0,8	-0,049	0,218	
min	(2001/2002)	19,1	351	7,26	193,7	11,9	7,2	0,3	4,4	49,0	2,6	3,2	0,5	-1,382	-0,119	
v(%)		1,6	3,9	1,0	5,8	10,9	29,0	39,0	14,9	11,8	26,7	5,8	23,3	63,6	149,8	
m		19,5	374	7,48	220,5	12,7	9,4	1,1	6,0	65,5	10,5	3,4	0,6	-0,358	0,111	0,47
max	Nagüeles	19,9	397	7,52	241,0	14,3	13,1	1,6	8,2	70,2	14,6	4,0	0,8	-0,093	0,210	0,72
min	(2002/2003)	19,2	357	7,45	206,9	10,4	4,0	0,7	4,5	58,3	3,4	2,9	0,4	-0,832	0,036	0,35
v(%)		1,0	4,2	0,3	4,9	9,6	27,4	24,3	18,7	5,2	30,1	9,7	23,1	54,1	39,1	26,4

Tabla 8.5. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de los manantiales de Ojén y Nagüeles. Leyenda: *n*, número de muestras; *m*, media aritmética; *max*, valor máximo; *min*, valor mínimo y *v*, coeficiente de variación.

Los valores del coeficiente de variación de la mayor parte de los componentes químicos analizados presentan valores superiores al 10%; por tanto, según el criterio de Shuster y White (1971, 1972) los dos acuíferos se englobarían dentro del tipo *conduit flow system*. No obstante, si se considera el coeficiente de variación de la conductividad eléctrica (5'5% en el manantial de Ojén y 3'6% en Nagüeles) y se aplica el mismo criterio de clasificación de Shuster y White (1971, 1972), los dos sistemas aquí analizados se incluirían dentro del tipo *diffuse flow*

system, lo cual no coincide con los resultados obtenidos en el análisis hidrodinámico.

El valor del coeficiente de variación del carbono orgánico total (TOC) es relativamente alto en ambas surgencias (>25'0%). No obstante, los valores del coeficiente de variación y la media del contenido en TOC son muy similares a los obtenidos por Batiot (2002) en diversos manantiales del Sur de Europa (Francia y España).

8.3.2. Evolución temporal de los parámetros físico-químicos

8.3.2.1. Manantial de Ojén

La evolución de la conductividad eléctrica durante todo el período de estudio (Figura 8.21) muestra una tendencia ligeramente ascendente interrumpida por las diluciones provocadas durante los principales eventos de recarga. Esta tendencia pone de manifiesto el drenaje progresivo de agua con mayor tiempo de residencia dentro del acuífero, mezclada con aguas de infiltración rápida. Se producen disminuciones de más de 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los valores de conductividad eléctrica, lo que indica un grado de karstificación funcional relativamente alto del sistema. Estas disminuciones de la conductividad eléctrica suelen estar relacionadas con el descenso de la TAC y del contenido en Mg^{2+} (Figura 8.21). En lo que respecta a la evolución del contenido en TOC (Figura 8.21) muestra valores más altos durante la crecida de principios de año hidrológico y, posteriormente, desciende de forma progresiva hasta alcanzar los valores mínimos en la época de aguas altas. Durante el estiaje, se observa un aumento del contenido en TOC paralelo a un aumento del contenido en Mg^{2+} .

Durante todo el periodo de estudio, los descensos del contenido en Mg^{2+} , se han producido de manera rápida y muy localizada en el tiempo (Figura 8.21), lo cual ha permitido estimar el volumen de agua drenado por el manantial antes del descenso acusado de dicho parámetro. Así, el volumen drenado por la surgencia, desde el inicio del aumento de caudal hasta el descenso brusco del contenido en

Mg²⁺, para los tres años hidrológicos considerados, es de aproximadamente 0,6 hm³. Este volumen corresponde al agua situada dentro de la zona no saturada, de manera que hasta que no sea drenado, no se produce la respuesta rápida en relación a las diluciones hidroquímicas.

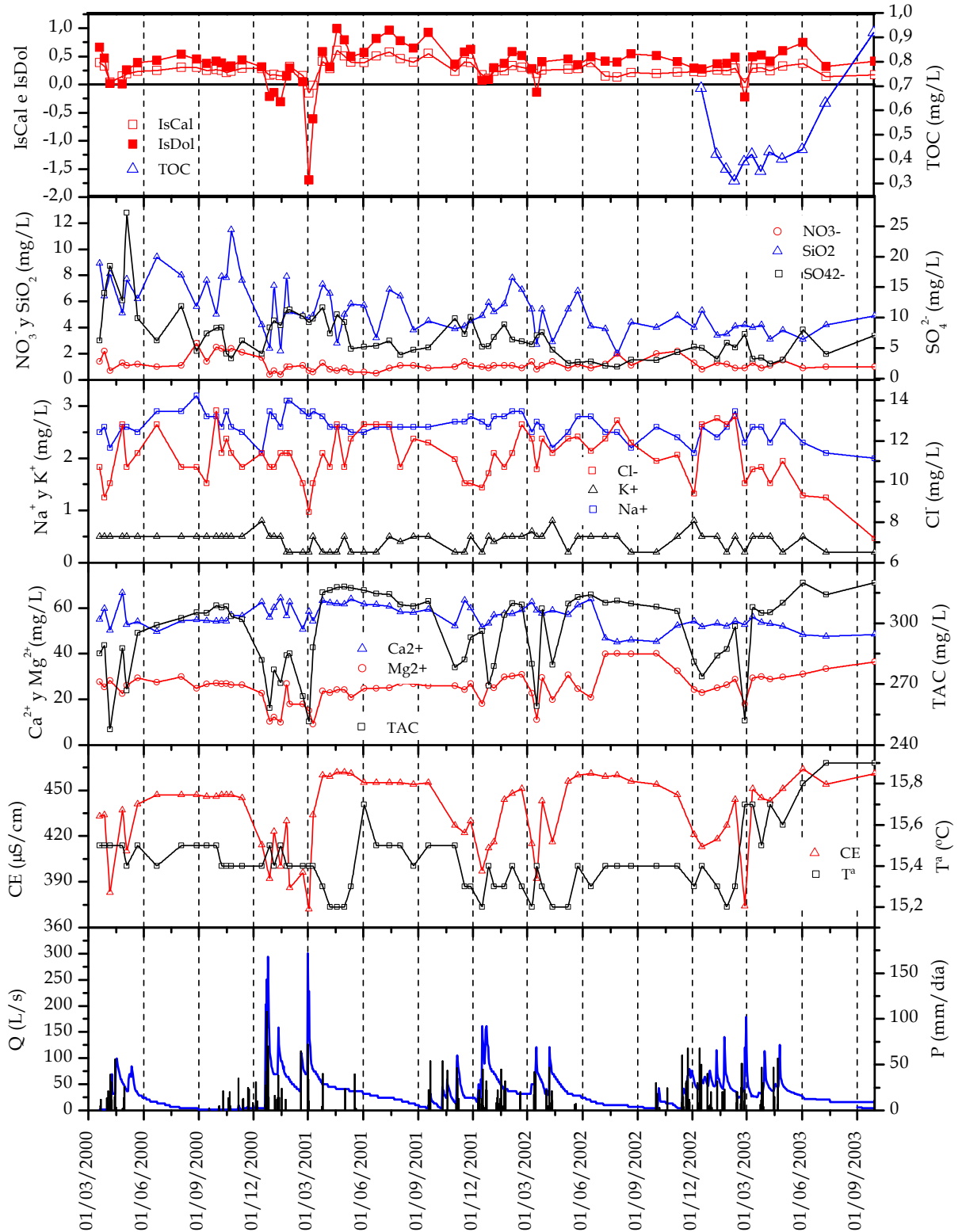


Figura 8.21. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Ojén durante el período de investigación.

La evolución de la temperatura del agua no muestra la variación anual de la temperatura ambiente (Figura 8.21), caracterizada por mínimos invernales y máximos estivales. Tampoco se observa una evolución de los contenidos en Cl^- y Na^+ característica de un aumento progresivo en estiaje con respecto a la época de aguas altas por causa de la evaporación. Además, el bajo grado de correlación entre la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ y el contenido en Cl^- (Figura 8.22), no permite establecer hipótesis sobre el tiempo de permanencia del agua en el epikarst.

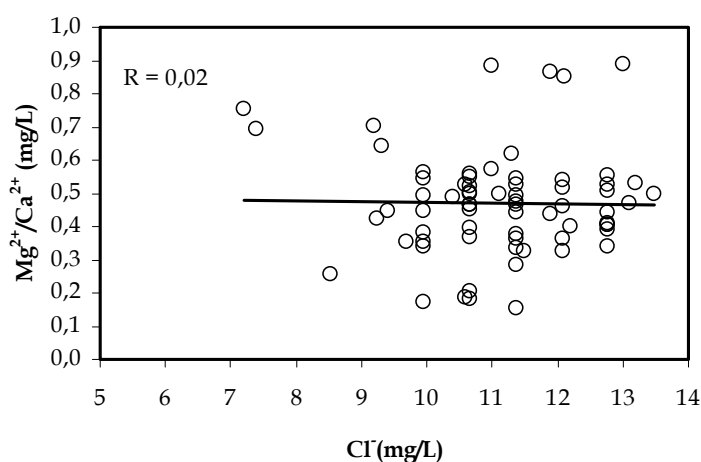


Figura 8.22. Correlación entre la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ y el contenido en Cl^- de las aguas drenadas por el manantial de Ojén.

Durante los estiajes, sobre todo para el año hidrológico 2000/2001 (Figura 8.23), se observa una disminución de la conductividad eléctrica paralela a una disminución de la TAC y del contenido en Ca^{2+} y a un ligero aumento del contenido en Mg^{2+} , probablemente porque se produce precipitación de calcita a medida que aumenta el tiempo de permanencia en el acuífero. Además, si se tiene en cuenta el contexto hidrogeológico del manantial, la interpretación hidroquímica de este hecho estaría relacionada con un drenaje lento a través de fisuras de la zona no saturada en los mármoles dolomíticos durante el agotamiento, puesto que el manantial no drena una zona saturada propiamente dicha (Andreo, 1997).

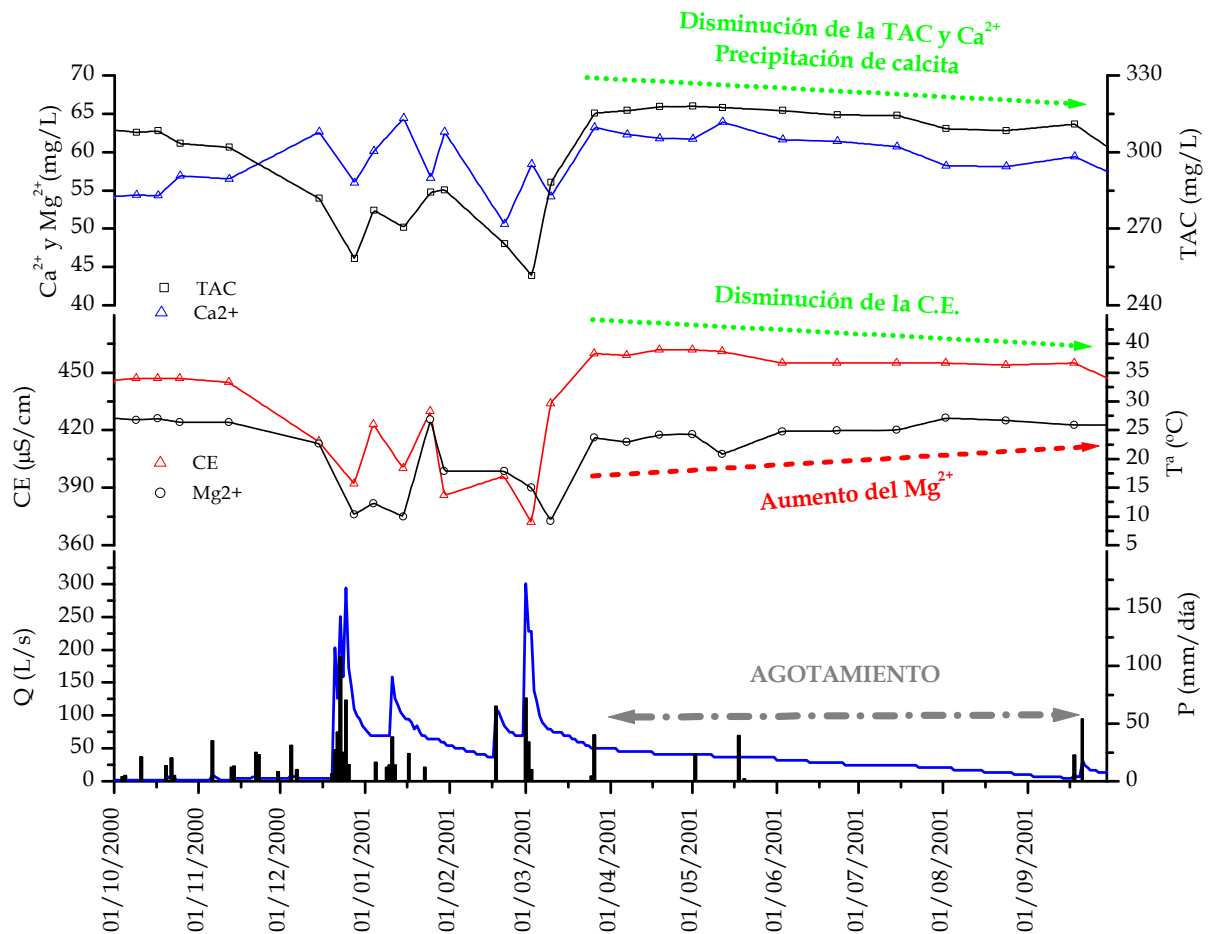


Figura 8.23. Evolución temporal de la conductividad eléctrica, Mg²⁺, TAC y Ca²⁺ del agua drenada por el manantial de Ojén durante todo el año hidrológico 2000/2001.

La crecida de Marzo de 2003 (Figura 8.24), la más importante del año hidrológico, con caudales próximos a los 200 L/s, provoca una disminución de la conductividad eléctrica y un ascenso de la temperatura. La menor mineralización del agua durante este periodo se debe a que disminuye la TAC y el contenido en Mg²⁺, mientras que aumenta ligeramente el contenido en TOC (Figura 8.23). Esta respuesta se produce después de un mes en condiciones de agotamiento, es decir, la inexistencia de recarga entre mediados del mes de Enero y mediados de Febrero de 2003 provoca que las aguas almacenadas en la franja epikárstica de la zona no saturada, que han estado concentrándose por evaporación durante este mes, sean empujadas hacia la surgencia por las lluvias de finales de Marzo del 2003 (efecto pistón de la zona no saturada).

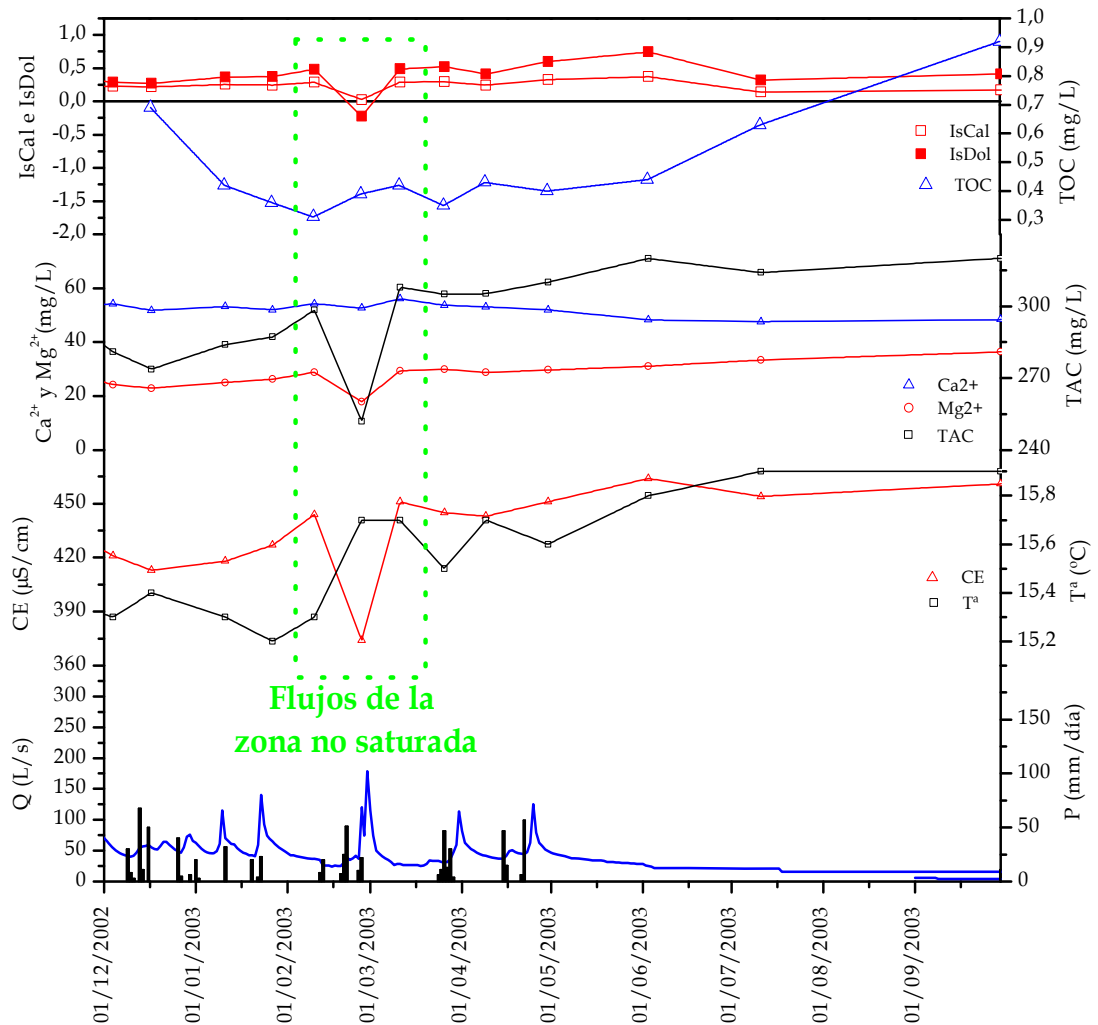


Figura 8.24. Evolución temporal del TOC, conductividad eléctrica y otros parámetros hidroquímicos del agua drenada por el manantial de Ojén durante parte del año hidrológico 2002/2003.

Se ha realizado un análisis de componentes principales a partir de los datos hidroquímicos correspondientes a las 77 muestras de aguas tomadas en el manantial de Ojén. En el análisis se han considerado todos los parámetros físico-químicos (temperatura, conductividad eléctrica, pH, TAC, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, SiO₂, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺). Los dos primeros factores del ACP (Figura 8.25) explican el 43% de la varianza total. La matriz de correlación muestra la importante correlación de la conductividad eléctrica con la TAC y el contenido en Mg²⁺, de manera que en el campo de las variables, el factor I (26%) queda definido por esta asociación de parámetros que representan al eje de la *mineralización* y del *tiempo de permanencia del agua en el acuífero*. El factor II (17%) se encuentra definido por los

contenidos en Ca^{2+} , Cl^- y Na^+ y podría indicarse indicativo de la permanencia del agua en el *epikarst* y *zona no saturada* (procesos de evapotranspiración).

	T	C. E.	pH	TAC	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
T	1											
C. E.	0,0322	1										
pH	0,1040	0,1374	1									
TAC	0,0165	0,9401	0,1355	1								
Cl^-	0,1537	0,3981	0,3123	0,4552	1							
SO_4^{2-}	-0,3877	0,0705	-0,2095	0,0674	-0,0962	1						
NO_3^-	0,0574	0,0229	-0,1905	0,0512	0,0932	0,0628	1					
SiO_2	-0,1280	-0,0895	-0,1017	-0,0994	-0,1264	-0,0371	0,1692	1				
Ca^{2+}	0,1076	0,3670	0,1061	0,5375	0,4511	-0,0705	0,0834	-0,0523	1			
Mg^{2+}	0,0230	0,7117	0,1253	0,6135	0,1288	0,0787	0,0590	-0,1422	-0,1880	1		
Na^+	-0,1603	0,4853	-0,0364	0,5442	0,1680	0,1621	0,1857	-0,1484	0,3475	0,3052	1	
K^+	0,0791	0,3833	0,0059	0,3600	0,1044	0,1319	0,2002	0,0144	0,0738	0,4516	0,0787	1

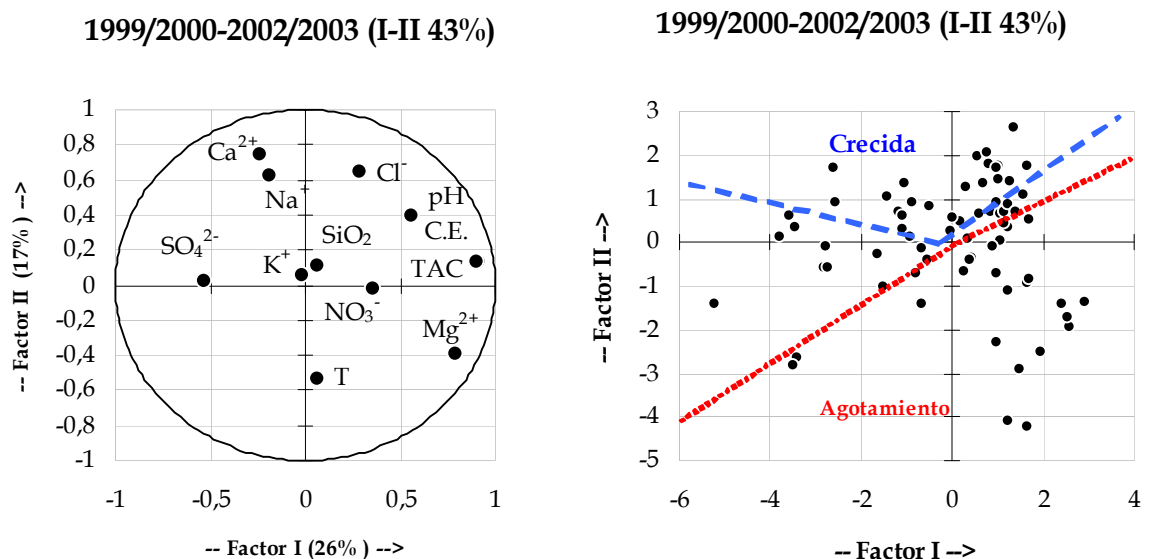


Figura 8.25. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por el manantial de Ojén durante todo el periodo de estudio (n= 77).

Dada la escasa varianza que explica el ACP, la situación de las muestras en los planos factoriales I-II (Figura 8.25) permite diferenciar únicamente dos grupos de aguas: *aguas de crecida*, menos mineralizadas y caracterizadas por la señal de la zona no saturada y *aguas de estiaje* definidas por una temperatura más alta y un mayor contenido en Mg^{2+} y, por tanto, con un mayor tiempo de residencia dentro del acuífero.

8.3.2.2. Manantial de Nagüeles

El manantial de Nagüeles, en comparación con el de Ojén, presenta una menor variabilidad hidroquímica (Figura 8.26). Así, las disminuciones máximas en la conductividad eléctrica del agua de la surgencia de Nagüeles, paralelas a los

aumentos de caudal, son aproximadamente del 15% ($60 \mu\text{S}/\text{cm}$) con respecto al valor máximo para todo el periodo de registro. Este cálculo se realiza asumiendo que el agua drenada por el manantial antes de la crecida representa el 100% de la mineralización del agua subterránea del conjunto del acuífero y que la dilución registrada durante la crecida es el resultado de la infiltración rápida de un porcentaje del agua de lluvia, cuya conductividad eléctrica puede considerarse insignificante. Por tanto, la relativamente baja dilución durante las crecidas, pone de manifiesto que la karstificación funcional, deducida mediante el estudio hidrodinámico, debe de ser localizada y limita la cantidad de agua de lluvia que participa en la mezcla. Así, independientemente de la magnitud de la crecida, la conductividad eléctrica no presenta disminuciones importantes. No obstante, la escasa extensión del acuífero (20 km^2) o la inexistencia de eventos pluviométricos de gran intensidad durante el período de estudio pueden influir también en los procesos de dilución hidroquímica.

Las disminuciones de la conductividad eléctrica en respuesta a la recarga están condicionadas fundamentalmente con el descenso de TAC y Ca^{2+} (Figura 8.26). Además, las evoluciones generales de la temperatura y de la conductividad eléctrica son bastante similares entre sí, con valores relativamente más altos durante los meses de estiaje (Figura 8.26). Durante el estiaje del año hidrológico 2000/2001, la temperatura presenta una evolución ascendente, con dos valores máximos en las primeras crecidas del siguiente año, mientras que la conductividad eléctrica presenta una ligera tendencia descendente (Figura 8.27).

Esta respuesta hidroquímica e hidrotérmica podría ser consecuencia de un pequeño episodio lluvioso de $15 \text{ L}/\text{m}^2$, de manera que este aguacero provocó un aumento de temperatura y conductividad eléctrica y, posteriormente, continuó la tendencia ascendente de la temperatura, al mismo tiempo que la conductividad eléctrica disminuyó. La primera respuesta correspondería a un pequeño efecto pistón de las aguas almacenadas dentro del sistema que son empujadas por las aguas recientemente infiltradas, mientras que las posteriores evoluciones antitéticas de estos dos parámetros, indicarían un proceso de dilución por la

llegada de aguas menos mineralizadas y más calientes, debido esto último a que la temperatura ambiente es elevada durante la época estival. El hecho de que un pequeño episodio lluvioso produzca una respuesta de este tipo denota un importante grado de karstificación funcional e implica un escaso poder regulador de este sistema acuífero.

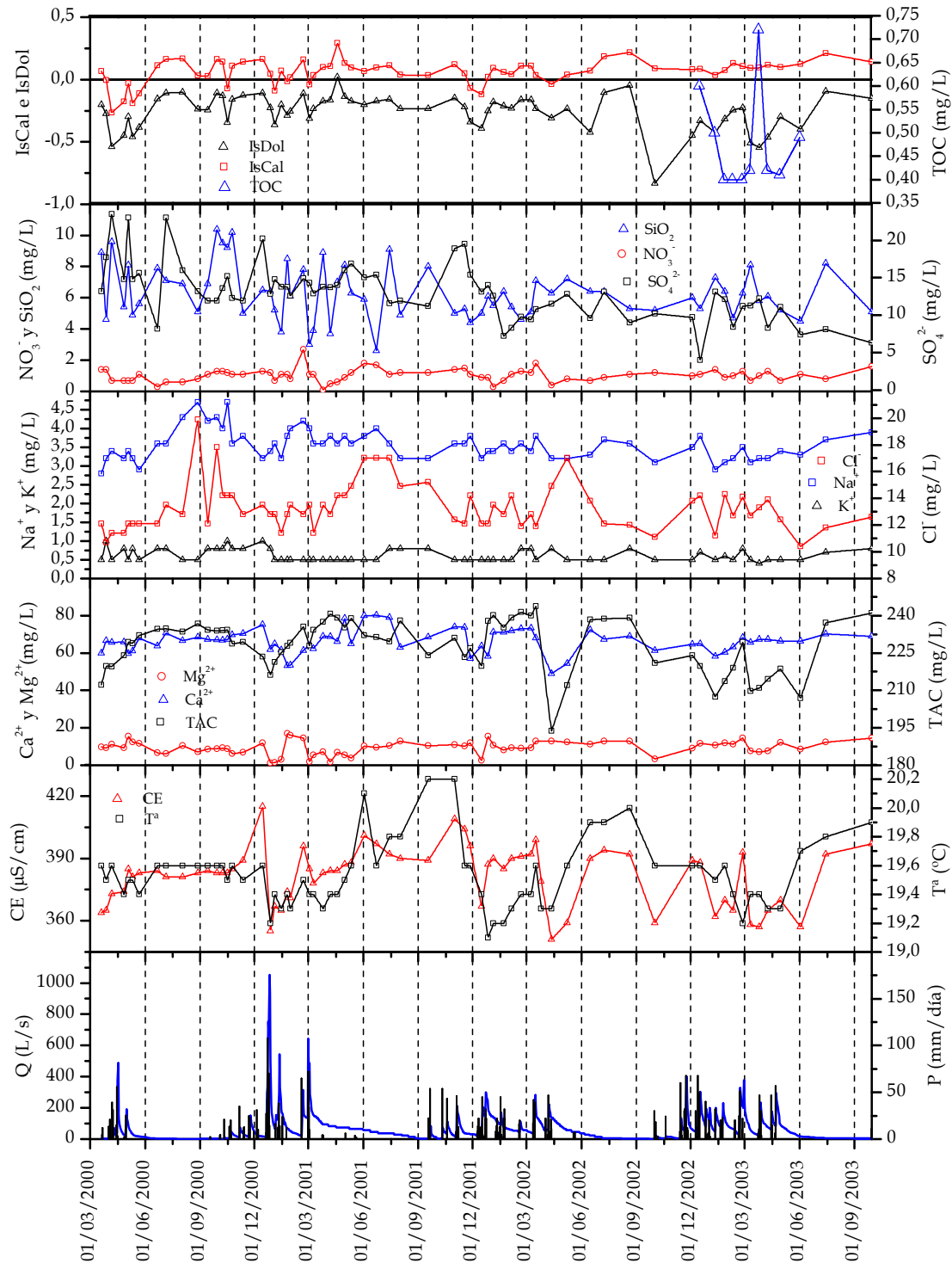


Figura 8.26. Evolución temporal de la composición química del agua drenada por el manantial de Nagüeles durante el período de investigación

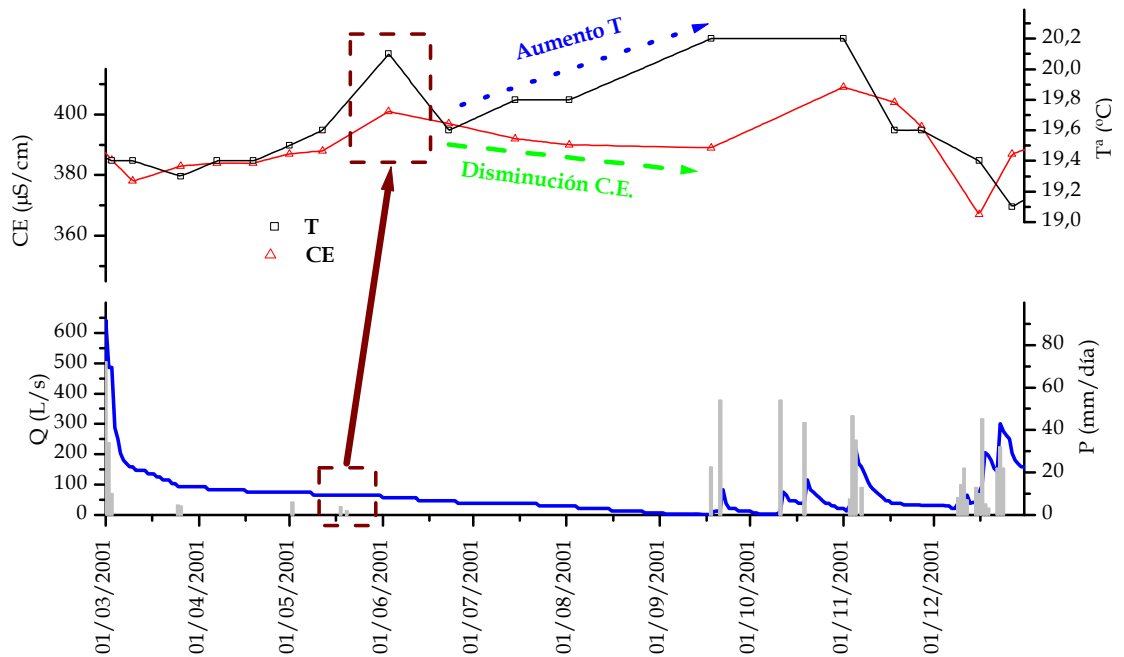


Figura 8.27. Evolución temporal de la conductividad eléctrica y la temperatura del agua drenada por el manantial de Nagüeles durante parte de los años hidrológicos 2000/2001 y 2001/2002.

Durante las primeras lluvias de cada año hidrológico se observa una de las respuestas hidroquímicas más particulares del manantial de Nagüeles (Figura 8.26). Se registran crecidas de magnitud variable, en función del valor total de precipitación, y los valores más elevados de la conductividad eléctrica (indicativos del final del estiaje) del agua de la surgencia (Figura 8.26). Este aumento de la mineralización se debe al aumento de los contenidos en TAC, Cl^- y Na^+ , porque a la surgencia llega agua almacenada en el epikarst y en el resto de la zona no saturada, que ha estado concentrándose por evaporación y disolviendo mármoles durante el estiaje (efecto pistón, con participación de la zona no saturada).

Con respecto a la evolución del contenido en TOC, al igual que en el resto de surgencias, sólo ha sido posible su determinación para una parte del año hidrológico 2002/2003. Así, se puede comprobar en la figura 8.26 la presencia de valores más elevados en las primeras crecidas del año hidrológico y en estiaje y menores durante la fase hidrodinámica de aguas altas. Sin embargo, se observa un importante aumento relativo del TOC a finales de Marzo de 2003, como respuesta al mayor evento pluviométrico del año hidrológico. Este aumento puntual del TOC, paralelo a una importante disminución de la mineralización de las aguas, podría corresponder a una infiltración rápida del agua de lluvia.

8.3.3. Curvas de frecuencias

Como se observa en la figura 8.28, las curvas de frecuencias de la conductividad eléctrica de las aguas drenadas por los manantiales de Ojén y Nagüeles muestran una moda principal no muy acentuada, que caracteriza las aguas (estiaje), es decir, aguas con mayor tiempo de residencia dentro del acuífero. No obstante, el rango de variación de las dos surgencias es algo diferente. El manantial de Ojén presenta una asimetría hacia los valores más bajos de conductividad eléctrica, que corresponden a las diluciones del agua del acuífero por mezcla con el agua de infiltración menos mineralizada. Además, en este tramo asimétrico se observa una segunda y tercera moda porque, durante los eventos de recarga, se producen diferentes situaciones de mezcla entre las agua infiltradas y las almacenadas dentro del sistema. La curva del manantial de Nagüeles muestra un rango de variación algo menor, con modas secundarias tanto hacia los valores más bajos de conductividad eléctrica (procesos de dilución), como hacia los valores más altos, que corresponden a aguas más mineralizadas (mayor tiempo de residencia dentro del acuífero) y que han sido empujadas hacia el manantial por las aguas de infiltración (efecto pistón).

La curva de la TAC de las aguas drenadas por el manantial del Ojén es similar a la de la conductividad eléctrica, mientras que las curvas de otros parámetros característicos del sistema calcocarbónico (Ca^{2+} y Mg^{2+}) aún cuando muestran una única moda principal y un amplio rango de variación, la morfología de éstas es muy diferente, lo que pone de manifiesto la importancia del diferente comportamiento hidrogeológico (hidrodinámico e hidroquímico) de los mármoles calizos y de los mármoles dolomíticos. En cambio, las curvas del contenido en TAC, Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas del manantial de Nagüeles presentan una forma parecida entre ellas con una única moda principal.

El rango de variación de las curvas de Cl^- y NO_3^- muestra la influencia de las aguas de la franja epikárstica de la zona no saturada y de los procesos de reconcentración debido a fenómenos de evapotranspiración en ambos sistemas acuíferos.

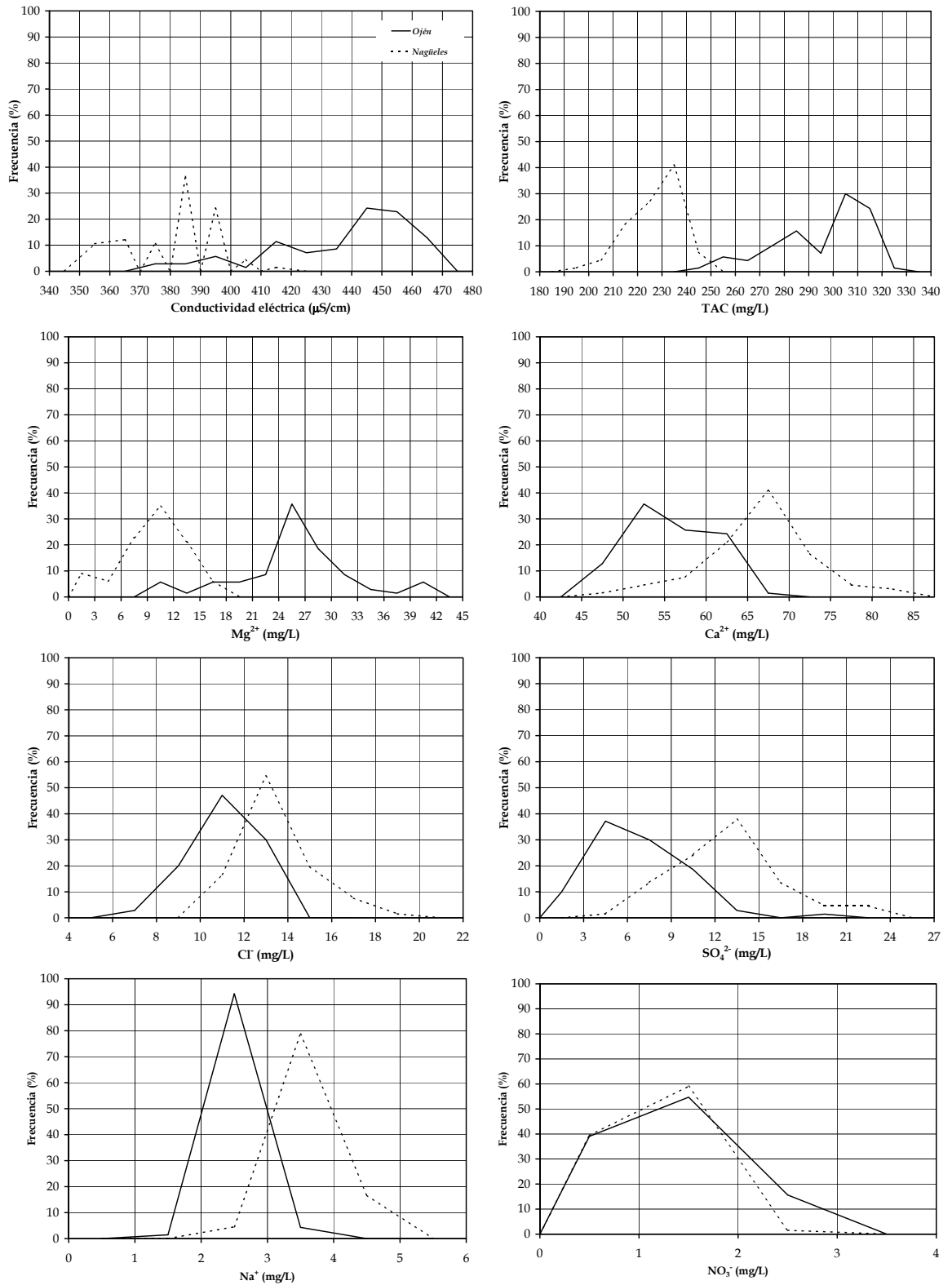


Figura 8.28. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de los manantiales de Ojén y Nagüeles.

8.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

La evolución de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas del manantial de Ojén y de las aguas de precipitación del área de recarga de Sierra Blanca (estación de Ojén) no muestran tendencia durante el período analizado (Figura 8.29).

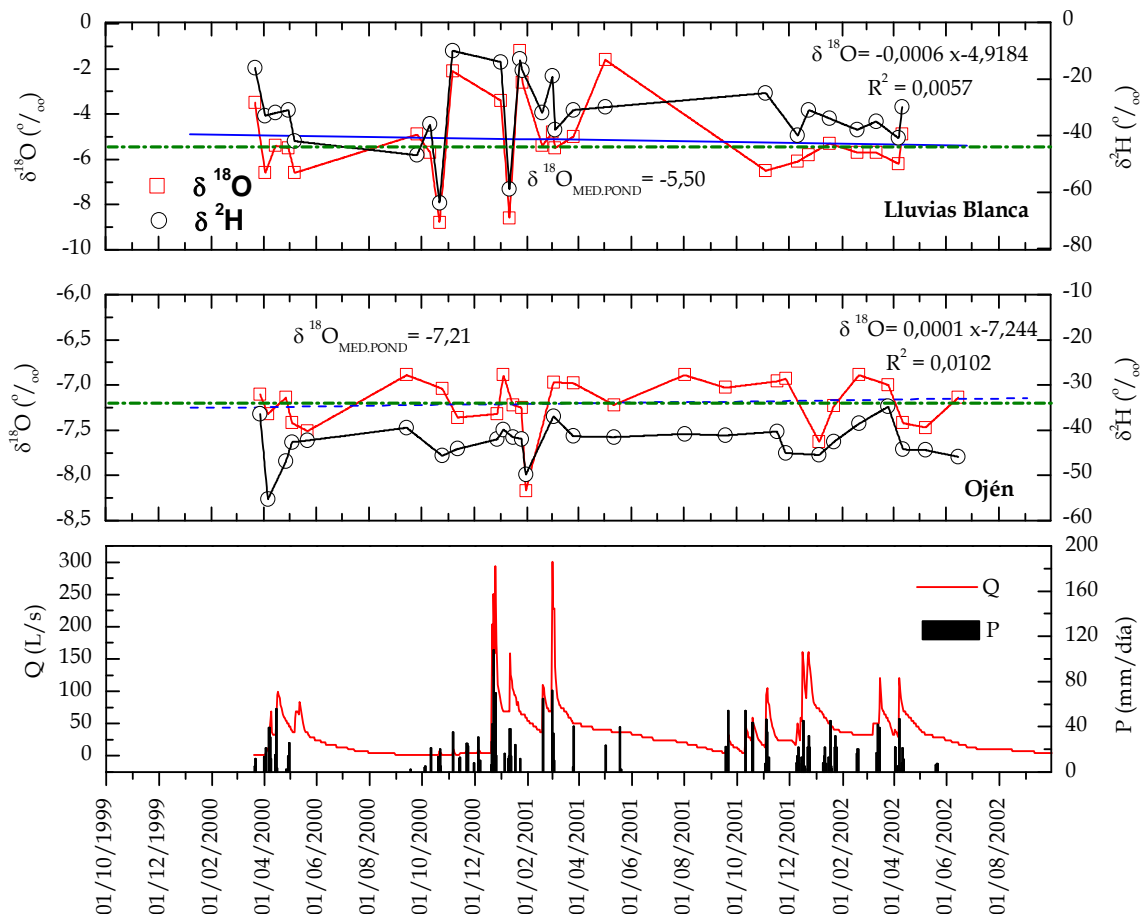


Figura 8.29. Evolución temporal del contenido en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de Sierra Blanca y del agua drenada por el manantial de Ojén. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$.

El valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia para el periodo de estudio es de $-5,50\text{‰}$, mientras que el agua drenada por el manantial de Ojén presenta un contenido medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ de $-7,21\text{‰}$ para el conjunto de todos los datos analizados. Esta diferencia entre los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ de entrada y salida muestra la importancia de la evapotranspiración de las lluvias menos negativas en el área de recarga de este acuífero.

En la evolución temporal del $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas drenadas por el manantial de Ojén (Figura 8.29) se observa que existen respuestas relativamente rápidas, de acuerdo con la periodicidad de muestreo, aunque algunos de los valores más negativos de las lluvias se detectan, algo desfasados, en las aguas del manantial.

Las curvas de frecuencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas drenadas por el manantial de Ojén (Figura 8.30) son claramente plurimodales, con un amplio rango de variación y, por tanto, indicativas de la escasa capacidad del sistema de Ojén para homogeneizar la señal isotópica. Ello traduce la existencia de un importante grado de karstificación funcional en este acuífero.

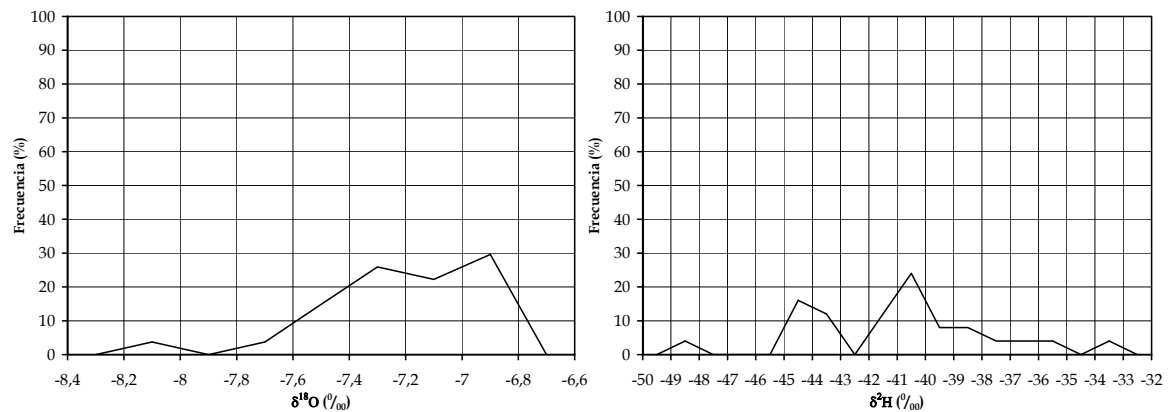


Figura 8.30. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por el manantial de Ojén durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.

9. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO DE LA ALFAGUARA

9.1. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

El macizo carbonático de la Alfacuara se encuentra situado a 9 km al NNE de la ciudad de Granada al NE del pueblo de Alfacuara (Figura 9.1). La altitud media del área de estudio es de 1350 m y los valores medios anuales de precipitación y temperatura son, respectivamente, 800 mm y 11,6 °C.

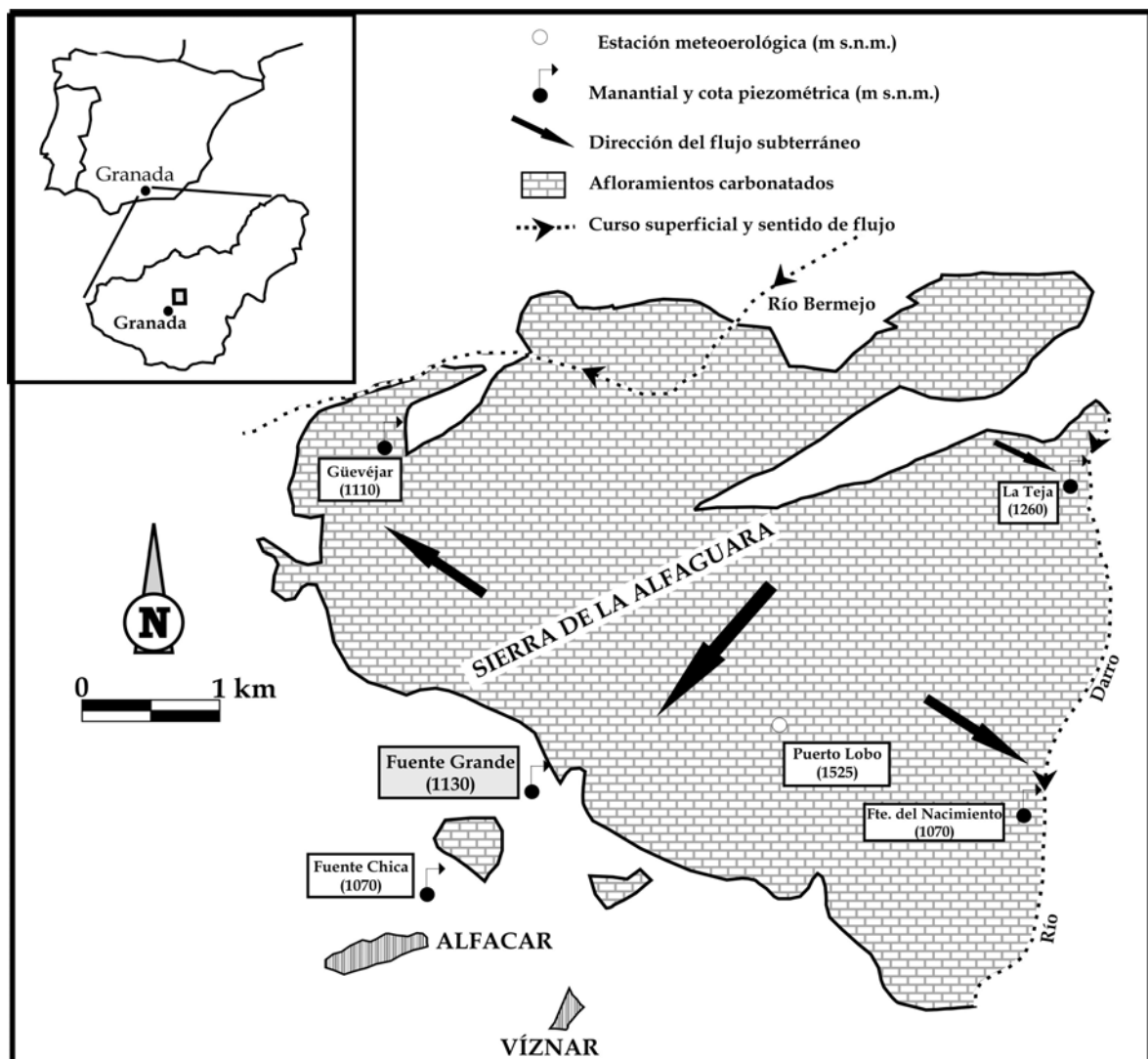


Figura 9.1. El sistema acuifero de la Alfacuara.

Desde el punto de vista geológico, en la Sierra de la Alfacuara aparecen representadas varias unidades pertenecientes a los Complejos Alpujarride y Maláguide y unidades de transición entre ambos complejos tectónicos de la Zona

Interna de la Cordillera Bética (Sanz de Galdeano *et al.*, 1995). El área de estudio está constituida fundamentalmente por calizas y dolomías con una potencia media aproximada superior a los 500 metros (ITGE-COPTJA, 1999).

La estructura geológica de la Sierra de la Alfaguara se caracteriza por el apilamiento de escamas tectónicas con una doble vergencia. Dentro de las unidades se distinguen, en algunos sectores, pliegues de dirección predominante E-W, pero con vergencias hacia el Norte y hacia el Sur, dependiendo de los afloramientos. El conjunto de unidades tectónicas ha sido afectado posteriormente por dos generaciones de fallas NNW-SSE y NNE-SSW (Castillo, 1981; Sanz de Galdeano *et al.*, 1995).

El modelado exokárstico está poco representado en la Sierra de la Alfaguara aunque se conoce un buen número de cavidades kársticas con un desarrollo predominantemente vertical, gracias a los trabajos espeleológicos desarrollados en la zona. En el trabajo de Castillo *et al.* (1982) se recoge un inventario de las principales cavidades.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el macizo de la Alfaguara constituye un acuífero (Fernández Rubio, 1964; Castillo, 1981 y Castillo *et al.*, 1982) formado principalmente por dolomías triásicas y calizas jurásicas, que ocupa una superficie aproximada de 20 km². Se encuentra limitado, al Norte, por el Río Bermejo (Figura 9.1), el cual se encaja en materiales maláguides de baja permeabilidad; al Este, por el Río Darro que discurre sobre las dolomías alpujárrides y, al Sur y Oeste, por los sedimentos de la depresión de Granada. Los materiales calizo-dolomíticos que constituyen este acuífero presentan una potencia superior a los 500 m (Castillo *et al.*, 1982).

La recarga del sistema se produce por infiltración del agua de lluvia y, ocasionalmente, de fusión de nieve, que cae sobre el afloramiento permeable. Este acuífero se drena a través de manantiales situados en sus bordes meridional y occidental, el más importante de los cuales es la Fuente Grande de Alfacar. Este manantial surge a una cota de 1130 m (Figura 9.1), en el contacto entre los materiales acuíferos carbonáticos y los detríticos de baja permeabilidad del relleno

de la depresión de Granada y cuyas aguas son encauzadas a través de la acequía de Aynadamar.



Lámina 9.1. A- Panorámica desde el SE de la Sierra de la Alfaguara, B- Fuente Grande de Alfacar, C- Acequía de Aynadamar.

9.2. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

La caracterización hidrodinámica del acuífero de la Alfaguara se ha llevado a cabo mediante el análisis de la serie de caudales medios diarios de la Fuente Grande de Alfacar. Estos datos de caudal se han obtenido mediante la aplicación de una curva de gastos a los valores registro de la altura de la lámina de agua en una escala situada en el canal de salida de la acequía de Aynadamar. Las lecturas de la escala en este canal han sido realizadas, con una periodicidad prácticamente diaria, por técnicos de la empresa SERAGUA que gestiona el abastecimiento de agua a Alfacar. Al caudal obtenido mediante la correspondiente curva de gastos hay que añadir un caudal de 30 L/s que se deriva en la propia surgencia para abastecimiento a las poblaciones de Víznar y Alfacar. La serie de caudales diarios así obtenida comprende desde Mayo de 2000 hasta Septiembre de 2003. El caudal medio del manantial durante este periodo es de 85 L/s. En la figura 9.2 se

representa la evolución temporal de los caudales para toda la serie de datos disponible.

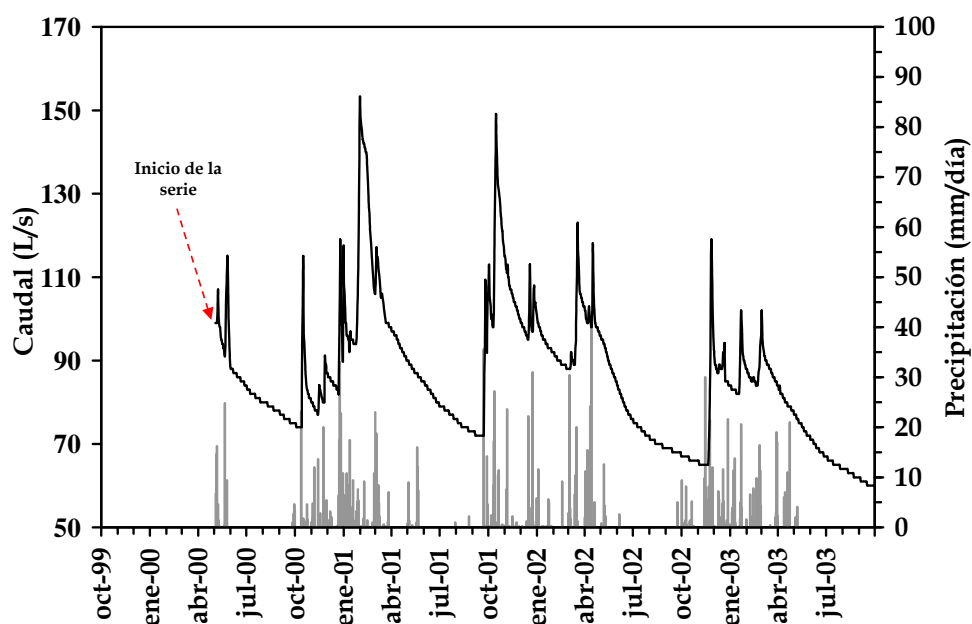


Figura 9.2. Hidrograma de Fuente Grande para el periodo de estudio. Precipitaciones registradas en la estación de Puerto Lobo (véase situación en figura 9.1).

9.2.1. Análisis del hidrograma de Fuente Grande

Los hidrogramas anuales de Fuente Grande muestran varias crecidas por cada año hidrológico, aunque la mayoría de las veces se trata de una crecida principal y varias de menor importancia (Figura 9.3). Estos aumentos de caudal son, generalmente, proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones y se producen entre 5 y 10 días después del evento pluviométrico que origina la recarga. Los tiempos de crecida varían entre 5 y 10 días, mientras que los tiempos de base no son superiores a 20 días.

Al inicio de la decrecida de Febrero 2001 se observa un abombamiento en el hidrograma (Figura 9.3). Esta morfología, ya descrita por otros autores (Antigüedad, 1986; Liñán, 2003) en los hidrogramas de surgencias que drenan acuíferos carbonáticos, se relaciona con la existencia de dificultades en el drenaje durante fases de recarga importante, que dan lugar a procesos de inversión de gradiente. Una posible explicación alternativa a este fenómeno podría ser la recarga por fusión nival, pero queda descartada debido a la escasa cuantía de este tipo de precipitaciones en los meses precedentes.

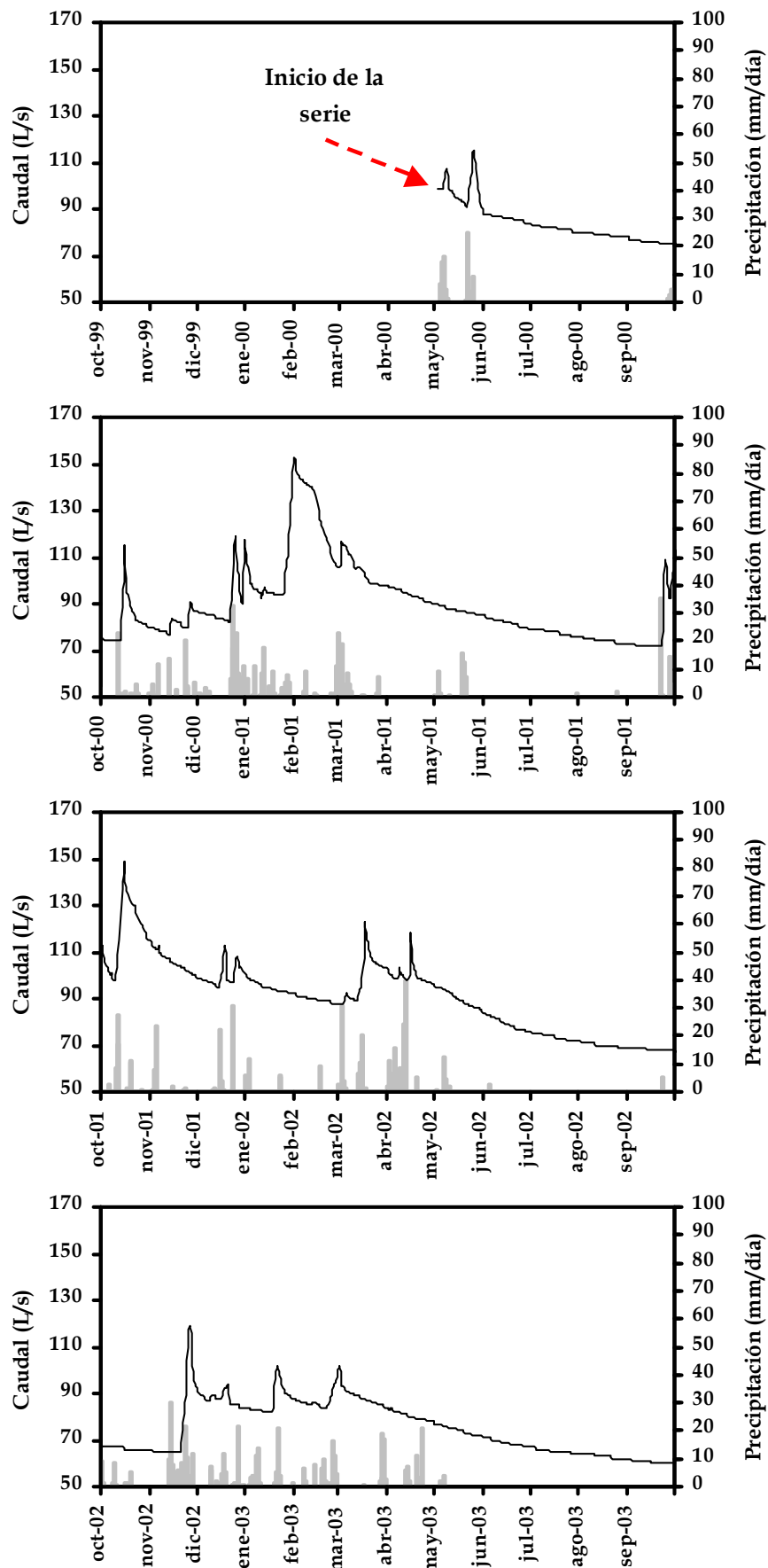


Figura 9.3. Hidrogramas anuales, a paso de tiempo diario, de Fuente Grande para el periodo 2000-2003. Precipitaciones registradas en la estación de Puerto Lobo.

En la tabla 9.1 se muestran los caudales máximos y mínimos para cada uno de los años hidrológicos considerados en el análisis de Fuente Grande. 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 es de 2'1.

Por tanto, un primer análisis de la respuesta hidrodinámica del manantial de Fuente Grande permite establecer, desde el punto de vista hidrodinámico, cierto comportamiento inercial.

	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	Precipitación
2000/2001	153	72	2	544
2001/2002	149	68	2	445
2002/2003	119	60	2	457
<i>media</i>	140	67		482

$\overline{Q_{max}} / \overline{Q_{min}}$ 2,1
--

Tabla 9.1. Relación de caudales máximos y mínimos registrados en Fuente Grande y valores de precipitación anual en la estación de Puerto Lobo para el periodo entre 2000 y 2003 (datos de caudal en L/s y de precipitación en mm).

9.2.2. Análisis de la curva de recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

A partir de la metodología propuesta por Mangin (1970, 1975), se ha llevado a cabo el estudio de cuatro curvas de recesión de la serie de caudales medios diarios. La figura 9.4 recoge las curvas estudiadas mientras que la tabla 9.2 muestra los datos relativos a las mismas y los resultados obtenidos de su análisis.

La duración media de la decrecida (D_d) es bastante pequeña (≈ 5 días), aunque en el año hidrológico 2000/2001, la duración es mucho más elevada (47 días), lo que debe ser consecuencia de los fenómenos de inversión de gradiente que tienen lugar en este acuífero en condiciones de alta recarga. Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración (η) son muy similares en las otras tres curvas, de manera que η presenta un valor medio de 0'1803 días⁻¹. Estos resultados indican que la zona no saturada presenta un cierto grado de karstificación funcional. No obstante, los bajos valores del coeficiente de heterogeneidad (ϵ),

indicativos de una escasa concavidad de la curva de la función y (Figura 9.4), reflejan que aunque la decrecida s.s. se produce rápidamente, la disminución de caudal en la surgencia durante dicha fase tiene lugar de manera lenta y gradual.

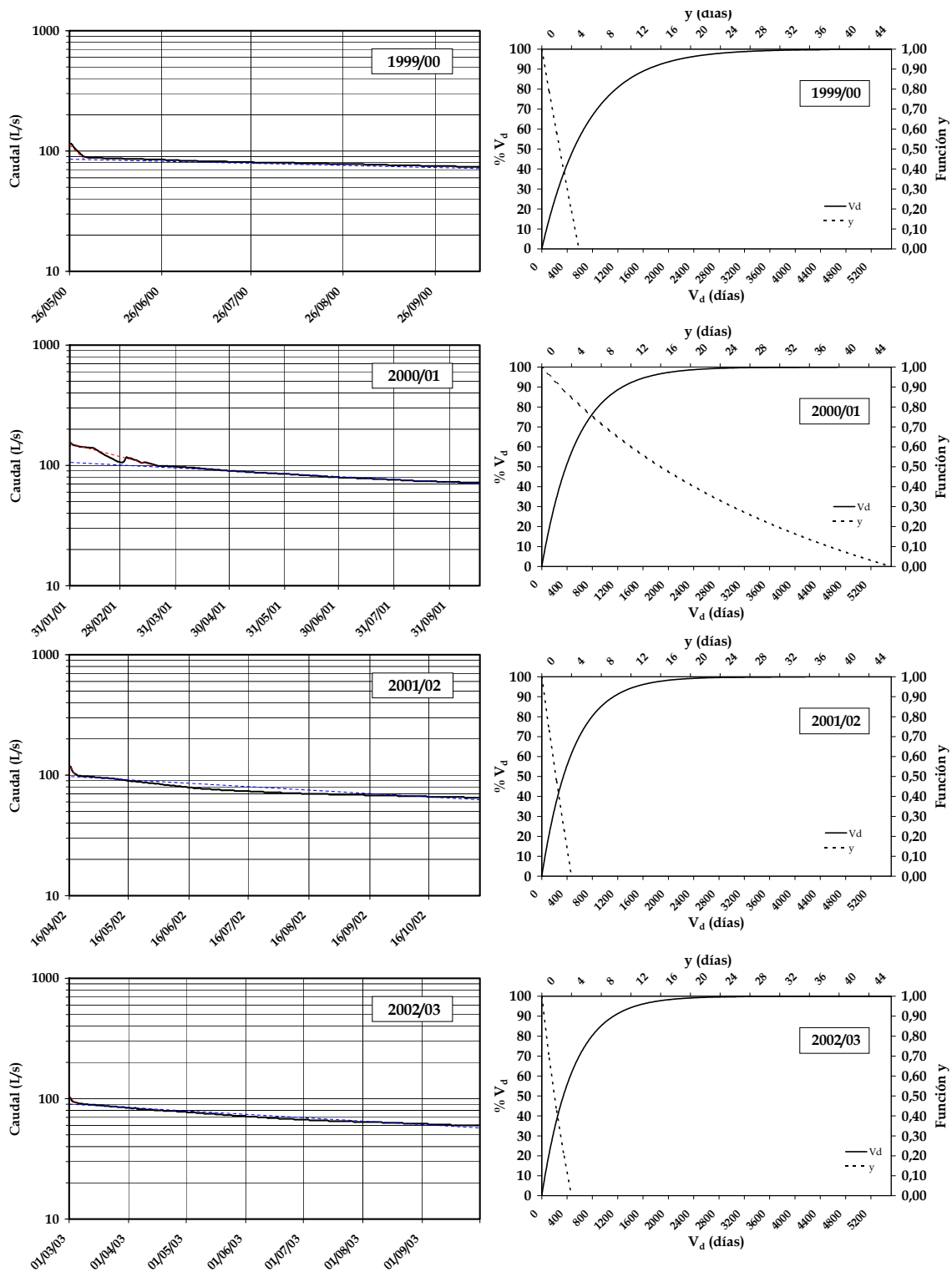


Figura 9.4. A la izquierda, curvas de recesión analizadas en Fuente Grande para el período comprendido entre 2000 y 2003. A la derecha, gráficos de la función y para $t = 2$ días y del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo correspondientes a dicha surgencia si se mantuvieran las condiciones de agotamiento.

El valor del parámetro i para cada una de las curvas analizadas, calculado a partir de los coeficientes η y ε , es próximo o superior a 0'50, lo cual, según Mangin (1975), sería indicativo de un sistema complejo y de grandes dimensiones. Estos resultados no estarían en consonancia con la realidad, al menos en cuanto a su extensión, ya que este sistema acuífero presenta una superficie del orden de 20 km². En cambio, el grado de complejidad podría estar relacionado con el comportamiento antagónico de la decrecida s.s. pues, por un lado, la infiltración se produce rápidamente y, por otro, la disminución de caudal durante la decrecida es menos rápida.

<i>Año Hidrológico</i>	D_d (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D_a (días)	α (días ⁻¹)	V_d (hm ³)	k
1999/2000	5	0,2000	0,0167	0,58	134	1,38E-03	5,62	2,10
2000/2001	47	0,0213	0,0199	0,92	187	1,81E-03	5,25	1,96
2001/2002	4	0,2500	0,0263	0,48	207	2,03E-03	4,24	1,58
2002/2003	4	0,2500	0,0882	0,43	210	2,04E-03	3,94	1,47
Media	15	0,1803	0,0378	0,60	185	1,81E-03	4,76	1,78

Tabla 9.2. Resultados obtenidos a partir del análisis de las curvas de recesión de Fuente Grande (años hidrológicos 1999/2000-2002/2003). Leyenda: D_d duración de la decrecida, η coeficiente de velocidad de infiltración y ε coeficiente de heterogeneidad, i y k parámetros de Mangin (1970, 1975), D_a duración del agotamiento, α coeficiente de agotamiento y V_d volumen dinámico.

La duración del agotamiento varía entre 134 días (1999/2000) y 210 días (2002/2003). El coeficiente de agotamiento (α) para cada una de las curvas analizadas presenta valores comprendidos entre 1 y 2×10^{-3} días⁻¹, indicativos de que el agotamiento se produce de forma lenta, como corresponde a un sistema de flujo difuso. La representación del porcentaje del volumen dinámico (V_d) drenado en función del tiempo (Figura 9.4), para cada hidrograma, muestra que, al cabo de 400 días sin alimentación (desde el comienzo del agotamiento), se drena menos del 50% de dicho volumen, lo que demuestra la gran capacidad de filtro del sistema y el importante papel regulador del mismo. El volumen de tránsito anual (V_t), calculado a partir de la serie de caudales diarios, alcanza un valor de 2,7 hm³. Así, el parámetro k (V_d/V_t), durante el período de estudio, presenta valores superiores a 1 para todas las curvas analizadas. Los resultados obtenidos para este parámetro no están contemplados en la clasificación de Mangin (1970, 1975),

según la cual el valor máximo de k es 1; no considera la posibilidad de que el volumen dinámico sea mayor que el volumen de tránsito (Mangin, 1970). Se deduce así que la metodología de Mangin (op. cit.) presenta limitaciones cuando se trata de aplicar en regiones con características climatológicas diferentes al área donde fue desarrollada (Pirineo francés). Este aspecto ya ha sido puesto de manifiesto anteriormente por varios autores (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1990; Moral, 1992 y 2005; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2002b y 2004b). Aún así, estas limitaciones sólo habría que tenerlas en cuenta en el caso de comparar sistemas acuíferos carbonáticos sometidos a distintas condiciones climáticas, lo cual no impide que dentro de un mismo ámbito climático pueda ser utilizado como criterio comparativo de sistemas acuíferos.

9.2.3. Análisis Correlatorio y Espectral

En este apartado se presentan los resultados del análisis correlatorio y espectral, llevados a cabo con la serie de datos registrados entre 03/05/2000 y 30/09/2003. La señal de entrada corresponde a las precipitaciones diarias en la estación pluviométrica de Puerto Lobo y la de salida a caudales medios diarios en la estación de aforos de Fuente Grande. A partir de la serie de datos analizados, fenómenos de periodicidad inferior a 2 días no pueden ser deducidos. 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).

9.2.3.1. Análisis simple

El correlograma de la serie de caudales diarios de Fuente Grande presenta una morfología tendida (Figura 9.5A). El efecto memoria presenta un valor de 80 días, indicativo según Mangin (1981a y b) de una gran inercia posiblemente relacionada con la existencia de ciertas reservas.

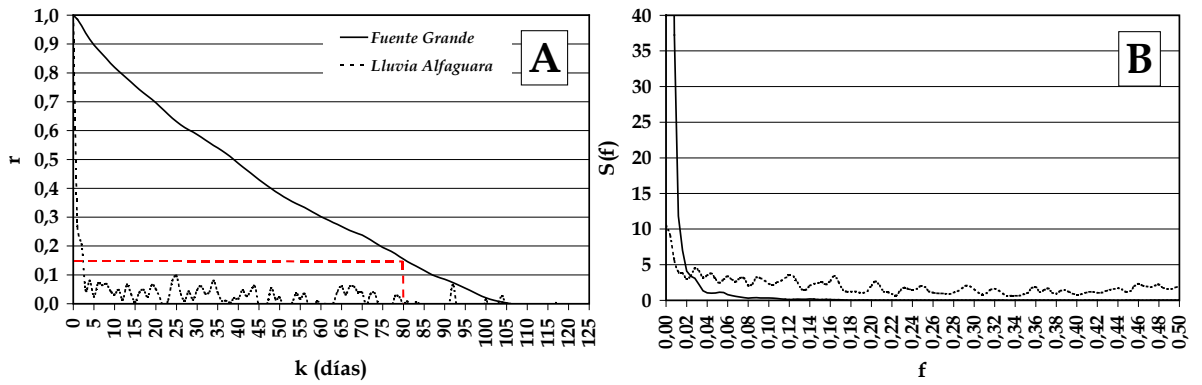


Figura 9.5. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de la precipitación registrada en la estación de Puerto Lobo entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 125 días y paso de 1 día. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia, f frecuencia.

En el análisis frecuencial, se detecta la importante capacidad de filtro del sistema, ya que la frecuencia de corte es de 0,04 (Figura 9.5B), lo que indica que la información de la lluvia se encuentra filtrada al cabo de aproximadamente 25 días. Además, el elevado tiempo de regulación que se deduce del espectro de densidad de varianza es importante (68 días).

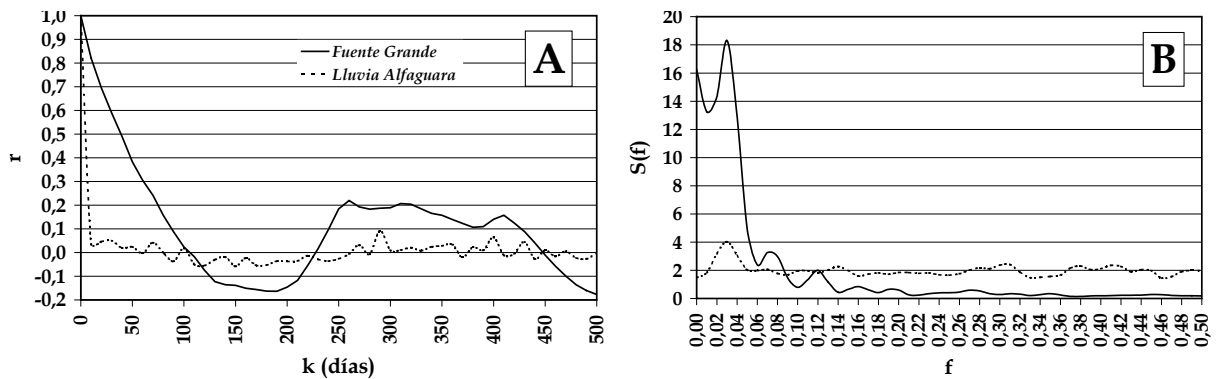


Figura 9.6. Resultados del análisis correlatorio y espectral simple de la serie de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de la precipitación registrada en la estación de Puerto Lobo entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003, con una ventana de 500 días y paso de 10 días. A) Correlograma, B) Espectro de frecuencias. Leyenda: r coeficiente de correlación, S(f) espectro de frecuencia, f frecuencia.

El análisis a largo término muestra un correlograma con ciclos anuales bien marcados (Figura 9.6A). El espectro, para el análisis de larga duración (Figura 9.6B), presenta una destacada periodicidad anual, al igual que se observa para las precipitaciones; por tanto, su origen es climático. Asimismo, en el espectro de la serie de datos diarios de caudal de Fuente Grande se advierte una tendencia

plurianual que no se observa en la serie de precipitaciones (Figura 9.6B), mientras que las variaciones de las precipitaciones a corto término se atenúan en el espectro de caudales.

9.2.3.2. Análisis Cruzado

El correlograma obtenido del análisis cruzado de los datos de caudal y los datos de precipitación presenta una forma extendida, con pequeños picos, entre los que destaca el valor máximo del coeficiente de correlación ($r_k=0,253$) para un k de 3 días (Figura 9.7A). Tras este pequeño máximo, la función de correlación cruzada se estabiliza y muestra un decrecimiento muy lento para el resto de la ventana de observación. Este resultado sugiere una primera respuesta, de menor importancia, relacionada con la transmisión rápida de la señal de entrada (precipitaciones), debido, probablemente, a la karstificación funcional en la zona no saturada. En cambio, la evolución posterior pone de manifiesto una amortiguación de la señal de entrada, característica de un sistema bastante inercial. Por tanto, aunque se observa una primera respuesta, de escasa importancia, propia de un sistema poco inercial, el resultado en su conjunto conlleva un modelo de acuífero inercial, acorde con un importante poder regulador, ya deducido anteriormente a partir de los resultados del análisis simple.

El correlograma cruzado de larga duración (Figura 9.8A) muestra, una vez más, la periodicidad anual muy marcada. La función amplitud cruzada para el análisis de larga duración (Figura 9.8B) muestra, de forma clara, el pico correspondiente a la componente anual, lo cual evidencia la gran capacidad de filtro del sistema. El desfase medio existente entre la señal de entrada y la de salida para sucesos de periodicidad anual es de 56 días.

En la figura 9.7C se observa que el sistema sólo se comporta de manera lineal para las frecuencias muy bajas. El análisis de larga duración corrobora, nuevamente, el hecho de que este sistema es lineal para los sucesos de periodicidad anual (Figura 9.8C).

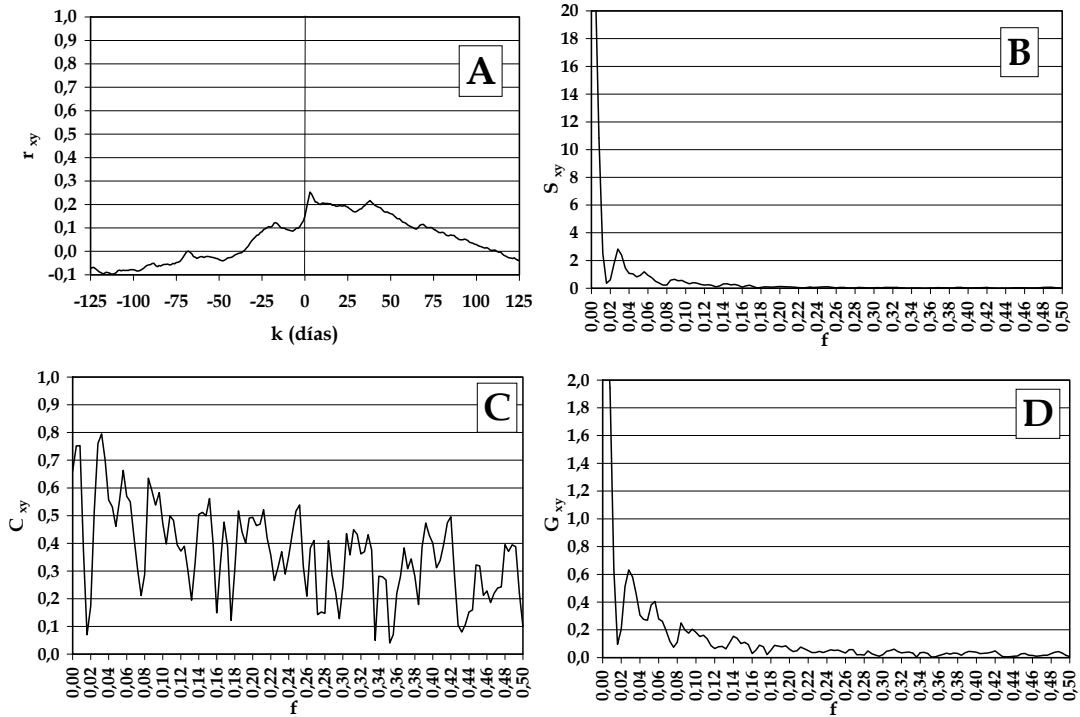


Figura 9.7. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Puerto Lobo para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

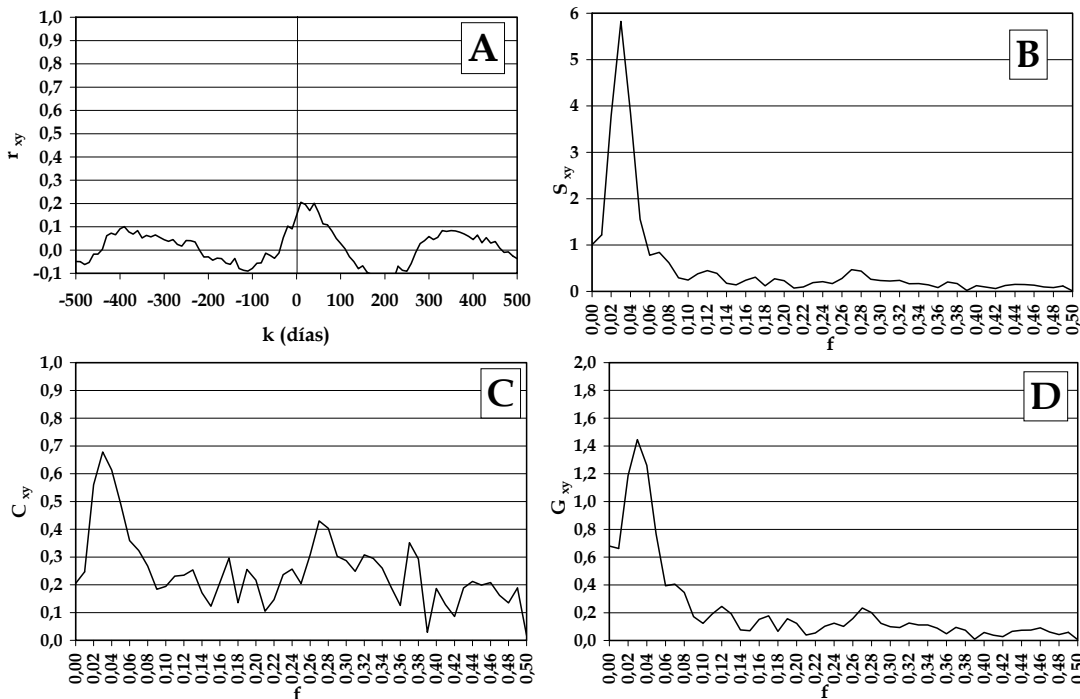


Figura 9.8. Resultados del análisis correlatorio y espectral cruzado de la serie temporal de caudales diarios drenados por Fuente Grande y de precipitación registrada en la estación pluviométrica de Puerto Lobo para el período comprendido entre los años hidrológicos 1999/2000 y 2002/2003. Ventana de 500 días y paso de 10 días. Leyenda: f frecuencia; r_{xy} coeficiente de correlación cruzada, S_{xy} función de amplitud cruzada, C_{xy} función de coherencia, G_{xy} función de ganancia.

La capacidad reguladora del sistema también queda demostrada por la fuerte atenuación de las altas frecuencias en el gráfico de la función ganancia (Figura 9.7D). En el análisis de larga duración (Figura 9.8D), sólo la periodicidad anual aparece amplificada.

9.2.4. Análisis de caudales clasificados

La serie de caudales diarios de Fuente Grande se ha dividido en clases de 10 L/s y se ha calculado la frecuencia acumulada con la que se produce cada clase (Figura 9.9A). Se han diferenciado tres tramos, con desigual pendiente, en la gráfica que representa la frecuencia relativa acumulada, en escala probabilística, frente a los intervalos de caudal, en escala logarítmica (Figura 9.9B):

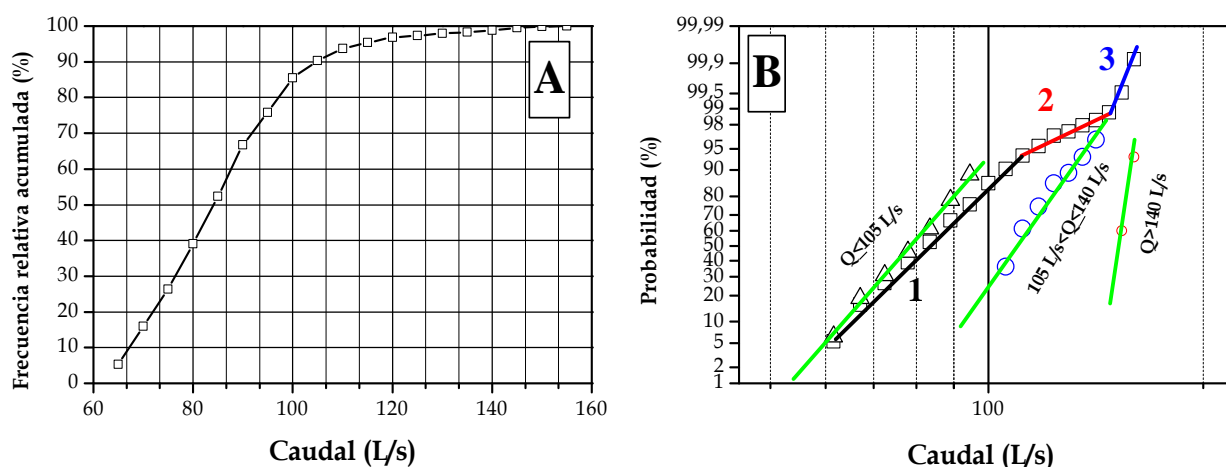


Figura 9.9. Gráfico de caudales clasificados del manantial de Fuente Grande, con la frecuencia relativa acumulada en escala aritmética (A) y en escala probabilística (B).

(1) Tramo de caudales inferiores a 105 L/s, que corresponde a la situación de agotamiento del manantial.

(2) Tramo con caudales entre 105 y 140 L/s pertenece, fundamentalmente, incluye los datos de crecida y decrecida s.s. del hidrograma manantial.

(3) Tramo con caudales superiores a 140 L/s, que engloba sólo las puntas de las crecidas de Fuente Grande de Enero y Octubre de 2001.

El análisis independiente de cada uno de los tres tramos diferenciados en la curva de caudales clasificados (Figura 9.9B) ha permitido calcular el porcentaje del volumen desaguado, con respecto al total, para cada una de las situaciones hidrodinámicas diferenciadas (Tabla 9.3).

	m_Q (L/s)	% Volumen
$Q \leq 105$ L/s	80	81
105 L/s $\leq Q < 140$ L/s	106	17
$Q > 140$ L/s	142	2

Tabla 9.3. Resultados obtenidos para el cálculo del porcentaje del volumen que se drena en las tres situaciones hidrodinámicas diferenciadas en Fuente Grande a partir del análisis de caudales clasificados.

Los resultados muestran que durante el agotamiento se drena un 81% del volumen total y que sólo el 2% del volumen se drena en las crecidas hidrodinámicas excepcionales. Estos datos corroboran la elevada inercia del acuífero y refuerzan la idea de que el acuífero de la Alfaguara es capaz de amortiguar o filtrar las entradas de las precipitaciones, debido a su elevada capacidad de regulación.

9.2.5. Aplicación de la transformada continua *wavelet*

El análisis hidrodinámico de este acuífero se ha completado con la aplicación de la transformada continua *wavelet* y del análisis cruzado de la transformada *wavelet* a la serie de datos diarios de caudal de Fuente Grande y de precipitación registrada en la estación de Puerto Lobo.

El espectro continuo y el espectro continuo global de los datos de precipitación (Figuras 9.10A y 9.10B), ponen de manifiesto la práctica inexistencia de componentes inferiores a 1 año, aunque en el espectro continuo global sí se insinúan una componente bimestral y otra cuatrimestral (Figura 9.10B).

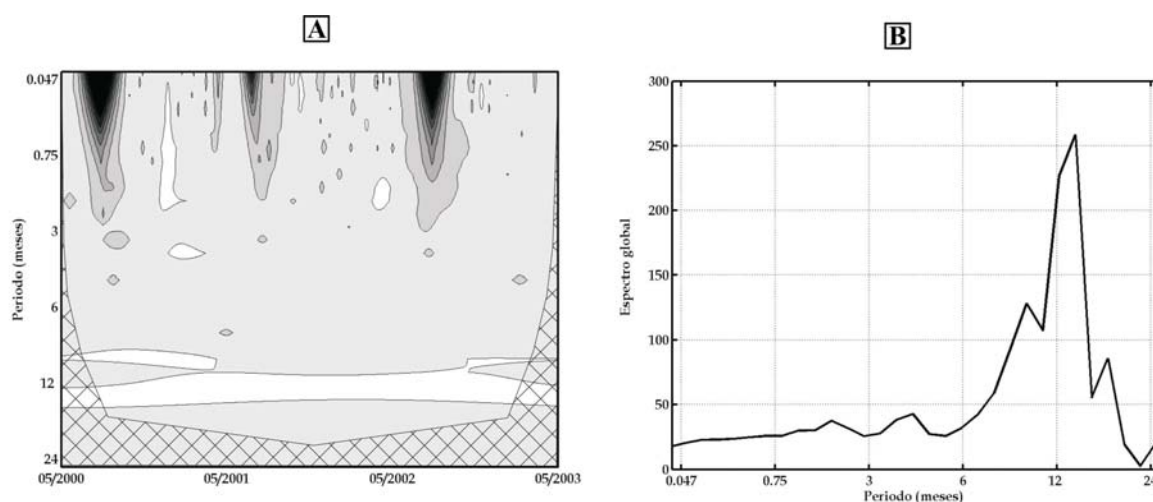


Figura 9.10. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de precipitación diaria en la estación de Puerto Lobo para el período comprendido entre Mayo de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

La periodicidad anual es claramente visible tanto en el espectro continuo de precipitaciones (Figura 9.10A) como en el de caudales (Figura 9.11A), aunque en este último la periodicidad anual aparece para el intervalo 8-14 meses, sobre todo durante los doce primeros meses considerados. Los espectros globales de precipitaciones y caudales (Figuras 9.10B y 9.11B) reflejan claramente el intervalo correspondiente a la periodicidad anual (8-14 meses). Además, en el espectro global de caudales (Figura 9.11B) se observa una componente semestral, que no se detecta en el de precipitaciones (Figura 9.10B), mientras que los picos bimestral y cuatrimestral del espectro global de precipitaciones no se registran en el de caudales. Este filtrado de las periodicidades de mayor frecuencia (< 6 meses) en el espectro de caudales con respecto al de precipitaciones, indica la elevada capacidad de regulación del acuífero.

En el espectro cruzado continuo de caudales y lluvia (Figura 9.12A) se observan algunos componentes inferiores a la anual que no se presentaban en el análisis simple, aunque es la señal anual la que se observa con mayor nitidez. Los resultados del espectro cruzado global (Figura 9.12B) permiten constatar la componente anual, nuevamente en un rango de 8 a 14 meses, y, en mucha menor medida, las componentes secundarias de 4 y 6 meses, son las más destacables. Por tanto, la atenuación de la señal de entrada a corto término (altas frecuencias), se

asocia a cierta capacidad de filtro e indica un bajo grado de karstificación de este acuífero.

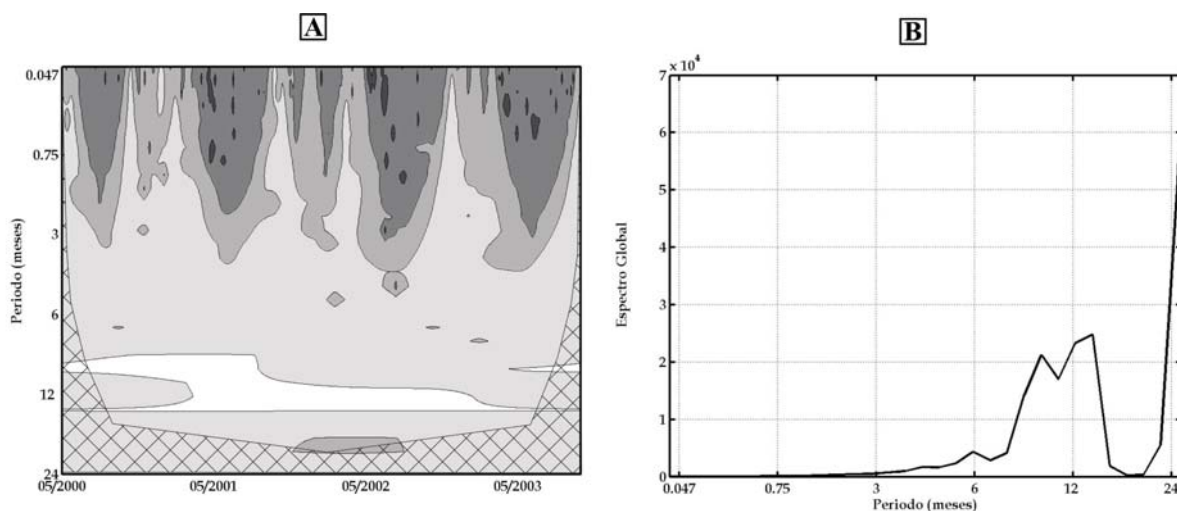


Figura 9.11. Espectro continuo (A) y global (B) de la transformada *wavelet* de los datos de caudal medio diario en Fuente Grande para el período comprendido entre Mayo de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes y los datos no son interpretables.

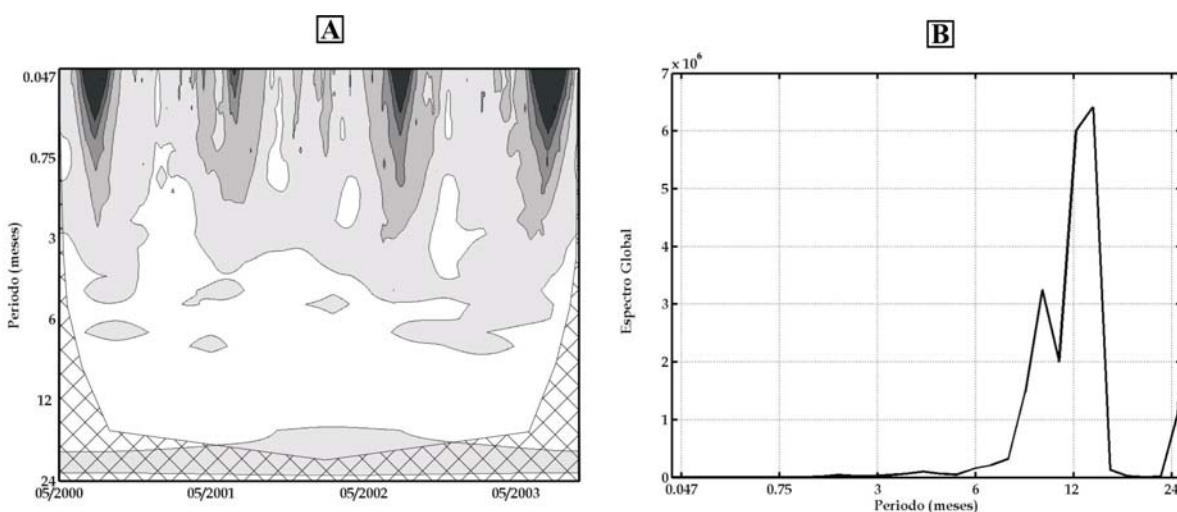


Figura 9.12. Espectro continuo cruzado (A) y global (B) de la transformada *wavelet* efectuada con los datos de precipitación diaria en la estación de Puerto Lobo y los datos de caudal medio diario en Fuente Grande para el período comprendido entre Febrero de 2000 y Septiembre de 2003. La trama enrejada indica el “cono de influencia” donde los efectos de borde son importantes.

9.2.6. Síntesis y conclusiones del estudio hidrodinámico

El análisis hidrodinámico de los caudales de la Fuente Grande de Alfacar pone de manifiesto que la mayor parte de las crecidas en los hidrogramas analizados son proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones,

pero las variaciones de caudal se producen, al menos, entre 5 y 10 días después del evento pluviométrico que origina la recarga. Los tiempos de base y de crecida, así como la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ revelan un comportamiento hidrogeológico predominantemente inercial del sistema de la Alfaguara. Asimismo, la morfología característica del hidrograma de esta surgencia durante parte del período de estudio (Febrero de 2001), responde a la existencia de dificultades en el drenaje subterráneo.

El análisis de las curvas de recesión de Fuente Grande mediante la metodología propuesta por Mangin (1971, 1975), muestra que la infiltración se produce rápidamente (≈ 15 días) aunque la disminución de caudal durante la decrecida tiene lugar de manera más bien lenta y gradual. El agotamiento del manantial está caracterizado por un coeficiente (α) del orden de $1-2 \times 10^{-3}$ días⁻¹, indicativo de un vaciado lento de la zona saturada.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral a la serie de caudales de Fuente Grande demuestra que el sistema de la Alfaguara actúa como un gran filtro capaz de amortiguar y modular la señal de entrada (precipitaciones). Presenta un efecto memoria alto (80 días) y el tiempo de regulación es igualmente elevado (68 días), datos propios de una importante capacidad reguladora.

En lo que respecta al análisis de caudales clasificados, la curva de frecuencias relativas acumulada frente a los intervalos de caudal de Fuente Grande, permite concluir que la diferencia de caudal entre una situación de crecida excepcional y el inicio del agotamiento es tan sólo de 35 L/s. Además, durante el agotamiento se drena más del 80% del volumen total desaguado por la Fuente Grande, indicativo de la elevada capacidad de regulación del sector de acuífero drenado por esta surgencia.

El análisis *wavelet* de los datos de precipitación y de caudal ha corroborado que el acuífero de la Sierra de la Alfaguara se comporta como un gran filtro frente a las precipitaciones, capaz de amplificar la señal original de las precipitaciones tanto a corto, como a largo término, lo cual es indicativo de un escaso grado de karstificación funcional y de la posible existencia de reservas de agua subterránea.

variación. Por otro lado, los parámetros característicos del sistema calcarbónico (TAC, Ca²⁺, Mg²⁺) muestran coeficientes de variación igual o inferiores al 5%, mientras que el resto de parámetros presentan coeficientes en su mayor parte superiores al 20%. Según estos resultados, el coeficiente de variación de los parámetros propios de la disolución de las rocas acuíferas y, por tanto, del quimismo de base de las aguas, indicarían que el acuífero de la Alfaguara es un sistema con un flujo de tipo difuso (la circulación del agua se realiza a través de pequeñas fisuras). En cambio, el coeficiente de variación de aquellos parámetros propios de la zona no saturada, que en su mayor parte proceden de la concentración por evaporación del agua de lluvia en el epikarst, según los criterios de Shuster y White (1971, 1972) serían indicativos de un sistema de tipo *conduit flow* o de flujo por conductos.

	Manantial (periodo)	T (°C)	C.E. (μS/cm)	pH	TAC (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	IS _{DOL}	IS _{CAL}
n		46	448	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
m	Fuente Grande	13,4	375	7,61	246,1	6,9	14,1	2,1	5,8	53,2	23,7	1,2	0,5	-0,015	0,089
max	(2000-2003)	14,1	381	7,90	252,0	9,9	23,5	4,0	9,0	59,2	28,0	1,8	0,8	0,214	0,212
min		12,7	370	7,43	240,1	5,0	8,2	1,1	3,1	49,5	21,0	1,0	0,2	-0,344	-0,063
v(%)		2,8	0,6	1,4	1,2	19,5	27,4	29,5	24,3	3,4	5,1	21,0	31,0	1,061,8	92,2
m	Fuente Grande	13,4	374	7,61	245,8	6,2	13,2	2,0	5,4	53,2	23,5	1,1	0,6	0,007	0,102
max	(2000/2001)	14,1	378	7,71	249,6	8,5	19,2	2,4	9,0	59,2	24,5	1,8	0,8	0,191	0,202
min		12,8	370	7,47	242,5	5,0	9,1	1,3	3,1	51,2	21,0	1,0	0,5	-0,220	0,002
v(%)		3,0	0,3	0,8	0,8	17,9	22,4	20,7	27,6	3,8	4,3	19,2	22,6	1717,7	57,2
m	Fuente Grande	13,3	377	7,59	247,3	7,6	13,8	2,4	5,3	53,1	24,2	1,3	0,5	-0,017	0,086
max	(2001/2002)	13,7	380	7,73	252,0	9,9	21,0	4,0	6,0	55,0	28,0	1,8	0,8	0,208	0,212
min		12,7	372	7,43	240,1	5,0	9,2	1,4	3,9	51,0	22,0	1,0	0,2	-0,254	-0,056
v(%)		2,6	0,4	1,3	1,4	20,4	26,5	34,9	13,2	2,6	7,5	24,7	32,1	951,5	100,2
m	Fuente Grande	13,4	375	7,62	249,6	4,5	11,3	2,1	5,8	51,8	25,8	1,1	0,5	0,072	0,111
max	(2002/2003)	13,9	378	7,69	253,0	8,5	15,0	4,1	9,0	54,0	28,0	1,2	0,8	0,248	0,179
min		13,0	372	7,53	245,0	2,1	3,2	1,1	2,2	50,6	23,2	0,9	0,3	-0,171	0,011
v(%)		2,0	0,4	0,6	1,0	37,6	24,6	40,8	28,6	1,9	5,4	8,7	22,3	163,3	46,2

Tabla 9.4. Parámetros estadísticos de los componentes físico-químicos analizados en las aguas de Fuente Grande para todo el período de estudio y por año hidrológico. Leyenda: n número de muestras, m media aritmética, max valor máximo, min valor mínimo y v coeficiente de variación.

Los valores medios de los índices de saturación en calcita y dolomita indican que las aguas están prácticamente en equilibrio con respecto a ambos minerales (Tabla 9.4).

9.3.2. Evolución temporal de los parámetros físico-químicos del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar

La evolución temporal de los parámetros hidroquímicos analizados en las aguas del manantial de Fuente Grande se muestran en la figura 9.14. Un análisis general de todo el periodo de control, a partir de la media móvil de rango 9 de los valores diarios de conductividad eléctrica, permite constatar que este parámetro muestra, generalmente, valores más bajos en la época de aguas altas (diluciones), con un mínimo durante la crecida hidrodinámica más importante en Febrero de 2001. Las diluciones son de muy pequeña cuantía (5-10 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y, en la mayoría de los casos, proporcionales a la magnitud de la recarga que las origina. Esta primera interpretación traduce la gran capacidad de filtro que tiene el acuífero de la Alfacara ante las precipitaciones.

La evolución de la temperatura del agua muestra valores relativamente más bajos durante la época de aguas altas que durante el estiaje (Figura 9.14). Este tipo de respuesta se debe a que durante los meses de otoño e invierno se produce una disminución importante de la temperatura ambiente que provoca que la temperatura del agua de recarga sea menor.

Después de comentar las características generales de las evoluciones de la temperatura y de la conductividad eléctrica, se describe a continuación la evolución de los componentes químicos mayoritarios. La evolución de los parámetros característicos de la disolución de los materiales carbonáticos que constituyen el acuífero (TAC, Ca^{2+} y Mg^{2+}), muestra que la Alcalinidad y el contenido en Mg^{2+} presentan valores algo más bajos durante los periodos de aguas altas (Figura 9.14). Sin embargo, a diferencia de estos dos parámetros, el contenido en Ca^{2+} muestra una tendencia ligeramente decreciente durante los periodos de estiaje.

La evolución de los contenidos en NO_3^- , Cl^- y Na^+ del agua es parecida durante la mayor parte del periodo de estudio, lo que indicaría un mismo origen para todos ellos, debido a la concentración del agua de lluvia por evapotranspiración en el epikarst. Para este conjunto de parámetros se detectan

valores altos al inicio de cada año hidrológico, sobre todo para el año hidrológico 2002/2003, y tras las crecidas hidrodinámicas se observa una tendencia general progresivamente decreciente.

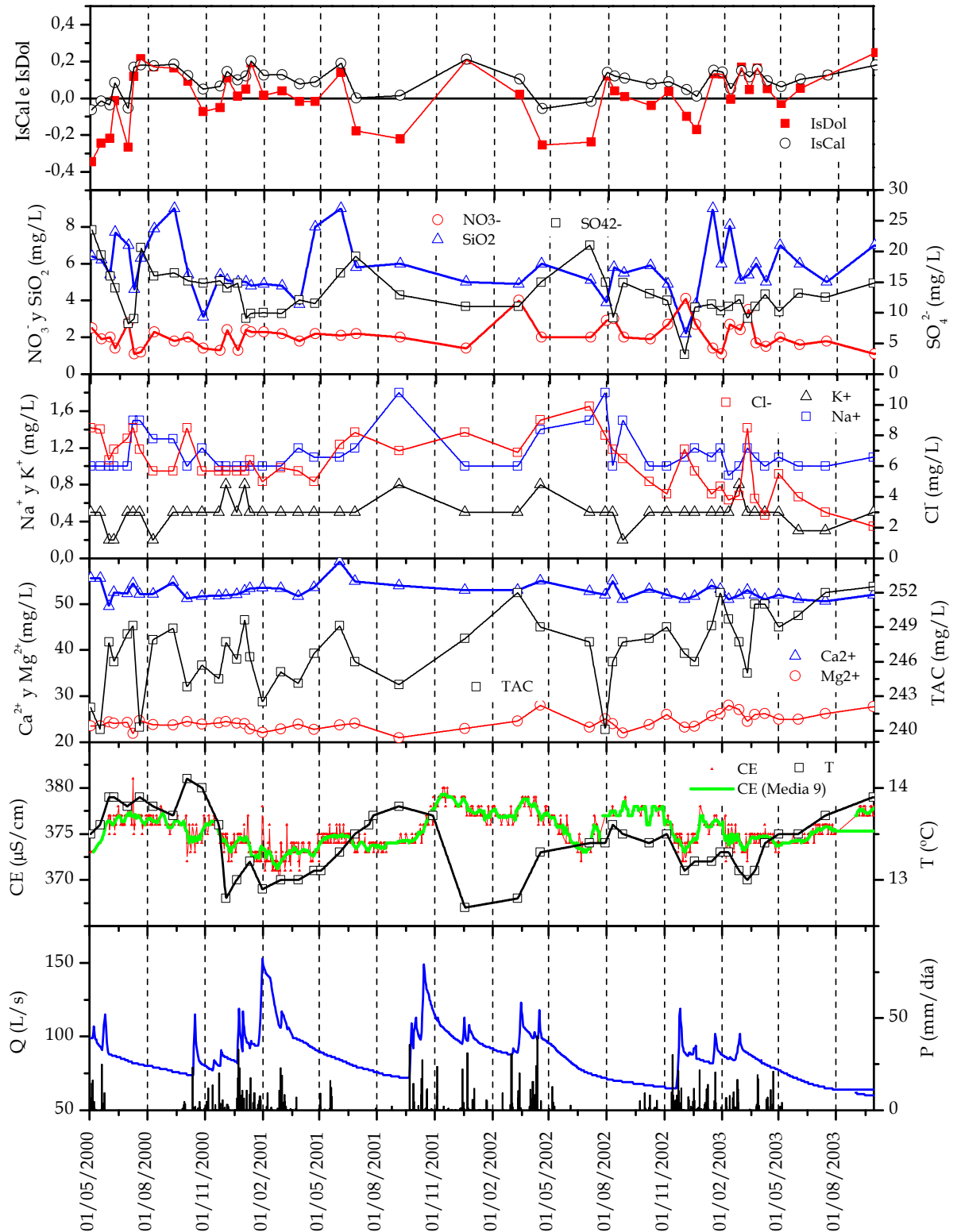


Figura 9.14 Evolución temporal de la composición química del agua drenada por Fuente Grande durante el período de investigación.

En cuanto a los índices de saturación en las especies minerales consideradas (Figura 9.14), cabe señalar que, después de algunas crecidas, el manantial drena agua más subsaturada, sobre todo, en dolomita.

Con los datos hidroquímicos de las 46 muestras de aguas recogidas en Fuente Grande se ha realizado un ACP (Figura 9.15), que explica un porcentaje muy bajo de la varianza total (42% entre los dos ejes principales), lo que indica la importante capacidad de homogeneización del agua de lluvia que tiene el acuífero de la Alfaguara. Además, la correlación entre las diferentes variables analizadas es muy baja (Figura 9.15).

	T	C. E.	pH	TAC	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T	1											
C. E.	0,1530	1										
pH	-0,1021	0,2022	1									
TAC	-0,0650	0,2754	0,1972	1								
Cl ⁻	0,0492	-0,0798	-0,4041	-0,5392	1							
SO ₄ ²⁻	0,3815	-0,0793	-0,0805	-0,3155	0,2490	1						
NO ₃ ⁻	-0,3682	-0,2407	-0,1270	-0,1064	0,2541	-0,3654	1					
SiO ₂	0,2211	0,1367	0,2138	0,2252	-0,1392	0,2716	-0,2528	1				
Ca ²⁺	-0,1084	0,0222	-0,1541	-0,1893	0,4340	0,2164	0,0149	0,4021	1			
Mg ²⁺	0,0447	0,0722	0,0964	0,4909	-0,4902	0,0246	-0,0852	0,1991	-0,2805	1		
Na ⁺	0,2589	0,1659	-0,0370	-0,2543	0,3584	0,2379	-0,0899	-0,0791	0,0985	-0,2461	1	
K ⁺	-0,3537	-0,2351	-0,1796	-0,0517	0,0810	-0,1330	0,1375	-0,1477	0,2870	0,1273	0,0999	1

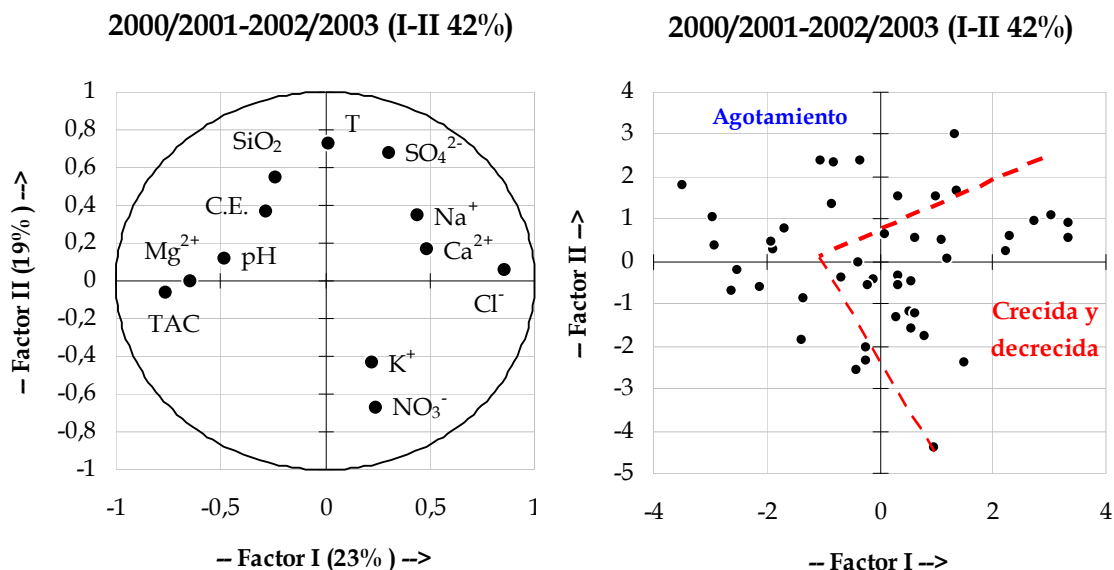


Figura 9.15. Matriz de correlación y representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de las aguas drenadas por Fuente Grande durante todo el periodo de estudio (n= 46).

En el campo de las variables (Figura 9.15), el eje I podría representar la *mineralización media* de las aguas, mientras que el factor II está caracterizado por la temperatura en su parte positiva y la variable NO₃⁻ en su parte negativa.

Dada la escasa varianza que se explica en este análisis, la situación de las muestras en el plano factorial I-II (Figura 9.15) sólo se pueden distinguir dos grupos de aguas: *aguas de estiaje* o *agotamiento* definidas por una mayor alcalinidad y contenido en Mg^{2+} según el eje I y una temperatura más alta según el eje II y, por tanto, con un mayor tiempo de residencia dentro del acuífero y *aguas de crecida y decrecida*, menos mineralizadas y caracterizadas por la señal de la zona no saturada.

9.3.3. Curvas de frecuencias

Las curvas de frecuencia correspondientes a la conductividad eléctrica y algunos de los parámetros hidroquímicos (TAC, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y NO_3^-) se muestran en la figura 9.16. Si se tiene en cuenta la interpretación clásica para este tipo de análisis (Bakalowicz, 1979; Mudry, 1987), tanto en la curva de conductividad eléctrica como en las curvas de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico (TAC, Ca^{2+} y Mg^{2+}) se observa un escaso rango de variación y un marcado carácter unimodal. Esto demuestra, nuevamente, que el funcionamiento inercial del acuífero es capaz de homogeneizar la señal de entrada.

Los mayores rangos de variación de las curvas de frecuencia de Cl^- y NO_3^- ponen de manifiesto la influencia de las aguas que han estado concentrándose por evaporación en el epikarst (Figura 9.16). No obstante, la curva de frecuencias del Na^+ , claramente unimodal y de escaso rango de variación, indicaría la ausencia de este tipo de procesos o la existencia de procesos de sorción.

La curva de frecuencias del contenido en SO_4^{2-} (Figura 9.16), muestra una moda principal no muy marcada, característica de las aguas que se drenan durante la mayor parte del tiempo (agotamiento).

En resumen, las curvas de distribución de frecuencias de los diferentes parámetros controlados corroboran la homogeneidad química del agua drenada por Fuente Grande y confirman que el sistema de la Alfaguara muestra un comportamiento característico de un acuífero de flujo difuso.

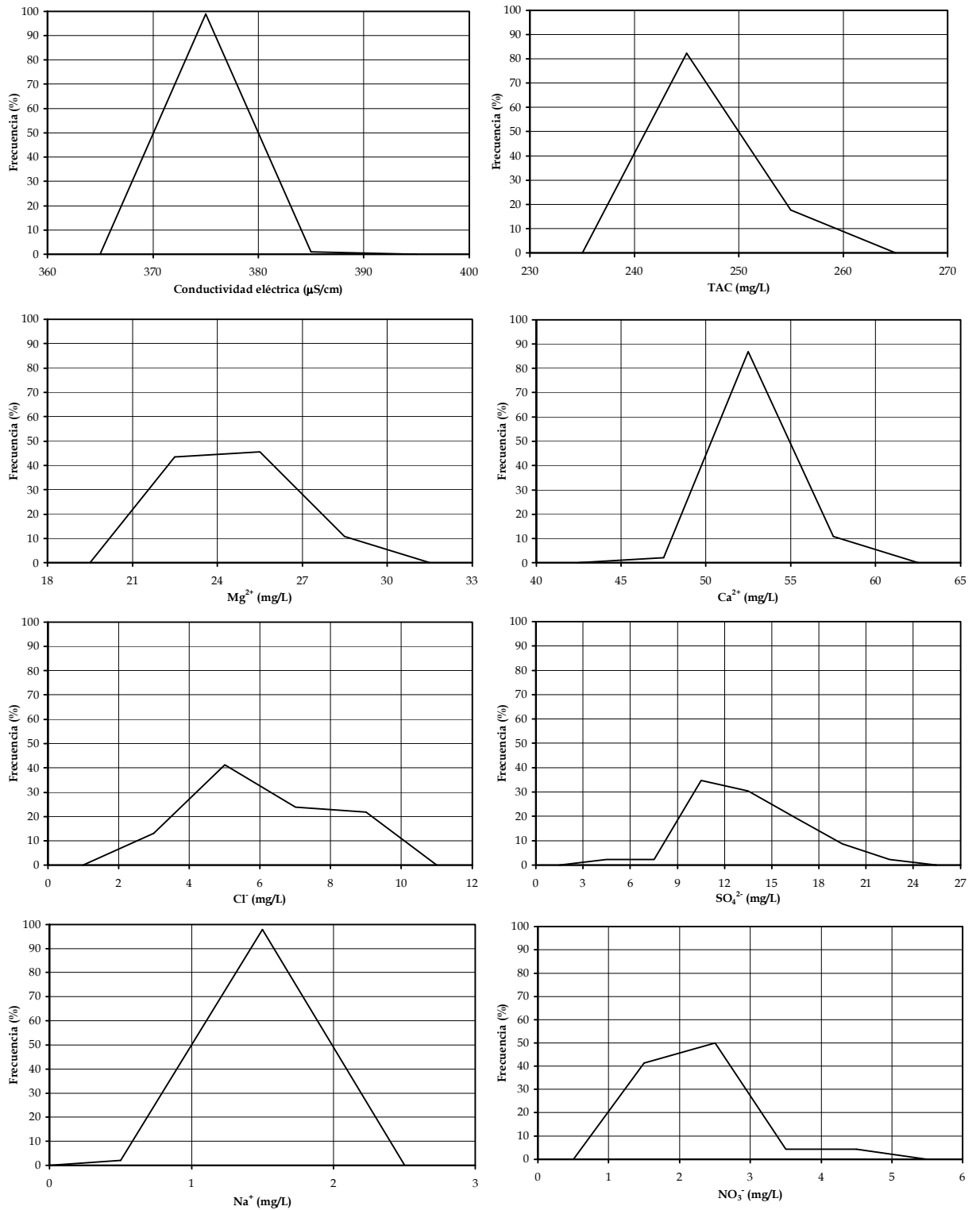


Figura 9.16. Gráficos de frecuencia de algunos parámetros hidroquímicos controlados en las aguas de la Fuente Grande de Alfacar.

9.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas subterráneas muestreadas en la Fuente Grande de Alfacar presentan una tendencia ligeramente ascendente durante el período de investigación, como consecuencia de la disminución de la cantidad de precipitación caída sobre el acuífero de la Alfaguara (Figura 9.17).

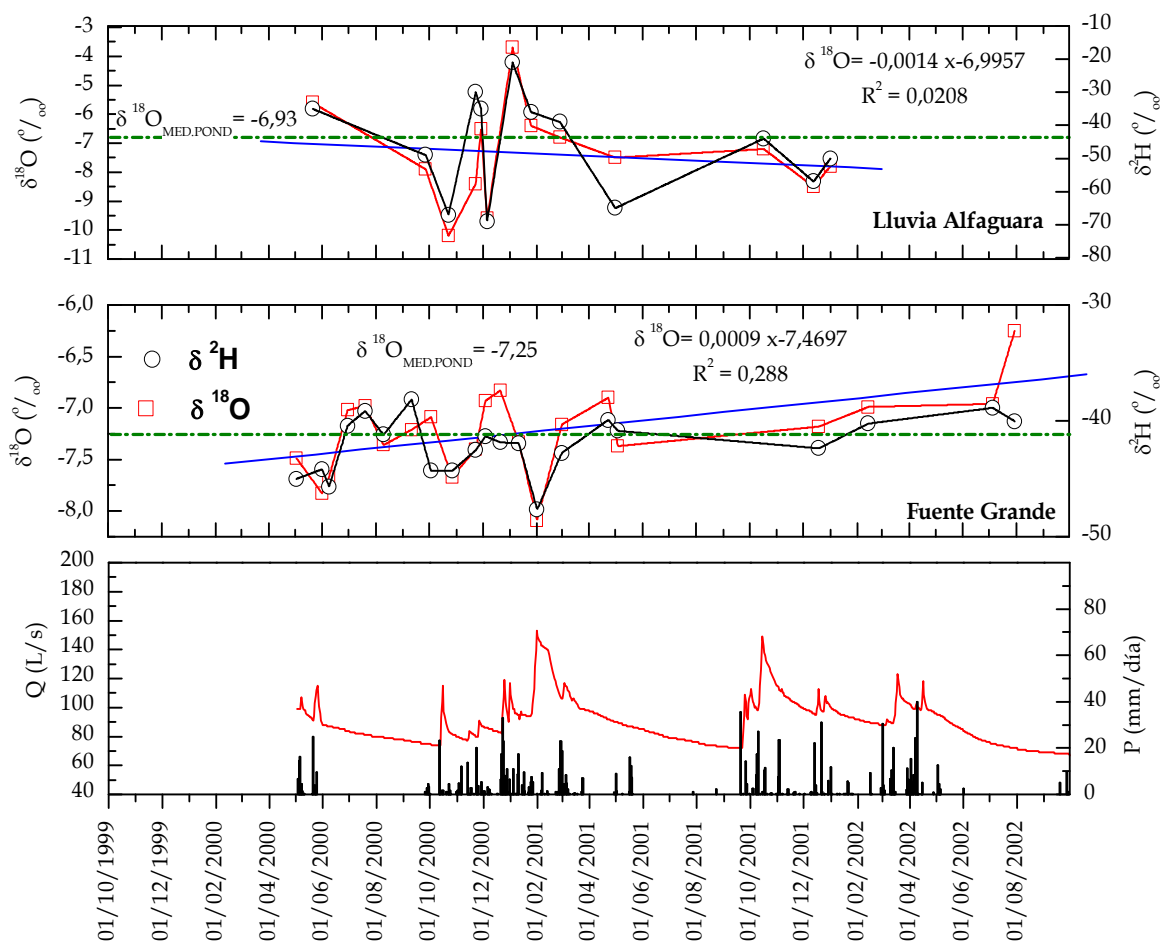


Figura 9.17. Evolución temporal del contenido en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua de lluvia de la Sierra de la Alfaguara y del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar. En azul, las líneas de regresión correspondiente a los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia y del agua subterránea y en verde el valor medio ponderado de los datos de $\delta^{18}\text{O}$.

El valor medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ del agua drenada por esta surgencia es de $-7,25\text{‰}$, muy similar al obtenido a través de la media aritmética ($-7,21\text{‰}$). Las muestras de agua de lluvia recogidas en la Sierra de la Alfaguara, presentan un contenido medio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ de $-6,94\text{‰}$. La escasa diferencia entre los valores medios ponderados de $\delta^{18}\text{O}$ de entrada y salida es menor que en los otros acuíferos investigados, lo cual podría indicar una menor importancia de los

fenómenos de evapotranspiración del agua de lluvia, probablemente, por la escasez de suelo existente sobre el acuífero.

Las curvas de frecuencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas drenadas por la Fuente Grande de Alfacar (Figura 9.18) muestran un rango de variación relativamente importante, con una forma casi unimodal para los valores de $\delta^{18}\text{O}$ ($\approx 50\%$ de los datos están comprendidos entre $-7,0$ y $-7,5\text{‰}$) y plurimodal para los valores de $\delta^2\text{H}$.

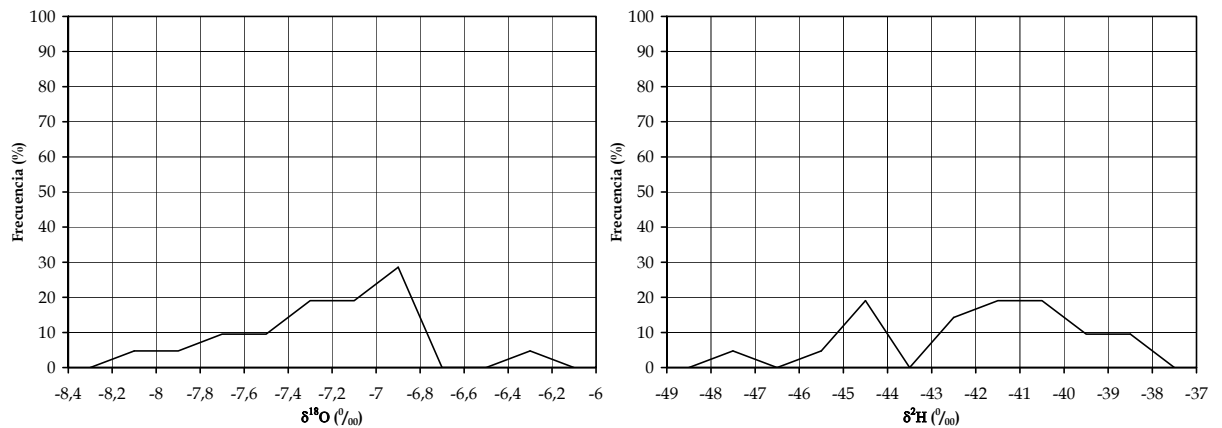


Figura 9.18. Gráficos de frecuencias elaborados a partir de los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.

Las variaciones en los contenidos isotópicos del agua de Fuente Grande de Alfacar (Figura 9.19), en respuesta a los episodios de recarga registrados durante el período de investigación, generalmente, son de poca magnitud.

La evolución paralela del contenido en Mg^{2+} y $\delta^{18}\text{O}$, así como la correlación generalizada de los valores altos de $\delta^{18}\text{O}$ con los estados de sobresaturación en calcita y dolomita indican, que la circulación del agua se realiza, mayoritariamente, a través de pequeñas fisuras. Por tanto, el acuífero de la Alfaguara es un sistema con un flujo de tipo difuso, como se ha puesto de manifiesto anteriormente mediante el análisis de las respuestas hidrodinámica e hidroquímica

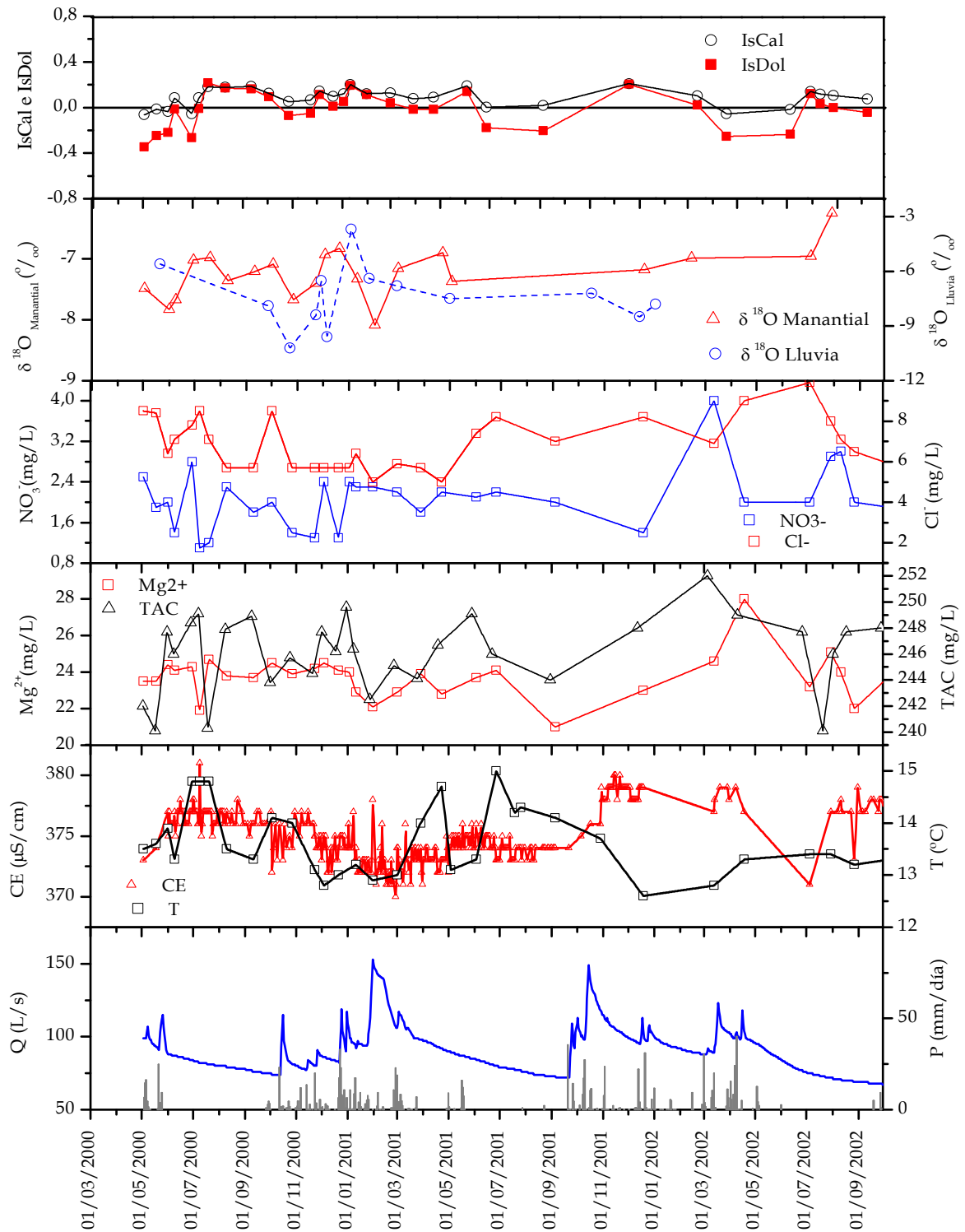


Figura 9.19. Evolución temporal del $\delta^{18}\text{O}$ del agua de lluvia de la Sierra de la Alfaguara junto con la evolución del $\delta^{18}\text{O}$ y de algunos parámetros físico-químicos del agua drenada por la Fuente Grande de Alfacar durante los años hidrológicos 1999/2000-2001/2002.

10. DISCUSIÓN

En los capítulos precedentes se han aplicado diversas metodologías a las series de datos de caudal, hidroquímica e hitrotermia de los principales puntos de descarga de siete sistemas acuíferos. La segunda parte de la memoria (capítulos del 4 al 9) muestra la interpretación de resultados obtenidos en cada acuífero, teniendo en cuenta aspectos geológicos, climáticos, geomorfológicos y estructurales. El estudio de las respuestas de los acuíferos ha permitido conocer la estructura y funcionamiento hidrogeológico de cada uno de ellos.

El análisis conjunto de las respuestas, llevado a cabo en un mismo periodo climático y mediante la aplicación de los mismos métodos de investigación, permite caracterizar y comparar los diversos tipos de funcionamiento hidrogeológico que presentan acuíferos carbonáticos representativos de la Cordillera Bética y, además, conocer los factores que controlan la karstificación funcional dentro de un mismo rango de latitud. Paralelamente a la caracterización y comparación de los sistemas investigados, se pretende evaluar el grado de aplicabilidad de las diferentes metodologías utilizadas en esta investigación para el estudio de los acuíferos carbonáticos del Sur de España. Por último, se trata de establecer una clasificación de los acuíferos carbonáticos, a escala regional, mediante una serie de parámetros sencillos, que contemplen la diversidad de comportamientos hidrogeológicos de, al menos, los sistemas acuíferos de una misma latitud.

10.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS ESTUDIADOS. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN UTILIZADOS

A partir del análisis hidrodinámico, hidroquímico e isotópico de los manantiales estudiados en la presente investigación, se ha elaborado la tabla 10.1, que resume los parámetros más importantes utilizados para caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de cada uno de los acuíferos investigados. Las

variables consideradas para comparar el funcionamiento hidrogeológico han sido las que se relacionan a continuación (Tabla 10.1).

- *Análisis del hidrograma*: tiempos de aguacero, de base y de crecida (t_{aguacero} , t_{base} y t_{crecida}), valores medios de los caudales mínimos y máximos ($\overline{Q_{\text{min}}}$ y $\overline{Q_{\text{max}}}$) y su cociente ($\overline{Q_{\text{max}}}/\overline{Q_{\text{min}}}$).

- *Análisis de la curva de recesión*: duración de la decrecida (D_d), coeficiente de velocidad de infiltración (η), coeficiente de heterogeneidad (ε), duración del agotamiento (D_a), coeficiente de agotamiento (α), volumen dinámico (V_d) y parámetros i-k.

- *Análisis correlatorio y espectral*: efecto memoria (E.M.), tiempo de regulación (T.R.), frecuencia de corte (F.C.) y el valor máximo del correlograma cruzado entre las precipitaciones y el caudal de los manantiales (R_{max}).

- *Análisis de caudales clasificados*: los porcentajes de volumen de agua drenados en condiciones de aguas altas y de aguas bajas.

- *Hidroquímica*: los coeficientes de variación de la conductividad eléctrica (C.E.) y de los contenidos en Mg^{2+} y Cl^- de las aguas, el porcentaje de dilución hidroquímica máxima, el porcentaje de varianza muestral explicada con los dos ejes principales del ACP de los datos hidroquímicos y, por último, el rango de variación de la curva de frecuencias de la conductividad eléctrica. La elección de los coeficientes de variación de los contenidos en Mg^{2+} y Cl^- está fundamentada en el hecho de que se consideran parámetros representativos del comportamiento de la zona saturada y no saturada, respectivamente (Mudry, 1987; Emblanch, 1997; Batiot *et al.*, 2003).

En la tabla 10.1, también se incluyen otras características de los acuíferos, como la superficie total y los valores de precipitación media anual para el periodo de estudio (1999-2003). No se han incluido parámetros isotópicos, porque han resultado poco relevantes como se ha constatado en el estudio de los sistemas.

Con la información de cada uno de los sistemas acuíferos investigados descrita en los capítulos 4 al 9 de esta memoria, además de comparar los

resultados obtenidos y analizar y criticar las diferentes metodologías aplicadas, en el presente apartado se presenta la distribución de los diferentes manantiales mediante diagramas X-Y. En estos diagramas se pueden observar los valores de los principales parámetros seleccionados, para cada una de las metodologías aplicadas (Tabla 10.1). Como se muestra en la figura 10.1, los ejes de estos diagramas X-Y se han proyectado de manera que los manantiales sigan siempre un patrón de distribución, en función del comportamiento hidrogeológico de los acuíferos considerados. Así, desde la parte inferior izquierda a la superior derecha del gráfico, aumenta el grado de karstificación funcional y disminuye la inercia y el poder regulador.

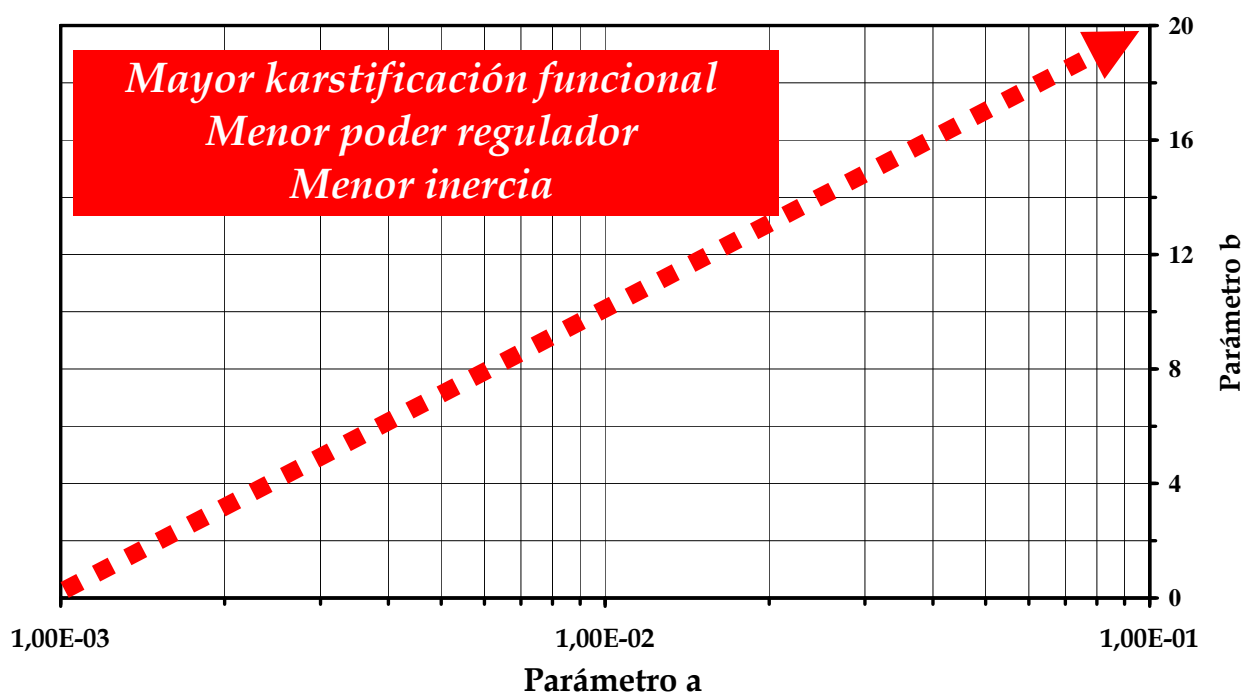


Figura 10.1. Esquema básico de distribución de los manantiales en diagramas X-Y, a partir de la representación de los diversos parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos considerados en la tabla 10.1.

10.1.1. Análisis de Hidrogramas

En la figura 10.2 se presentan los hidrogramas de los manantiales estudiados en el marco de la presente investigación. De los diferentes parámetros determinados a partir del análisis de los hidrogramas, el denominado tiempo de aguacero (t_{aguacero}), es decir, el tiempo que transcurre desde el final del aguacero

hasta el comienzo del aumento del caudal, es el que muestra una menor variabilidad para el conjunto de los manantiales analizados (Tabla 10.1).

Así, excepto los manantiales de El Tempul (Sierra de las Cabras) y Fuente Grande de Alfacar (Sierra de la Alfaguara), todas las surgencias muestran que los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante, de acuerdo con la periodicidad de control (diaria).

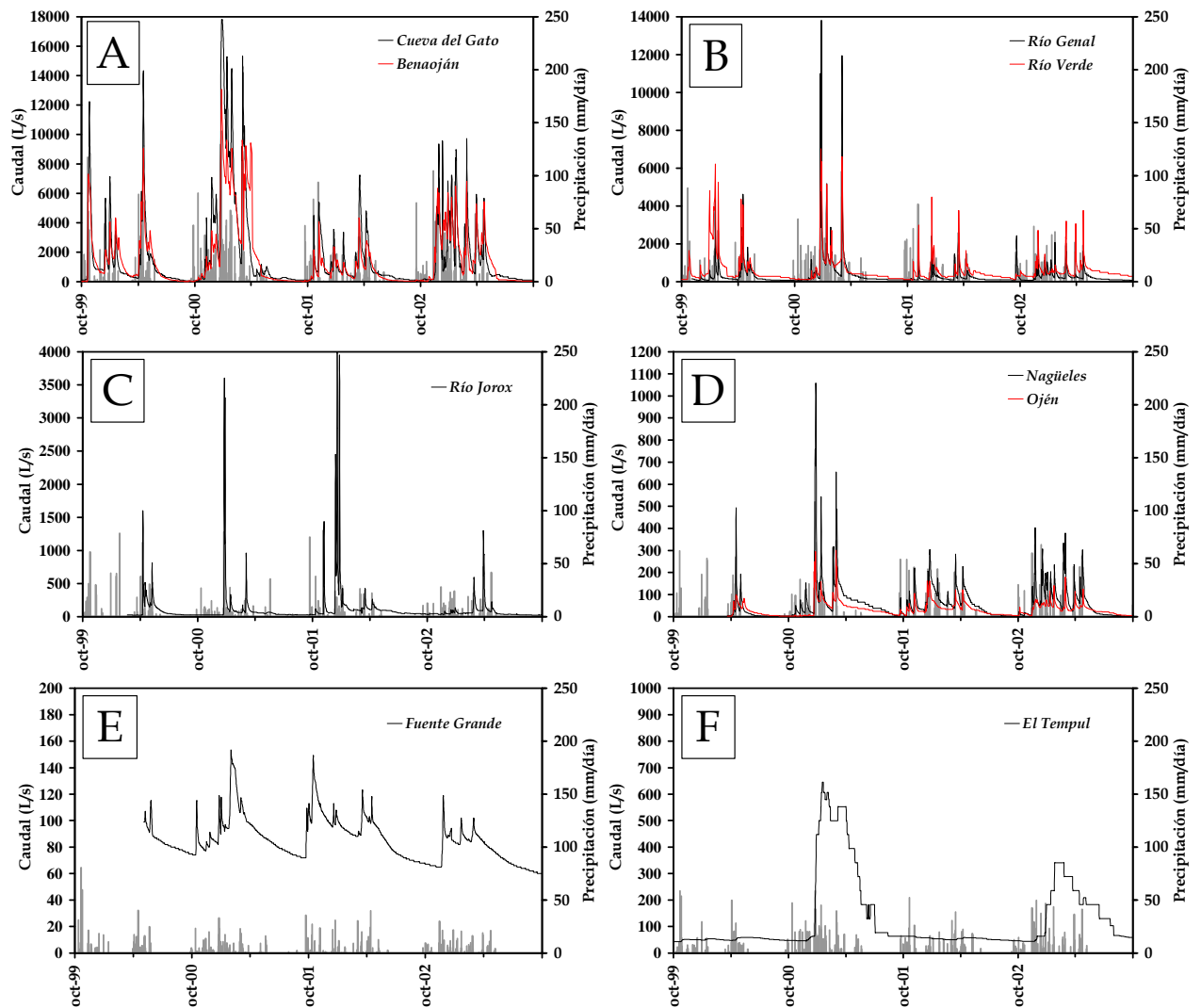


Figura 10.2. Hidrogramas de los manantiales analizados durante el periodo de investigación (1999-2003). Leyenda: A) sector nororiental de la Sierra de Líbar, manantiales de Benaoján y Cueva del Gato; B) acuífero de la Sierra de las Nieves, manantiales del Río Genal y Río Verde; C) acuífero de Sierra Prieta, manantial del Río Jorox; D) acuíferos de Marbella y Ojén (Sierra Blanca), manantiales de Nagüeles y Ojén; E) acuífero de la Alfaguara, Fuente Grande de Alfacar; F) acuífero de la Sierra de las Cabras, manantial de El Tempul.

		PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS																		PARÁMETROS HIDROQUÍMICOS									
		Análisis del hidrograma							Análisis de la curva de recesión							Análisis correlatorio y espectral				Análisis caudales clasificados									
Manantial (Acuífero)	P (mm)	S (km ²)	t _{aguacero} (días)	t _{crecida} (días)	t _{base} (días)	$\overline{Q_{max}}$	$\overline{Q_{min}}$	$\overline{Q_{max}/Q_{min}}$	D _a (días)	η (días ⁻¹)	ε (días ⁻¹)	i	D _a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (hm ³)	k	E.M. (días)	T.R. (días)	F.C.	R _{max}	% Aguas Bajas	% Aguas Altas	v (%) C.E.	v (%) Mg ²⁺	v (%) Cl ⁻	% Dilución	% Varianza ACP	Variación Curva Frecuencias (μS/cm)	
Sierra de Líbar	Benaoján (Sistema Nororiental)	1492	67	1	10	30	8317	17	497	39	0,02614	0,11231	0,78	117	0,0279	2,84	0,06	79	57	0,08	0,505	54	44	4,7	42,5	28,4	16	46	40
	Cueva del Gato (Sistema Nororiental)	1492	67	1	10	30	11140	72	154	20	0,05395	0,08871	0,76	144	0,0156	4,87	0,10	70	46	0,08	0,439	33	67	10,2	32,6	34,7	40	55	130
Sierra de las Nieves	Genal (Sistema de las Nieves)	971	103	1	5	15	5778	67	86	29	0,03743	0,21020	0,66	136	0,0066	3,16	0,29	10	17	0,2	0,540	78	22	4,7	23,5	17,8	23	42	90
	Grande (Sistema de las Nieves)	971	103				15512	122	127					110	0,0133	4,60	0,23	12	16	0,2	0,520			14,7	25,7	21,1	45	64	180
	Verde (Sistema de las Nieves)	971	103	1-2	5-25	20-55	5371	145	37	13	0,08631	0,17952	0,62	154	0,0069	7,81	0,43	23	22	0,18	0,500	82	18						
Sierra Prieta-Bonela	Jorox (Sistema Prieta-Bonela meridional)	578	44	1	5	15	2617	22	122	10	0,12292	0,37917	0,45	152	0,0092	1,23	0,37	10	8	0,18	0,432	50	50	6,6	14,9	10,2	25	44	130
Sierra Blanca	Ojén (Sistema de Ojén)	898	13	1	3	15	185	3	62	17	0,10440	0,12454	0,63	160	0,0157	0,30	0,29	71	41	0,13	0,380	90	10	5,5	25,7	11,8	18	43	90
	Nagüeles (Sistema de Nagüeles)	898	24	1	2	10	561	1	448	8	0,13393	0,14408	0,54	144	0,0294	0,53	0,30	35	30	0,13	0,520	86	14	3,6	39,0	13,4	15	38	60
Sierra de la Aljaguara	Fuente Grande (Sistema de Alfacar)	482	20	5-10	5-10	20	140	67	2	15	0,18032	0,03779	0,60	185	0,0018	4,76	1,78	80	68	0,04	0,253	91	9	0,6	5,1	19,5	< 0,3	42	10
Sierra de las Cabras	El Tempul (Sierra de las Cabras)	815	34	7-10	30-60	120-180	692	51	14	155	0,00688	0,00955	0,97	178	0,0018	4,43	0,55	95	84	0,03	0,202	63	37						

Tabla 10.1. Resultados de los principales parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos correspondientes a los manantiales investigados.

En cuanto a los tiempos de base y de crecida existe una correlación directamente proporcional entre ambos (Figura 10.3A). Las surgencias cuyos hidrogramas presentan un mayor tiempo de crecida (tiempo que transcurre desde el comienzo del aumento de caudal hasta la punta del hidrograma) muestran un mayor tiempo de base (tiempo que transcurre desde el comienzo de la crecida hasta el inicio del agotamiento). El manantial de El Tempul muestra valores de estos dos parámetros claramente más elevados (Tabla 10.1) que el resto de surgencias. Los valores más bajos de t_{crecida} y t_{base} se registran en los manantiales de Ojén y Nagüeles.

La relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{\text{max}}}/\overline{Q_{\text{min}}}$) presenta una mayor variabilidad (Tabla 10.1). Los valores más altos corresponden a los manantiales de Benaoján (Sierra de Líbar) y Nagüeles (Sierra Blanca), los cuales drenan acuíferos bastante diferentes entre sí, tanto por su tamaño, contexto geológico (litología, estructura, geomorfología) como por el contexto climático (volumen de precipitaciones) en el que se encuentran. Sin embargo, las surgencias de El Tempul y Fuente Grande, muestran los valores más bajos de $\overline{Q_{\text{max}}}/\overline{Q_{\text{min}}}$. Los resultados de este parámetro, bastante coherentes con el conocimiento hidrogeológico disponible (veáse capítulos 4 y 9), y su fácil determinación, demuestran el interés del mismo para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos.

El análisis conjunto de toda la información deducida a partir de los hidrogramas anuales permite distinguir tipos de funcionamiento de los acuíferos. Así, los manantiales de El Tempul y Fuente Grande muestran hidrogramas anuales (Figura 10.2) con variaciones de caudal que se producen entre 5 y 10 días después del evento pluviométrico que origina la recarga (t_{aguacero}). Los elevados tiempos de base y de crecida y la baja relación $\overline{Q_{\text{max}}}/\overline{Q_{\text{min}}}$ revelan el comportamiento hidrogeológico inercial de los acuíferos que drenan estos manantiales.

Los hidrogramas anuales de los principales puntos de descarga del sector nororiental de la Sierra de Líbar (manantiales de Benaoján y Cueva del Gato), del manantial del Río Genal (sistema de las Nieves) y del manantial de Nagüeles

(sistema de Marbella) muestran varias crecidas para cada año hidrológico, proporcionales a la magnitud e intensidad de las precipitaciones (Figura 10.2). En general, los tiempos de base son de 30 días para los dos primeros y menores de 20 días en los dos segundos, mientras que los tiempos de crecida son de 10 días para los manantiales de la Sierra de Líbar y de 5 y 2 días, para los manantiales de Río Genal y Nagüeles, respectivamente (Tabla 10.1). Además, en estas cuatro surgencias, los aumentos de caudal se producen, generalmente, un día después de la caída de una lluvia importante. Estas características, junto con los elevados valores de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, ponen de manifiesto la escasa capacidad de filtro de los acuíferos drenados por dichos manantiales.

Los manantiales del Río Verde (sistema de las Nieves), Río Jorox (sistema Prieta-Bonela meridional) y Ojén (sistema de Ojén) presentan hidrogramas con las mismas características que las descritas para los manantiales del Río Genal y Nagüeles. No obstante, en los hidrogramas de estas tres surgencias se advierte que las primeras lluvias de algunos años hidrológicos, precedidos de un importante periodo de drenaje en condiciones de agotamiento, producen crecidas de menor importancia y valores máximos de caudal menos elevados. Ello se debe a que la infiltración procedente de las primeras lluvias otoñales, sirve además de para saturar suelo, epikarst y zona no saturada, para recargar el volumen de agua drenado durante el agotamiento precedente.

Las representaciones gráficas de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ frente al tiempo de crecida y al tiempo de base (Figuras 10.3B y 10.3C) muestran una distribución similar del conjunto de manantiales considerados, tal y como era de esperar dada la relación de proporcionalidad que se ha puesto de manifiesto, anteriormente, entre los tiempos de crecida y base (Figura 10.3A). No obstante, cabe señalar que estas representaciones permiten diferenciar, al menos, uno de los manantiales con un comportamiento marcadamente inercial (El Tempul) de aquellos que muestran un comportamiento menos inercial o más bien de tipo kárstico. Además, dentro de estos últimos, la posición del manantial de Nagüeles denota que el sistema acuífero de Marbella es un claro ejemplo de acuífero kárstico.

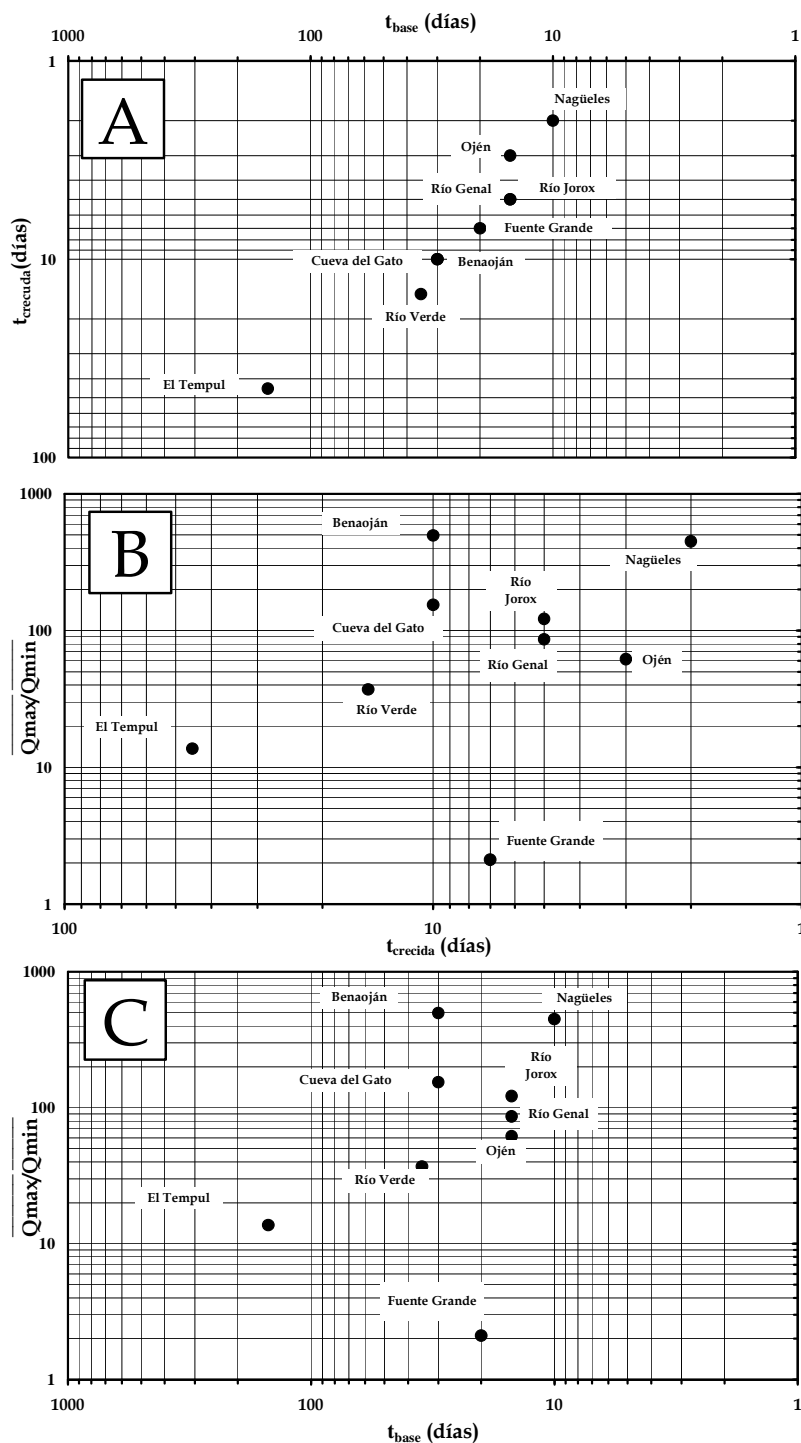


Figura 10.3. Representación gráfica del tiempo de base frente al tiempo de crecida (A), del tiempo de crecida frente a la relación $\overline{Q_{max}/Q_{min}}$ (B) y del tiempo de base frente a la relación $\overline{Q_{max}/Q_{min}}$ (C).

La fácil determinación de la mayoría de los parámetros anteriores, a partir de los hidrogramas, convierte este método en sencillo y rápido para llevar a cabo, sin necesidad de un tratamiento previo de los datos de caudal, una primera comparación de las respuestas naturales.

10.1.2. Análisis de las Curvas de Recesión mediante el método de Mangin (1970, 1975)

El análisis conjunto de los resultados obtenidos con este método (Tabla 10.1) permite constatar que los valores medios de duración de la decrecida no varían de manera significativa de unos manantiales a otros, excepto en el caso del manantial de El Tempul, que presenta una larga duración (155 días), debido a que la velocidad de infiltración es muy lenta. En el resto de manantiales, se puede diferenciar un grupo (Río Jorox y Nagüeles) que presenta un tiempo de decrecida próximo a 10 días, lo cual permite deducir las velocidades de infiltración más rápidas determinadas en esta investigación. Los parámetros característicos de la decrecida de los manantiales del sistema de las Nieves y de la Sierra de Líbar muestran un mayor grado de karstificación funcional de la zona no saturada en los sectores drenados por el manantial del Río Verde y en la surgencia de la Cueva del Gato. Por último, los valores de la decrecida s.s. de Fuente Grande revelan que, aunque ésta se produzca de forma relativamente rápida (≈ 15 días), la disminución de caudal en la surgencia durante dicha fase tiene lugar de manera lenta y gradual (parámetro ϵ), lo que pone de manifiesto que, en realidad, la componente de la zona no saturada queda rápidamente anulada por la componente de la zona saturada, es decir, que el sistema acuífero está funcionando, mayoritariamente, en condiciones de agotamiento.

El parámetro i presenta un valor relativamente alto en todos los manantiales, con valores comprendidos entre 0'45 y 0'97, característicos de sistemas complejos y de grandes dimensiones según Mangin (1975). Estos resultados no estarían en consonancia con la realidad, al menos en cuanto a la extensión de varios de los acuíferos estudiados en esta investigación (Marbella, Ojén, Alfaguara y Prieta-Bonela meridional).

La duración del agotamiento es un parámetro con una variabilidad importante (Tabla 10.1). Igualmente, el coeficiente de agotamiento (α) muestra valores muy desiguales. Así, en los manantiales de la Sierra de Líbar (Benaoján y Cueva del Gato) y de Sierra Blanca (Ojén y Nagüeles) α es del orden de 10^{-2} días⁻¹,

característico de sistemas de tipo kárstico, a diferencia de los manantiales de El Tempul y Fuente Grande, en los que el agotamiento se realiza de manera más lenta y α se encuentra en un rango de 10^{-3} a 10^{-4} días⁻¹, propio de sistemas poco karstificados y más bien de flujo difuso. Los manantiales de la Sierra de las Nieves (Río Genal y Río Verde) y del acuífero Prieta-Bonela (Río Jorox) presentan valores intermedios de α , del orden de 10^{-3} días⁻¹, próximos a 10^{-2} días⁻¹.

El parámetro k indica la capacidad del acuífero para restituir progresivamente una parte del volumen de agua que circula por él. Según Mangin (1975) los acuíferos kársticos presentan un valor de $k < 0,5$ y, en los sistemas con $k < 0,1$, el poder regulador es escaso y predomina la componente rápida de la infiltración. De acuerdo con los valores de este parámetro (Tabla 10.1), los acuíferos drenados por los manantiales estudiados presentan importantes diferencias en cuanto a su poder regulador. Así, las surgencias de la Sierra de Líbar son las que muestran un valor de k más bajo, porque presentan un mayor grado de karstificación y un menor poder regulador. En contraposición, los manantiales de El Tempul y Fuente Grande presentan un valor medio de k más elevado, que refleja la elevada capacidad reguladora de estos acuíferos. No obstante, Fuente Grande presenta un parámetro $k \approx 2$, no contemplado en la clasificación de Mangin (op. cit.), en la cual se considera un valor máximo de 1. El hecho de que el valor del parámetro k sea mayor que la unidad se debe a que el volumen dinámico (cuya variación determina los caudales de la surgencia durante el agotamiento) es superior al volumen drenado por el manantial durante un ciclo medio (volumen de tránsito), es decir, su capacidad de regulación es hiperanual.

Se han representado, en el gráfico de la clasificación de Mangin (1975), los valores medios de los parámetros k e i obtenidos para los manantiales de los acuíferos estudiados (Figura 10.4). La mayoría de las surgencias se encuentra dentro del dominio IV, característico de los sistemas kársticos con una compleja organización de drenaje. Cabe destacar que el manantial del Río Jorox se sitúa dentro del dominio III, aunque próximo al dominio IV. En cambio, los manantiales de El Tempul y Fuente Grande se encuentran claramente en los dominios de los sistemas poco karstificados (dominio V).

En cuanto a la aplicabilidad del método, tras la situación de las diferentes surgencias en el gráfico propuesto por Mangin (1970, 1975), es obvio que el parámetro i , aunque varía entre 0'45 y 0'97 (50% de rango de variación posible), en la mayoría de los casos, presenta valores del dominio IV, correspondiente a acuíferos complejos y de grandes dimensiones. Esta interpretación no coincide con las dimensiones reales de varios de los ejemplos analizados en esta investigación, al igual que ocurre en otros acuíferos de la Cordillera Bética (Cruz-Sanjulián *et al.*, 1990; Moral, 1992 y 2005; Andreo, 1997; Jiménez *et al.*, 2002 y 2004). La forma en que se produce la decrecida (parámetro i) podría permitir establecer las potenciales diferencias entre los manantiales, pero, dicha forma, no depende sólo de las características del subsistema infiltración (zona no saturada) sino que está relacionada también con el régimen pluviométrico que origina la crecida (frecuencia e intensidad de las precipitaciones). Otros autores, como Grasso y Jeannin (1994) y Mugerza (2001), también han puesto de manifiesto las limitaciones de la clasificación de Mangin (1970, 1975), debido a las dificultades de cálculo del parámetro i . En cambio, el parámetro k de los acuíferos estudiados da una buena idea del poder regulador de los mismos y, por tanto, puede ser considerado como una variable representativa, aunque se haya obtenido un valor de k no contemplado en la clasificación que se diseñó.

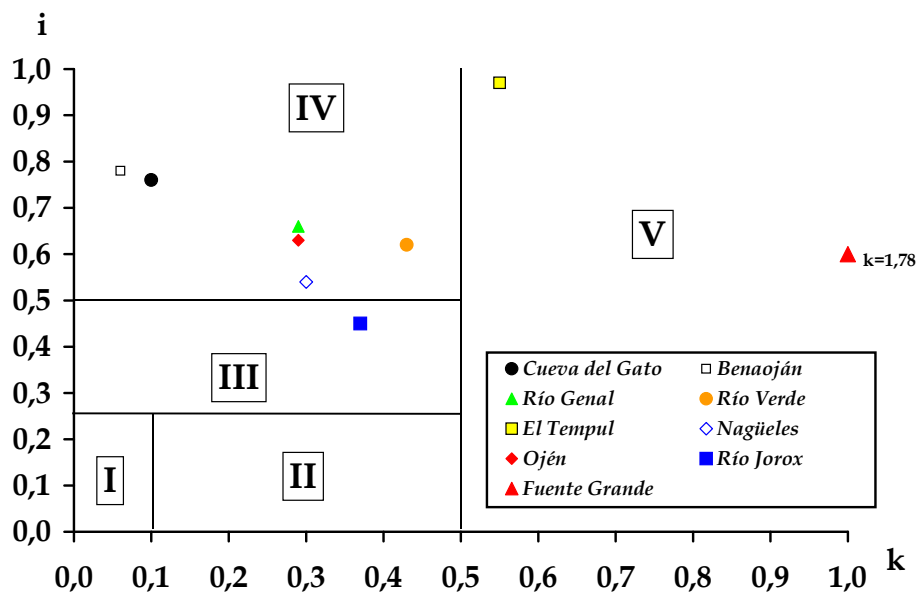


Figura 10.4. Gráfico i - k propuesto por Mangin (1970, 1975) para clasificar los sistemas kársticos, en el cual se han representado los valores medios de todas las curvas de recesión analizadas para cada uno de los manantiales estudiados.

Al igual que para el análisis cualitativo de hidrogramas, se han representado los diferentes manantiales en unos ejes de coordenadas tomando como referencia la combinación de los siguientes parámetros: duración de la decrecida (D_d), duración del agotamiento (D_a), coeficiente de agotamiento (α) y los parámetros i-k (Figura 10.5).

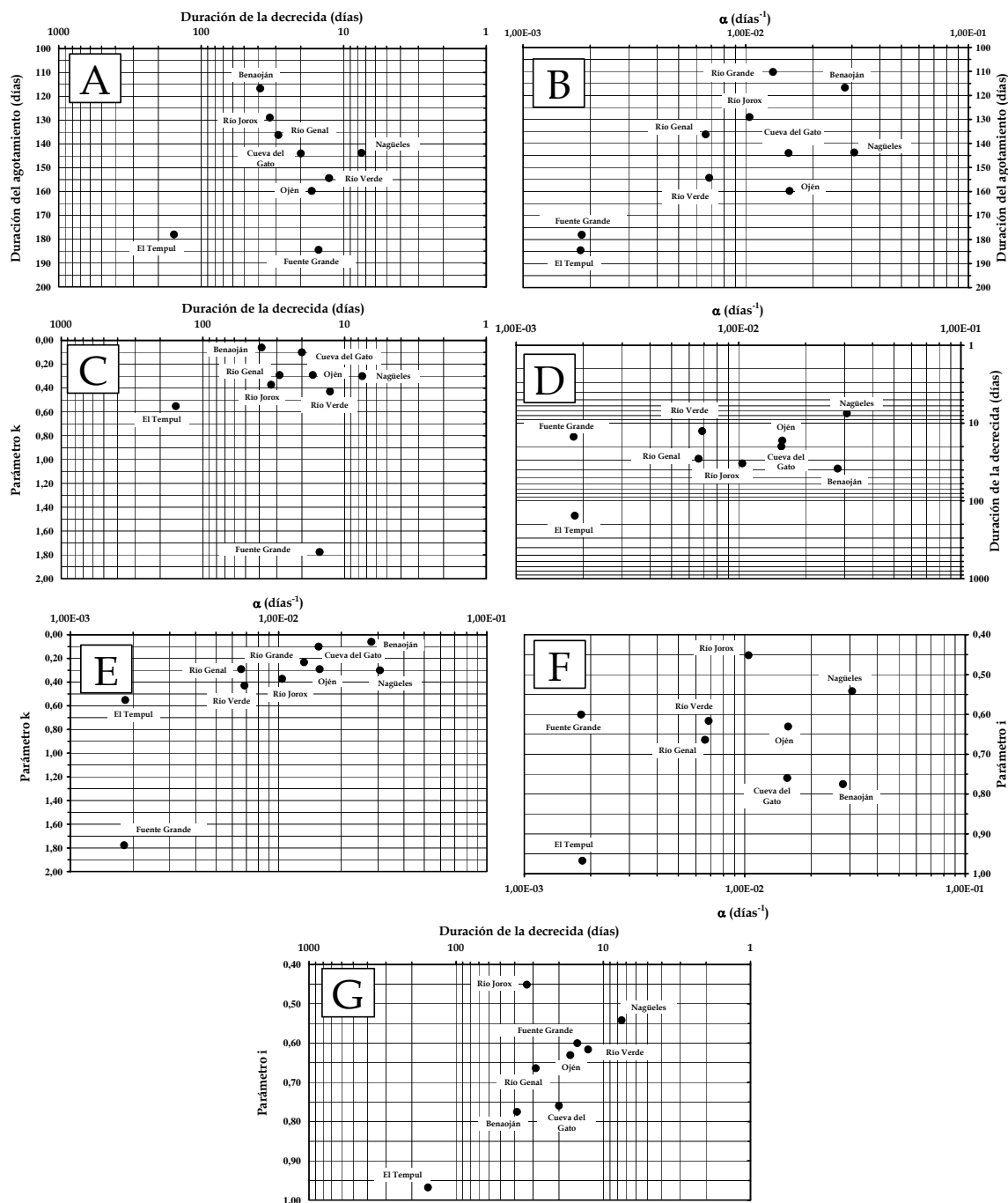


Figura 10.5. Representación gráfica, en diagramas X-Y, de varios parámetros obtenidos mediante el análisis de la curva de recesión. Leyenda: α coeficiente de agotamiento, parámetros i y k de Mangin (1970, 1975).

La mayoría de los gráficos permiten diferenciar los sistemas más inerciales (manantial de El Tempul y Fuente Grande) del resto, que presentan un comportamiento eminentemente más kárstico (Figura 10.5). Dentro de este segundo grupo, los manantiales de Benaoján (acuífero de Líbar) y Nagüeles (acuífero de Marbella) se muestran como ejemplos de acuíferos con flujo de tipo kárstico y escaso poder regulador. No obstante, el diagrama X-Y de la figura 10.5G, que representa los dos parámetros característicos de la decrecida (duración de la decrecida y parámetro i muestra una distribución algo diferente del conjunto de los manantiales; en concreto, las posiciones de la Fuente Grande de Alfacar, Benaoján y Cueva del Gato. Así, la Fuente Grande de Alfacar aparece asociada a otros puntos de descarga propios de sistemas muy karstificados (Figura 10.5G), mientras que la posición de los manantiales de la Sierra de Líbar son propias de los sistemas más inerciales analizados en esta investigación. Una posible explicación de esta distribución es que los subsistemas infiltración de los manantiales estudiados de la Sierra de Líbar presenten un desarrollo de la karstificación funcional menor de lo que parece, mientras que la zona no saturada del sector drenado por la Fuente Grande de Alfacar, tal y como se ha comentado anteriormente, presenta una escasa importancia dentro del contexto hidrodinámico general del sistema acuífero de la Alfaguara.

La interpretación anterior, aunque plausible, debe de tener en cuenta otras variables o factores que pueden explicar, incluso por sí solos o por la combinación de ambos, dicho comportamiento, como son el régimen pluviométrico y el tamaño del sistemas. Ya se ha indicado anteriormente que la decrecida no depende sólo de las características del subsistema infiltración, sino también de las precipitaciones previas al comienzo de la decrecida (distribución de la lluvia). Las precipitaciones que han dado lugar a las crecidas analizadas en el acuífero de la Sierra de Líbar se han producido, como media, durante 3 a 5 días, mientras que las precipitaciones sobre el acuífero de la Alfaguara se han registrado en 1-2 días, lo que provoca decrecidas más cortas en este último. Además, el reducido tamaño del acuífero de la Alfaguara hacen que, comparativamente, la Sierra de Líbar presente decrecidas más largas, por un lado, debido al mayor tamaño del sistema

y, por otro, por el aporte del agua infiltrada a través de los sumideros kársticos de los diferentes poljes, tal y como se deduce a partir del análisis de caudales clasificados. En ese mismo sentido, el valor del parámetro i para cada una de las curvas analizadas de las surgencias de la Cueva del Gato y Benaoján es igual o superior a 0'70, lo cual, según Mangin (1975), es indicativo de un sistema complejo y de grandes dimensiones, que concuerda claramente con la realidad, ya que el sector de acuífero drenado por estas surgencias presenta una extensión superior a 60 km².

10.1.3. Análisis Correlatorio y Espectral

De los resultados obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral, el correlograma simple permite calcular uno de los parámetros más interesantes, a priori, para comparar respuestas naturales; el efecto memoria (E.M.), que según Mangin (1981 a y b) está ligado a la mayor o menor existencia de reservas reguladoras y se define como el valor de k (días) para $r = 0'1-0'2$. Dentro del conjunto de manantiales considerados (Figura 10.6) se diferencia un primer grupo, que presentan un correlograma claramente tendido (El Tempul y Fuente Grande), un segundo grupo (Benaoján, Cueva del Gato y Ojén), cuyo correlograma es bastante menos tendido, debido a un decrecimiento más rápido durante la primera parte del correlograma, y el resto de surgencias (Río Genal, Río Grande, Río Verde, Río Jorox y Nagüeles), que muestran un correlograma muy vertical hasta $k=5$ días, con un rápido descenso de los valores de correlación. La mitad de los manantiales presentan un valor relativamente alto del efecto memoria (Tabla 10.1), sobre todo los manantiales de Fuente Grande y El Tempul, mientras que las surgencias del sistema de las Nieves y de Prieta-Bonela presentan valores característicos (10-25 días) de sistemas escasamente inerciales. Estos últimos resultados son los valores más bajos obtenidos en las series de caudal de manantiales que drenan acuíferos carbonáticos del Sur de España y, por tanto, refuerzan la hipótesis de que estos acuíferos son los sistemas menos inerciales de esta latitud.

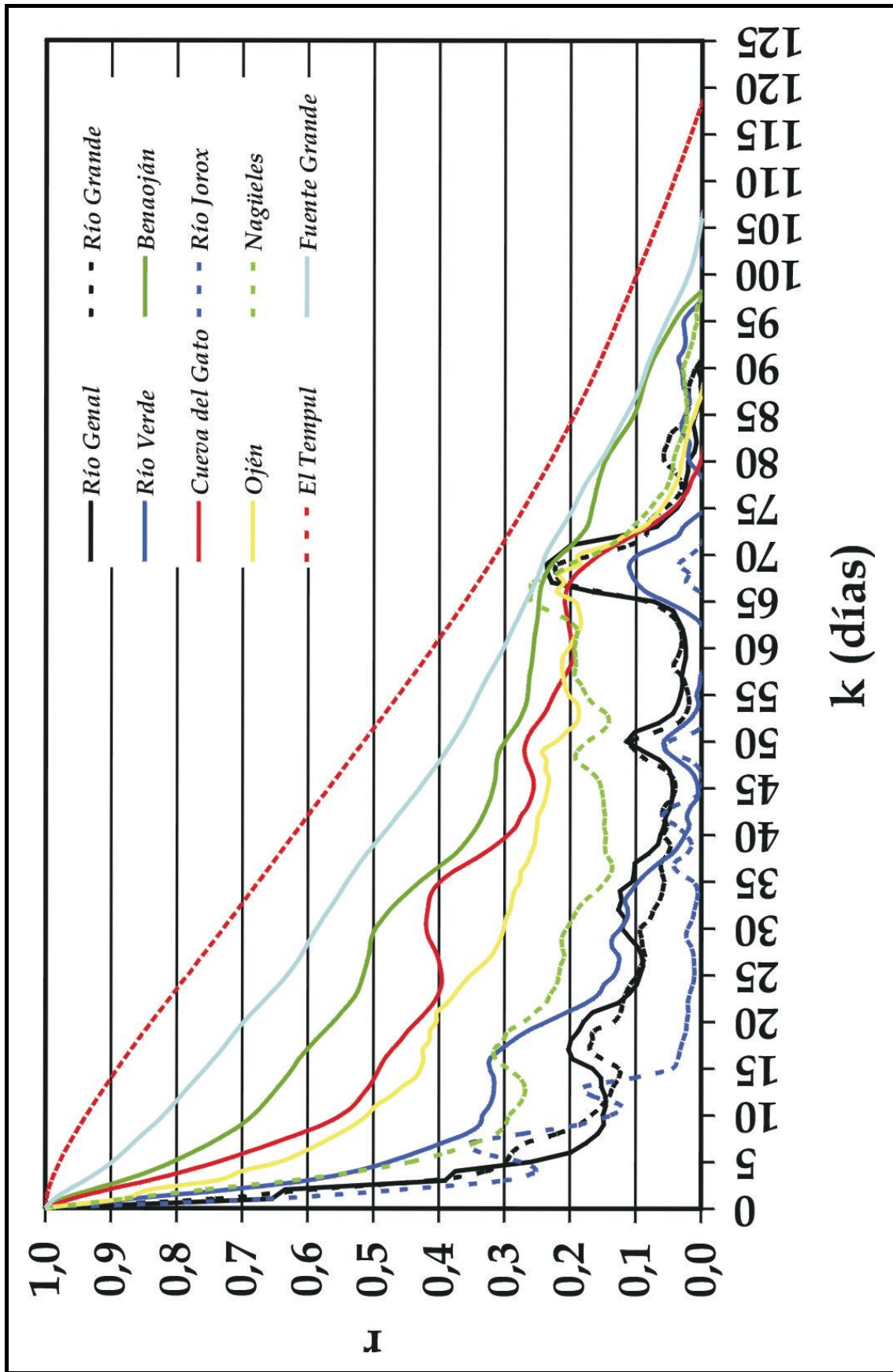


Figura 10.6. Correlogramas simples de los caudales de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: r coeficiente de correlación.

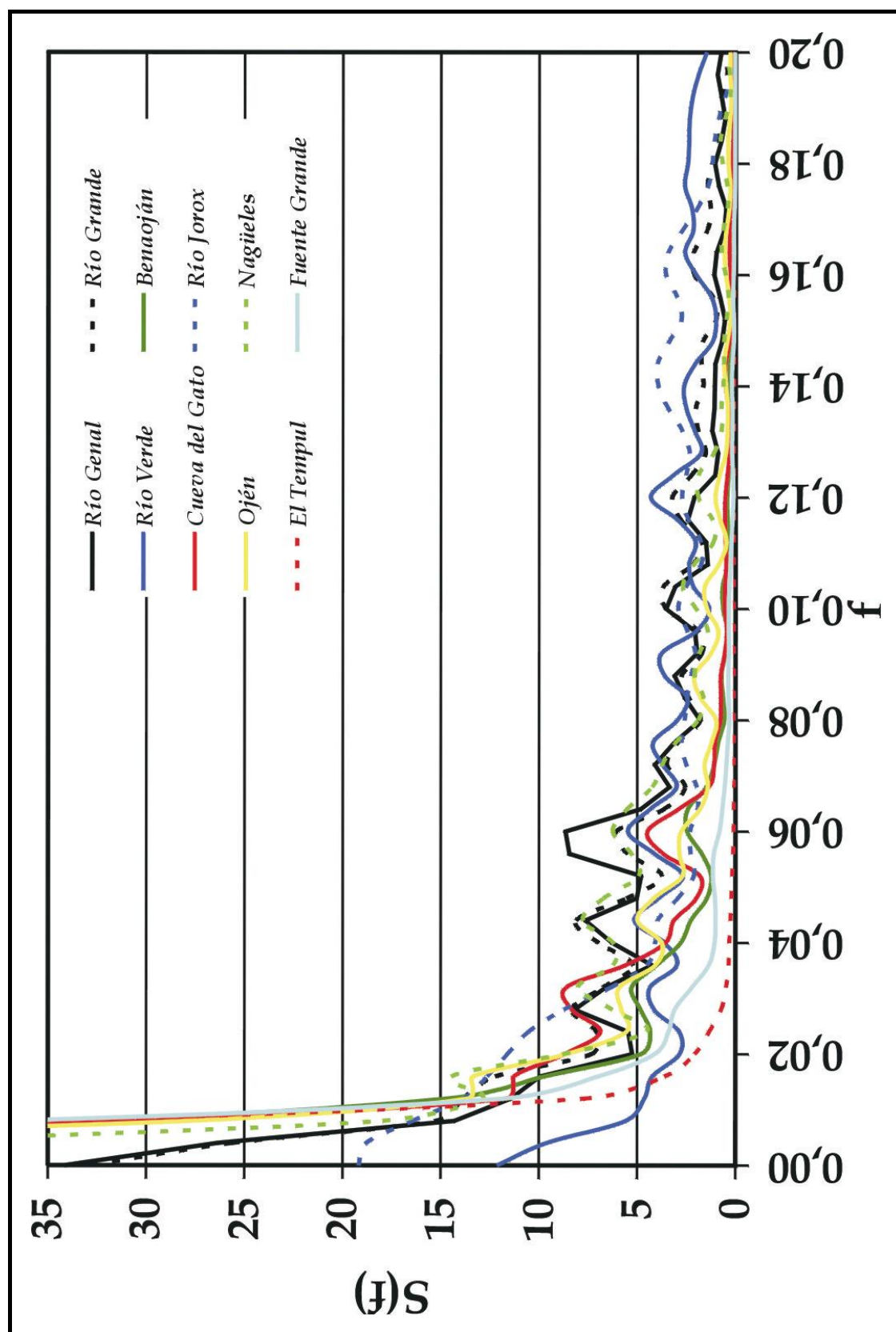


Figura 10.7. Espectro de frecuencia de los caudales de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: $S(f)$ espectro de frecuencia, f frecuencia.

El espectro de densidad de varianza (Figura 10.7) ha permitido calcular la duración de la influencia de los eventos de lluvia sobre los acuíferos, mediante el parámetro denominado tiempo de regulación (T.R.), que se define como $S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro para $f=0$. Los tiempos de regulación muestran valores relativamente altos para los mismos manantiales (El Tempul y Fuente Grande) que presentan un elevado efecto memoria (Tabla 10.1). Asimismo, las surgencias con reducido efecto memoria presentan también valores bajos del tiempo de regulación, excepto en el caso de los manantiales del Río Genal y Río Verde que, comparativamente, muestran valores más altos del tiempo de regulación que del efecto memoria. Este resultado es consecuencia de que el valor del efecto memoria puede considerarse como un valor semicuantitativo, que depende de la forma del correlograma y, por tanto, del valor del correlograma que se tome para el intervalo del coeficiente de correlación entre $0'1$ y $0'2$.

A partir del espectro de densidad de varianza (Figura 10.7) se ha obtenido, también, el parámetro frecuencia de corte (F.C. en Tabla 10.1) que permite conocer la capacidad de filtro del sistema. Este parámetro es inversamente proporcional a los valores del efecto memoria y al tiempo de regulación (Tabla 10.1). Los valores más bajos de la frecuencia de corte se obtienen en los manantiales de Fuente Grande y El Tempul (0,04-0,03), mientras que las surgencias del sistema de las Nieves y de Prieta-Bonela presentan valores característicos de sistemas muy karstificados (0,18-0,20). Ahora bien, conviene tener presente que la frecuencia de corte se obtiene directamente del espectro de densidad de varianza y presenta el problema de establecer a partir de qué valor de frecuencia se puede considerar que el espectro es despreciable (Figura 10.7).

Aparte de los diferentes parámetros que se deducen del análisis espectral simple (tiempo de regulación y frecuencia de corte), el espectro de densidad de varianza (Figura 10.7) pone de manifiesto que existe una coincidencia de los fenómenos periódicos a corto término para las surgencias del sistema de las Nieves, Prieta-Bonela, Ojén y Marbella.

La aplicación del análisis correlatorio y espectral, de forma cruzada, muestra la relación causa-efecto entre lluvia y caudal, es decir, el hidrograma unitario de los acuíferos. Los correlogramas cruzados obtenidos en esta investigación presentan morfologías muy diversas (Figura 10.8). Existe un primer grupo de manantiales (El Tempul y Fuente Grande) que presentan un correlograma cruzado de forma extendida y poco puntiaguda, sobre todo el primero, con valores máximos del coeficiente de correlación (R_{\max}) del orden de 0,20-0,25 (Tabla 10.1). Los correlogramas cruzados obtenidos para el resto de manantiales presentan una forma puntiaguada (Figura 10.8), con valores de R_{\max} que varían entre 0,38 (Ojén) y 0,54 (Río Genal).

Dentro del segundo grupo, los hidrogramas unitarios del acuífero de la Sierra de Líbar (manantiales de Benaoján y Cueva del Gato) y de los acuíferos de Sierra Blanca (surgencias de Ojén y Nagüeles) reflejan un descenso rápido de los valores de correlación, seguidos de un decrecimiento más lento a partir de un determinado valor de k (Figura 10.8).

En cambio, los hidrogramas unitarios de los sistemas de Sierra de las Nieves y de Prieta-Bonela, muestran un descenso rápido de los valores de correlación, mucho más destacado, y la disminución lenta posterior de dichos valores es menos marcada.

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, el parámetro R_{\max} presenta una variabilidad importante dentro del conjunto de manantiales estudiados. No obstante, la representatividad de su valor, que se relaciona con la capacidad de transmisión de la señal de entrada (y con el mayor o menor grado de karstificación), es muy escasa, si no se tiene en cuenta que el resultado de este parámetro depende del valor de k (paso de tiempo) para el que se produce. Así, en la mayor parte de las surgencias analizadas, el parámetro R_{\max} se detecta para un valor k de 1-2 días, mientras que en los manantiales más inerciales se observan dos valores muy desiguales: $k=3$ días para la Fuente Grande de Alfacar y $k=28$ días para El Tempul.

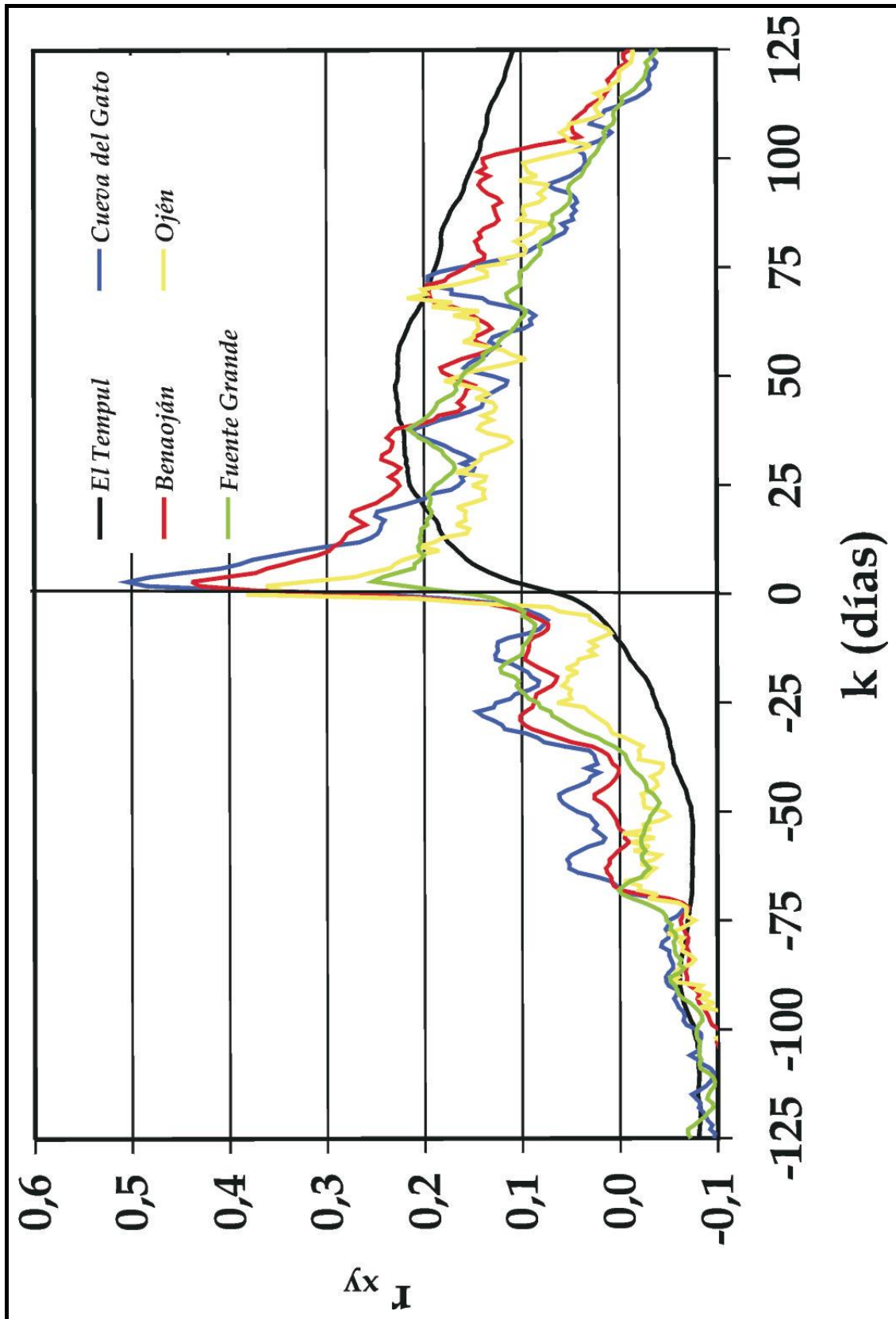


Figura 10.8. Correlogramas cruzados lluvia-caudal (hidrogramas unitarios) de cada uno de los manantiales estudiados, para una ventana de observación de 125 días y paso de 1 día. Leyenda: r_{xy} coeficiente de correlación cruzada.

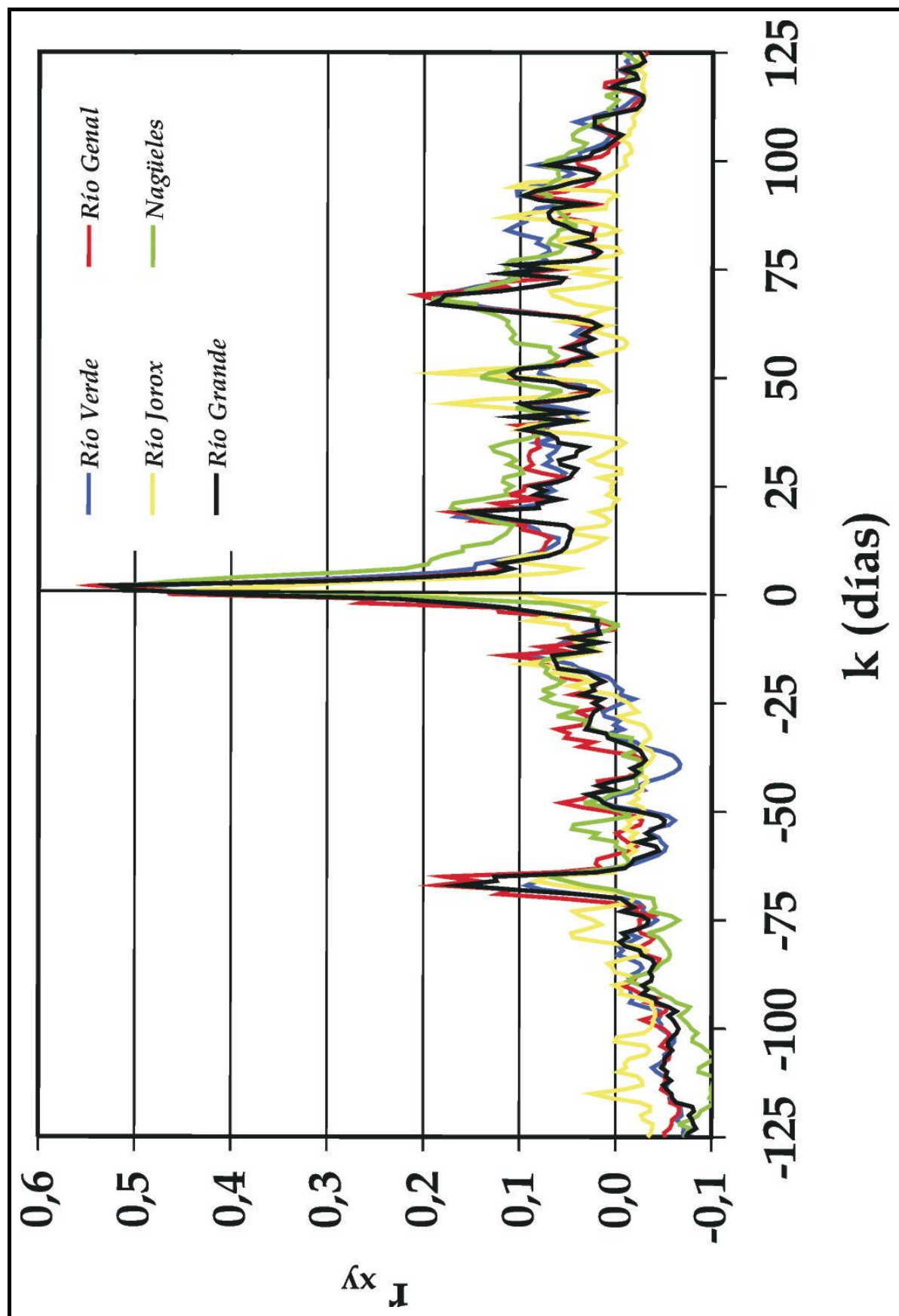


Figura 10.8. (continuación)

El análisis correlatorio y espectral se ha llevado a cabo para el mismo periodo de tiempo en todos los manantiales, con objeto de evitar aspectos relacionados con la duración de la serie de datos relativos a la función de entrada (precipitaciones), que pudieran afectar a los parámetros deducidos. De esta manera, se han uniformizado los efectos externos derivados del régimen de precipitaciones durante el período de estudio. En este sentido, además, cabe añadir que el efecto memoria (E.M.) está relacionado con la importancia de las precipitaciones (Grasso y Jeannin, 1994; Eisenlohr, 1995; Mugerza, 2001; Liñán, 2003). El resto de parámetros obtenidos a partir del análisis correlatorio y espectral (tiempo de regulación, frecuencia de corte y valor máximo del coeficiente de correlación cruzada), también pueden verse afectados por la cantidad y distribución de las precipitaciones, aunque el tiempo de regulación, por su propia definición ($S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro de densidad de varianza para $f=0$), es el parámetro más preciso, desde el punto de vista cuantitativo.

Del análisis conjunto de todos los resultados obtenidos en el análisis correlatorio y espectral (Tabla 10.1) se deduce que sistemas localizados en el Sur de España y con un importante grado de karstificación, como los acuíferos de la Sierra de Líbar o Sierra Blanca, presentan valores para los parámetros característicos (efecto memoria, tiempo de regulación, frecuencia de corte) similares a los que se obtienen en los más inerciales del Pirineo francés (Mangin, 1984). Este hecho se debe a que la irregularidad en la distribución pluviométrica en el Sur de España (marca climática) provoca que los manantiales estén mucho tiempo en régimen de agotamiento, en comparación con otras zonas de precipitación más regular. Ello da lugar a una “inercia añadida” como consecuencia de que la variación de los caudales durante el agotamiento es mucho más lenta que durante otras situaciones hidrodinámicas.

En el caso de sistemas poco karstificados (Sierra de las Cabras y acuífero de la Alfaguara) se obtienen valores de dichos parámetros que no se contemplan en las clasificaciones existentes (Figura 10.9). En este sentido, el trabajo de Garay (2002) constituye una revisión de la clasificación hidrodinámica de los acuíferos kársticos propuesta por Mangin (cuatro clases, representadas por los manantiales

de Aliou, Baget, Fontestorbes y Torcal), y plantea la necesidad de ampliarla con un nuevo tipo de sistemas carbonáticos, de comportamiento mucho más inercial que el que presentan los cuatro tipos propuestos por Mangin (Figura 10.10).

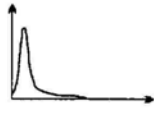
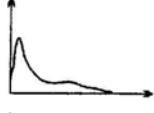
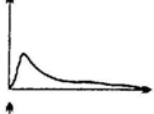

TIPOS	EFFECTO MEMORIA (r: 0.1 - 0.2)	BANDA ESPECTRAL (Fc)	TIEMPO DE REGULACIÓN (So/2)	HIDROGRAMA UNITARIO
ALIOU	REDUCIDO 5 días	MUY ANCHA 0.30	10-15 días	
BAGET	PEQUEÑO 10-15 días	ANCHA 0.20	20-30 días	
FONTESTORBES	GRANDE 50-60 días	ESTRECHA 0.10	50 días	
TORCAL	MUY GRANDE 70 días	MUY ESTRECHA 0.05	70 días	

Figura 10.9. Clasificación de los sistemas acuíferos a partir del análisis correlatorio y espectral, según Mangin (1984).






Modelo tipo	efecto memoria	banda espectral (frecuencia de corte)	tiempo de regulación	hidrograma unitario	ejemplos similares
ALIOU	5 días	0,30	10-15 días		Olalde Aldabide
BAGET	10-15 días	0,20	20-30 días		Iturriotz Ilantones Sant Josep Racó Misèria
FONTESTORBES	50-60 días	0,10	50 días		Font Major Hund-Gato Orue ¿Arteta?
TORCAL	70-80 días	0,05	70 días		Los Santos Quart
LA ESPERANZA	300 días	0,04	120 días		Berro Torremolinos

Figura 10.10. Clasificación de los acuíferos carbonáticos propuesta por Mangin (1984), modificada por Garay (2002), en la que se incluyen algunos ejemplos de sistemas españoles.

La alta correlación entre los diversos parámetros deducidos del análisis correlatorio y espectral se pone de manifiesto al representarlos en los gráficos X-Y de la figura 10.11. El análisis conjunto de todos estos gráficos permite concluir que

los manantiales de El Tempul y Fuente Grande drenan acuíferos con gran poder regulador, de acuerdo con los resultados del análisis del hidrograma (Figura 10.3) y de la curva de recesión (Figura 10.5). Sin embargo, la posición de los manantiales de la Sierra de las Nieves, de las Sierras Prieta-Bonela y del sistema de Marbella en los gráficos de la figura 10.11 es indicativa de que se trata de acuíferos con un flujo de tipo kárstico. Por último, los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato (acuífero de Líbar) y el manantial de Ojén (sistema de Ojén) se ubican en una posición intermedia entre los dos grupos anteriores (Figura 10.11).

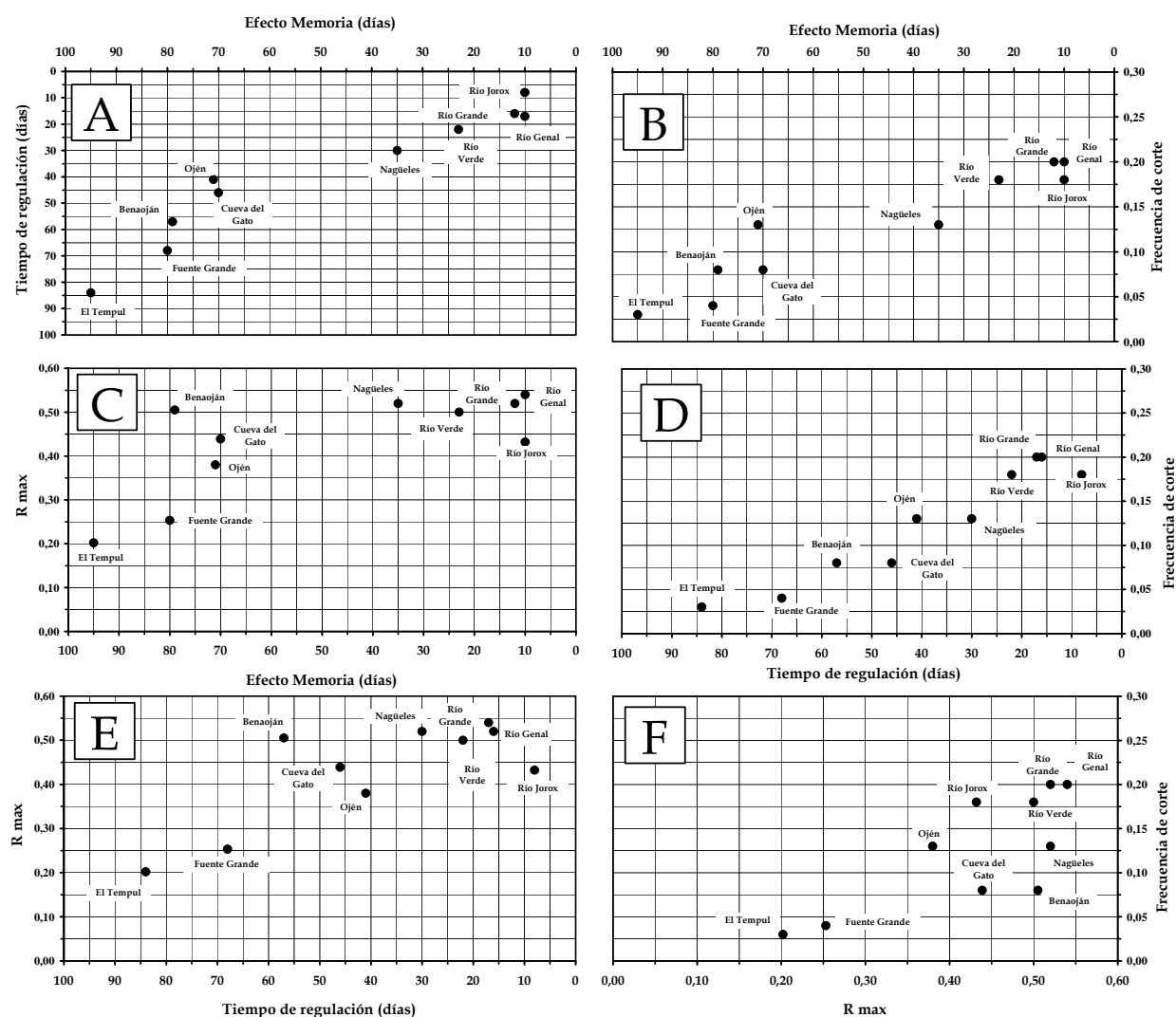


Figura 10.11. Diagramas X-Y de diversos parámetros obtenidos mediante el análisis correlatorio y espectral. Leyenda: R_{max} valor máximo del correlograma cruzado entre las precipitaciones y el caudal de los manantiales.

La posición de las tres últimas surgencias en las figuras 10.11A, 10.11B y 10.11C es variable, según los parámetros que se consideren. Así, la representación

de los valores del efecto memoria provoca un acercamiento de estos manantiales de tipo intermedio hacia los manantiales con gran poder regulador (El Tempul y Fuente Grande). En cambio, la combinación de los parámetros deducidos del espectro de densidad de varianza (frecuencia de corte y tiempo de regulación) y del análisis cruzado (R_{\max}) dan lugar a una distribución más regular, con un grupo intermedio, entre los dos tipos extremos (Figuras 10.11D, 10.11E y 10.11F).

No obstante, conviene tener presente que el efecto memoria (E.M.), la frecuencia de corte (F.C.) y el valor máximo del coeficiente de correlación cruzada (R_{\max}) pueden considerarse parámetros semicuantitativos ya que dependen de la forma del correlograma y del espectro de densidad de varianza y del valor de k (paso de tiempo) para el que se produce, respectivamente. Por tanto, parece que el parámetro del análisis correlatorio y espectral más adecuado para caracterizar el funcionamiento de los acuíferos es el tiempo de regulación (T.R.)

10.1.4. Análisis de Caudales Clasificados

El análisis de caudales clasificados ha resultado ser un método interesante para poner de manifiesto diferentes modalidades de circulación de agua, en cada uno de los acuíferos estudiados; es decir, su utilidad para la caracterización hidrogeológica individual ha quedado contrastada. No obstante, la interpretación de los resultados ha requerido integrar toda la información previa sobre el funcionamiento del acuífero, obtenida a partir de los restantes métodos hidrodinámicos (análisis de hidrogramas, análisis de la curva de recesión y análisis correlatorio y espectral). Además, para minimizar la influencia del estado hidrodinámico del acuífero y de la diferente duración de la serie de datos hidrológicos, en todos los manantiales se ha calculado la curva de caudales clasificados correspondiente al periodo de estudio.

Desde el punto de vista metodológico, la falta de unos parámetros cuantificables, sólo ha permitido considerar como criterio comparativo, el porcentaje de volumen de agua drenado en diferentes situaciones hidrodinámicas -aguas altas, aguas bajas- (Tabla 10.1), de acuerdo con Padilla (1990), aunque este

tipo de análisis presenta limitaciones cuando se comparan sistemas. Así, del conjunto de resultados obtenidos, se deduce que acuíferos con un importante grado de karstificación, como los de Sierra de las Nieves o Sierra Blanca presentan valores de dichos porcentajes parecidos al de un acuífero más inercial (acuífero de la Alfaguara), donde la mayor parte del drenaje se realiza en una situación hidrodinámica de aguas bajas (decrecida y agotamiento). Por el contrario, los resultados obtenidos en el manantial de la Cueva del Gato, muestran la importante influencia de los caudales en aguas altas procedentes de la presa de los Caballeros, al igual que los valores obtenidos en el manantial de El Tempul, que también están condicionados por la potencial recarga de parte de la escorrentía que circula por los arroyos de Bujalance y Bogaz. En definitiva, esta metodología presenta interés para la caracterización hidrogeológica de un sistema acuífero concreto; sin embargo, su utilidad como herramienta comparativa entre sistemas es limitada.

10.1.5. Análisis de la Transformada Continua *Wavelet*

Se trata de una metodología novedosa, cuya aplicación al estudio de series temporales de caudal y de precipitaciones de cada uno de los acuíferos analizados ha resultado interesante para:

- 1) corroborar, en parte, los resultados obtenidos por los restantes métodos de análisis hidrodinámico y
- 2) analizar la existencia de componentes de baja o alta frecuencia en las series de caudal, asociadas, respectivamente, a un menor o mayor grado de karstificación funcional y, por tanto, a un comportamiento más o menos inercial del acuífero (Labat *et al.*, 1999b). Sin embargo, la interpretación que hacen Labat *et al.* (*op.cit.*), relacionando la amplificación a largo término de los espectros de las series de caudal con la existencia de reservas de agua subterránea, no parece coherente con los resultados obtenidos en algunos de los acuíferos aquí investigados.

Otro aspecto a destacar, aunque de menor importancia dentro del contexto de la presente investigación, se relaciona con la utilidad de aplicar esta metodología a las series históricas de precipitación y caudal, para definir la existencia de ciclos interanuales, asociados a la alternancia de periodos secos y húmedos, así como conocer su variabilidad temporal. Estos aspectos deben de ser tenidos en cuenta para una correcta planificación y gestión de los recursos hídricos de las diferentes áreas de estudio (Andreo *et al.*, 2006b).

Las consideraciones anteriores pueden llevar a pensar que se trata de un método interesante para caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos investigados. No obstante, la exigencia en cuanto al tratamiento de los datos y la compleja interpretación de los resultados, sin parámetros cuantitativos o cualitativos de referencia que permitan diferenciar el carácter general del comportamiento de los acuíferos, hacen de esta metodología un instrumento no demasiado interesante para la caracterización y comparación de las respuestas naturales de los acuíferos carbonáticos.

10.1.6. Análisis de los resultados Hidroquímicos

Los parámetros derivados del análisis hidroquímico que se han recogido en la tabla 10.1 proceden de técnicas clásicas de tratamiento de este tipo de datos (ACP, diagrama de frecuencias), así como parámetros derivados del análisis de la propia evolución hidroquímica, indicativos de los comportamientos de la zona saturada y no saturada. No obstante, en el contexto de la caracterización comparativa, el principal problema del estudio hidroquímico radica en que, para los acuíferos considerados, hay pocas muestras de agua correspondientes a la crecida y muchas a la decrecida y agotamiento. Así, la mayoría de los métodos de tratamiento de datos hidroquímicos reflejan, fundamentalmente, el comportamiento para las situaciones de decrecida y agotamiento.

La evolución temporal de la conductividad eléctrica permite constatar que, en todos los manantiales, durante los periodos de recarga, se producen diluciones en la mineralización del agua, que se manifiestan por descensos en los valores de

conductividad eléctrica, provocados por la disminución en diferentes parámetros hidroquímicos. Estas diluciones se han estimado, desde un punto de vista cuantitativo (en %), asumiendo que el agua drenada antes de la crecida representa el 100% de la mineralización del agua subterránea y que la dilución producida durante la crecida es el resultado de la infiltración rápida de agua de lluvia, cuya conductividad eléctrica puede considerarse despreciable. Es evidente que este criterio presenta ciertas limitaciones, entre otras que el agua de lluvia tiene una mineralización (aunque sea baja) y antes de su mezcla con el agua almacenada en el acuífero disuelve materiales acuíferos, pero puede servir como un criterio comparativo más. Así, el valor máximo de estas diluciones (Tabla 10.1) se produce en el agua de los manantiales del Río Grande y Cueva del Gato, los cuales presentan los mayores coeficientes de variación de la conductividad eléctrica (por encima del 10%, Tabla 10.1). Ambos valores son indicativos de una karstificación funcional importante de los acuíferos que drenan, aunque en el caso del manantial de la Cueva del Gato, dichos resultados están fuertemente influenciados por la señal de entrada procedente de la presa de los Caballeros. Por el contrario, en el agua de Fuente Grande, se registran valores de dilución y del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica inferiores al 1,0% (Tabla 10.1), lo que demuestra la gran capacidad de filtro que tiene el acuífero de la Alfaguara ante las precipitaciones.

En el resto de las surgencias se detectan valores intermedios de los dos parámetros antes referidos, aunque cabe destacar los valores relativamente bajos de las disminuciones máximas en la conductividad eléctrica del agua de las surgencias de Benaoján y Nagüeles (Tabla 10.1). Los acuíferos drenados por estos manantiales presentan un desarrollo de la karstificación funcional relativamente importante, aunque con limitaciones del drenaje, lo cual condiciona la cantidad de agua de lluvia que participa en la mezcla drenada por los manantiales.

La correlación entre los porcentajes de dilución y el coeficiente de variación de la conductividad eléctrica es bastante alta (Figura 10.12A). No obstante, las surgencias de Benaoján y Río Genal presentan valores del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica por debajo del 5%, propios de sistemas con un flujo

de tipo difuso (*diffuse flow system*), según el criterio de Shuster y White (1971, 1972), mientras que los valores de dilución máxima reflejan un comportamiento hidrogeológico distinto (*conduit flow system*). No obstante, el escaso valor del coeficiente de variación de la conductividad eléctrica puede ser consecuencia de un exceso de medidas de las situaciones de decrecida y agotamiento.

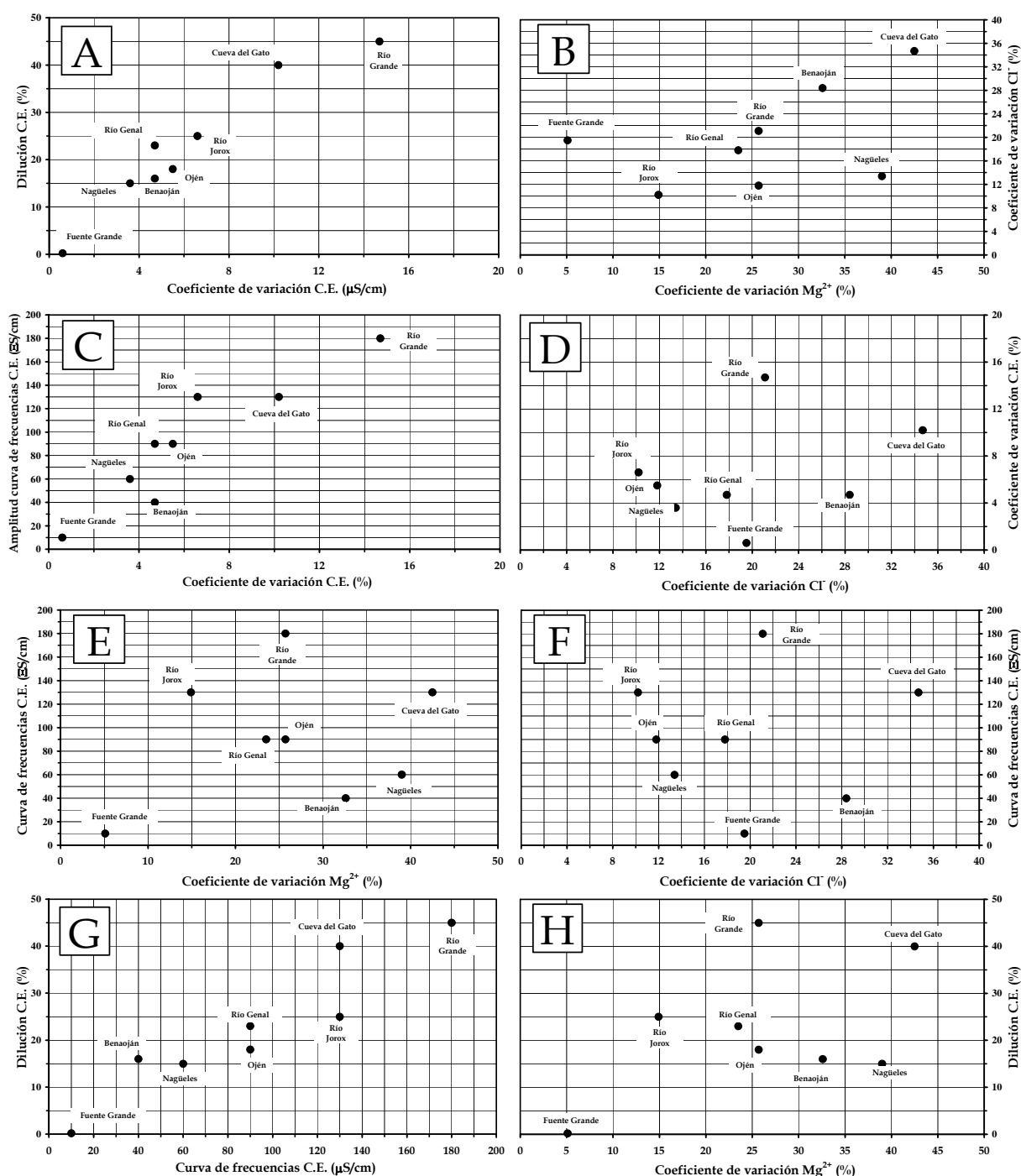


Figura 10.12. Representación gráfica en diagramas X-Y de diversos parámetros obtenidos mediante el estudio hidroquímico.

La mayoría de los gráficos X-Y, que incluyen a la conductividad eléctrica (coeficiente de variación, % de dilución hidroquímica máxima o rango de variación de la curva de frecuencias) como uno de los dos parámetros a representar, permiten diferenciar al manantial más inercial (Fuente Grande de Alfacar) del resto que presentan un comportamiento más de tipo kárstico (Figuras 10.12A, 10.12C, 10.12E, 10.12G y 10.12H). Dentro de este segundo grupo, los manantiales de Cueva del Gato (acuífero de Líbar) y Río Grande (sistema de las Nieves) se diferencian del resto. Ello es indicativo de un elevado grado de karstificación funcional en el caso del sector drenado por el manantial del Río Grande, así como la importante influencia, desde un punto de vista hidroquímico, que ejerce el agua procedente de la presa de los Caballeros sobre la surgencia de la Cueva del Gato, como se ha puesto de manifiesto en los capítulos 5 y 6 de esta memoria.

Las representaciones gráficas del coeficiente de variación del contenido en Cl⁻ frente a algunos de los restantes parámetros hidroquímicos (Figuras 10.12B, 10.12D y 10.12F) muestran una distribución ligeramente anárquica para el conjunto de surgencias analizadas. Sólo en la figura 10.12B se observa cierta agrupación, aunque conviene tener presente que el contenido en Mg²⁺, que informa sobre el mayor o menor tiempo de residencia del agua en el acuífero, puede estar influenciado, si se comparan los resultados de varios sistemas acuíferos, por la naturaleza caliza o calizo-dolomítica de los mismos.

La figura 10.13 muestra las curvas de frecuencia de la conductividad eléctrica de las aguas drenadas por el conjunto de manantiales estudiados en esta memoria. Todas las curvas presentan una moda principal, que caracteriza las aguas drenadas durante la mayor parte del tiempo (agotamiento y parte de la decrecida). No obstante, los rangos de variación que presentan estas curvas son muy diferentes. Así, la Fuente Grande de Alfacar muestra una curva unimodal, con el rango de variación más bajo de todos los manantiales (Tabla 10.1), lo que refleja un bajo grado de karstificación funcional. Por el contrario, los manantiales del Río Grande, Río Jorox y Cueva del Gato presentan los mayores rangos de variación de este parámetro, con una importante asimetría hacia los valores más

bajos de conductividad eléctrica debido, principalmente, a las diluciones del agua del acuífero por mezcla con el agua de infiltración menos mineralizada (Tabla 10.1). En el resto de surgencias (Nagüeles, Ojén, Benaoján y Río Genal), esta asimetría hacia los valores más bajos (procesos de dilución) es menor, de manera que muestran rangos de variación bastante más bajos que los que presentan los manantiales anteriores.

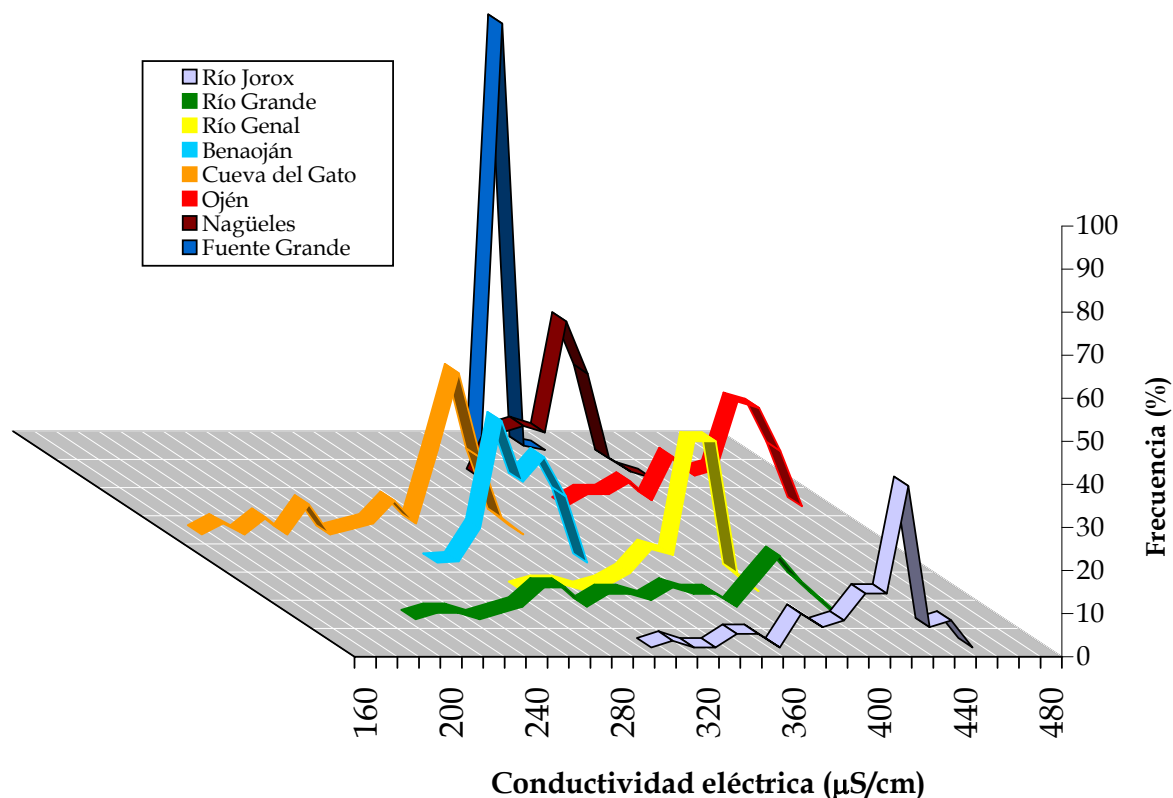


Figura 10.13. Diagramas de frecuencias elaborados a partir de los datos de conductividad eléctrica del agua medidos en los manantiales estudiados.

10.1.7. Análisis de los resultados Isotópicos

La evolución de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas subterráneas y de las aguas de precipitación, de los cuatro acuíferos en los que se han analizado, no siempre han mostrado variaciones significativas en respuesta a los episodios de recarga. En general, durante el periodo de estudio (años hidrológicos 1999/2000-2001/2002) no se aprecia claramente que la evolución de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de los diferentes manantiales muestre, amortiguadas o no, las variaciones relativas del

$\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia. Este hecho se debe, probablemente, a que la periodicidad de muestreo para análisis isotópicos no ha sido lo suficientemente adecuada, lo cual impide hacer precisiones más detalladas en este sentido.

Las curvas de frecuencia de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas drenadas por los diferentes manantiales muestran, para los cuatro acuíferos analizados, un destacable rango de variación, con varias modas de escasa frecuencia (Figura 10.14). De acuerdo con la interpretación clásica de este tipo de curvas (Bakalowicz *et al.*, 1974; Bakalowicz, 1979), los cuatro casos tendrían un comportamiento similar en cuanto al desarrollo de la karstificación funcional de los acuíferos que drenan. Sin embargo, esta hipótesis queda plenamente invalidada por los resultados obtenidos, en cada uno de los acuíferos, a partir de las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas.

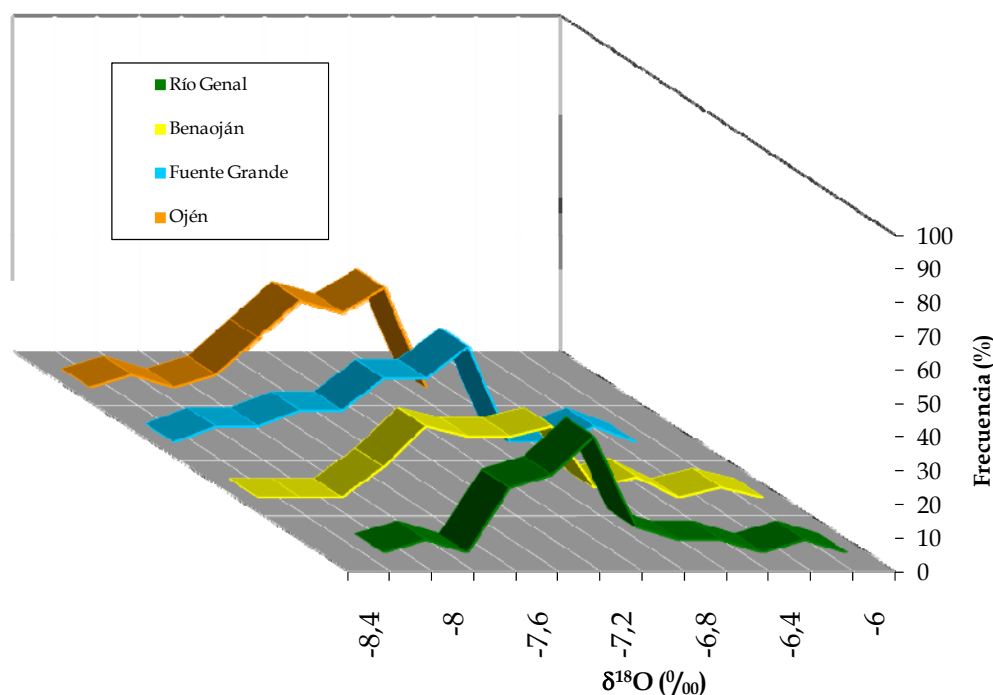


Figura 10.14. Diagramas de frecuencias elaborados a partir de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de los manantiales investigados.

Es conocido que las técnicas isotópicas son una metodología de investigación de gran interés en hidrogeología. Ahora bien, para caracterizar y comparar el funcionamiento hidrogeológico de acuíferos kársticos es necesario disponer de medios que permitan un muestreo con la periodicidad adecuada.

10.2. ANÁLISIS MULTIVARIANTE PARA LA PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS

Los resultados del apartado anterior (10.1) han permitido conocer las metodologías utilizables, teniendo en cuenta las limitaciones de cada una de ellas, y los parámetros que mejor explican la diversidad de comportamientos hidrogeológicos de los sistemas acuíferos investigados. Como complemento de este análisis y para poder establecer una clasificación de los acuíferos carbonáticos a escala regional, se ha tratado de constatar qué parámetros dan más información sobre el funcionamiento de los acuíferos y qué afinidades existen entre los diferentes acuíferos estudiados. Para ello, a partir de la información de cada uno de los manantiales considerados (Tabla 10.1), se han realizado varios Análisis de Componentes Principales (ACP) y tres Análisis Clúster.

10.2.1. Análisis de Componentes Principales

En un primer ACP, se han considerado las variables obtenidas a partir del estudio hidrodinámico, ya que éste permite analizar el mayor número de casos (manantiales). Los resultados de este primer ACP, para el campo de las variables (Figura 10.15A), muestran que los dos ejes o factores principales explican el 65% de la varianza. El factor I (40%) está caracterizado por la oposición entre un conjunto de variables cuyos valores elevados son propios de una alta inercia de los acuíferos, en la parte derecha del eje (positiva), frente a otras variables cuyos valores elevados indican justamente lo contrario, es decir, caracterizan un comportamiento de tipo kárstico, en la parte izquierda (negativa).

El factor II (25%) queda definido por la oposición entre el porcentaje del volumen de agua drenado en aguas altas respecto al total, frente al porcentaje drenado en aguas bajas. Además, en el lado positivo de este factor, se encuentra la precipitación, mientras que en la parte negativa está la velocidad de infiltración (η). Así, aunque en este primer ACP hay variables que son redundantes, en el campo de las observaciones (Figura 10.15B) se observa una primera separación de los puntos de descarga en función de su inercia: manantiales de comportamiento

kárstico –en sentido amplio– (Río Jorox, Nagüeles, Río Genal, Río Verde, Benaoján, Cueva del Gato y Ojén), en la parte izquierda del diagrama, de aquellos más inerciales (El Tempul y Fuente Grande), en la parte derecha.

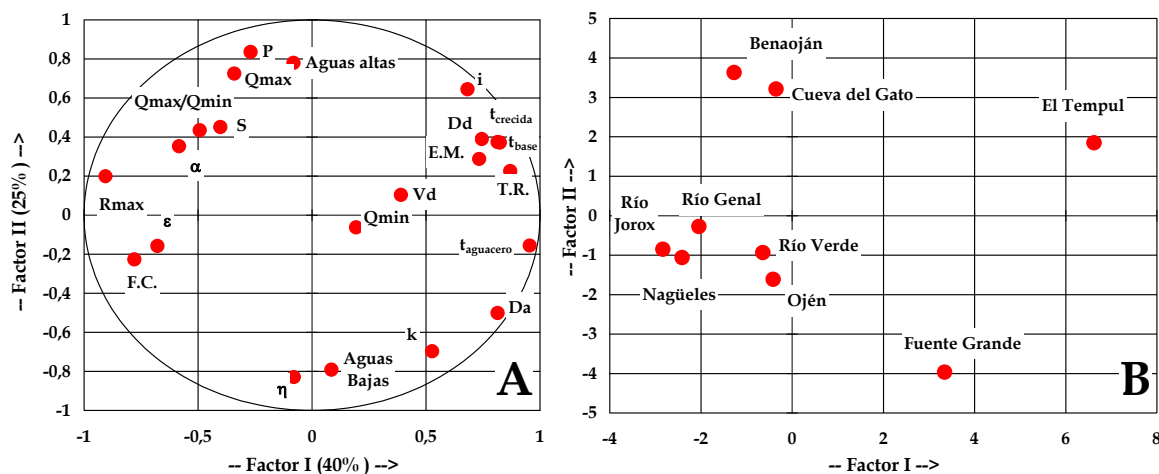


Figura 10.15. Representación de los factores I-II del primer ACP efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).

En un segundo ACP se han suprimido once variables ($t_{aguacero}$, t_{base} , $\overline{Q_{max}}$, $\overline{Q_{min}}$, η , i , k , E.M., F.C., R_{max} y % Aguas bajas), fundamentalmente, por dos razones: 1) proporcionan similar información que otras que se mantienen en el nuevo análisis y 2) la escasa representatividad de dichos parámetros deducida del análisis comparativo (apartado 10.1). Más en detalle, las razones de esta supresión se comentan a continuación.

- $t_{aguacero}$ y t_{base} : el primero depende, en gran medida, de la cantidad e intensidad de las precipitaciones y de la situación hidrodinámica precedente. El segundo se caracteriza a partir de la combinación de los parámetros duración de la decrecida (Dd) y duración del agotamiento (Da).
- $\overline{Q_{max}}$ y $\overline{Q_{min}}$: la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ incorpora la información de ambos parámetros.
- η , i , k : el primero es inversamente proporcional a la duración de la decrecida (Dd), mientras que los parámetros i - k se definieron para una

clasificación específica que plantea los inconvenientes descritos en el apartado 10.1.2.

- E.M., F.C. y R_{\max} : los dos primeros parámetros pueden considerarse semicuantitativos, mientras que el valor de R_{\max} depende del valor de la abscisa del correlograma cruzado para el cual se produce (véase el epígrafe 10.1.1). Dada la alta correlación entre estos tres parámetros y el tiempo de regulación (T.R.), se considera que esta última variable es la más representativa de todas las del análisis correlatorio y espectral.
- % Aguas bajas: aporta la misma información que % Aguas altas.

En el segundo ACP (Figura 10.16A), los dos primeros factores explican el 68% de la varianza. El factor I (42,0%), considerado como eje de la karstificación funcional, queda determinado por la oposición de la variable duración del agotamiento (Da) frente a la relación $\overline{Q_{\max}}/\overline{Q_{\min}}$ y α y, por otro, por la oposición entre el tiempo de regulación (T.R.), duración de la decrecida (Dd) y el tiempo de crecida frente al coeficiente de heterogeneidad (ε). En este caso, el factor II (26,0%) queda definido, básicamente, por la variable precipitación (P) y, en menor medida, por el % de volumen de agua drenado en aguas altas.

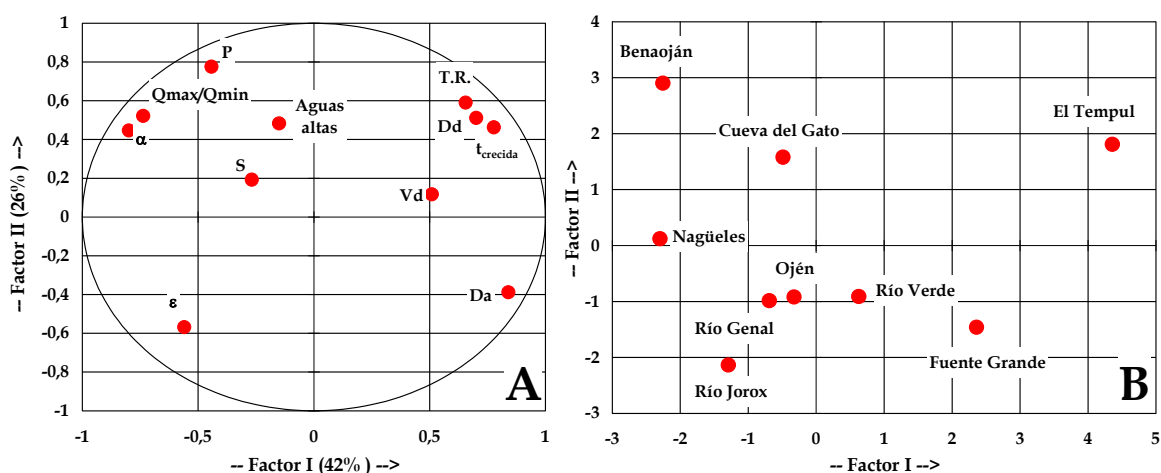


Figura 10.16. Representación de los factores I-II del segundo ACP efectuado a partir de una selección de parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).

En el plano I-II de las unidades estadísticas (Figura 10.16B) se siguen distinguiendo los dos grupos de manantiales: a la derecha, se encuentran los que drenan acuíferos inerciales (El Tempul y Fuente Grande) y, a la izquierda, se

sitúan las surgencias de los acuíferos kársticos. No obstante, se observa que la posición de Fuente Grande es más cercana a estos últimos debido, en gran medida, al control que ejerce la variable coeficiente de heterogeneidad (ε). Además, la situación de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato, dentro del plano factorial I-II, está fuertemente influenciada por la variable precipitación.

En un tercer ACP se han eliminado las variables precipitación, t_{crecida} , ε , V_d , y % de volumen de agua drenado en aguas altas, por las razones que se explican a continuación.

- Precipitación: aunque se ha mantenido durante los análisis anteriores, se trata de una variable estrictamente no intrínseca del acuífero.
- t_{crecida} , ε , V_d y % de volumen de agua drenado en aguas altas: no tienen un peso predominante en cuanto a su interés para la caracterización.

En este nuevo ACP (Figura 10.17A) los dos ejes principales explican mayor cantidad de varianza muestral (87,0%). El factor I (59,0%) está determinado, nuevamente, por la oposición de las variables $\overline{Q_{\text{max}}}/\overline{Q_{\text{min}}}$ y coeficiente de agotamiento (α) frente a la duración del agotamiento (D_a), por lo que parece bien claro que este es el factor que corresponde, en gran medida, al grado de karstificación funcional. El factor II (28,0%), en este caso (Figura 10.17), queda definido por la asociación entre las variables tiempo de regulación (T.R.) y duración de la decrecida (D_d), que al igual que el factor I, informa sobre el poder regulador del acuífero y, por tanto, sobre el grado de karstificación funcional del mismo.

En el campo I-II de las observaciones es posible diferenciar tres grupos de manantiales (Figura 10.17B). Así, en la parte izquierda del diagrama se sitúan las surgencias características de acuíferos con menor grado de karstificación (El Tempul y Fuente Grande), mientras que en la parte derecha se diferencian los otros dos grupos, ambos característicos de acuíferos más karstificados, uno constituido por los manantiales de Benaoján y Nagüeles y, el otro, formado por el resto de manantiales.

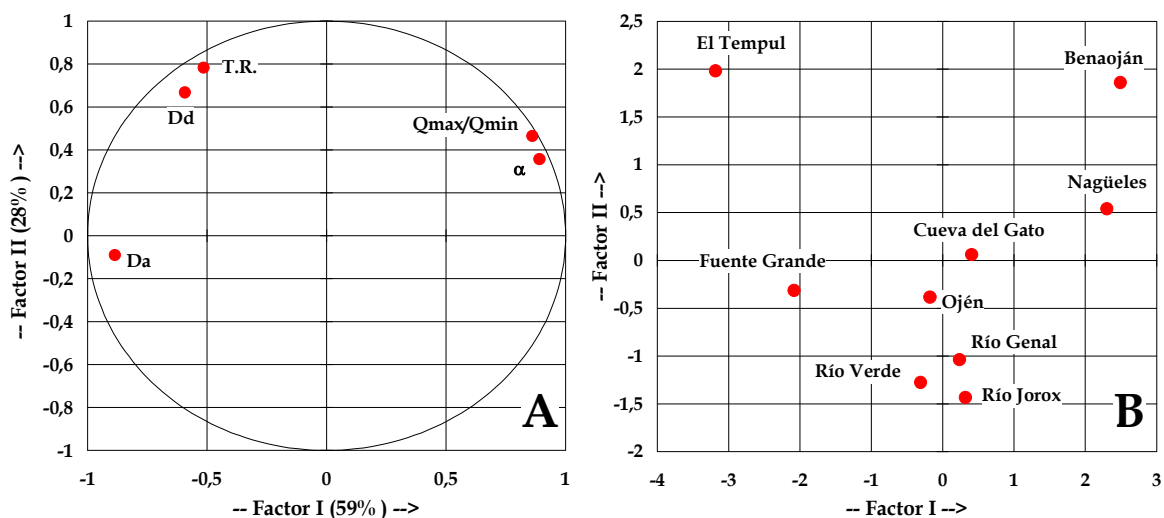


Figura 10.17. Representación de los factores I-II del tercer ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos (Tabla 10.1).

De forma análoga a como se ha hecho con la información hidrodinámica, se ha llevado a cabo un análisis de componentes principales con el conjunto de variables hidroquímicas consideradas (Tabla 10.1). Los dos ejes o factores principales de este ACP explican el 85,0% de la varianza muestral (Figura 10.18A). El factor I (63,0%) aglutina la mayor cantidad de información y está caracterizado por la casi totalidad de las variables analizadas. En gran medida, todas estas variables (porcentaje de dilución hidroquímica máxima, coeficiente de variación de la conductividad eléctrica -C.E.- y rango de variación de la curva de frecuencias de la conductividad eléctrica) aportan el mismo tipo de información, dado que caracterizan el comportamiento kárstico de los sistemas acuíferos investigados. El eje II (22,0%) queda definido, únicamente, por el coeficiente de variación del contenido en cloruros (Cl^-).

En el campo de las observaciones (Figura 10.18B) no se diferencian con tanta claridad, como en el caso de los ACP realizados con datos hidrodinámicos (Figuras 10.15, 10.16 y 10.17), los manantiales de comportamiento kárstico del manantial más inercial (Fuente Grande). Conviene recordar que del manantial de El Tempul no se ha llevado a cabo un control hidroquímico. No obstante, investigaciones posteriores sobre la respuesta hidroquímica del acuífero de la

Sierra de las Cabras (Perez Ramos *et al.*, 2005) corroboran el comportamiento inercial deducido en esta investigación, a partir de la respuesta hidrodinámica.

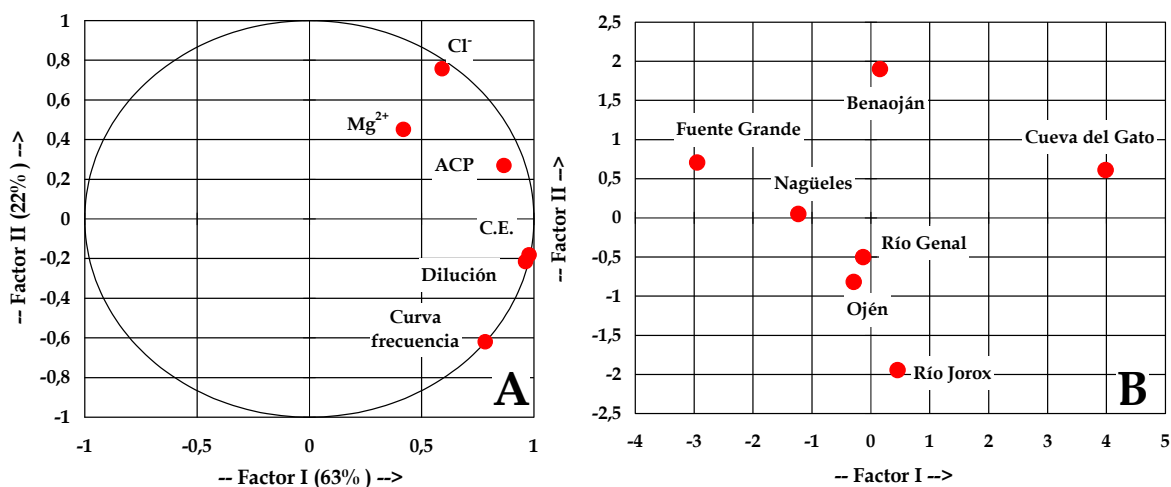


Figura 10.18. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con los parámetros hidroquímicos de los manantiales investigados (Tabla 10.1).

Los resultados obtenidos en el último ACP sugieren llevar a cabo un nuevo análisis conjuntamente con los parámetros hidrodinámicos resultantes de los tres primeros análisis de componentes principales. Por ello, se ha realizado un quinto ACP con los parámetros hidrodinámicos utilizados en el tercer ACP (Figura 10.17) y el conjunto de parámetros hidroquímicos recogidos en la tabla 10.1, para comprobar la relación entre los parámetros hidroquímicos e hidrodinámicos. En este nuevo ACP (Figura 10.19A), la inclusión de las variables hidroquímicas provoca que los dos ejes principales expliquen menos varianza muestral (70,0%). El factor I (41,0%) está determinado por las variables contenido en Mg^{2+} y α frente a la duración del agotamiento (D_a), mientras que el factor II (29,0%), queda definido, con mucha menos claridad que el factor I, por la variable $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ frente a la oposición del rango de variación de la curva de frecuencias de la conductividad eléctrica. Ambos factores explican el comportamiento más o menos kárstico de los acuíferos y, por tanto, el poder regulador (inercia) de los mismos, que algunos autores han relacionado, históricamente, con la existencia de reservas en los acuíferos. Esta deducción ha podido llevar a diagnósticos equivocados en muchos casos, ya que se debería relacionar con la capacidad del acuífero para

regular o modular los recursos medios renovables y no con las reservas y, por tanto, no informaría sobre éstas últimas.

En el campo I-II de las unidades estadísticas (Figura 10.19B), aunque de forma menos clara, pueden distinguirse los tres grupos de manantiales descritos en el tercer ACP realizado sólo con datos hidrodinámicos (Figura 10.17B). Así, en la parte derecha del diagrama se ubica la surgencia característica de un acuífero con menor grado de karstificación (Fuente Grande), mientras que en la parte izquierda se diferencian los otros dos grupos, ambos característicos de acuíferos más karstificados, uno constituido por los manantiales de Benaoján y Nagüeles y, el otro, formado por el resto de acuíferos.

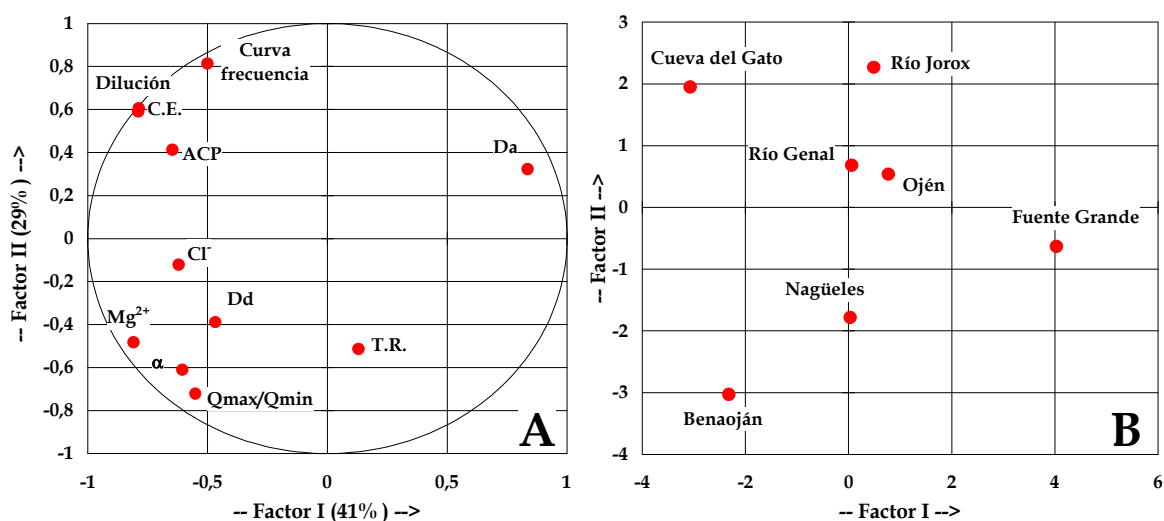


Figura 10.19. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos y la totalidad de los parámetros hidroquímicos (Tabla 10.1).

Un sexto y último ACP (Figura 10.20A), en el que se han eliminado variables hidroquímicas que son redundantes (Dilución, ACP y Curva de frecuencias) y otras que no parecen tener un peso predominante (coeficiente de variación del contenido en cloruros), permite llegar a los mismos resultados del ACP previo, aunque aumenta la varianza muestral (los dos primeros ejes dan cuenta del 75,0%). El factor I (54,0%) está definido por la oposición de las variables $\overline{Q_{max}/Q_{min}}$, α y el coeficiente de variación del contenido en Mg^{2+} frente a la duración del agotamiento (Da), mientras que el factor II (21,0%) queda caracterizado por la oposición del tiempo de regulación (T.R.) frente al coeficiente de variación de la

conductividad eléctrica (C.E.). Ambos factores nos informan, de nuevo, sobre el mayor o menor comportamiento kárstico de los sistemas acuíferos investigados.

En el plano I-II de las unidades estadísticas (Figura 10.20B) se observa a la izquierda, la surgencia característica de un acuífero poco karstificado (Fuente Grande) y, a la derecha, se sitúan dos grupos de surgencias que drenan acuíferos más karstificados, uno constituido por los manantiales de Benaoján, Nagüeles y Cueva del Gato y, el otro, formado por el resto de manantiales.

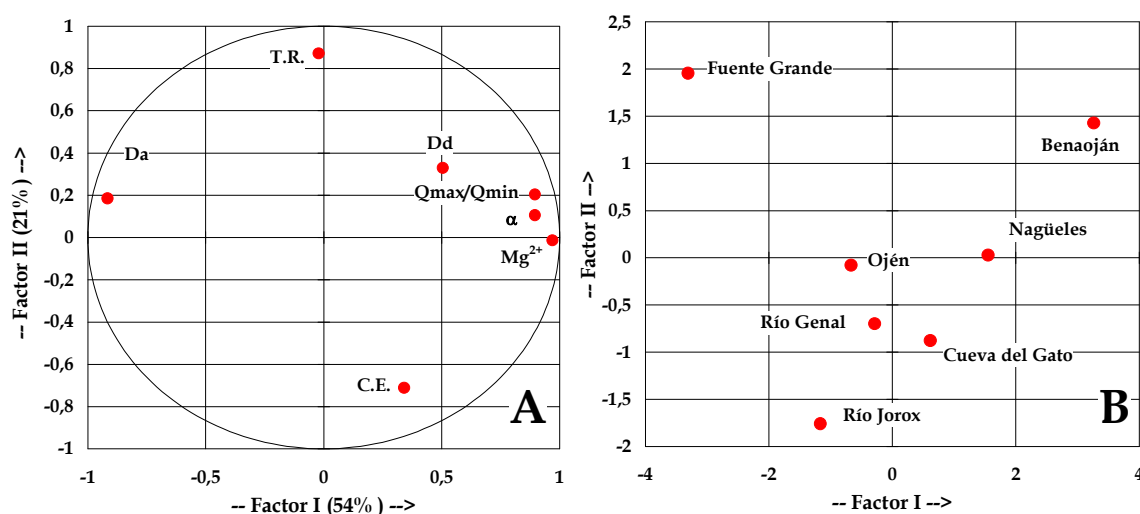


Figura 10.20. Representación de los factores I-II del ACP efectuado con una selección de los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos de las surgencias analizadas (Tabla 10.1).

10.2.2. Parámetros para una clasificación de los acuíferos carbonáticos

A partir de los análisis de componentes principales se han establecido los parámetros, tanto hidrodinámicos como hidroquímicos, que dan la mayor información posible para caracterizar y clasificar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos: $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, el coeficiente de agotamiento (α), el coeficiente de variación del contenido en Mg^{2+} , tiempo de regulación y el coeficiente de variación de la conductividad eléctrica. En la figura 10.21 se muestra la combinación de estos parámetros, en seis diagramas X-Y, donde los manantiales se distribuyen, dentro del diagrama, en función de su comportamiento hidrogeológico, de manera que desde la parte inferior izquierda a la superior derecha del gráfico, aumenta el grado de karstificación funcional,

disminuye la inercia y la capacidad de regulación de los recursos medios renovables.

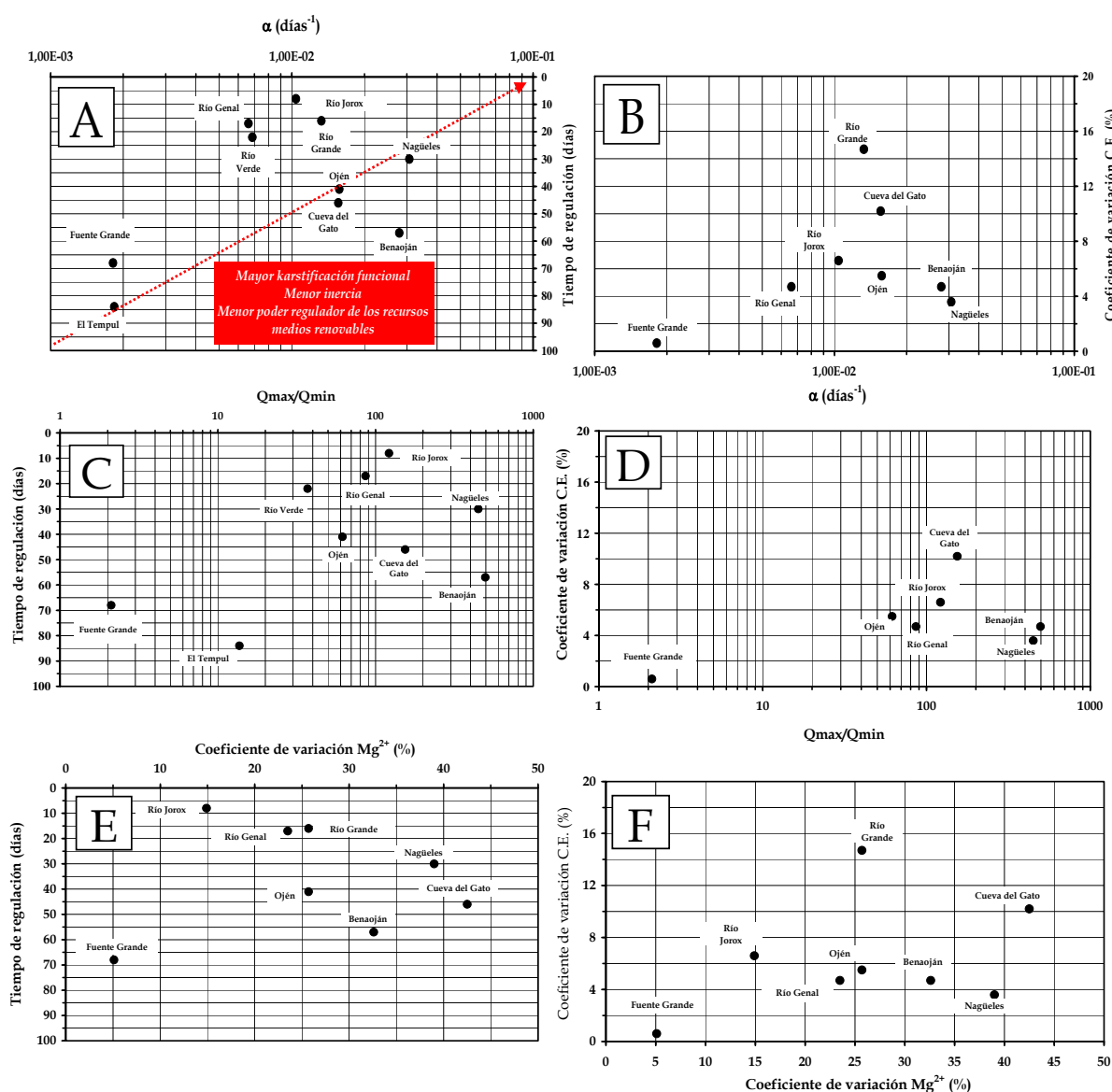


Figura 10.21. Representación gráfica de los acuíferos estudiados a partir de los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos significativos a efectos de caracterización hidrogeológica.

En todos los gráficos de la figura 10.21 se pueden diferenciar los sistemas más inerciales (drenados por los manantiales de El Tempul y Fuente Grande) del resto, que presentan un comportamiento eminentemente más kárstico. Del mismo modo, en la mayor parte de los gráficos, los manantiales de Nagüeles y los del acuífero de la Sierra de Líbar (Benaoján y Cueva del Gato) se muestran como los ejemplos más representativos de un acuífero con flujo de tipo kárstico. El resto de surgencias, pertenecientes a los acuíferos de las Sierras de las Nieves, Prieta-

Bonela y Blanca (manantial de Ojén), se sitúan en una posición intermedia entre los dos grupos definidos anteriormente (Figura 10.21), si bien la posición varía dependiendo del parámetro característico que se represente.

Por otra parte, no todos los manantiales de un sistema acuífero presentan la misma ubicación dentro del conjunto de diagramas X-Y (Figura 10.21). Así, la posición del manantial del Río Verde muestra que el sector del acuífero de las Nieves drenado por esta surgencia tiene cierta capacidad reguladora, mientras que la posición del manantial del Río Genal y, sobre todo, del manantial del Río Grande es característica de un sector de acuífero con mayor grado de karstificación.

Las posiciones de los manantiales de los sistemas de Ojén (manantial de Ojén) y Prieta-Bonela-Alcaparaín (manantial del Río Jorox) en los gráficos de la figura 10.21 varían según los parámetros representados. No obstante, la surgencia de Ojén presenta, mayoritariamente, una posición algo más cercana a los sistemas de carácter inercial, mientras que para la surgencia del Río Jorox se observa todo lo contrario.

En definitiva, la distribución de las surgencias en función de los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos que aglutinan la mayor información sobre el comportamiento hidrogeológico global de los acuíferos carbonáticos, pone de manifiesto un patrón aproximado de los diferentes comportamientos. No obstante, queda claro que no existe una jerarquización única e inequívoca, a partir de la combinación de dos de estos parámetros y, por tanto, es la conjunción de varios de éstos, incluidos el tamaño y el contexto climático (volumen de precipitaciones), los que se deben de tener en cuenta para una correcta caracterización

10.2.3. Análisis Clúster

Como colofón de los análisis multivariantes, para resumir las afinidades existentes entre los diferentes acuíferos piloto investigados, se han realizado tres análisis clúster. El número de variables y muestras (acuíferos) no es elevado, pero suficiente para determinar las relaciones entre los parámetros y acuíferos

considerados. En concreto, se han realizado tres análisis clúster, con sus correspondientes dendrogramas, a partir los siguientes datos: de todas las variables hidrodinámicas (Figura 10.22), de todas las variables hidrodinámicas e hidroquímicas (Figura 10.23) y de todas las variables hidrodinámicas de los manantiales que drenan los acuíferos menos inerciales (Figura 10.24).

El dendrograma de las variables con los datos derivados del análisis hidrodinámico (Figura 10.22A) muestra, al igual que para los análisis de componentes principales, dos agrupaciones principales que diferencian los parámetros con un comportamiento de tipo kárstico de aquéllos que reflejan lo contrario (comportamiento de acuífero de flujo difuso). El dendrograma resultante de las surgencias analizadas (Figura 10.22B) pone de manifiesto la relación existente entre los manantiales que drenan un mismo sistema acuífero, así como una agrupación (clúster) de las surgencias de las Sierras de las Nieves, Prieta-Bonela y Blanca, intermedia entre los manantiales inerciales (El Tempul y Fuente Grande) y los de tipo kárstico (Cueva del Gato y Benaoján).

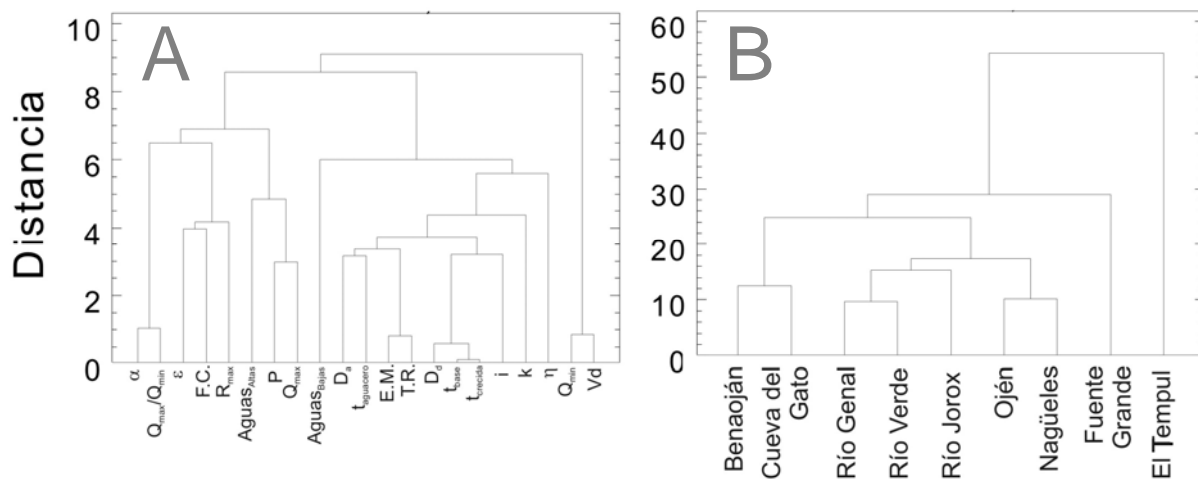


Figura 10.22. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales investigados.

El análisis clúster del conjunto de todas las variables (hidrodinámicas e hidroquímicas) muestra un dendrograma (Figura 10.23A) con una agrupación principal, que incluye la mayor parte de los parámetros hidrodinámicos y todas las variables hidroquímicas. El dendrograma de las surgencias (Figura 10.23B) corrobora, nuevamente, la agrupación de los manantiales en función de los

sistemas acuíferos que drenan, así como la afinidad de los acuíferos de las Sierras de las Nieves, Prieta y Blanca, que se sitúan en una posición intermedia entre los de funcionamiento más kárstico (Benaoján y Cueva del Gato en Sierra de Lívar) y más inercial (Fuente Grande en Sierra de Alfacar).

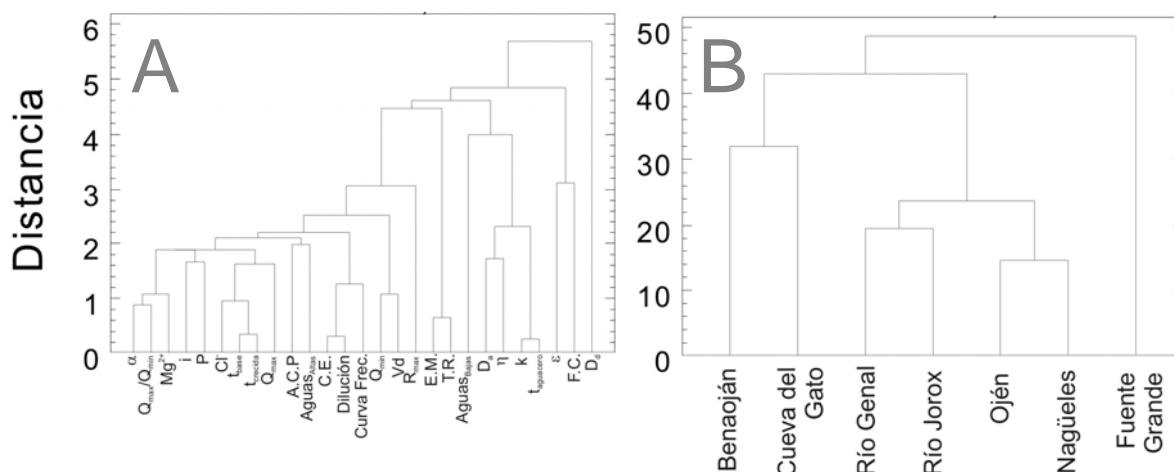


Figura 10.23. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos e hidroquímicos de los manantiales investigados.

Por último, el análisis clúster de los datos hidrodinámicos correspondientes a los manantiales con un comportamiento menos inercial (Figura 10.24) muestra un dendrograma de surgencias en el que destaca, nuevamente, la afinidad o similitud entre los manantiales de las Sierras de las Nieves, Prieta-Bonela y Blanca. Los manantiales de estos acuíferos presentan un funcionamiento hidrogeológico de tipo intermedio o más inercial dentro de la categoría de acuíferos kársticos, de la cual son representativos los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato.

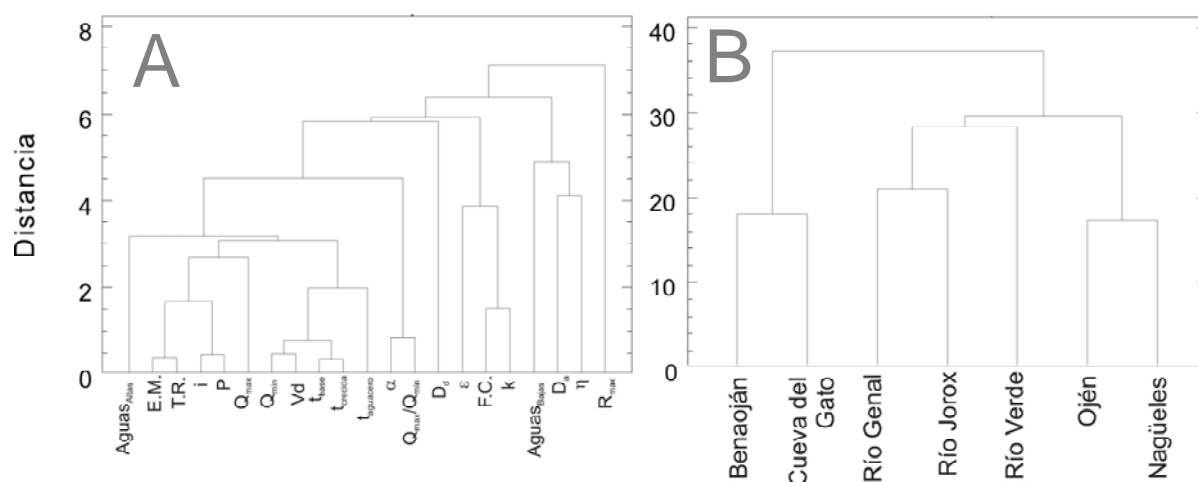


Figura 10.24. Dendrogramas resultantes del análisis clúster efectuado con todos los parámetros hidrodinámicos de los manantiales acuíferos menos inerciales.

En definitiva, las agrupaciones de las variables del conjunto de análisis clúster confirman las afinidades ya detectadas en el Análisis de Componentes Principales, mientras que los dendrogramas de surgencias ponen de manifiesto la afinidad o similitud entre los manantiales de un mismo marco geográfico (precipitaciones), geológico, geomorfológico e hidrogeológico y la agrupación de las surgencias de la Sierra de las Nieves, Prieta-Bonela y Blanca entre dos tipos extremos: uno, de flujo difuso (Sierra de la Alfaguara y Sierra de las Cabras) y, otro, de flujo por conductos (Sierra de Líbar), aunque más cercano a este último tipo de acuífero.

10.3. PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA

Los análisis multivariantes y la posterior discusión de los dos apartados anteriores han permitido, por un lado, evaluar qué parámetros son más adecuados para caracterizar el funcionamiento de los acuíferos (grado de karstificación y poder regulador) y, por otro, comprobar qué agrupaciones se establecen entre los diferentes acuíferos piloto estudiados. A partir de esta información, se propone una clasificación de acuíferos carbonáticos del Sur de España formada por tres tipos básicos (tabla 10.2):

- A.** Sistemas de tipo KÁRSTICO o de flujo predominante por conductos
- B.** Sistemas de tipo FISURADO o de flujo difuso
- C.** Sistemas de tipo INTERMEDIO entre los dos anteriores. Esta categoría se subdivide en dos subtipos: INTERMEDIO KÁRSTICO e INTERMEDIO FISURADO

En esta clasificación, además de catalogar los diferentes ejemplos estudiados a partir de los distintos parámetros considerados, se incluyen otras características de los acuíferos (precipitación, superficie, características geológicas y geomorfológicas). En dicha clasificación (Tabla 10.2), se han incluido dos columnas con ejemplos de otros acuíferos del ámbito de estudio (Sur de España), que se pueden asignar a cada una de las categorías tipo. La primera columna

según los resultados obtenidos por otros autores en investigaciones previas y la segunda en función del grado de similitud de estos macizos carbonáticos (características hidrogeológicas geológicas y geomorfológicas) con los acuíferos tipo. Además, se incluye una propuesta de integración, en estas categorías, de otros acuíferos de diferentes regiones de España y del Sur de Francia, si bien éstas se ubican en un contexto climático muy diferente.

A continuación se detallan las principales características que definen a cada uno de los tipos establecidos en esta clasificación (Tabla 10.2).

Sistemas de tipo KÁRSTICO

Esta clase se caracteriza a partir de las respuestas naturales de los manantiales que drenan el sector nororiental del acuífero de la Sierra de Líbar: Benaoján y Cueva del Gato. Los acuíferos de este tipo están ubicados en áreas donde las precipitaciones son muy elevadas y las componentes litológica y estructural han permitido un importante desarrollo del modelado exokárstico y endokárstico (gran cantidad de formas de absorción activas), lo que facilita que la infiltración y agotamiento se produzcan de una manera rápida (flujo predominante por conductos), y que existan importantes diferencias entre los caudales máximos y mínimos. Al mismo tiempo, el alto grado de jeraquización de los conductos provoca importantes disminuciones de la temperatura del agua y procesos de dilución, indicativos de un poder regulador muy bajo.

Además de los acuíferos tipo de la Sierra de Líbar, de acuerdo con los resultados obtenidos por otros autores tanto en el manantial de Guaro (López Chicano, 1992) como en los manantiales de Cañamero, Fuensanta e Hierbabuena (Barberá y Andreo, 2008), se pueden incluir en esta categoría el sector meridional del acuífero de Sierra Alhama-Sierra Gorda de Loja y una gran parte de los acuíferos carbonatados situados al Este de Ronda (Sierras Hidalga, Blanquilla y Merinos). Por otro lado, los resultados obtenidos pueden ser extrapolables a otros macizos carbonáticos andaluces como la Sierra de Grazalema y algunos sectores de la Sierra de Segura (Moral, 2005).

TIPO DEFINIDO	Manantial	Sistema Acuífero	$\frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	α (días ⁻¹)	v (%) Mg ²⁺	T.R. (días)	v (%) C.E.	P (mm)	S (km ²)	CARACTERÍSTICAS		Ejemplos Sur de España Manantial-Sistema acuífero (referencia)	Ejemplos Sur de España Macizos carbonáticos	Otros ejemplos Manantial (referencia)
										Geológicas	Geomorfológicas Formas de absorción activas			
KÁRSTICO	Benaoján	Sector nororiental de la Sierra de Líbar	497	0,0279	42,5	57	4,7	1492	67	Calizas y dolomías Pliegues en cofre	Exokarst y Endokarst muy desarrollado Muy abundantes	Guaro-Sierra Alhama y sector meridional de Sierra Gorda de Loja (López-Chicano, 1992) Cañamero-Sierras Hidalga-Blanquilla-Merinos (Barberá y Andreo, 2008)	Sierra de Grazalema Sierra de Segura	Aliou (Mangin, 1975) Baget (Mangin, 1975) Argin (Antigüedad, 1986) Olalde (Antigüedad, 1986) San José (Obartí et al.; 1986) Fonts del Llobregat (Ramonedá et al., 1999)
	Cueva del Gato	Sector nororiental de la Sierra de Líbar	154	0,0156	32,6	46	10,2	1492	67					
INTERMEDIO KÁRSTICO	Nagüeles	Sistema de Marbella	448	0,0294	39,0	30	3,6	898	24	Mármoles calizos Interferencia de pliegues	Exokarst poco desarrollado y Endokarst desarrollado Poco abundantes	La Villa-Torcal de Antequera (Thauvin, 1991; Pulido, 1993; Jiménez et al., 2002b) Villanueva del		
	Genal	Sistema de las Nieves	86	0,0066	23,5	17	4,7	971	103	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst desarrollado Abundantes	Rosario-Sector oriental de las Sierras de Camarolos y Gorda (Mudarra et al., 2008) La Yedra-Sierra de las Cabras (Mudarra y Andreo, 2009)	Sierra del Valle de Abdalajís Sierra de Jarastepar Sierras de Cabra, Rute-Horconera Sierras de Pandera-Parapanda	Fontestorbes (Mangin, 1975) Font Major (Mangin et al., 1983) Bastareny (Ramonedá et al., 1999) Salubita (Mugerza, 2001)
	Grande	Sistema de las Nieves	127	0,0133	25,7	16	14,7	971	103	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst desarrollado Abundantes	Maro-Alberquillas (Liñán et al., 2000) Fájara-Sierra Tejeda meridional (Pérez Ramos y Andreo, 2007)		
	Jorox	Sistema Prieta-Bonela - Alcaparaín	122	0,0092	14,9	8	6,6	578	44	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Poco abundantes			
INTERMEDIO FISURADO	Ojén	Sistema de Ojén	62	0,0157	25,7	41	5,5	898	13	Mármoles dolomíticos y calizos Interferencia de pliegues	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Poco abundantes	Fuente del Tejo-Calar del Espino (Moral, 2005) Natividad-Sierra Seca (Moral, 2005) Parroso-Sector occidental de las Sierras de Camarolos y Gorda de Villanueva del Trabuco (Mudarra et al., 2008)	Sierra Tejeda septentrional Sierra Almirajara Sierra de Lújar Sierra de Gádor	Arteta (Sahuquillo et al., 1987)
	Verde	Sistema de las Nieves	37	0,0069	25,0 ⁽¹⁾	22	3,0 ⁽¹⁾	971	103	Calizas y dolomías Sinclinal tumbado	Exokarst y Endokarst desarrollado Muy abundantes			
FISURADO	Fuente Grande	Sistema de Alfacar	2	0,0018	5,1	68	0,6	482	20	Calizas y dolomías Escamas tectónicas	Exokarst poco desarrollado y Endokarst desarrollado Poco abundantes	Riofrío-Sierra Gorda de Loja (López-Chicano, 1992) Torremolinos-Sierra de Mijas (Andreo, 1997) Coín-Sector oriental de Sierra Blanca (Andreo, 1997)	Sierra de Cañete Sierra Arana	Los Santos (Obartí, 1987) La Esperanza (Garay, 2000) Berro (Garay, 2000)
	El Tempul	Sierra de las Cabras	14	0,0018	5,5 ⁽²⁾	84	1,0 ⁽²⁾	815	34	Calizas y dolomías Estructura anticlinal	Exokarst y Endokarst poco desarrollado Escasas	Los Molinos-Sierra de María (Moreno Calvillo, 1980)		

Tabla 10.2. Propuesta de clasificación de acuíferos carbonáticos del Sur de España.⁽¹⁾ Dato tomado de Liñán (2003) para el periodo de estudio 1995/1996-1997/1998. ⁽²⁾ Dato tomado de Perez Ramos et al. (2005) para el año hidrológico 2003/2004.

Sistemas de tipo FISURADO

Corresponden a este tipo los sistemas drenados por las surgencias de Fuente Grande de Alfacar y de El Tempul, principales puntos de drenaje de los acuíferos de la Alfaguara y de la Sierra de las Cabras, respectivamente. Se trata de acuíferos enclavados en zonas con valores de precipitación moderada y que, en su mayoría, están formados por dolomías y calizas fuertemente plegadas y fracturadas con escaso desarrollo de las formas kársticas de absorción. De este modo, el análisis de sus respuestas naturales, tanto hidrodinámico como hidroquímico, revela un modelo de acuífero carbonático muy inercial con escaso grado de karstificación funcional y gran poder regulador. Además de los acuíferos anteriores, los resultados obtenidos por Andreo (1997) en los sistemas de Torremolinos (Sierra de Mijas) y Coín (sector oriental de Sierra Blanca), así como por López-Chicano (1992) en el macizo carbonático de Sierra Gorda de Loja (manantiales de Riofrío) y Moreno Calvillo (1980) en Sierra de María (manantiales de los Molinos), permiten incluir a dichos sistemas acuíferos en esta categoría. Aparte de éstos, a este tipo pueden atribuirse también la Sierra de Cañete y Sierra Arana.

Sistemas de tipo INTERMEDIO

Entre los dos tipos extremos definidos se encuentran el resto de sistemas, agrupados en una gran clase, que se divide, a su vez, en dos subtipos.

El primer subtipo, definido como INTERMEDIO KÁRSTICO, está caracterizado por las respuestas naturales de las surgencias que drenan los sistemas acuíferos de Marbella (Nagüeles), Prieta-Bonela-Alcaparaín (Río Jorox) y de sectores del acuífero de la Sierra de las Nieves (Ríos Genal y Grande). Este tipo de acuíferos presenta características muy similares al denominado de tipo KÁRSTICO (precipitaciones medias-altas, exokarst y endokarst desarrollados, con formas de absorción activas aunque menores que en el de tipo kárstico) y, mayoritariamente, dan una respuesta hidrodinámica e hidroquímica análoga a éstos. No obstante, presentan un menor grado de jerarquización de los conductos (menor

karstificación funcional), lo que provoca que algunas de sus respuestas naturales, tanto hidrodinámicas como hidroquímicas, muestren cierto grado de inercialidad. Este mismo tipo de comportamiento ha sido puesto de manifiesto, anteriormente, para la surgencia de La Villa (Thauvin, 1991; Pulido, 1993; Jiménez *et al.*, 2002b), principal punto de drenaje del acuífero del Torcal de Antequera. La respuesta del manantial de Villanueva del Rosario (Mudarra *et al.*, 2008) y del manantial de la Yedra (Mudarra y Andreo, 2009) muestran que una gran parte de los acuíferos carbonáticos de las Sierras de las Cabras y del sector oriental de las Sierras de Camarolos y Gorda de Villanueva del Trabuco se pueden incluir en esta categoría. Del mismo modo, las respuestas de los manantiales de Maro (Liñán *et al.*, 2000) y de la Fájara (Pérez-Ramos y Andreo, 2007), ponen de manifiesto que tanto el acuífero de las Alberquillas (Sierra de Almirajara meridional) como los constituidos por los mármoles calizos alpujárrides de Sierra Tejeda meridional deben de englobarse dentro de esta categoría. Por último, en esta tipología se pueden encuadrar también los acuíferos de la Sierra del Valle de Abdalajís y Sierra de Jarastepar, así como otros acuíferos subbéticos del sur de las provincias de Córdoba (Sierra de Cabra, Rute-Horconera) y Jaén (Sierras de Pandera-Parapanda).

El segundo subtipo, denominado INTERMEDIO FISURADO, se define a partir de las respuestas naturales de los manantiales de Ojén (Sierra Blanca) y Río Verde (Sierra de las Nieves). En este caso, las características climáticas y geológicas de cada uno de los ejemplos considerados son diferentes. Así, el acuífero de Ojén se ubica en un sector con precipitaciones de 800-900 mm, constituido por un macizo de mármoles dolomíticos y calizos afectados por una estructura geológica formada por pliegues isoclinales, lo cual dificulta la existencia de formas exokársticas de absorción. Todas estas características le confieren al acuífero un mayor poder regulador que el observado para el subtipo anterior, según se deduce de sus respuestas naturales. En cambio, el sector del acuífero de la Sierra de las Nieves drenado por el manantial del Río Verde presenta las mismas características que el resto de surgencias del acuífero que drena (precipitaciones altas, exokarst y endokarst desarrollados), pero sus respuestas naturales indican un mayor poder

regulador debido a que la karstificación funcional de algunos de sus sectores es baja. Además de los acuíferos anteriores, los resultados obtenidos por Moral (2005) en los sistemas acuíferos del Calar del Espino y Sierra Seca (Sierra de Segura), a partir del análisis de las surgencias de la Fuente del Tejo y la Natividad respectivamente, así como por Mudarra *et al.* (2008), en el sector occidental de las Sierras de Camarolos y Gorda de Villanueva del Trabuco (manantial del Parroso), permiten incluir a dichos sistemas acuíferos en esta categoría. Al mismo tiempo, en esta clase se pueden encuadrar los acuíferos formados por dolomías alpujárrides de Sierra Tejeda septentrional, Sierra Almirajara y las Sierras de Lújar y Gádor.

De esta propuesta de clasificación para sistemas acuíferos del Sur de España se deducen dos particularidades a destacar:

1. Los sistemas de tipo KÁRSTICO definidos corresponden a acuíferos binarios (importante presencia de cuencas vertientes -poljes-) en zonas de elevada pluviometría. De este modo, sistemas acuíferos con formas de absorción de menor importancia (dolinas, lapiaces) pero con ausencia o presencia minoritaria de poljes activos y/o ubicadas en un contexto climático de menor pluviometría, presentan un comportamiento que refleja un menor grado de karstificación funcional y, por tanto, se hallan en la categoría INTERMEDIO KÁRSTICO. El sistema acuífero del Torcal de Antequera constituye un claro ejemplo de esta última categoría.
2. Sistemas acuíferos con unas características geológicas y geomorfológicas propias de la tipología KÁRSTICO presentan un comportamiento propio de un sistema de tipo FISURADO debido al elevado tamaño de los mismos (ej. Sierra Gorda de Loja). Por el contrario, sistemas de pequeñas dimensiones con características geológicas y geomorfológicas propias de sistemas más inerciales, presentan parámetros característicos de acuíferos poco inerciales, debido a su reducido tamaño (ej. Sistema de Marbella y Sistema Prieta-Bonela meridional).

Por tanto, parece evidente que no se puede establecer una clasificación única, en cuanto a una serie de parámetros determinados que informen, inequívocamente, sobre el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos del Sur de España, sino que es la combinación de varios de éstos, incluidas el tamaño y el contexto climático (volumen de precipitaciones) lo que debe de tenerse en cuenta para un correcta caracterización y clasificación.

11. CONCLUSIONES

Tras la exposición de los principales resultados y la discusión de los mismos, en este último capítulo de la memoria se plantean las principales conclusiones, que se han dividido en dos grupos. Por un lado, las relacionadas directamente con los resultados de la caracterización del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos estudiados y su comparación en un mismo marco temporal. Por otro, aquellas conclusiones que pueden considerarse como metodológicas, relativas a la aplicabilidad de los diferentes métodos o técnicas utilizadas, así como de la propuesta de clasificación de los acuíferos carbonáticos a partir de sus respuestas naturales.

11.1. SOBRE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El *sistema acuífero de la Sierra de las Cabras*, con una superficie aproximada de 34 km², constituye el sistema más occidental de los analizados y está formado por afloramientos de calizas y dolomías que presentan un escaso desarrollo de formas kársticas. La precipitación media sobre la Sierra de la Cabras ha sido de 815 mm. El estudio hidrodinámico del principal punto de descarga de este sistema acuífero, el manantial de El Tempul, ha puesto de manifiesto que con la mayoría de las metodologías aplicadas (análisis del hidrograma, estudio de las curvas de recesión, análisis correlatorio y espectral, análisis de caudales clasificados y análisis *wavelet*) se han obtenido valores característicos de una importante capacidad de amortiguación de la señal de entrada y de un gran poder regulador. En definitiva, este sistema presenta un comportamiento hidrogeológico predominantemente inercial, indicativo de un escaso grado de karstificación funcional y, en este caso, también de la existencia de reservas de agua subterránea.

El *sector nororiental de la Sierra de Líbar* ocupa una superficie aproximada de 65 km² y constituye un sistema acuífero formado por calizas y dolomías, cuya disposición subhorizontal, junto con la importante fracturación, y la elevada precipitación de la zona (1492 mm/año de valor medio para el periodo de estudio)

han dado lugar al mayor desarrollo del modelado kárstico de todos los sistemas investigados. Desde el punto de vista hidrodinámico, la mayor parte de los tratamientos realizados a partir de la descarga natural de los manantiales de Benaoján y Cueva del Gato, ha revelado el comportamiento eminentemente kárstico del sistema que drenan. Así, los valores de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, los parámetros característicos de la decrecida y agotamiento (análisis de la curva de recesión) y la aplicación de la transformada *wavelet* permiten constatar que el acuífero presenta una escasa capacidad de filtro frente a las precipitaciones, debido al elevado grado de karstificación funcional. Los resultados del análisis correlatorio y espectral muestran la existencia de flujos rápidos en las zonas de mayor desarrollo de la karstificación, pero también una respuesta impulsional más lenta, característica de un sistema algo más inercial. Así, en el sector de acuífero drenado por el manantial de Benaoján existe un menor desarrollo de la karstificación funcional, como demuestran los valores obtenidos para la mayoría de los parámetros característicos de la curva de agotamiento, así como los resultados del análisis correlatorio y espectral. En particular, el efecto memoria y el tiempo de regulación, ligeramente elevados, son propios de una circulación relativamente lenta del agua de lluvia a través de una parte de la red kárstica, poco desarrollada. Además de los resultados del estudio hidrodinámico, durante los períodos de recarga, se producen importantes disminuciones de la temperatura del agua y procesos de dilución. Los diagramas de frecuencias de los diferentes parámetros hidroquímicos, el valor medio de las diluciones y de los descensos de la temperatura del agua, así como los resultados de un ensayo de trazador ponen de manifiesto, por un lado, la influencia de la recarga desde la presa del Río Gadares y, por otro, el mayor grado de karstificación funcional del sector drenado por la surgencia de la Cueva del Gato (muy elevado) en comparación con el drenado por el manantial de Benaoján (elevado).

El *sistema acuífero de la Sierra de las Nieves*, con una superficie aproximada de 109 km², está formado por materiales dolomíticos y calizos que presentan un destacable desarrollo del modelado kárstico, tanto exo como endokárstico. La precipitación media registrada durante el periodo de estudio ha

sido 971 mm. Desde el punto de vista hidrodinámico, el análisis de los hidrogramas de dos de los tres manantiales principales (nacimientos del Río Genal y Río Verde) pone de manifiesto el comportamiento kárstico del sector meridional del acuífero, aunque tanto la forma del hidrograma del manantial del Río Verde, como los parámetros característicos de la decrecida s.s. (estudio de la curva de recesión) muestran un alto grado de karstificación funcional, mayor en el sector drenado por este manantial que en el drenado por la surgencia del Río Genal. Por el contrario, el resto de metodologías empleadas (análisis correlatorio y espectral, análisis *wavelet* y análisis de caudales clasificados) indican que el sector de la Sierra de las Nieves drenado por el manantial del Río Genal presenta un comportamiento hidrogeológico algo más kárstico que el drenado por manantial del Río Verde. El comportamiento general escasamente inercial del acuífero de la Sierra de las Nieves se corrobora, aún más, con los resultados del estudio hidrodinámico de la surgencia del Río Grande.

El *sistema acuífero Prieta-Bonela-Alcaparaín* ocupa una superficie de 44 km² y está formado fundamentalmente por dolomías, calizas y brechas. Este sistema presenta un escaso desarrollo de formas kársticas, como consecuencia de la mayor complejidad de la estructura geológica, y menores valores de precipitación (482 mm/año durante el periodo de estudio) que la Sierra de las Nieves. No obstante, los resultados del análisis hidrodinámico de la serie de caudales del principal punto de descarga (manantial del Río Jorox) ha puesto de manifiesto, de manera general, el alto grado de karstificación funcional del sector de acuífero drenado por esta surgencia. La presencia, para un mismo año hidrológico, de varias crecidas rápidas y puntiagudas (bajos valores de $t_{crecida}$ y t_{base}), el alto valor de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$ y los pequeños valores de los parámetros efecto memoria y tiempo de regulación, así como los resultados del análisis *wavelet*, reflejan el comportamiento kárstico del sistema. En contraposición a este comportamiento general, tan sólo la forma del hidrograma durante algunas crecidas otoñales y los parámetros característicos de la decrecida s.s. (análisis de la curva de recesión) denotan un carácter algo más inercial, según se deduce del

modo en que se produce la infiltración (depende de la cantidad e intensidad de las precipitaciones).

El estudio hidroquímico de las respuestas naturales de los acuíferos de las Sierras de las Nieves y Prieta-Bonela-Alcaparaín permite constatar los resultados del análisis hidrodinámico. Así, durante los períodos de recarga se producen marcadas diluciones de la composición química del agua y disminuciones de la temperatura en todos los manantiales. Además, los rangos de variación y el número de modas secundarias de los diagramas de frecuencias de la conductividad eléctrica reflejan un significativo grado de karstificación funcional, característico de acuíferos de tipo kárstico.

El *sistema acuífero de Marbella*, situado en el borde meridional de Sierra Blanca, presenta una superficie de 24 km², ocupada, en gran parte, por mármoles calizos, mientras que el *sistema acuífero de Ojén*, situado en la parte sureste de Sierra Blanca, está formado por mármoles dolomíticos y calizos y abarca una superficie menor (13 km²). La precipitación media sobre este sector de Sierra Blanca durante el periodo de estudio ha sido de 898 mm. La complejidad estructural de este sector de Sierra Blanca ha favorecido el escaso desarrollo tanto del exokarst como del endokarst. Desde el punto de vista hidrodinámico, la mayoría de los tratamientos realizados a la serie de caudales de los manantiales de Nagüeles y Ojén, principales puntos de descarga de los acuíferos de Marbella y Ojén, ha revelado el comportamiento kárstico de los dos acuíferos, parecido al deducido para el sector nororiental de la Sierra de Líbar. Así, los valores de la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, los parámetros característicos del agotamiento (análisis de la curva de recesión) y la aplicación de la transformada *wavelet* confirman que estos dos acuíferos presentan una escasa capacidad de filtro frente a las precipitaciones, indicativo de un cierto grado de karstificación funcional. No obstante, la forma del hidrograma del manantial de Ojén y los resultados del análisis correlatorio y espectral para esta surgencia muestran la doble existencia de flujos rápidos y flujos propios de un sistema algo más inercial. En resumen, el análisis de los resultados del estudio hidrodinámico de los sistemas de Marbella y Ojén pone de manifiesto

que presentan un comportamiento hidrogeológico de tipo kárstico, algo mayor en el sistema de Marbella que en el sistema de Ojén, y parecido al del sector Nororiental de la Sierra de Líbar.

En cambio, la evolución de los parámetros hidroquímicos en estos dos sistemas acuíferos del borde meridional de Sierra Blanca no permite constatar los resultados del análisis hidrodinámico. Así, la dilución hidroquímica, relativamente pequeña, durante las crecidas del manantial de Nagüeles pone de manifiesto que la karstificación funcional, deducida mediante el estudio hidrodinámico, debe de ser localizada, de manera que se limita la infiltración rápida que se pueda producir a través de los drenes kársticos. Además, la comparación de la forma y rangos de variación de la curva de frecuencias, de la conductividad eléctrica del agua drenada por estos manantiales, ratifica la dualidad de comportamiento que se deduce del estudio hidrodinámico e hidroquímico.

El sistema más oriental de los estudiados es el *acuífero de la Alfaguara*, con una superficie aproximada de 20 km². Está formado por afloramientos de dolomías y calizas, que presentan un modelado exokárstico escaso, aunque se conoce un buen número de cavidades kársticas con desarrollo preferentemente vertical. La precipitación media sobre la Sierra de la Alfaguara durante el periodo de estudio ha sido 482 mm. El estudio hidrodinámico de la serie de caudales de la Fuente Grande de Alfacar, principal punto de descarga del sistema de la Alfaguara, revela un comportamiento característico de un acuífero de flujo difuso para el sector drenado por esta surgencia, similar al deducido para el acuífero de la Sierra de las Cabras. El estudio hidroquímico refleja, igualmente, la capacidad de homogeneización de la señal de entrada (composición química del agua de lluvia) que presenta este acuífero. Las precipitaciones que se registran durante el período de estudio producen pequeñas disminuciones de los valores de la conductividad eléctrica, aunque la característica principal es una única variación anual de este parámetro, que refleja nuevamente la capacidad de homogeneización de la señal de entrada que tiene el acuífero. Esta capacidad de homogeneización queda corroborada con el escaso rango de variación y el

marcado carácter unimodal de los diagramas de frecuencia de la conductividad eléctrica, así como de los parámetros característicos del sistema calcocarbónico.

11.2. SOBRE LA APLICABILIDAD DE LAS METODOLOGÍAS UTILIZADAS Y LA PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN DE ACUÍFEROS CARBONÁTICOS

Se han aplicado diversos métodos de investigación para caracterizar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos estudiados. La aplicación de estas metodologías de investigación, desarrolladas en ámbitos climáticos diferentes al del Sur de España, ha mostrado ciertas particularidades que se comentan a continuación.

De los resultados obtenidos para los parámetros derivados del **análisis de hidrogramas** cabe reseñar que, la relación entre la media de los caudales máximos y la media de los caudales mínimos ($\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$) ha resultado ser un indicador, de fácil determinación, muy interesante para diferenciar el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos carbonáticos.

La aplicación del **análisis de la curva de recesión** propuesto por Mangin, ha puesto de manifiesto la escasa aplicabilidad del parámetro i . Aunque la muestra de surgencias analizadas recoge un 50% de la variabilidad potencial del parámetro, en la mayoría de los casos, es representativo de sistemas complejos y de grandes dimensiones, lo cual no concuerda con las dimensiones reales de varios de los acuíferos considerados en esta investigación. La forma en que se produce la decrecida (i) podría permitir establecer las potenciales diferencias entre los manantiales, pero, dicha forma, no depende sólo de las características del subsistema infiltración (zona no saturada) sino que está relacionada también con el régimen pluviométrico que origina la crecida (frecuencia e intensidad de las precipitaciones). En cambio, el parámetro k de los acuíferos estudiados da una buena idea del poder regulador de los mismos y, por tanto, puede ser considerado como una variable representativa para la caracterización de sistemas, independientemente de que se haya obtenido un valor de k mayor que la unidad, posibilidad no contemplada por Mangin en la clasificación original. Esto se debe a

que Mangin no consideró que existen sistemas acuíferos carbonáticos con una capacidad de regulación hiperanual, de manera que el volumen dinámico (cuya variación determina los caudales de la surgencia durante el agotamiento) es superior al volumen emitido por el manantial durante un ciclo medio (volumen de tránsito).

El **análisis correlatorio y espectral** es una herramienta muy interesante, siempre y cuando se puedan uniformizar los efectos derivados de la duración de las series de datos de precipitaciones. Este hecho se ha conseguido cuando se comparan los resultados obtenidos de varios sistemas acuíferos para un mismo intervalo temporal (igual régimen de precipitaciones -distribución-) y/o mediante la aplicación a series de caudal de surgencias lo suficientemente largas (que contengan años medios, húmedos y secos) y, por tanto, representativa del sistema acuífero. No obstante, la aplicación en esta investigación también ha puesto de manifiesto varios problemas en cuanto a la propuesta metodológica de Mangin para el estudio de sistemas acuíferos carbonáticos. El primero de ellos está relacionado con que la mayoría de parámetros obtenidos a partir del análisis correlatorio y espectral son semicuantitativos o su estimación no siempre es precisa (efecto memoria, frecuencia de corte), o es preciso combinarlos con otros para que tengan significado (valor máximo del coeficiente de correlación cruzada combinado con el valor de k -días- para el que se produce). El tiempo de regulación, por su propia definición ($S_0/2$, donde S_0 es el valor del espectro de densidad de varianza para $f=0$), es el parámetro definido con mayor precisión, desde el punto de vista cuantitativo. El segundo de los problemas está relacionado con el hecho de que los resultados obtenidos en esta investigación, para surgencias de sistemas poco karstificados (Sierra de las Cabras y acuífero de la Alfaguara), no se contemplan en la clasificación preexistente. En este sentido, el trabajo de Garay (2002) constituye una revisión de la clasificación hidrodinámica de los acuíferos kársticos propuesta por Mangin (cuatro clases, representadas por los manantiales de Aliou, Baget, Fontestorbes y Torcal), y plantea la necesidad de ampliarla con un nuevo tipo de sistemas carbonáticos, de comportamiento mucho más inercial (poder regulador hiperanual) que el de los cuatro tipos propuestos por Mangin.

Con la presente investigación se ha constatado que los resultados obtenidos en sistemas del Sur de España con un importante grado de karstificación, como los acuíferos de la Sierra de Líbar o Sierra Blanca, presentan valores para los parámetros característicos (efecto memoria, tiempo de regulación, frecuencia de corte) similares a los que se obtienen en los más inerciales del Pirineo francés (Mangin, 1984). Este hecho se debe a la irregularidad en la distribución pluviométrica en el Sur de España (marca climática), lo cual provoca que los manantiales estén mucho tiempo en régimen de agotamiento, en comparación con otras zonas de precipitación más continuada, dando lugar a una “inercia adicional” como consecuencia de que la variación de los caudales durante el agotamiento es mucho más lenta que durante otras situaciones hidrodinámicas.

El **análisis de caudales clasificados** sólo ha resultado interesante para llevar a cabo una caracterización hidrogeológica individual, de cada sistema acuífero, previa a la integración de toda la información obtenida a partir de los restantes métodos hidrodinámicos (análisis de hidrogramas, análisis de la curva de recesión y análisis correlatorio y espectral). Su utilidad como metodología comparativa entre sistemas, mediante la evaluación del porcentaje de volumen de agua drenado en diferentes situaciones hidrodinámicas (agotamiento, decrecida, crecida, etc.) ha resultado ser una herramienta con muchas limitaciones.

Finalmente, por lo que respecta a los métodos hidrodinámicos, el **análisis de la transformada continua wavelet** ha permitido constatar su escasa aplicabilidad para análisis comparativo de las respuestas naturales de los acuíferos carbonáticos debido, por un lado, a la compleja interpretación de los resultados, sin parámetros cuantitativos o cualitativos de referencia que permitan diferenciar el comportamiento de los acuíferos y, por otro, a que la interpretación hecha por otros autores, relacionando la existencia de reservas de agua subterránea con la amplificación a largo término de los espectros de las series de caudal, no parece coherente con los resultados obtenidos en algunos de los acuíferos aquí investigados. Sin embargo, sí se ha contrastado su interés como herramienta de análisis de series históricas de precipitación y caudal, para definir la variabilidad temporal de periodos secos y húmedos, que deben de ser tenidos en cuenta para

una correcta planificación y gestión de los recursos hídricos de las diferentes áreas de estudio.

Los **métodos hidroquímicos** utilizados para comparar el funcionamiento de los acuíferos considerados en esta investigación, presentan el problema de que hay pocas muestras de agua correspondientes a la crecida y muchas de decrecida y agotamiento. Así, todos los parámetros derivados del análisis hidroquímico que se han contemplado, excepto el porcentaje de dilución hidroquímica máxima (caracteriza el grado de karstificación funcional en situaciones de crecida), están influenciados por las situaciones de decrecida y agotamiento que, por otro lado, son las dominantes la mayor parte del tiempo, como ya se ha explicado anteriormente, debido a la marca climática en el ámbito meridional mediterráneo. Por otro lado, los rangos de los coeficientes de variación de los parámetros hidroquímicos propuestos por Shuster y White (1971, 1972), para la distinción entre sistemas de tipo kárstico o *conduit flow* (flujo por conductos) y sistemas de flujo de tipo difuso (*diffuse flow system*), no son coherentes con los resultados obtenidos del resto de parámetros hidroquímicos e hidrodinámicos. No obstante, los coeficientes de variación, sí han resultado útiles para comparar los sistemas estudiados. Por último, las curvas de frecuencia de la conductividad eléctrica del agua drenada por los manantiales, combinadas con el rango de variación de éstas, ha resultado un método muy interesante y sencillo para comparar el grado de karstificación funcional de los sistemas acuíferos carbonáticos.

Las **técnicas isotópicas** son una metodología de investigación de gran interés en hidrogeología. Sin embargo, la aplicación de éstas para caracterizar y comparar el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos investigados, no ha cumplido el objetivo que se pretendía debido, probablemente, a que la periodicidad de muestreo no ha sido lo suficientemente detallada o porque los resultados analíticos no han sido suficientemente precisos. Los datos isotópicos no son coherentes con los resultados obtenidos a partir de las respuestas hidrodinámica e hidroquímica.

Todas las observaciones anteriores ponen de manifiesto que cualquier metodología de investigación de las aplicadas es utilizable en cualquier sistema que se estudie, siempre y cuando se sea consciente de las limitaciones de la misma. Además, se ha constatado la importancia de disponer de resultados de varios métodos de investigación en un mismo sistema acuífero, para que la interpretación de su funcionamiento hidrogeológico sea correcta.

Otro de los objetivos que perseguía esta investigación es establecer una clasificación de los acuíferos carbonáticos, a escala regional, mediante una serie de parámetros sencillos, que contemplen la diversidad de comportamientos hidrogeológicos de, al menos, los sistemas acuíferos situados en una misma latitud. Para ello, a partir de la caracterización de cada uno de los sistemas, se ha realizado un análisis conjunto de las respuestas de los acuíferos, incluidos varios Análisis de Componentes Principales (ACP) y tres Análisis Clúster, lo cual ha permitido conocer los parámetros que explican mejor la diversidad de comportamientos hidrogeológicos de los sistemas acuíferos investigados. Se ha podido constatar qué parámetros son más interesantes, teniendo en cuenta las limitaciones de cada metodología, y qué afinidades se establecen entre los diferentes acuíferos piloto estudiados.

Los parámetros “característicos”, tanto hidrodinámicos como hidroquímicos, que dan la mayor información posible para caracterizar y clasificar el funcionamiento hidrogeológico son la relación $\overline{Q_{max}}/\overline{Q_{min}}$, el coeficiente de agotamiento (α), el coeficiente de variación del contenido en Mg^{2+} , el tiempo de regulación y el coeficiente de variación de la conductividad eléctrica, que informan sobre el grado de karstificación de los acuíferos y, por tanto, sobre la capacidad de regulación de los recursos medios renovables. Además, el conjunto de análisis realizado pone de manifiesto la afinidad o similitud entre los manantiales de un mismo marco geográfico (precipitaciones) geológico, geomorfológico e hidrogeológico, así como la agrupación de las surgencias de la Sierra de las Nieves, Prieta-Bonela y Blanca entre dos tipos extremos: uno de flujo

difuso (Sierra de la Alfaguara y Sierra de las Cabras) y otro de flujo por conductos (Sierra de Lívar), aunque mucho más cercano a este último.

La clasificación de acuíferos carbonáticos del Sur de España propuesta se divide en tres tipos singulares:

- A.** Sistemas de tipo KÁRSTICO o de flujo predominante por conductos, se caracterizan por estar ubicados en áreas de pluviometría elevada, con un importante desarrollo del modelado exokárstico y endokárstico (gran cantidad de formas de absorción activas, eventualmente sistemas binarios), lo cual provoca que la infiltración y agotamiento se produzcan de una manera rápida, y que existan importantes diferencias entre los caudales máximos y mínimos. Además, el alto grado de jeraquización de los conductos propicia importantes disminuciones de la temperatura del agua y procesos de dilución, indicativos de una capacidad de regulación muy baja. Las surgencias del sector nororiental de la Sierra de Lívar (Benaoján y Cueva del Gato) son los ejemplos tipo de este grupo. En él se podrían incluir otros sistemas estudiados por autores previos: sector meridional del acuífero de Sierra Alhama-Sierra Gorda de Loja, los acuíferos carbonáticos de las Sierras Hidalga, Blanquilla y Merinos, la Sierra de Grazalema y algunos sectores de la Sierra de Segura.
- B.** Sistemas de tipo FISURADO o de flujo difuso, se encuentran en zonas con valores de precipitación baja-moderada y que, en su mayoría, están formados por dolomías y calizas fuertemente plegadas y fracturadas, con escaso desarrollo de las formas kársticas de absorción. Sus respuestas naturales (hidrodinámicas e hidroquímicas) revelan un modelo de acuífero carbonático muy inercial, con escaso grado de karstificación funcional y gran poder regulador. A este grupo pertenecen los acuíferos de la Alfaguara (Fuente Grande de Alfacar) y de la Sierra de las Cabras (manantial de El Tempul). Además, se podrían incluir los acuíferos de Sierra de Mijas, sector oriental de Sierra Blanca, Sierra Gorda de Loja, Sierra de María, Sierra de Cañete y Sierra Arana.

C. Sistemas de tipo INTERMEDIO, que se dividen en dos subtipos. El tipo INTERMEDIO KÁRSTICO, que se localiza en áreas de precipitaciones medias-altas y se caracteriza por presentar también un exokarst y endokarst desarrollados, con formas de absorción activas, aunque menores que las del tipo KÁRSTICO. Presenta un menor grado de jerarquización de los conductos (menor karstificación funcional), lo que provoca que algunas de sus respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas muestren cierta inercia. Del conjunto de sistemas acuíferos estudiados, son los de Marbella (manantial de Nagüeles), Prieta-Bonela-Alcaparaín (manantial del Río Jorox) y un sector del acuífero de las Nieves (manantiales de los Ríos Genal y Grande) los que se engloban en este grupo. También se incluirían los acuíferos del Torcal de Antequera, Sierra del Valle de Abdalajís, Sierra de Jarastepar, Sierras de las Cabras, el sector oriental de las Sierras de Camarolos y Gorda de Villanueva del Trabuco, los acuíferos alpujárrides de Albequillas (Sierra Almiajara meridional) y de Sierra Tejeda meridional y los acuíferos subbéticos de Sierra de Cabra, Rute-Horconera y Sierras de Pandera-Parapanda.

El tipo INTERMEDIO FISURADO engloba, por un lado, acuíferos con pluviometría media, estructura geológica compleja y escasas formas exokársticas de absorción y, por otro, acuíferos ubicados en zonas de pluviometría elevadas, con exokarst y endokarst desarrollados, pero que presentan en algunos sectores un escaso desarrollo de la karstificación funcional. Todas estas características le confieren a esta tipología un mayor poder regulador que el observado para el subtipo anterior. Este grupo se define a partir de las respuestas naturales de los manantiales de Ojén (Sierra Blanca) y Río Verde (Sierra de las Nieves). También se incluirían los sistemas acuíferos del Calar del Espino y Sierra Seca (Sierra de Segura), el sector occidental de las Sierras de Camarolos y Gorda de Villanueva del Trabuco y los acuíferos formados por dolomías alpujárrides de Sierra Tejeda septentrional, Sierra Almiajara y las Sierras de Lújar y Gádor.

De esta propuesta de clasificación para sistemas acuíferos del Sur de España se deduce que los sistemas menos inerciales definidos (tipo KÁRSTICO) corresponden a acuíferos binarios (importante presencia de cuencas vertientes - poljes-) en zonas de elevada pluviometría. De manera que, a medida que algunas de estas dos características disminuye (ausencia o presencia minoritaria de poljes activos y/o contexto climático de menor pluviometría), los sistemas acuíferos presentan un comportamiento que refleja un menor grado de karstificación funcional. Por otro lado, se ha puesto de manifiesto la importancia del tamaño de los sistemas acuíferos, ya que ejemplos con características geológicas y geomorfológicas propias de la tipología KÁRSTICO presentan un comportamiento propio de un sistema de tipo FISURADO debido al elevado tamaño de los mismos, mientras que sistemas de pequeñas dimensiones con características propias de sistemas más inerciales, presentan parámetros característicos de acuíferos poco inerciales.

La propuesta de clasificación que se hace deberá ser completada con futuras investigaciones, toda vez que ha quedado claro que es difícil plantear una clasificación única, que tenga en cuenta la gran cantidad de parámetros determinados, y que informe, inequívocamente, sobre el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos del Sur de España. La combinación de varios de los parámetros, incluidos el tamaño y el contexto climático (volumen de precipitaciones), deberán de utilizarse para una correcta caracterización y clasificación en cada caso concreto.

BIBLIOGRAFÍA

Aminot, A. (1974): Géochimie des eaux d'aquifères. 2.- Les analyses chimiques en hydrogéologie karstique. *Annales Spéléologie*, 29(4): 461-483.

Andreo, B.; Carrasco, F. y Cruz-Sanjulián, J.J. (1992): Contribución al conocimiento hidrodinámico del sistema carbonatado drenado por el manantial de Coín (Málaga). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 15: 775-782.

Andreo, B.; Carrasco, F.; Mangin, A.; Antigüedad, I. y Vadillo, I. (1996): El análisis correlatorio y espectral aplicado al sistema carbonatado alpujarride de Torremolinos (Sierra de Mijas, Málaga). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria (España), 233-247.

Andreo, B. (1997): Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España). Confederación Hidrográfica del Sur de España y Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga, Málaga, 489 páginas.

Andreo, B.; Carrasco, F.; Jiménez, P. y Vadillo, I. (2001): A comparative study of two carbonate aquifers in Southern Spain. En: G. Günay, K. Johnson, D. Ford y A. Johnson (Eds.) *Present state and future trend of Karst studies*. 6th International Symposium and Field Seminar, Marmaris (Turquía). Technical Documents in Hydrology (UNESCO), N^o 49, Vol II: 715-722.

Andreo, B.; Carrasco, F.; Bakalowicz, M.; Mudry, J. y Vadillo, I. (2002): Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca-Mijas unit (Málaga, southern Spain). *Environmental Geology*, 43 (1-2): 108-119.

Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo I.; Vías, J.M.; Neukum, C.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Jiménez, P.; Perles, M. J. y Sinreich, M. (2004a): Sierra de Líbar, Southern Spain. En: F. Zwahlen (Ed.) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate aquifers, Final Report of COST Action 620*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; Brussels, Luxemburg, 183-199.

Andreo, B.; Liñán, C.; Carrasco, F.; Jimenez de Cisneros, C.; Caballero, E. y Mudry, J. (2004b): Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (O-18, H-2) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (Spain). *Applied Geochemistry*, 19: 561-574.

Andreo, B.; Vadillo, I.; Carrasco, F.; Neukum, C.; Jiménez, P.; Goldscheider, N.; Hötzl, H.; Vías, J.M. y Pérez I. (2004c): Precisiones sobre el funcionamiento hidrodinámico y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero kárstico de la Sierra de Líbar (provincias de Málaga y Cádiz, Sur de España) a partir de un ensayo de trazadores. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 17 (3-4): 143-146.

Andreo, B.; Vadillo, I.; Carrasco, F.; Neukum, C.; Jiménez, P.; Liñán, C.; Goldscheider, N.; Hötzl, H.; Ferrer, R.; Del Campo, L.; Göppert, N.; Vías, J.M.; Pérez, I.; Sánchez, D. y Cobos, A. (2005): Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico y

la vulnerabilidad a la contaminación de la Sierra de las Nieves (Málaga) a partir de un ensayo de trazadores en condiciones de estiaje. *Geogaceta*, 37: 163-166.

Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo I.; Vías, J.M.; Neukum, C, Sinreich, M.; Jiménez, P.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Perles, M. J. y Zwahlen, F. (2006a): Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 357(1-3): 54-73.

Andreo, B.; Jiménez, P.; Durán, J.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. y Mangin, A. (2006b): Climatic and hydrological variations during the last 117-166 years in the south of the Iberian peninsula, from spectral and correlation analyses and wavelet continuous analyses. *Journal of Hydrology*, 324 (1-4), 24-39.

Antigüedad, I. (1986): Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizábal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (España). 338 páginas.

Antigüedad, I.; Ibarra, V. y Morales, T. (1987): Tipología de sistemas acuíferos kársticos de Vizcaya a partir del análisis correlatorio y espectral. *IV Simposio de Hidrogeología*, Palma de Mallorca (España), 331-344.

Antigüedad, I., Ibarra, V. y Morales, I. (1990): Experiences de traçages des systèmes karstiques en Biscaye (Pays Basque). *Memoires of IAH*, XXII (Part. I): 212-215.

APHA, AWWA, WPCF (1989): *Standard methods for the examination of water and wastewater* (17th Edition). Cleresci, L.S., Greenberg, A.E. and Trussel, R.R. ed., Washington (EEUU). 1193 páginas.

Bakalowicz, M., Blavoux, B. y Mangin, A. (1974): Apports du traçage isotopique naturel a la connaissance du fonctionnement d'un système karstique-teneurs en oxygene-18 de trois systèmes des Pyrenees, France. *Journal of Hydrology*, 23: 141-158.

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, Paris-VI, Géol. Dyn. et Lab. Souterrain CNRS (Francia). 269 páginas.

Bakalowicz, M. y Mangin, A. (1980): L'aquifère karstique sa definition, ses caracteristiques et son identification. *Memories hors de série de la Societe Geologique de France*, 11: 71-79.

Barberá J.A. y Andreo B. (2008): Tránsito aguas bajas-aguas altas de los principales manantiales de los sistemas carbonatados de las sierras orientales de Ronda (Málaga). En: López-Geta, J.A., Rubio, J.C. y Martín-Machuca, M. (Eds.). *VII Simposio del Agua en Andalucía*, Baeza (España): 321-330.

- Batiot C. (2002): Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes. Site expérimental de Vaucluse, Jura, Larzac, Région Nord-Montpelliéraine, Nerja (Espagne). PhD Thesis, Université d'Avignon (Francia). 247 páginas.
- Batiot, C.; Emblanch, C. y Blavoux, B. (2003): Carbone Organique Total et magnésium: deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 335 (2): 205-214.
- Bayó A. (1982): La exploración hidrogeológica de acuíferos en rocas carbonatadas desde la óptica de la explotación de recursos y utilización del almacenamiento. Reunión Monográfica sobre el karst, Larra (España): 177-215.
- Bayó, A.; Castiella, J.; Custodio, E.; Niñerola, S. y Virgós, L. (1986): Ensayo sobre las diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Identificación, técnicas de estudio y formas de captación y explotación. Jornadas sobre el Karst, San Sebastián (España), 2: 255-340.
- Blavoux, B.; Burger, A.; Chauve, P. y Mudry, J. (1979): Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 21 (4): 295-306.
- Benavente, J. y Mangin, A. (1984): Aplicación del análisis de series de tiempo al sistema espeleológico Hundidero-Gato. *I Congreso Español de Geología*. Comunicaciones, 3: 541-553.
- Benavente, J.; Pulido-Bosch, A. and Mangin, A. (1985): Application of correlation and spectral procedures to the study of discharge in a karstic system (Eastern Spain). En: *Karst Water Resources Symposium*, Ankara (Turquía). IAH Publ, 161: 67-75.
- Burger, A. y Dubertret, L. (1975): *Hydrogéologie des terrains karstiques*. IAH Publ. 190 páginas.
- Burroughs, W. J. (1992). *Weather cycles: real or imaginary*. Cambridge University Press (Reino Unido). 201 páginas.
- Breaker, L.C.; Liu, P. y Torrence, C. (2001): Intraseasonal oscillations in sea surface temperature, wind stress, and sea level off the central California coast. *Continental Shelf Research*, 21: 727-750.
- Brechenmacher, J. (2002): Application of the PI method for Groundwater vulnerability mapping in the karst aquifer of Sierra de Líbar (Andalusia, Spain). Processing and analysis with GIS. Diplom Thesis in Geoecology, Universidad de Karlsruhe (Alemania), 109 páginas.
- Cardenal, J. (1993): Hidrogeología del sector Sierra Lújar-Albuñol (provincia de Granada). Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 402 páginas.

Cardoso da Silva, G. (1997): Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de la Tramuntana, Mallorca. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña (España). 376 páginas.

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 (España), 9-21.

Castillo-Martín A., (1981): Estudio geológico e hidrogeológico de La Alfaguara (Alpujárrides Septentrionales). I Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada (España): 627-641.

Castillo-Martín A.; Benavente J. y Lozano A. (1982): Estudio hidrogeológico del macizo de La Yedra-Alfacar-Víznar (Granada). Reunión Monográfica sobre el karst, Larra (España): 217-229.

Chambers, D.P.; Mehlha, C.A.; Urban, T.J. y Nerem, R.S. (2002): Analysis of interannual and low-frequency variability in global mean sea level from altimetry and tide gauges. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 1407-1411.

Chauve, P. (1960-62): Structure Géologique de la Région Centrale de la Province de Cadix (Espagne). *Memories hors de sèrie de la Societe Geologique de France*, 1: 257-264.

Custodio, E. y Llamas, R. (1976): *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega, Barcelona (España). 2359 páginas.

Cruz-Sanjulián, J.J.; García-Latorre, F. e Ibarra, V. (1986): Delimitación del sistema kárstico del manantial de Iturriotz (Trucios, Vizcaya): Su caracterización a partir del análisis del hidrograma. *Boletín Geológico y Minero*, 97: 782-792.

Cruz-Sanjulián, J.J.; Ibarra, V. y Morales, T. (1987): Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio del hidrograma del manantial de Olalde (Vizcaya). *Geolis*, 1: 50-61.

Cruz-Sanjulián, J.J.; Benavente, J.; Moral, F.; Martínez, J. C.; López-Geta, J. A.; Rubio Campos, J. C.; Aragón Rueda, R. y Peinado, T. (1990): Investigación de acuíferos carbonáticos (Sierras de Cazorla y Segura). Universidad de Granada-ITGE, 235 páginas.

Daubechies, I. (1990): The wavelet transform time-frequency localization and signal análisis. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 36: 961-1004.

Delannoy, J.J. (1987): *Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales de Andalucía*. Junta de Andalucía - Casa de Velázquez (Eds.), Madrid. 50 páginas.

Delannoy, J. y Díaz del Olmo, F. (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. *Karstologia Mémoires*, 1: 71-85.

Delannoy, J.J. (1998): Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las Serranías de Grazalema y de Ronda. En: J.J. Durán y J.L. Martínez (Eds.) *El Karst en Andalucía*, Instituto Tecnológico Geominero de España; Madrid (España), 93-129.

Dreybrodt, W. (1988): *Processes in karst systems*. Springer-Verlag. 288 páginas.

Diputación Provincial de Cádiz (1984): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Cádiz*. 100 páginas.

Drogue, C. (1969): Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karst péri méditerranéens. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier (Francia). 462 páginas.

Drogue, C. (1980): Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés fissurés. Application à l'interprétation de certains aspects du fonctionnement hydrogéologique. *Memories hors de série de la Societe Geologique de France*, 11: 101-108.

Dürr, S.H. (1967): Geologie der Sierra de Ronda und ihrer Südwestlichen Ausläufer (Andalusien). Tesis Doctoral, Universidad de Bonn. 122 páginas.

Durán, J.J. y López Martínez, J. (1992): Application of geological, hydrochemical and isotopic methods for hydrogeological investigation of selected Spanish karst regions. *International Contributions to Hydrogeology*, 13: 43-60.

Durán, J.J. (1996): Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (España). 409 páginas.

Eisenlohr, L. (1995): Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat, CHYN & Université de Neuchâtel (Suiza). 121 páginas.

Emblanch, C. (1997): Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques: étude en région méditerranéenne de montagne Thèse, Université d'Avignon (Francia). 195 páginas.

Emblanch, C.; Zuppi, G.M.; Mudry, J.; Blavoux, B. y Batiot, C. (2003): Carbon 13 of TDIC to quantify the role of the Unsaturated Zone: the exemple of the Vaucluse karst systems (Southeastern France). *Journal of Hydrology*, 279 (1): 262-274.

Epstein, S. y Mayeda, T. (1953): Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4: 213-224.

Fernández Rubio, R. (1964): Contribución al estudio del karst de La Alaguara (Alpujárrides septentrionales). *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, 62, 309-341.

Fernández de Valderrama, I. (2004): Contribución al estudio hidrogeológico de la Unidad Kárstica de Santa Eufemia-Ereñozar (zona nororiental de Bizkaia). Aportación de los ensayos con trazadores al conocimiento del medio kárstico. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (España). 358 páginas..

Ferrer, R. (2003): La sima del aire. *Monografías Espeleológicas de la Sociedad Excursionista de Málaga*, 5, 61-70.

Fontes, J. Ch.; Marce, A. y Letolle, R. (1965): Analyse isotopique de l'oxygène en géologie. Problèmes techniques. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 7(2): 123-133.

Freixes, A. (1993): El medio kárstico de la investigación observacional y experimental a la modelización. *Hidrología Subterránea y Migración de Contaminantes*, 97-141.

Gaucherel, C. (2002): Use of wavelet transform for temporal characterisation of remote watersheds. *Journal of Hydrology*, 269 (3): 101-121.

Garay, P. (2000): El dominio Triásico Espadán-Calderona. Contribución a su conocimiento geológico e hidrogeológico. Tesis Doct. Univ. Valencia.

Garay, P. (2002): Tipología de acuíferos kársticos basada en el análisis de correlación y espectral de sus descargas naturales: una propuesta de revisión y ampliación de la clasificación de Mangin. En: F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo (Eds.) *Karst and Environment*, 99-104.

García-Latorre, F.; Cruz-Sanjulián, J. e Ibarra, V. (1987): Precisiones sobre el funcionamiento del sistema kárstico del barranco de Peñalba a partir de los caudales clasificados del manantial de Iturriotz (Bizkaia) en los ciclos 1983-84 y 1984-1985. *Boletín Geológico y Minero*, 98 (1): 58-68.

García López, S. (1997): Los acuíferos carbonatados alpujárrides al SE de Sierra Nevada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 315 páginas.

González-Yélamos, J. (1999): Ensayos de trazadores en acuíferos kársticos: desarrollo histórico y anecdótico. En: B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán (Eds.) *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja, 441-451.

Gracia, F.J.; Benavente, J. y Anfuso, G. (2000): Implicaciones endokársticas de la evolución geomorfológica de los poljes de Zurraque y Burfo (Sierra de Líbar, Málaga). En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda, Excmo. Ayuntamiento de Ronda, 341-351.

Grasso, D.A. y Jeannin P.Y. (1994): Etude critique des méthodes d'analyse de la réponse globale des systèmes karstiques. Application au site de Bure (JU, Suisse). *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, 13: 87-113.

Hanshaw, B.B. y Back, W. (1979): Major chemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems. *Journal of Hydrology*, 43:287-312.

Ibarra, V.; Cruz-Sanjulián, J.J. y García-Latorre, F. (1987): Análisis correlatorio y espectral del manantial de Iturrioz (Vizcaya): El sistema del Barranco de Peñalba como ejemplo de un tipo de karst de características mixtas. *Estudios Geológicos*, 43: 241-248.

IGME (1987): Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 1.064 Cortes de la Frontera. Madrid (España).

IGME (1991): Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 1.050 Ubrique. Madrid (España).

IGME (2000): Análisis de la descarga de la Sierra de las Cabras (Cádiz) a través del manantial de El Tempul. Informe inédito, 66 páginas.

ITGE (1990): Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 1063 Algar. Madrid (España).

ITGE (1996): Funcionamiento hidrodinámico y regulación hidrogeológica del manantial de El Tempul (Cuenca del Guadalquivir, Cádiz). Informe inédito realizado por IDRENA. 62 páginas.

ITGE-Junta de Andalucía (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía. 216 páginas.

ITGE-COPTJA. (1999): Plan de Integración de los recursos hídricos subterráneos en los sistemas de abastecimiento público de Andalucía. Sector de Acuíferos de Padul-La Peza y Albuñuelas.

Jenkins, G.M. y Watts, D.G. (1968): *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco, 525 páginas.

Jiménez, P.; Andreo, B.; Durán, J.J.; Carrasco, F.; López-Geta, J.A.; Vadillo, I. y Vázquez, M. (2001a): Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España). *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 112 (2): 85-102.

Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A. y Vadillo, I. (2001b): Estudio de variaciones climáticas e hidrológicas ocurridas durante el último siglo a partir del análisis correlatorio y espectral de series temporales de datos registrados en el

sur de la Península Ibérica. En: A. Pulido, P. A. Pulido y A. Vallejos (Eds.) *V Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Almería (España), Vol. I: 63-72.

Jiménez, P. (2002): Caracterización de la descarga del sector nororiental de la Sierra de Líbar. Memoria de Investigación Tutelada, Programa de Doctorado "Análisis, gestión y uso del agua". Instituto del Agua, Universidad de Granada (España). Inédito. 102 páginas.

Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A. y Vadillo, I. (2002a): Aplicación de un modelo lluvia-caudal al acuífero carbonático de la Sierra de las Cabras (Provincia de Cádiz, S de España). *Geogaceta*, 31: 111-114.

Jiménez, P.; Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J.J. y López-Geta, J.A. (2002b): Caracterización de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de su respuesta hidrodinámica. En: F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo (Eds.) *Karst and Environment*, 105-113.

Jiménez, P.; Andreo, B. y Carrasco, F. (2003): Análisis de la descarga del Sector Nororiental de la Unidad Hidrogeológica de Líbar (Provincias de Málaga y Cádiz, Sur de España). *Actas de las I Jornadas Luso-Españolas As Águas Subterrâneas no sul da Península Ibérica*, Faro (Portugal): 107-116.

Jiménez, P.; Andreo, B. y Carrasco, F. (2004a): Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de la Fuente Grande de Alfacar (Sierra de la Alfaguara, Granada). *Geogaceta*, 35: 159-162.

Jiménez, P., Carrasco, F., Durán, J.J., Andreo, B. y López-Geta, J.A. (2004b): Análisis de la respuesta hidrodinámica de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética occidental (Sur de España). *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 115 (2): 187-197.

Jiménez, P. (2007): Sierra de Líbar (M.A.S. 050.068 y 060.044). En: Diputación de Málaga-IGME-UMA, *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*, Vol II: 31-36.

Käss, W. (1998): *Tracing technique in geohydrology*. Rotterdam, Balkema. 581 páginas.

Kiraly, L. (1975): Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. *Hydrology of Karstic Terrains*, 53-67.

Kumar, P. y Foufoula-Georgiou, E. (1993): A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields. Segregation of large and small scale features using wavelet transform. *Water Resources Research*, 29 (8): 2515-2532.

Kumar, P., (1996): Role of coherent structure in the stochastic dynamic variability of precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 101 (26): 393-404.

Labat, D.; Ababou, R. y Mangin, A., (1999a): Analyse en ondelettes en hydrologie karstique : 1^{re} partie : analyse univariée de pluies et débits de sources karstiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 329: 873- 879.

Labat, D.; Ababou, R. y Mangin, A. (1999b): Analyse en ondelettes en hydrologie karstique : 2^e partie : analyse croisée pluies-débits. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 329: 881-887.

Labat, D.; Ababou, R. y Mangin, A. (2000a): Rainfall runoff relations for karstic springs: convolution and spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 238: 123-148.

Labat, D.; Ababou, R. y Mangin, A. (2000b): Rainfall runoff relations for karstic springs: continuous wavelet and multiresolution analyses. *Journal of Hydrology*, 238: 149-178.

Labat, D.; Ababou, R. y Mangin, A. (2001): Introduction of wavelet analyses to rainfall-runoffs relationship for karstic basins: the case of Licq-Atherey karstic system (France). *Ground Water*, 39 (4): 605-615.

Larocque, M.; Mangin, A.; Razack, M. y Banton, O. (1998): Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205: 217-231.

Liñán, C.; Andreo, B. y Carrasco, F. (1999): Hydrogeological Research on carbonate Aquifers of a Unesco Biosphere Reserve (Sierra de las Nieves, Málaga, S Spain). *XXIX Congress of International Association of Hydrogeologists*, Bratislava (Eslovaquia), 203-208.

Liñán, C.; Carrasco, F. y Andreo, B. (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). En: A. Pulido, P. A. Pulido y A. Vallejos (Eds.) *V Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Almería (España), Vol. II: 127-140.

Liñán, C. (2003): Hidrogeología de Acuíferos Carbonatados en la Unidad Yunquera-Nieves (Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 317 páginas.

Liu, P.C. (1995): Wavelet spectrum analysis and ocean wind waves. En: E. Foufoula-Georgiou y P. Kumar (Eds.) *Wavelets in Geophysics*. Academic Press, New York (EEUU), 151-166.

Longo A.; Andreo B.; Carrasco, F.; Cucchi, F.; Vías, J. y Jiménez, P. (2001): Comparison of two contamination vulnerability maps obtained by the SINTACS method in two carbonate aquifers (S Spain). En: Jacques Mudry y François Zwhalen (Eds.), *7th Conference on limestone hydrology and fissured media*, Besançon (Francia), *Sci. Tech. Envir. Mém. H.S. n°13*: 233-236.

López-Chicano, M. (1992): Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 387 páginas.

Llanos, H. (1992): Estudio hidrogeológico de la unidad de Urbasa, montes de Vitoria, Treviño y sectores adyacentes. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco (España). 334 páginas.

Mandelbrot, M.B. y Wallis, J. (1968): Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Research*, 4: 909-918.

Mangin, A. (1970): Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales Spéléologie*, 25(3): 581-610.

Mangin, A. (1971): Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Annales Spéléologie*, 26 (2): 283-329.

Mangin, A. (1975): Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques (I). Thèse Doctorat Sciences Naturelles, Universidad de Dijon (Francia). En: *Annales Spéleologie*, 29(3): 283-332 ; 29(4): 495-601; 30(1): 21-124.

Mangin, A. (1981a): Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 293: 401-404.

Mangin, A. (1981b): Apports des analyses corrélatore et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 293: 1011-1014.

Mangin, A. (1982): L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Reunión Monográfica sobre el karst, Larra (España), 141-157.

Mangin, A. y Pulido-Bosch, A. (1983): Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de acuíferos kársticos. *Tecniterrae*, 51: 53-65.

Mangin, A. (1984): Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67: 25-43.

Mangin, A. (1994): Karst hydrogeology. En: Gibert, J., Danielpol, D.L. y Standford J.A. (Eds.) *Groundwater Ecology*, Academic Press, San Diego (EEUU): 43-67.

Margrita, R.; Guizerix, J.; Corompt, P.; Gaillard, B.; Calmels, P.; Mangin, A. y Bakalowicz, M. (1983): Reflexions sur la theorie des traceurs: applications en hydrologie isotopique. *Coll. Int. sur l'Hydrologie isotopique et la mise en valeur des ressources en eau*. IAEA, Viena (Austria): 653-678.

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 (España). 1171 páginas.

Mayoral, J.; Huisa, J.A. y Castejón, J. (2000): Prospecciones y exploraciones espeleológicas en la zona de Montejaque y Benaoján (Málaga). En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda (España), 307-322.

Mayoral, J. (2004): *Investigaciones espeleológicas en Montejaque y Benaoján (Málaga)*. Excmo. Ayuntamiento de Montejaque (España). 153 páginas.

Meyers, S.D.; Kelly, B.G. y O'Brien, J.J. (1993): An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review*, 121 (10): 2858-2866.

Meyers, S.D. y O'Brien, J.J. (1994): Spatial and temporal 26-day SST variations in the equatorial Indian Ocean using wavelet analysis. *Geophysical Research Letters*, 21 (9): 777-780.

Millán, J. y Wiczorek, J. C. (2000): Adelanto de las exploraciones espeleológicas en el polje de Líbar (Montejaque, Málaga). En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda (España), 267-292.

Miserez, J.J. (1973): *Géochimie des eaux du karst Jurassien. Contribution physico-chimique a l'étude des altérations*. Thèse Doct. Sci. Nat. Univ. Neuchâtel (Suiza). 313 páginas.

Moral, F. (1992): Estudio hidrogeológico de la Unidad del Espino (Sierra de Segura, Jaén). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada (España). 126 páginas.

Moral, F. (2005): Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura). Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide (España). 580 páginas.

Morales, T. (1991): Estudio hidrogeológico de la Zona Norte de Vizcaya. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (España). 503 páginas.

Moreno Calvillo, I. (1980): Contribución al conocimiento hidrogeológico de las Sierras de María y del Maimón (provincia de Almería). Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada (España). Inédito.

Mudarra, M.; Andreo, B. y Marín, A.I. (2008): Consideraciones sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonatado de la Alta Cadena (provincia de Málaga, España). *Geogaceta*, 44: 163-166.

Mudarra, M. y Andreo, B. (2009): Hydrogeological functioning of the karst aquifer drained by Yedra Spring (Southern Spain) from hydrochemical components and organic natural tracers. *Sustainability of the Karst Environment-Dinaric Karst and other karst regions*. Plitvice Lakes (Croacia). En imprenta

Mudry, J.; Kiraly, L. y Muller, I. (1979): Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et franc-comtois. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie*, 3: 183-221.

Mudry, J. (1987): Apport du tracage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. Thèse Sciences Naturelle, Universidad de Besançon (Francia). 378 páginas.

Mugerza, I. (2001): Estudio hidrogeológico de la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (Gipuzkoa). Establecimiento de una metodología para la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad intrínseca en acuíferos kársticos. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco (España). 406 páginas.

Obartí, F.J.; P. Garay, P. y Morell, I. (1986): Definición y caracterización del sistema kárstico del manantial de Sant Josep (Vall d'Uxó, España). *Jornadas sobre el Karst en Euskadi, San Sebastián (España)*, Vol. I: 171-186.

Obartí, F.J. (1987): El análisis de sistemas aplicados al estudio de acuíferos kársticos. Tesis de Licenciatura, Universidad de Granada. 230 páginas.

Obartí F.J.; Garay, P. y Morrell, I. (1988): An attempt to karst classification in Spain based on system analysis. *XXI Congreso Internacional de la AIH (Karst Hydrogeology)*, Guilin (China), Vol XXI, Part 1: 328-336.

Padilla, A. (1990): Modelos matemáticos aplicados al estudio de acuíferos kársticos. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 267 páginas.

Padilla, A. y Pulido-Bosch, A. (1995): Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology*, 168: 73-89.

Pedroche, A. y Mendoza, D. (2000): Investigaciones espeleológicas en el sector nordeste del polje del Republicano. En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda (España), 299-305.

Pérez Ramos, I.; Andreo, B.; López Geta, J.A.; Martín Machuca, M.; Morales, R. y Emblanch, C. (2005): Caracterización hidroquímica del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz). En: J.A. López Geta, J.C. Rubio y M. Martín Machuca (Eds.) *VI Simposio sobre el Agua en Andalucía*, Tomo I: 507-517.

Pérez Ramos, I. y Andreo, B. (2007): Sierra Tejeda (M.A.S. 060.064). En: Diputación de Málaga-IGME-UMA, *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*, Vol II: 137-142.

Pistre, S.; Liñán, C.; Andreo, B.; Carrasco, F., Drogue, C. y Martín Algarra, A. (2002): Role d'un régime extensif pre-quatenaire dans la karstification des massifs carbonatés de la Cordillère Bétique occidentale: exemple du massif de Yunquera-Nieves (Espagne). *Bulletin de la Société Géologique de la France*, 173(5): 437-448.

Plata, A. (1994): *Composición isotópica de la precipitación y aguas subterráneas de la Península Ibérica*. CEDEX. 139 páginas.

Pulido, A. (1979): *Contribución al conocimiento de la hidrogeología del Prebético Nororiental (provincias de Valencia y Alicante)*. Servicio Publicaciones del Ministerio de Industria (España). Memoria del IGME nº 95. 410 páginas.

Pulido, A. (1986): Reflexiones sobre hidrogeología kárstica basadas en ejemplos de las Cordilleras Béticas. *Jornadas sobre el Karst en Euskadi, San Sebastián (España)*, Vol. II : 31-50.

Pulido, A. (1987): Aproximaciones metodológicas al estudio del funcionamiento hidrogeológico del karst. *Geolis*, 1: 18-23.

Pulido, A. (1993): The karstic aquifer of the Torcal de Antequera (Málaga). En: A. Pulido (Ed.) *Some Spanish karstic aquifers*, Universidad de Granada (España): 37-50.

Ramoneda, J.; Freixes, A.; Monterde, M.; Morin, J.P. y Gourcy, L. (1999): Los acuíferos kársticos del Parque Natural del Cadí-Moixeró (Pirineo oriental, Catalunya). En: B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán (Eds.) *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Patronato de la Cueva de Nerja (España), 483-495.

Rodier, H. (1978): *Análisis de aguas naturales, aguas residuales, aguas de mar*. Omega. 1059 páginas.

Sahuquillo, A.; Estrela, T y Andreu, J. (1987): Análisis de hidrogramas de manantiales kársticos. IV Simposio de Hidrogeología, Palma de Mallorca (España), 317-330.

Sanz de Galdeano, C. y Andreo, B. (1994): Structure of the Blanca Unit (Alpujarride Complex, Betic Cordillera). Regional implications. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 30(2): 439-447.

Sanz de Galdeano, C. y Andreo, B. (1995): Structure of Sierra Blanca (Alpujarride Complex, West of Betic Cordillera). *Estudios Geológicos*, 51: 43-55.

Sanz de Galdeano C.; Delgado F. y López-Garrido A.C. (1995): Estructura del Alpujarride y del Maláguide al NW de Sierra Nevada (Cordillera Bética). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8(3): 239-250.

Shuster, E.T. y White, W.B. (1971): Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 14 (2): 93-128.

Shuster, E.T. y White, W.B. (1972): Sources areas and climatic effects in carbonate groundwaters determined by saturation indices and carbon dioxide pressures. *Water Resources Research*, 8(4): 1067-1073.

Sociedad Excursionista de Málaga (1990): *Sima GESM 90*. Boletín Informativo, número especial, Málaga (España). 36 páginas.

Szilagyi, J.; Parlange, M.B.; Katul, G.G. y Albertson, J.D. (1999): An objective method for determining principal time scales of coherent eddy structures using orthonormal wavelets. *Advances in Water Resources*, 22 (6): 561-566.

Takeuchi, N.; Narita, K. y Goto, Y. (1994): Wavelet analysis of meteorological variables under winter thunderclouds over the Japan sea. *Journal of Geophysical Research*, 99 (5): 10751-10758.

Thauvin, J.P (1981): Alimentación y descarga del macizo kárstico del Torcal de Antequera (Málaga). I Simposio del Agua en Andalucía, Granada (España), Vol. I: 379-386.

Torrence, C. y Compo, G.P. (1998): A practice guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61-78.

Vallejos, A. (1997): Caracterización hidrogeoquímica de la recarga de los acuíferos del Campo de Dalías a partir de la Sierra de Gádor (Almería). Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 264 páginas.

Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J.; Carrasco, F.; Vadillo, I. y Jiménez, P. (2002): Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo (Eds.) *Karst and Environment*, 75-83.

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. (2004): The COP method. F. Zwahlen (Ed.) *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate aquifers, Final Report of COST Action 620*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development; Brussels, Luxemburg, 163-172.