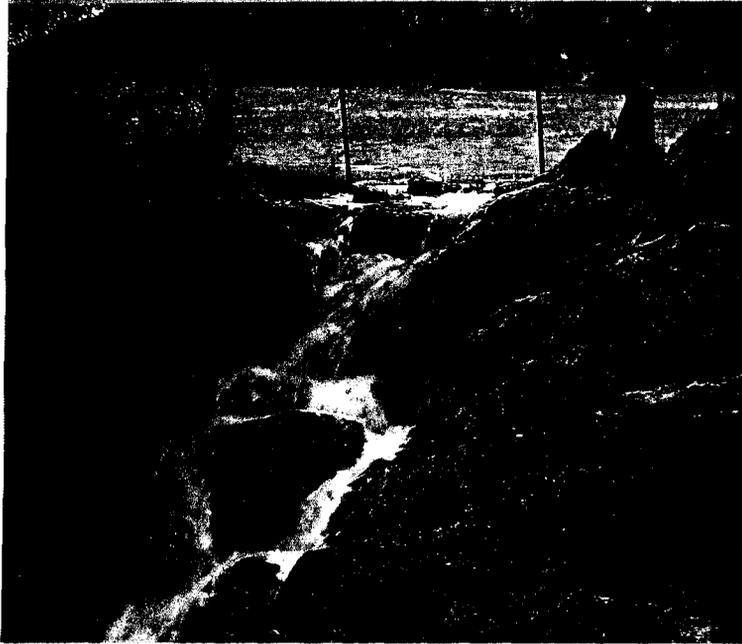


62683
(I)

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



**VOLUMEN I:
*ESTUDIO DE LA RECARGA***



Grupo de Hidrogeología de la
Universidad de Málaga (GHUMA)



Ministerio
de Ciencia
y Tecnología



Instituto Geológico y
Minero de España

62683
I

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

VOLUMEN I:

ESTUDIO DE LA RECARGA

Clasificación tipológica de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética y estimación de su recarga (contrato 8.06/44.1864 de la UMA)

Desarrollo de una metodología de determinación de la recarga y su zonación espacial en acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (contrato 8.06/44.1977 de la UMA)

EQUIPO DE TRABAJO

Por parte del Instituto Geológico y Minero de España:

Juan José Durán Valseo (Director del proyecto)
Investigador Titular. Jefe del Servicio de Investigación y Desarrollo Hidrogeológico de
la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas

Juan Antonio López Geta
Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas

Por parte de la Universidad de Málaga:

Bartolomé Andreo Navarro (Coordinador de los volúmenes I y II)
Profesor Titular de Geodinámica Externa. Departamento de Ecología y Geología

Francisco Carrasco Cantos (Coordinador del volumen III)
Profesor Titular de Geodinámica Externa. Departamento de Ecología y Geología

Jesús María Vías Martínez
Becario F.P.I. Departamento de Geografía

Pablo Jiménez Gavilán
Becario F.P.I. Departamento de Ecología y Geología

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.2. ANTECEDENTES	9
1.3. OBJETIVOS	11
1.4. METODOLOGÍA	13
1.4.1. Métodos de determinación directa	14
1.4.2. Métodos hidrodinámicos	14
1.4.3. Métodos ambientales químicos e isotópicos	14
1.4.4. Métodos de balance	15
1.4.5. Métodos basados en modelos numéricos de flujo en acuíferos	16
1.4.6. Otros métodos	16
2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS GENERALES DE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS PARA EL ESTUDIO DE LA RECARGA	18
2.1. GENERALIDADES SOBRE EL KARST DE LA CORDILLERA BÉTICA	19
2.1.1. El karst de la Zona Externa	19
2.1.2. El karst de la Zona Interna	21
2.2. SELECCIÓN DE ACUÍFEROS PILOTO	23
2.3. SIERRA DE LAS CABRAS	24
2.4. SIERRA DE LÍBAR	29
2.5. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA YUNQUERA-NIEVES	33
2.6. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS	42
2.7. SIERRA GORDA DE LOJA	53
2.8. SIERRAS DE CABRA Y RUTE-HORCONERA	58
2.9. SIERRA DE CAZORLA	62
2.10. SIERRA DE MARÍA	69
3. EVALUACIÓN DE LA RECARGA EN LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES	74
3.1. SIERRA DE LAS CABRAS	75
3.1.1. Elementos del balance	75
3.1.2. Tentativa de balance para el periodo 1862-1978	75
3.1.3. Tentativa de balance para el periodo 1985-1995	76
3.1.4. Tentativa de balance para el periodo comprendido entre 17/6-96 y 17-11-99	77
3.2. SIERRA DE LÍBAR	78

3.3. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA YUNQUERA-NIEVES	79
3.3.1. Precipitación	79
3.3.2. Evapotranspiración real	79
3.3.3. Lluvia útil o infiltración eficaz	82
3.3.4. Salidas de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves	84
3.3.5. Balance hidrogeológico de la unidad Yunquera-Nieves	86
3.4. SIERRAS BLANCA Y MIJAS	88
3.4.1. Salidas de la unidad Blanca-Mijas	89
3.4.2. Precipitaciones	91
3.4.3. Evapotranspiración real y lluvia útil	93
3.4.4. Escorrentía	100
3.4.5. Recursos hídricos	104
3.5. SIERRA GORDA DE LOJA	108
3.5.1. Elementos del balance	108
3.5.2. Tasa de recarga o coeficiente de infiltración eficaz	112
3.6. SIERRAS DE CABRA Y RUTE-HORCONERA	114
3.7. SIERRA DE CAZORLA	115
3.7.1. Subunidad de Beas de Segura	115
3.7.2. Subunidad de Cazorla	117
3.8. SIERRA DE MARÍA	119
4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA RECARGA. PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN TIPOLOGICA	121
4.1. PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA RECARGA	122
4.1.1. Mapa pluviométrico (isoyetas)	122
4.1.2. Mapas topográficos	123
4.1.3. Mapa litológico	126
4.1.4. Mapa de áreas de absorción preferencial	127
4.1.5. Mapas de suelos	128
4.2. CARTOGRAFÍA E INFORMACIÓN BÁSICA DE LAS VARIABLES EN LOS ACUÍFEROS PILOTO SELECCIONADOS	131
4.2.1. Sierra de las Cabras	131
4.2.2. Sierra de Líbar	132
4.2.3. Sierra de las Nieves	134
4.2.4. Sierras Blanca y Mijas	136
4.2.5. Sierra Gorda de Loja	137
4.2.6. Sierras de Cabra y Rute-Horconera	139
4.2.7. Sierra de Cazorla	140
4.2.8. Sierra de María	141
4.3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA RECARGA	143
4.4. CLASIFICACIÓN TIPOLOGICA DE LOS ACUÍFEROS CARBONÁTICOS EN FUNCIÓN DE LA RECARGA	151

5. ELABORACIÓN Y SUPERPOSICIÓN DE CAPAS DE INFORMACIÓN. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA	154
5.1. ELABORACIÓN DE LAS CAPAS DE INFORMACIÓN	155
5.2. SUPERPOSICIÓN CARTOGRÁFICA. ENSAYO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA	159
5.2.1. Consideraciones previas	159
5.2.2. Análisis de regresión lineal múltiple	161
5.2.3. Análisis de distancia al punto ideal	163
5.2.4. Sumatoria lineal ponderada	164
5.3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA. MÉTODO <i>APLIS</i>	166
5.3.1. Fundamentos del método <i>APLIS</i>	166
5.3.2. Resultados de la aplicación del método <i>APLIS</i> en los acuíferos piloto	168
5.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS DISTINTOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA RECARGA	173
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	176
BIBLIOGRAFÍA	

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En el marco del Plan de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS) desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) durante la década de los 80 se realizaron estimaciones de la recarga a los acuíferos españoles para poder efectuar unos balances hidrogeológicos coherentes con el grado de conocimiento entonces existente. Estas estimaciones de recarga, generalmente expresadas en forma de porcentaje respecto a la precipitación, se han aplicado después de una manera indiscriminada, cuando no existían otros argumentos, aunque no siempre con resultados satisfactorios. El IGME y otros Organismos Públicos con competencia en materia de aguas subterráneas precisan, en numerosas ocasiones, realizar estimaciones de la recarga natural a los acuíferos, entre ellos los carbonáticos. Por ejemplo, para el desarrollo de Programas de Infraestructura Hidrogeológica (PAIH) es fundamental contar con una herramienta sencilla que permita, en el caso de no tener un estudio detallado, aplicar valores comparativos de recarga con un criterio riguroso.

Dentro de las actividades del IGME está la de desarrollar metodologías y herramientas de I+D que permitan la optimización de la gestión y del conocimiento de los recursos hídricos. Así, durante los últimos años, el IGME ha realizado numerosos trabajos hidrogeológicos en Andalucía, al amparo del Convenio existente entre dicho Organismo y la Dirección General de Obras Hidráulicas de la Junta de Andalucía, algunos de los cuales han permitido establecer con mayor precisión la recarga real a acuíferos carbonáticos.

Como continuación de la línea de trabajo antes descrita, el IGME aprobó en el año 2001 la realización de un Proyecto de Investigación para el desarrollo de metodologías que permitieran estimar la recarga procedente de la lluvia en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos, tomando acuíferos de la Cordillera Bética como áreas de

trabajo. En el citado Proyecto han participado investigadores de la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME y del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA), durante los años 2001 y 2002. La participación del GHUMA se ha centrado en dos aspectos fundamentales: por una parte el estudio de la recarga y, por otra, en el análisis de la descarga. En relación con el primer aspecto se ha llevado a cabo una caracterización de acuíferos carbonáticos en función de su recarga (contrato 8.06/44.1864 de la UMA) y se ha desarrollado una metodología que permite determinar la recarga y su zonificación espacial en acuíferos carbonáticos (8.06/44.1977). El estudio de la descarga es un aspecto de gran interés para conocer la forma en que se produce la recarga y, al mismo tiempo, el volumen de agua que constituye la recarga, por lo que se ha llevado a cabo un análisis de la descarga natural de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (contrato 8.06/44.1865) y, posteriormente, una caracterización del funcionamiento de los mismos (8.06/44.1978). El presente volumen da cuenta de los trabajos realizados en relación con la recarga.

Se ha trabajado en acuíferos carbonáticos representativos de la diversidad climática y geológica de la Cordillera Bética: Sierra de las Cabras (provincia de Cádiz), Sierra de Líbar (Cádiz y Málaga), Sierra de las Nieves (Málaga), Sierras Blanca y Mijas (Málaga), Sierra Gorda de Loja (Granada), Sierras de Rute y Horconera (Córdoba), Sierra de Cazorla (Jaén) y Sierra de María (Almería). Se ha pretendido establecer una pauta para asignar valores a la recarga procedente de la lluvia en función de las características diferenciales de los acuíferos: características topográficas (altitud, pendiente), modelado kárstico, desarrollo del suelo, características climáticas (precipitación y temperatura), características litológicas y estructurales. Además de mejorar el conocimiento de la recarga y descarga natural de algunos acuíferos de interés, se trata de realizar una clasificación de los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, orientada a la estimación de la recarga, y proponer una metodología para el cálculo de la recarga en acuíferos carbonáticos del Sur de España a partir de una serie de variables que habitualmente están disponibles en las bases de datos de Organismos Públicos.

1.2. ANTECEDENTES

El estudio de la recarga de los acuíferos es un tema que se trata en casi todos los manuales de Hidrogeología, aunque en unos se aborda con más detalle que en otros. En el tratado de Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1976; 1983), concretamente en varios capítulos de las secciones 6 y 24, se lleva a cabo una descripción bastante completa de los principales aspectos relativos a la recarga de acuíferos.

De acuerdo con Custodio (1998) la recarga de un acuífero es el volumen de agua que penetra en un acuífero al cabo de un cierto intervalo de tiempo o el flujo unitario (tasa de recarga), expresada en volumen por unidad de tiempo, en volumen por unidad de superficie y unidad de tiempo o en altura por unidad de tiempo. Esta tasa de recarga puede ser tanto el valor en un momento determinado, como el valor medio que corresponde a un cierto periodo de tiempo. La recarga puede ser difusa, preferencial o concentrada y, lo más común, es que se produzca por infiltración de agua de lluvia, concretamente de una parte de lo que habitualmente se denomina lluvia útil (parte de la lluvia que no sufre evapotranspiración), aunque también se puede producir recarga a partir de aguas superficiales (ríos, lagos) o por transferencia de agua subterránea procedente de otro acuífero. En el marco de este Proyecto se ha trabajado sobre la recarga procedente de la lluvia, a partir de datos medios correspondientes al mayor número posible de años hidrológicos y la recarga se ha expresado en forma de porcentaje respecto de la precipitación.

La bibliografía especializada sobre el estudio de la recarga es relativamente escasa. A nivel internacional cabe señalar el volumen 8 de la colección *International Contributions to Hydrogeology Groundwater Recharge*, publicado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (Lerner *et al.*, 1990), que incluye información detallada sobre la estimación de la recarga en distintas condiciones elaborada por especialistas internacionales en el tema. Hay otro libro con el mismo título, editado por Balkema (Sharma, 1990) que también es una recopilación de trabajos realizados por especialistas en el ámbito de la recarga a los acuíferos. Otra referencia internacional importante corresponde al volumen 10(1) de la revista *Hydrogeology Journal*; se trata de un volumen especial titulado *Groundwater Recharge* en el que se abordan aspectos

fundamentales de la recarga, cuestiones de recarga artificial, aplicación de técnicas para cuantificar la recarga, uso de la modelización, incluso aborda la temática de la recarga urbana.

En la literatura hidrogeológica escrita en español, el antecedente más importante en materia de recarga a los acuíferos es, sin duda alguna, el texto publicado por el ITGE y el Grupo Español de la AIH (Custodio *et al.*, 1997) *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica* que recoge los trabajos presentados en un seminario con el mismo título celebrado en Las Palmas de Gran Canaria en Enero de 1997. En concreto, el libro incluye 10 ponencias de expertos hidrogeólogos que resumen el conocimiento actual sobre los procesos y los métodos de evaluación de la recarga de acuíferos y 10 comunicaciones libres que muestran con ejemplos los resultados obtenidos en diferentes acuíferos tras aplicar diversos métodos de estimación de la recarga. Dos ponencias particularmente interesantes de las presentadas en el seminario han sido publicadas en el Boletín Geológico y Minero (Custodio, 1998; Samper, 1998).

La estimación de la recarga en gran parte de los acuíferos carbonáticos del Sur de España fue realizada inicialmente por el IGME (1983) en el marco del PIAS y posteriormente ha sido publicada en los atlas hidrogeológicos de las provincias andaluzas y en el de la propia comunidad autónoma. Los cálculos originales han sido precisados en sucesivos informes técnicos del IGME y en los trabajos de diferentes investigadores dentro del ámbito universitario, (IGME-Universidad de Granada, 1990; López Chicano, 1992; Cardenal, 1993; Pulido-Bosch, 1993; Andreo, 1997, entre otros).

En estos trabajos se calcula la recarga de los acuíferos por diferentes métodos, siendo el más utilizado el de Thornthwaite, con capacidades de campo de 25 y 50 mm. En algunos estudios se han obtenido valores de recarga a partir del balance de cloruros y se han contrastado con la descarga a través de los manantiales. Conviene destacar que en un mismo acuífero se han obtenido diferentes resultados en función del método utilizado y del autor consultado y que son distintos los porcentajes de infiltración del agua de lluvia obtenidos para los acuíferos carbonáticos de la región (Cardenal, 1993; Andreo, 1997, entre otros).

1.3. OBJETIVOS

Las diferencias en la recarga de los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética responden, en primer lugar, a las notables variaciones que existen en los valores de precipitación sobre sus afloramientos. Además, intervienen factores topográficos (altitud y pendiente de las laderas), litológicos, desarrollo de la karstificación (formas exokársticas de absorción) y edafológicos (desarrollo del suelo). Todo ello hace que el funcionamiento hidrogeológico de estos acuíferos también sea diferente, por lo que es necesario disponer de una clasificación, a partir de criterios como los citados anteriormente y similares, que establezca unos tipos homogéneos de acuíferos carbonáticos para la estimación de su recarga. En este sentido conviene tener presentes las propuestas hechas por algunos investigadores (Bayó *et al.*, 1986; Obarti *et al.*, 1988; Andreo, 1997).

El cálculo de la recarga en los acuíferos más representativos de cada uno de los tipos diferenciados permitirá obtener los coeficientes a aplicar a los acuíferos de características similares. Para este cálculo, además de los procedimientos habituales, se ha estudiado con especial interés el análisis de las respuestas naturales de dichos acuíferos, puestas de manifiesto en las descargas de los manantiales, especialmente en los que tengan un registro de datos lo suficientemente largo.

Por tanto, los objetivos fundamentales son:

- Realizar una clasificación de acuíferos carbonáticos béticos para el establecimiento de tipos homogéneos de cara a la estimación de su recarga.
- Diseñar y confeccionar una herramienta sencilla que permita la estimación de la recarga y su reparto zonal mediante la combinación de las diferentes variables que intervienen en la misma (litológicas, climáticas, topográficas, geomorfológicas y edafológicas) y que están disponibles en las bases de datos de Organismos Públicos.

Para cubrir esos dos objetivos fundamentales se han llevado a cabo una serie de trabajos de los cuales se da cuenta en los apartados siguientes del presente volumen:

- Revisión actualizada de las características generales de los acuíferos carbonáticos seleccionados para el cálculo de la recarga con especial énfasis en las variables que influyen en la misma.
- Evaluación de la recarga en los acuíferos seleccionados mediante técnicas convencionales. Siempre que ha sido posible se han comparado los datos obtenidos aplicando diferentes métodos y se han contrastado los valores de la recarga con series históricas de descargas.
- Descripción de variables que influyen en la recarga y elaboración de la cartografía e información básica de las mismas para cada acuífero considerado utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Análisis de las variables que intervienen en la recarga y propuesta de clasificación tipológica de los acuíferos estudiados para el cálculo de la recarga.
- Elaboración y superposición de las capas de información de las variables que intervienen en la recarga. Ensayo metodológico de combinación de las capas de información para la evaluación y zonación de la recarga en acuíferos carbonáticos, tomando como referencia la tasa de recarga calculada por métodos convencionales. Propuesta metodológica para el cálculo de la recarga y aplicación del nuevo método a los acuíferos tipo de la clasificación tipológica.

1.4. METODOLOGÍA

Existen diferentes fuentes de recarga a los acuíferos, entre las cuales cabe citar: recarga difusa (a través de amplias zonas) de agua de lluvia, recarga concentrada a través de cauces permanentes, estacionales y efímeros, flujos laterales procedentes de otros acuíferos y retorno de riegos. En este caso se abordará, fundamentalmente, el estudio de la recarga producida por la lluvia.

Según Lerner *et al.* (1990) los métodos de recarga deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Balance de agua: para conocer el agua que hay disponible y la que puede convertirse en recarga.
- Identificación de los mecanismos y procesos de recarga.
- Errores de estimación: que deberían ser lo más bajos posibles. La recarga no debe fundamentarse excesivamente en parámetros difíciles de determinar.
- Aplicabilidad: si el método utiliza gran cantidad de datos e información muy especializada, difícilmente podrá aplicarse fuera de la investigación.
- Extrapolación: para una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos hay que disponer de estimaciones de la recarga en periodos largos.

Cada método de cálculo de la recarga tiene asociado un intervalo de tiempo (entre instantáneo y millones de años) para el que sus resultados tiene validez.

De acuerdo con Samper (1998) la medida de la recarga puede abordarse aplicando diferentes métodos que se citan a continuación.

1.4.1. Métodos de determinación directa

Son relativamente costosos, ya que requiere la construcción de un dispositivo que mida a suficiente profundidad el agua que se dirige hacia la zona saturada. Se realiza mediante lisímetros y medidores de filtración (*seepage meters*). Este método tiene la ventaja de que mide directamente el valor de la recarga, aunque la información es puntual y a veces puede no ser representativa del acuífero en su conjunto.

1.4.2. Métodos hidrodinámicos

Se basan en la utilización de la ecuación de flujo bajo condiciones de saturación parcial o total. Pueden ser métodos de campo y métodos numéricos. Los primeros suelen suponer régimen estacionario y funcionan mejor para flujo saturado, mientras que los segundos permiten abordar situaciones más complejas (régimen transitorio, heterogeneidad espacial), aunque requieren mayor número de datos.

Un ejemplo de estos métodos, aunque con gran cantidad de errores potenciales, es la técnica de la aproximación del gradiente-conductividad (flujo de Darcy) cuya descripción puede encontrarse, por ejemplo en López Rodríguez (1997). Cuando se pueden aceptar las simplificaciones que impone, permite obtener estimaciones de la recarga con una fiabilidad dependiente de la incertidumbre de las medidas de conductividad y gradiente hidráulico.

1.4.3. Métodos ambientales químicos e isotópicos

Constituyen una alternativa a los métodos hidrodinámicos basada en el estudio y análisis de las propiedades del agua. Los trazadores pueden ser artificiales o naturales. Entre los primeros destacan los colorantes, orgánicos e inorgánicos, que a veces suelen interactuar con el suelo, lo cual constituye un inconveniente del método. Por su parte, los trazadores naturales más utilizados en los estudios de recarga son: el ión cloruro, los isótopos estables (^{18}O y ^2H) y radioactivos (^3H , ^{14}C). Custodio (1997) llevó a cabo un análisis pormenorizado de la utilización de los trazadores ambientales en el cálculo de la recarga.

El método basado en el ión cloruro (Schoeller, 1962) es, con gran diferencia, el que más se ha utilizado en acuíferos kársticos, dado el carácter conservativo de este ión y la ausencia del mismo en las rocas carbonáticas. Para obtener la recarga en acuíferos kársticos aplicando este método es necesario conocer el contenido en Cloruros del agua de la precipitación (C_p) y del agua subterránea (C_a). La tasa de recarga o infiltración eficaz se establece como el cociente entre C_p/C_a .

1.4.4. Métodos de balance

De acuerdo con Samper (1997a, 1998) consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre las entradas y las salidas debe ser igual al cambio de agua en el almacenamiento. La realización de un balance requiere conocer y medir los flujos de entrada y salida de agua, así como el almacenamiento.

Los términos del balance suelen tener errores de medida, de interpretación, de estimación y debidos al uso de metodologías poco apropiadas. Ello provoca que haya “errores de cierre” que habitualmente repercuten en el valor de algún componente del balance que es difícil de determinar. En esencia, la recarga es la cantidad de agua que el suelo es capaz de drenar una vez que se han satisfecho los restantes procesos.

También puede deducirse la recarga a partir del balance en un acuífero entre dos fechas determinadas en las cuales se conocen los restantes flujos de entrada y salida. En este caso la recarga estimada incluirá el error de cierre que será función de los errores cometidos en el resto de componentes.

En la práctica habitual sólo alguno de los componentes de la ecuación del balance puede ser medido directamente (la precipitación), mientras que el resto (ETP y la ETR) debe ser estimado indirectamente a partir de fórmulas semiempíricas como las de Thornthwaite (1948), Coutagne (1954) y Turc (1955), entre otras.

Los métodos de balance tienen una serie de ventajas como la disponibilidad de datos (pluviometría, niveles piezométricos, caudales, etc.), la facilidad de aplicación y reducido coste de ejecución, el hecho de que tienen en cuenta todas las posible fuentes o sumideros de agua y su aplicabilidad a todo tipo de fuentes de recarga.

1.4.5. Métodos basados en modelos numéricos de flujo en acuíferos

Para el cálculo de la recarga aplicando métodos de balance se han desarrollado programas informáticos que permiten la simulación del flujo subterráneo en el acuífero (Samper, 1997b). Uno de estos programas es el BALAN (Samper y García Vera, 1992).

Si se dispone de un modelo numérico razonablemente válido es posible deducir la magnitud de la recarga a partir de la calibración del modelo de flujo, considerando la recarga como uno de los parámetros de la calibración. La estimación de la evolución temporal de la recarga y de su variación espacial, sin embargo, presenta mayores dificultades, ya que es necesario establecer la variabilidad temporal de la recarga. Dicha variabilidad se puede obtener a partir de balances de agua en el suelo. Este enfoque conjunto (método de balance + modelo numérico) ha permitido obtener una buena estimación de la recarga en varios casos reales.

1.4.6. Otros métodos

Dentro de este grupo se incluyen los que tratan de correlacionar la recarga con otras variables topográficas y climáticas, como la altitud o la precipitación. La validez de los resultados obtenidos por estos métodos es limitada ya que expresiones obtenidas para un determinado tipo de acuíferos sólo son extrapolables a otros similares. A pesar de estas limitaciones, hay casos en los que el gradiente altitudinal de la recarga se ha aplicado con resultado satisfactorio. Así, por ejemplo, Blavoux *et al.* (1992) en el acuífero de Vaucluse (Francia) y Cardenal (1993) en el acuífero de Sierra de Lújar (Granada), llevaron a cabo una evaluación de la recarga teniendo en cuenta las variaciones altitudinales de la misma.

El método de Kessler (1965) se aplica en acuíferos kársticos en los que existe abundante información pluviométrica. Parte de la hipótesis de que, en regiones templadas, la infiltración está influenciada por la precipitación que se produce en dos periodos: en los cuatro primeros meses del año y en los cuatro últimos.

En este proyecto de investigación, para la clasificación tipológica de los acuíferos en función de la tasa de recarga, se han utilizado los resultados obtenidos por los siguientes métodos: de balance, el método hidrogeoquímico basado en el ión cloruro y el método de Kessler. En los métodos de balance, la ETR se ha calculado mediante diferentes métodos (Turc, Coutagne y Thornwhite) en distintas circunstancias (con datos diarios y mensuales, con capacidades de campo de 25 y 50 mm).

Para desarrollar una propuesta metodológica que permita evaluar la recarga, se han considerado los mapas o capas de información correspondientes a variables que intervienen en la recarga (precipitación, altitud, pendiente, litología, áreas de recarga preferencial y suelos) y que suelen estar disponibles en las bases de datos de los Organismos Públicos. Tomando como referencia las tasas de recarga determinadas por los métodos convencionales antes citados se ha llevado a cabo un ensayo metodológico aplicando técnicas de superposición cartográfica en un Sistema de Información Geográfica y procedimientos matemáticos (regresión lineal, análisis del punto ideal, sumatoria lineal ponderada) para combinar las capas de información disponibles. Por tanto, el segundo objetivo de este proyecto consiste precisamente en desarrollar un método nuevo, no contemplado en la clasificación más arriba descrita, y a ello se dedica el capítulo 5 de este informe.

**2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS GENERALES
DE LOS ACUÍFEROS SELECCIONADOS
PARA EL ESTUDIO DE LA RECARGA.
REVISIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS**

2.1. GENERALIDADES SOBRE EL KARST DE LA CORDILLERA BÉTICA

La Cordillera Bética, de compleja estructura y gran extensión, presenta un elevado número de macizos carbonáticos, susceptibles de karstificación, aunque no todas las unidades geológicas de la cordillera presentan las mismas aptitudes frente a los procesos de disolución y el consiguiente desarrollo de los sistemas kársticos (Durán *et al.*, 1998). La diversidad morfoestructural y bioclimática de la cordillera y su historia geológica reciente han originado la configuración de una geomorfológica kárstica muy variada. La distinción de las grandes unidades geológicas de la Cordillera Bética, basada en criterios paleogeográficos y estructurales, presenta un claro reflejo geomorfológico e hidrogeológico, por lo que su caracterización es fundamental para el estudio del karst. Así, la Cordillera Bética se divide en dos partes fundamentales: Zona Externa y Zona Interna.

2.1.1. El karst de la Zona Externa

La Zona Externa de la Cordillera Bética está constituida por materiales mesozoicos y terciarios, de naturaleza carbonática y margoso-arcillosa. Estos sedimentos se depositaron en el margen continental de la placa ibérica durante el Mesozoico y, posteriormente, se estructuraron en mantos de corrimiento, con un zócalo (no aflorante) y una cobertera bien diferenciados. En general, los términos karstificables pertenecen al Jurásico, principalmente al Lías, aunque también existen materiales karstificables del Cretácico superior, sobre todo en las unidades de posiciones más septentrionales.

Geomorfológicamente, la Zona Externa se caracteriza por la alternancia de fuertes relieves carbonáticos con áreas más deprimidas de naturaleza margosa. Los macizos carbonáticos suelen corresponder a estructuras complejas, con tendencias antiforales, y frecuentemente se encuentran muy fracturados, plegados y escamados. Esto condiciona igualmente la hidrogeología de los macizos kársticos, aislados y delimitados por materiales impermeables.

En la Zona Externa se pueden distinguir varios dominios: Prebético, Subbético Externo, Subbético Medio y Subbético Interno (Penibético en el sector occidental). El Prebético presenta abundantes materiales karstificables correspondientes al Jurásico y al Cretácico. A este dominio pertenecen las Sierras de Cazorla y Segura.

Dentro del Subbético Externo hay importantes macizos kársticos, entre los que destaca la Sierra de Cabra (Córdoba), con varios poljes de grandes dimensiones, y la Sierra Mágina (Jaén). Otros macizos de menor extensión son la Sierra de Rute (Córdoba), en cuyo extremo meridional surge el Manantial de La Hoz, de tipo kárstico, con un caudal medio de 1000 L/s (actualmente captado y regulado para abastecimiento), la Sierra de Estepa y la Sierra de la Pandera. Los materiales karstificables del Subbético Externo son de edad jurásica: dolomías del Lías, calizas oolíticas del Dogger y calizas nodulosas del Malm.

En el Subbético Medio abundan las series margosas del Jurásico medio y superior, por lo que presenta un menor desarrollo de la karstificación, sólo en las dolomías y calizas del Lías. Este mayor espesor de materiales margosos hace que el desarrollo de la karstificación dependa principalmente de la elevación estructural de los pliegues. Así, aparecen formas kársticas pertenecientes al Subbético Medio en la Sierra de la Horconera (Córdoba), en la Sierra de Alta Coloma (Jaén), la Sierra de Montillana (Granada), la Sierra de Lucena (Córdoba), y en las sierras de la franja norte de la provincia de Málaga.

El Penibético y el Subbético Interno están constituidos fundamentalmente por potentes series dolomítico-calizas Jurásicas, seguidas de margas y margocalizas cretácicas. Sin embargo, las formas kársticas están más desarrolladas en el dominio Penibético que en el Subbético Interno debido a la estructura geológica (pliegues en “cofre” con charnelas planas) y a la mayor abundancia de la precipitación en el sector occidental de la Cordillera. En el Penibético destacan los relieves de la Serranía de Ronda (Sierras de Grazalema, Líbar, Blanquilla y Merinos) y el Torcal de Antequera donde abundan las formas tanto exokársticas como endokársticas. En el Subbético Interno existe un cierto desarrollo de la karstificación en Sierra Gorda (Granada), pero no tanto en otros macizos del norte de Almería (Sierras de Orce y de María).

2.1.2. El karst de la Zona Interna

Dentro de la Zona Interna se diferencian cuatro grandes complejos tectónicos: Nevado-Filábride, Alpujárride, Dorsal Bética y Complejo Maláguide. Los materiales karstificables que constituyen acuíferos de interés están más representados en el dominio Alpujárride y en la Dorsal Bética.

Las rocas karstificables del Complejo Alpujárride son calizas y dolomías (generalmente marmorizadas) del Trías medio-superior. Las estructuras fuertemente plegadas y los importantes relieves de las sierras que constituyen este dominio determinan el escaso desarrollo de las formas kársticas superficiales, a excepción de los lapiaces. El endokarst se encuentra, a veces, muy bien desarrollado (Cuevas de Nerja y de la Fájara en el macizo de Tejeda-Almijara). Sin embargo, existen macizos carbonáticos alpujárrides que no presentan rasgos notables de karstificación como Sierra de Gádor (Almería) y Sierra de Mijas.

Los afloramientos carbonáticos que constituyen la denominada Dorsal Bética afloran en el contacto entre la Zona Interna y la Externa de la Cordillera Bética, principalmente en Sierra de las Nieves (Málaga) y Sierra Arana (Granada). En el caso de la Sierra de las Nieves, afloran dolomías y calizas triásicas y jurásicas afectadas por una estructura sinclinal tumbada que ha facilitado el desarrollo de la karstificación. La Sierra de las Nieves constituye uno de los mejores ejemplos españoles de karst mediterráneo en transición con la alta montaña. Entre las formas exokársticas destacan las depresiones como el semipolje de La Nava, lapiaces y gran cantidad de ponors tanto activos como inactivos (Delannoy y Guendon, 1986). Dentro de este último grupo se encuentra la entrada a la sima G.E.S.M., que con 1101 m de profundidad, constituye una de las mayores cavidades verticales del mundo.

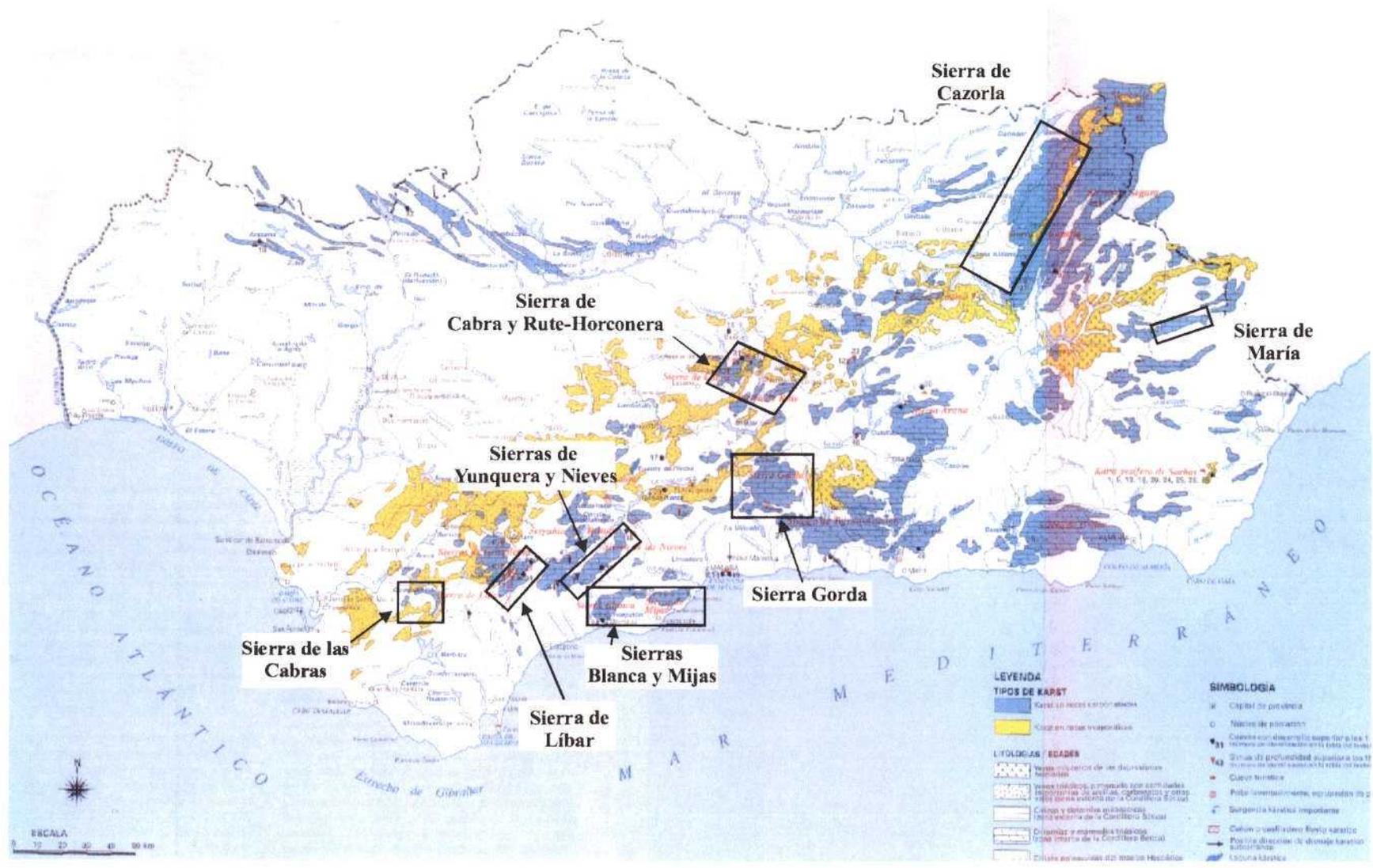


Fig. 2.1. Mapa del Karst en Andalucía (tomado de Durán et al., 1998) y situación de los acuíferos piloto.

2.2. SELECCIÓN DE ACUÍFEROS PILOTO

Para la realización de este Proyecto de Investigación se han seleccionado varios acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética que, de Oeste a Este, son los siguientes: Sierra de las Cabras (Cádiz), Sierra de Líbar (Cádiz y Málaga), Sierra de las Nieves (Málaga), Sierras Blanca y Mijas (Málaga), Sierra Gorda de Loja (Granada), Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Córdoba), Sierra de Cazorla (Jaén) y Sierra de María (Almería). Se trata de acuíferos representativos de un amplio abanico de características geológicas, climáticas, topográficas, geomorfológicas y edafológicas que concurren en la Cordillera Bética.

Se han seleccionado acuíferos carbonáticos de la mayor parte de los dos grandes dominios paleogeográficos de la cordillera, tanto de la Zona Externa (Prebético, Subbético Externo, Subbético Medio, Subbético Interno, Penibético) como de la Zona Interna (Alpujarride, Dorsal). En ellos hay calizas y dolomías, y sus equivalentes metamórficos, implicados en estructuras geológicas diversas, plegadas y falladas en mayor o menor grado. Igualmente el desarrollo del modelado kárstico varía desde acuíferos con gran desarrollo del exokarst y del endokarst (por ejemplo, Sierra de Líbar o Sierra de las Nieves) a otros en los que apenas se aprecia desarrollo de éstos (Sierra de María).

Por lo que respecta al marco climático, es un hecho conocido que las precipitaciones en Andalucía disminuyen de Oeste a Este, en casi un orden de magnitud (desde aproximadamente 2000 mm en la Sierra de Grazalema hasta 200 mm en Almería), razón por la cual en este proyecto se han seleccionado acuíferos sometidos prácticamente a todo el rango de variación: desde 1500 mm en Sierra de Líbar hasta 450 mm en Sierra de María.

En lo relativo a la topografía, aunque todos podrían considerarse como acuíferos de montaña, como corresponde a una cordillera alpina fuertemente afectada por la neotectónica, se han seleccionados acuíferos con una topografía particularmente abrupta (Sierras de María, Cazorla) y acuíferos que, aún presentando unas laderas con relativa pendiente, tienen en su parte alta una forma más o menos plana (“plateau” en la terminología francesa), como ocurre en Sierra de Líbar y Sierra de las Nieves.

2.3. SIERRA DE LAS CABRAS

El acuífero de la Sierra de las Cabras está situado en la parte central de la provincia de Cádiz, dentro de la hoja nº 1.063 (Algar) del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, y comprende las sierras del Valle, de Dos Hermanas, de la Sal, de las Cabras y de la Loma del Tempul, nombradas de Oeste a Este (Fig. 2.2). Todos estos relieves configuran una alineación montañosa, cuya forma en planta es de medialuna con la concavidad abierta hacia el Suroeste. La Sierra de las Cabras es atravesada por dos cauces fluviales: el arroyo de Bogaz, también llamado Boca de Foz, en la parte oriental, y el arroyo de Bujalance en la parte occidental.

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, en transición al dominio Subbético Externo (Chauve, 1960-62; Martín Algarra, 1987; ITGE, 1990). La serie estratigráfica de dicha unidad está constituida por 3 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 calcáreo-arcilloso, de edad cretácico-terciario.

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. Únicamente en la parte central de la Sierra del Valle afloran los materiales del Trías. Hacia el Norte la estructura está formada por un sinclinal ocupado por materiales cretácicos, bajo los cuales deben encontrarse las calizas y dolomías jurásicas, que afloran inmediatamente al norte (Sierra de Dos Hermanas y Loma de El Tempul) formando parte del flanco meridional del siguiente anticlinal.

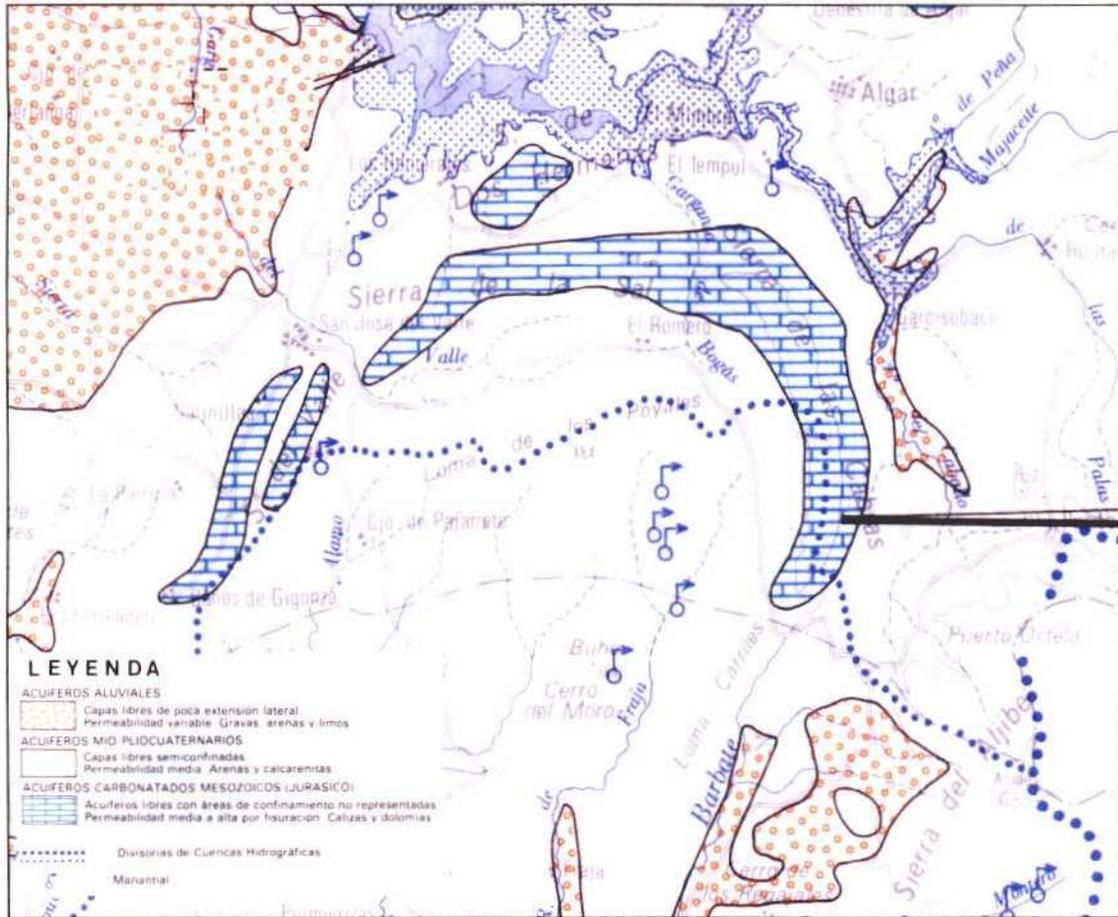


Fig. 2.2. Esquema hidrogeológico de la Sierra de las Cabras. (Atlas hidrogeológico de la provincia de Cádiz, DPC, 1985)

Las calizas y dolomías del Jurásico dan lugar a montañas de pendientes importantes en las que no se observan morfologías exokársticas de absorción. A pesar de ello constituyen un acuífero cuya superficie permeable total es del orden de 34 km², de acuerdo con la siguiente distribución: 29 km² en la Sierra de la Sal-Cabras, 2'6 km² en la Sierra del Valle, 1'8 km² en la Sierra de Dos Hermanas y 0'45 km² en la Loma del Tempul.

El acuífero está limitado, al Norte y Este, por el contacto entre los materiales carbonáticos y las arcillas triásicas y, al Sur y Oeste, por el contacto entre los carbonatos del Jurásico y las margas y margocalizas del Cretácico. La geometría del acuífero está condicionada por la estructura geológica previamente descrita, de forma que debe haber continuidad hidrogeológica entre los afloramientos calcáreos meridionales y septentrionales, aunque la estructura sinclinal intermedia, en el detalle, puede ser bastante compleja debido a las fracturas asociadas al plegamiento y/o posteriores. Así, la

extensión de la zona saturada del acuífero debe ser superior a la superficie de recarga del mismo (afloramientos permeables); concretamente, es del orden de 42 km².

La alimentación del acuífero de Sierra de las Cabras 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, 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 Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz (DPC, 1985) se estimaron los recursos medios del sistema en 5,5 hm³/año, procedentes exclusivamente de las precipitaciones.

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 unos 20 L/s y menos de 2000 L/s, con un valor medio histórico de 283 L/s. En épocas de recarga excepcional entra en funcionamiento el “trop plein” de Fuente Imbro, 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).

También se produce descarga por bombeo en algunos de los sondeos perforados durante la sequía de 1995 (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. Durante el periodo comprendido entre agosto de 1995 y marzo de 1996 fueron instalados y puestos en funcionamiento 2 sondeos en la Boca de Foz, 3 en el arroyo de la Zorra y 3 en el arroyo del Infierno, lo que permitió calcular valores de transmisividad comprendidos entre 10 y 10⁴ 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, aunque 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 29 m más someros de la zona saturada (Carreras, 1996). A partir de estos datos, en un informe del ITGE (1996) se calculó la porosidad drenable, que resultó ser del orden de 0,5 %.

Un estudio hidrodinámico realizado recientemente (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001) ha permitido caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema. La lluvia en el área de estudio es un fenómeno casi aleatorio y, sin embargo, el sistema de la Sierra de las Cabras actúa como un gran filtro capaz de amortiguar y modular la señal de entrada. Se trata de un sistema con 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 importantes de caudal tienen que ver con la componente anual de la distribución 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.

Los resultados del análisis de hidrogramas unitarios del manantial de El Tempul, tanto para la serie de datos diarios de caudal como para la serie de datos mensuales, muestran que la decrecida del manantial tiene lugar lentamente, >100 días (Tabla 2.1), lo cual significa que la infiltración no se produce de forma rápida o concentrada, porque existe una zona de infiltración 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, indicativo de que el agotamiento se realiza de forma lenta. Así, al inicio del agotamiento suele haber 5 hm³ susceptibles de ser drenados por el manantial, por lo que al cabo de un año sin llover se habría drenado, como mucho, la mitad del mismo. Estos datos son de particular interés en la gestión de los recursos hídricos del acuífero de Sierra de las Cabras.

MANANTIAL DE EL TEMPUL	D _a (días)	α (días ⁻¹)	Vd (m ³)	k	D _d (días)	η (días ⁻¹)	ϵ (días ⁻¹)	i
Hidrograma 1 (84/85)	136	2,08E-03	4.141.995	0,52	177	0,00565	0,00998	0,97
Hidrograma 2 (86/87)	173	1,64E-03	4.524.488	0,56	132	0,00758	0,01426	0,96
Hidrograma 5 (89/90)	150	1,59E-03	4.798.948	0,60	183	0,00546	0,01136	0,97
Hidrograma 7 (96/97)	102	1,29E-03	5.407.971	0,68	167	0,00599	0,02374	0,94
Hidrograma 9 (98/99)	174	1,33E-03	5.246.605	0,65	186	0,00538	0,00710	0,98
		1,58E-03		0,60				0,96

Tabla 2.1. Resultados del análisis de hidrogramas correspondientes al manantial de El Tempul.

El análisis de caudales clasificados de la serie de datos diarios del manantial de El Tempul permite concluir que por encima de 900 L/s el manantial está en crecida, y previsiblemente emergerá agua en Fuente Imbro e incluso en Boca de Foz, por lo que la variación de los caudales de El Tempul se producirá de forma más lenta de lo que cabría esperar (Jiménez *et al.*, 2001). Entre 900 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, por lo que el vaciado se realiza de acuerdo con el coeficiente de agotamiento.

2.4. SIERRA DE LÍBAR

La Sierra de Líbar se encuentra en el sector occidental dentro del contexto 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 constituida por una alineación montañosa que, según una dirección NE-SW, se extiende entre las localidades malagueñas de Montejaque y Cortes de la Frontera (Sierra de Líbar, Mojón Alto, Sierra de Montalate, Sierra de los Pinos, Sierra Blanquilla, Sierra del Palo, Juan Diego y Mures). El sector suroccidental (Sierra de Líbar) pertenece a la provincia de Cádiz y el resto a la provincia de Málaga (Fig. 2.3). La Sierra de Líbar junto con la de Grazalema, situada inmediatamente al Oeste, constituyen el núcleo central del Parque Natural de Sierra de Grazalema.

El Penibético, que aflora en la Sierra de Líbar (Martín Algarra, 1987), se caracteriza por una serie jurásica constituida por calizas y dolomías de edad liásica, de 400 a 600 metros de espesor. Sobre esta serie jurásica reposan margocalizas blancas y rojizas del Cretácico medio y Cretácico Superior-Oligoceno, respectivamente. En la parte Noroeste de la Sierra de Líbar aflora un flysch arcillo-areniscoso de edad aquitano-burdigaliense.

La estructura del macizo corresponde a dos grandes anticlinales, paralelos y orientados según una dirección N40°E, separados por un sinclinal cuyo flanco oeste aparece fallado dando lugar a la existencia de depresiones y poljes en el núcleo de la unidad. Los ejes de los anticlinales coinciden con las alineaciones montañosas, mientras que el núcleo del sinclinal lo hace con la zona deprimida de los Llanos de Líbar y de Pozuelo. Esta estructura se complica con la presencia de pliegues menores asociados a los principales, algunos cabalgamientos locales y, sobre todo, por una intensa fracturación. Dicha organización estructural provoca una cierta compartimentación interna, que no debe impedir la conexión hidráulica de la mayor parte de los elementos que la componen, dado el espesor de la serie calcárea jurásica.

De las diferentes unidades hidrogeológicas existentes en la Serranía de Ronda, es la Sierra de Líbar la que ofrece un modelado kárstico más espectacular, a gran escala, por la existencia de importantes cuencas endorreicas y por la gran variedad y cantidad

de formas exokársticas y endokársticas que se presentan con un marcado carácter estructural. Así, a lo largo de toda la unidad, se localizan abundantes dolinas de fondo llano, uvalas y poljes como los de Benaoján, Pozuelo y Líbar, este último con más de 7 kilómetros de longitud. La existencia de frecuentes campos de lapiaz, con pitones de hasta 10 metros, morfologías en “pila de platos”, así como pequeños valles ciegos y varios poljes de pequeña extensión, hacen de esta sierra uno de los macizos kársticos más importantes de la península Ibérica.

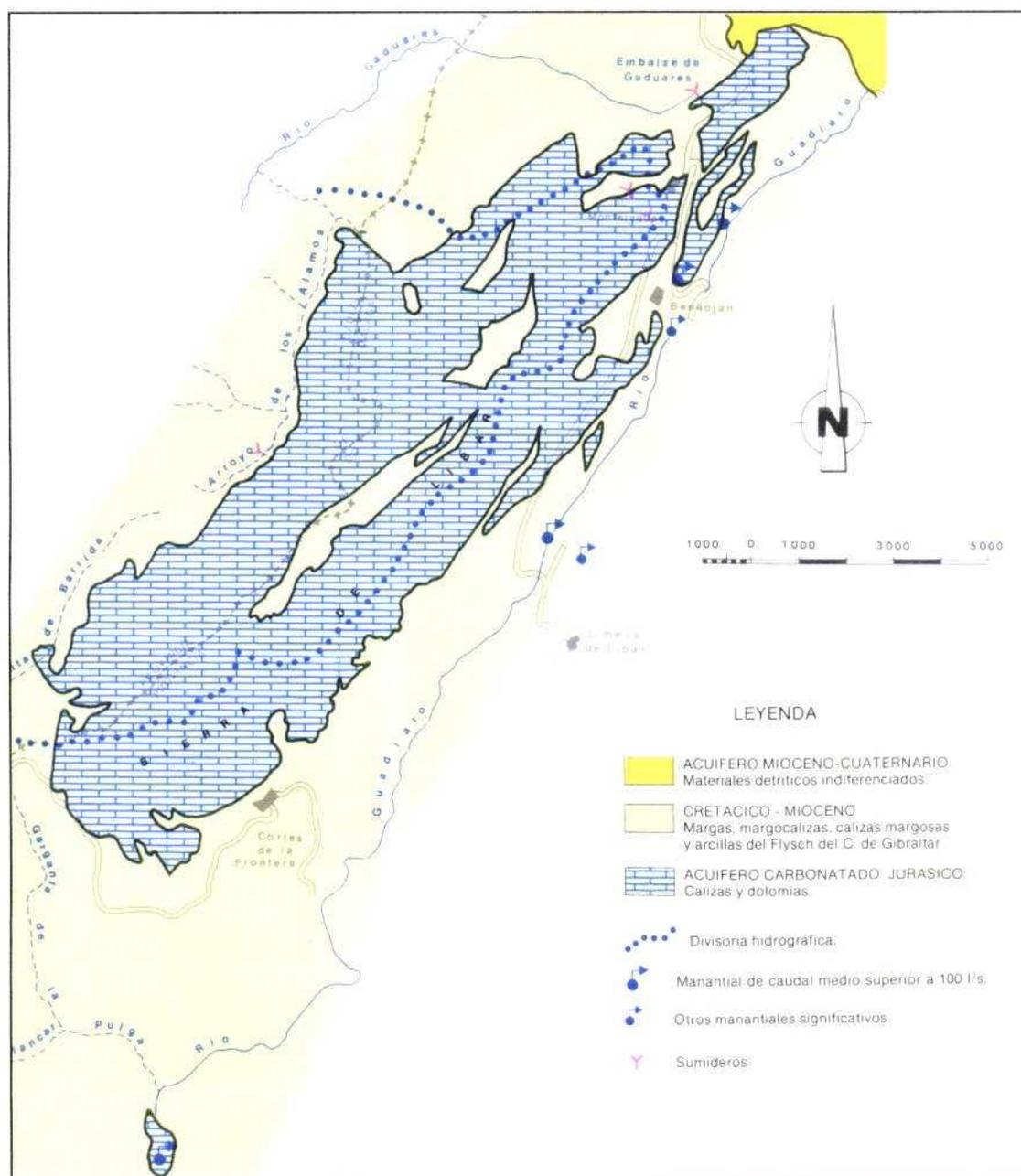


Fig. 2.3. Mapa de la Sierra de Líbar (tomado del Atlas hidrogeológico de la provincia de Málaga, DPM, 1988).

Los límites de la unidad hidrogeológica vienen impuestos por el contacto de los niveles permeables calizo-dolomíticos con los tramos margosos del Cretácico. El substrato impermeable está formado por arcillas y margas triásicas. En el borde NW, el afloramiento calcáreo de Sierra Líbar queda delimitado por las arcillas del flysch.

La escasez de sondeos mecánicos en la Sierra de Líbar impide contar con datos precisos acerca de la geometría interna del acuífero. Sin embargo, el estudio de los puntos de drenaje hace pensar que las estructuras observables en superficie reflejan la disposición de los materiales acuíferos en profundidad.

La recarga de este acuífero se produce por infiltración de las precipitaciones sobre sus afloramientos y también de la escorrentía generada en las cuencas endorreicas del Río Gadares (43,5 km²) del Arroyo de los Álamos (30 km²) que, cuando se produce, termina por desaparecer en sumideros situados en los bordes oeste (Sima del Republicano) y norte (Hundidero) de la Unidad.

La descarga del acuífero se produce a través de manantiales situados en su totalidad en la vertiente oriental de la Sierra, en las proximidades del río Guadiaro (IGME, 1983; DGOH, 1998): manantial de la Cueva del Gato (con un caudal de 1500 L/s), manantial del Molino del Santo, también llamado de Benaoján (1200 L/s) y surgencia del Charco del Moro (800 L/s). Éste último manantial se sitúa en el cauce del río Guadiaro, relacionado con un pequeño afloramiento de materiales jurásicos alejado de la sierra de Líbar, pero relacionado hidrogeológicamente con este acuífero. La disposición de estos tres manantiales principales, junto al gran volumen de sus caudales, ha contribuido a considerar tradicionalmente que el flujo subterráneo principal se dirigía hacia dichos puntos. Simultáneamente se ha admitido la presencia de flujos secundarios dirigidos hacia el Este y el Sur, por lo que además de los tres manantiales antes citados, a lo largo del cauce del río Guadiaro o en sus proximidades (entre Benaoján y Jimera de Líbar), existen varias emergencias difusas y otras localizadas cuyo caudal medio conjunto se aproxima a los 300 L/s, que también corresponden a descargas de este acuífero.

Este esquema de tres direcciones de flujo puede ser considerado válido siempre que no se trate de asignar un papel dominante a ninguna de ellas y se circunscriba

exclusivamente al macizo principal de la unidad, por lo que el flujo subterráneo tiene que estar muy condicionado por factores tales como la complejidad estructural de la Sierra de Libar o la existencia de grandes sumideros canalizadores de importantes volúmenes de agua.

Los principales manantiales presentan un régimen de descarga irregular con fuertes variaciones de caudal (Fig. 2.4.), con agotamientos rápidos, propio de sistemas pocos reguladores. Por otra parte, la evolución temporal del quimismo del agua muestra que estos manantiales responden rápidamente ante las precipitaciones con importantes procesos de dilución, evidenciando así su carácter eminentemente kárstico (Carrasco *et al.*, 2001).

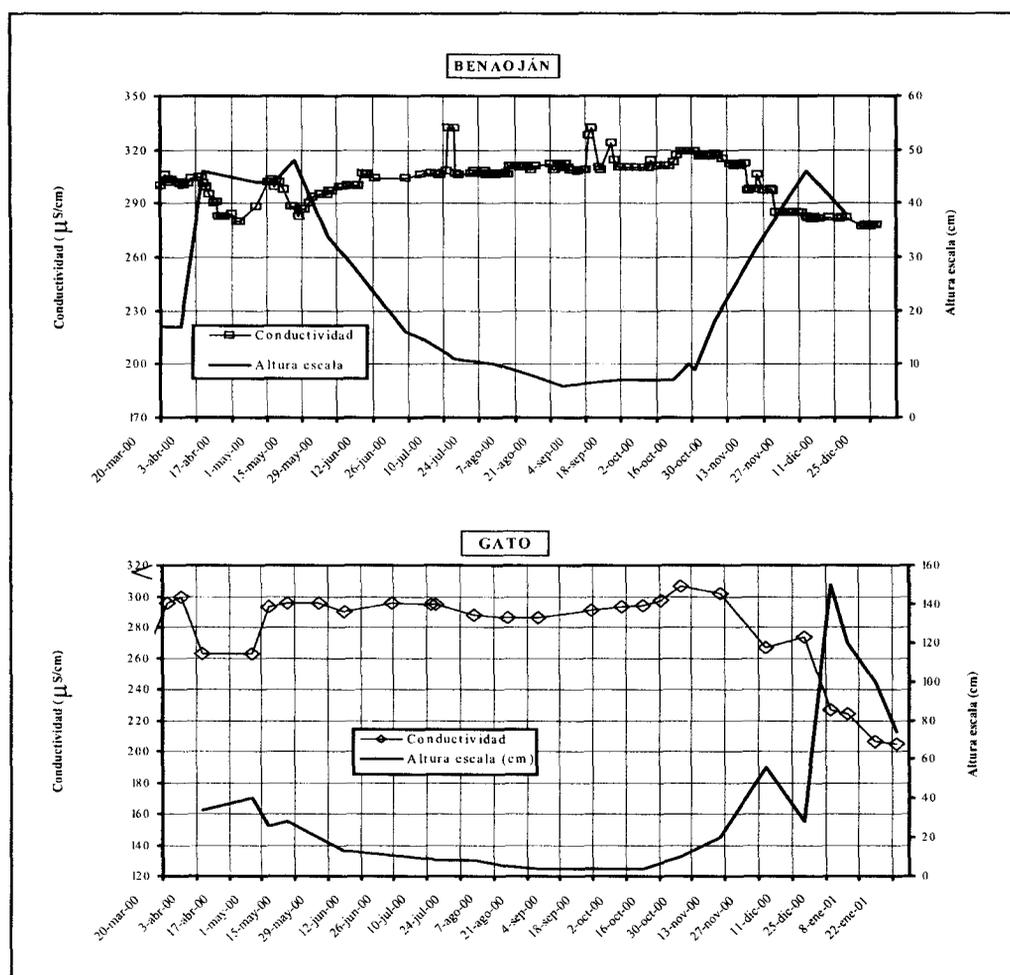


Fig.2.4. Evolución temporal de la altura de la lámina de agua (caudal) y de la conductividad eléctrica del agua en los manantiales de Sierra de Libar.

2.5. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA YUNQUERA-NIEVES

La Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves ocupa una superficie de 170 km² y forma parte de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Nieves y su Entorno, en el sector occidental de la provincia de Málaga. De Oeste a Este, está formada por la alineación montañosa que configuran las sierras de las Nieves, Yunquera, Prieta, Bonela y Alcaparaín.

Desde el punto de vista geológico está constituida por materiales pertenecientes a dos unidades tectónicas (Fig. 2.5): unidad de Nieves, en posición inferior, y, encima, la unidad de Yunquera. La primera es la que constituye la mayor parte de la Unidad Hidrogeológica y está formada por la siguiente serie estratigráfica (Dürr, 1967; Martín Algarra, 1987): dolomías de edad Noriense (1100 m de espesor), calizas negras con niveles de margas intercalados del Retiense (200 m), calizas con sílex del Lías (150 m), secuencia condensada del Jurásico Medio-Cretácico-Terciario formada por calizas nodulosas, radiolaritas y margocalizas (50 m) y, discordantes sobre todos los términos anteriores, se encuentra la brecha de la Nava de edad Mioceno inferior. La unidad tectónica de Yunquera aflora en las inmediaciones de la localidad de la que toma el nombre y presenta una serie estratigráfica formada por gneises y micaesquistos en la base (> 400 m de espesor), mármoles dolomíticos con intercalaciones de calcoesquistos (500 m) y mármoles calizos con intercalaciones metapelíticas (400 m).

La unidad de Nieves constituye un manto de corrimiento que reposa sobre el Penibético mediante una lámina de materiales arcillosos del Complejo del Campo de Gibraltar (Fig. 2.6) y es cabalgado por materiales alpujárrides (peridotitas, esencialmente) y maláguides (pizarras y grauvacas). La estructura geológica de la unidad de Nieves está formada por un pliegue sinclinal tumbado de dirección axial N40-60E y vergente al NO (Dürr, 1967; Martín Algarra, 1987). Por su parte, la unidad de Yunquera constituye un isleo tectónico en las proximidades del pueblo del mismo nombre y, además, aflora como escamas tectónicas (generalmente de escasa magnitud) en la zona de contacto entre la unidad de Nieves y las unidades alpujárride o maláguide cabalgantes.

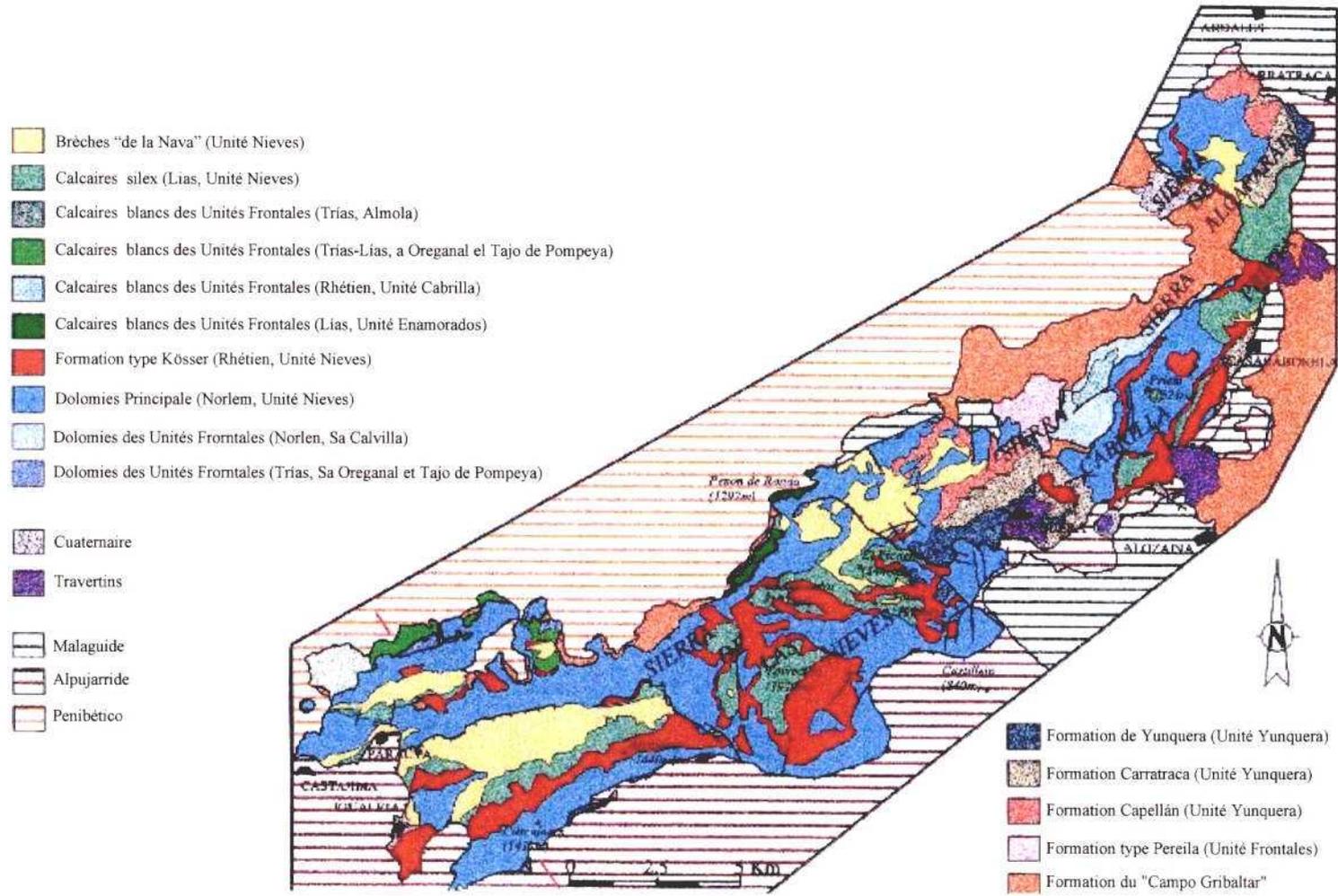


Fig. 2.5. Mapa geológico de las unidades tectónicas de Nieves y Yunquera (modificado de Martín Algarra, 1987).

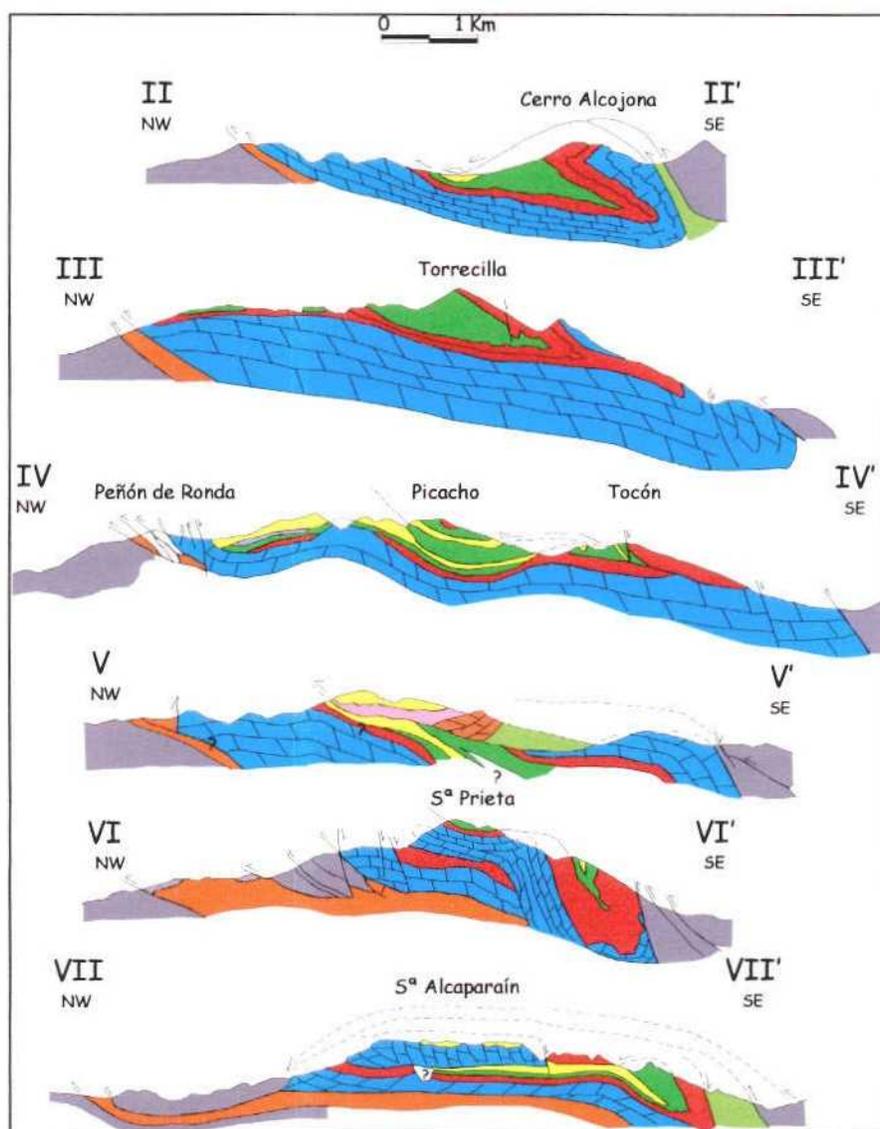


Fig. 2.6. Cortes geológicos de las unidades de Nieves y Yunquera (tomados de Martín Algarra, 1987). Ver leyenda en Fig. 2.4.

Después del cabalgamiento de la unidad de Yunquera sobre la de Nieves, se han producido fallas de dirección N130E que han funcionado como fallas transcurrentes y normales, han dado lugar a un sistema de horst y graben que ha compartimentado la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves (ITGE *et al.*, 1995; Pistre *et al.*, 2002).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la Sierra de las Nieves existen abundantes formas exokársticas de absorción como dolinas (especialmente en el sector central, cerca del vértice Torrecilla), polje (Llanos de la Nava) y lapiaz. A menudo, estas

formas exokársticas están conectadas con formas endokársticas (simas) de gran desarrollo vertical (Delannoy, 1987; 1998). En la Sima GESM, por ejemplo, se han explorado más de 1000 de desarrollo vertical. Sin embargo, desde Yunquera hacia el Este, las formas kársticas son escasas, debido a que la estructura sinclinal no es tan tendida como en la Sierra de las Nieves y, además, presenta escamas tectónicas que complican la estructura.

Las rocas carbonáticas de las unidades tectónicas de Yunquera y Nieves constituyen la Unidad Hidrogeológica del mismo nombre (Fig. 2.7), la cual queda limitada en sus bordes por materiales de baja permeabilidad: al NO las arcillas del Flysch del Campo de Gibraltar y al SE las peridotitas alpujárrides y las pizarras maláguides. La geometría de la Unidad Hidrogeológica queda determinada por la estructura sinclinal cuyo núcleo se encuentra en el borde SE, donde el contacto entre las rocas carbonatadas y las de baja permeabilidad se encuentra a menor cota y ello determina que todos los manantiales importantes se encuentren en este borde.

La recarga de la Unidad se produce mediante agua de lluvia y/o de fusión nival que se infiltra, generalmente de forma concentrada, a través de las abundantes formas exokársticas existentes. Por su parte, la descarga se produce por el borde SE y, generalmente, de modo natural (a través de manantiales); únicamente en las poblaciones de Yunquera, Alozaina, Casarabonela y Ardales existen sondeos para extracción de agua que sirve para completar los abastecimientos urbanos en momentos en los que los manantiales disminuyen mucho su caudal. Los manantiales más importantes están relacionados con el drenaje de la unidad tectónica de Nieves (IGME, 1983): Río Grande, surge a la cota más baja del macizo (450 m s.n.m.) y constituye el principal punto de descarga de la Unidad con un caudal medio del orden de 700 L/s, Río Verde (situado a 675 m s.n.m. y con un caudal medio de 400 L/s), Genal (700 m s.n.m. y 300 L/s) y Jorox (530 m s.n.m. y 150 L/s). La unidad tectónica de Yunquera se drena, principalmente, por el manantial del Plano, a cota 700 m s.n.m. y con un caudal medio de 100 L/s.

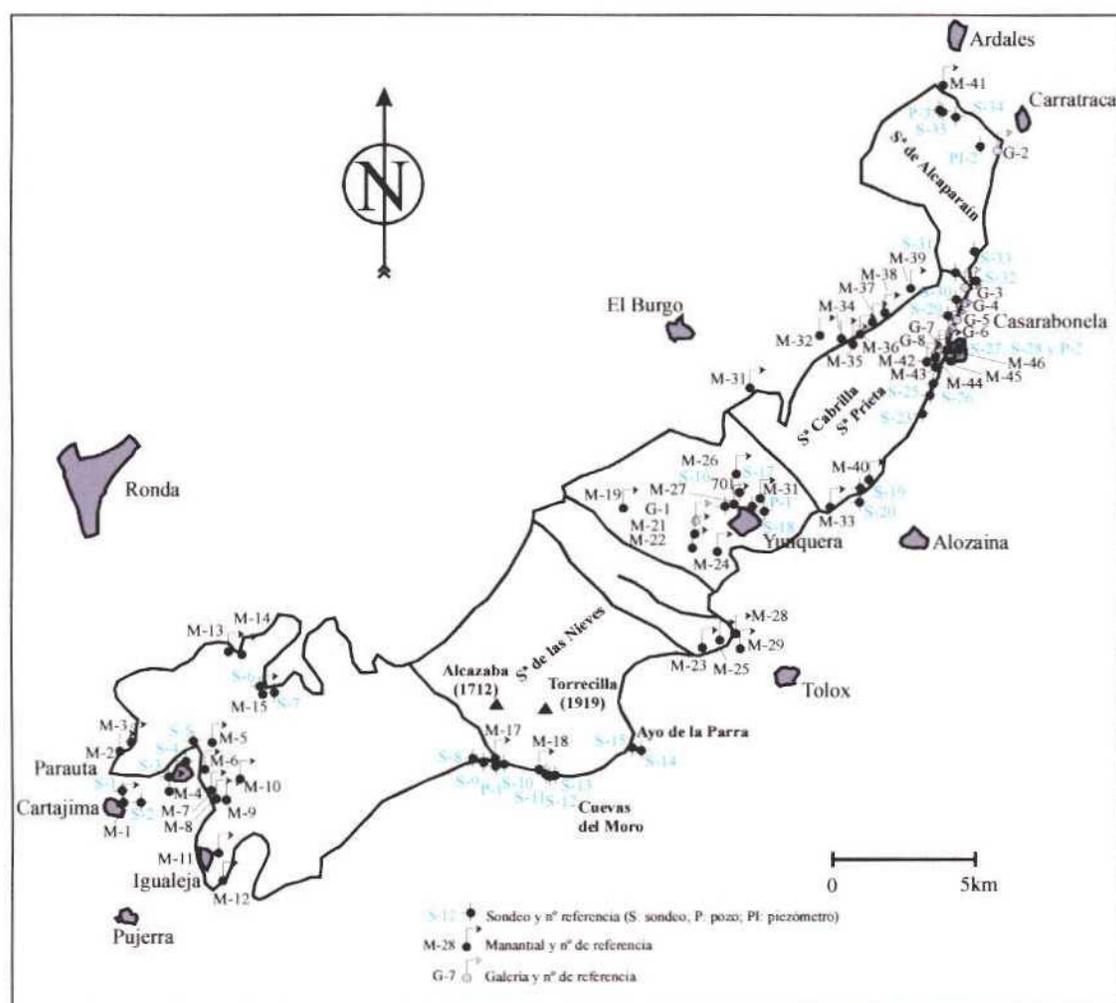


Fig. 2.7. Mapa hidrogeológico de la Unidad Yunquera-Nieves (Liñán, 2003).

A partir de la composición isotópica de las aguas subterráneas y teniendo en cuenta otros factores como la situación geográfica, la estructura geológica y la cota de surgencia de los manantiales pueden distinguirse dos sectores principales en la Unidad (Liñán *et al.*, 1999). El sector occidental, se drena por los manantiales de Genal, Verde y Grande; siendo éste último el principal punto de descarga. Dentro de dicho sector, la parte occidental, desde la falla que pasa por Río Verde (falla de las Turquillas) hacia el Oeste, se drena por las surgencias del Genal y del Verde, cuyas composiciones isotópicas son muy similares, mientras que desde la citada falla hacia el Este se drena por el manantial de Río Grande. La composición isotópica más ligera de las aguas de Río Grande, está en consonancia con la mayor altitud de su superficie de recarga, donde

se encuentra el vértice Torrecilla (1919 m), en cuyo entorno las precipitaciones suelen ser en forma de nieve durante el invierno. No obstante, la falla de las Turquillas no constituye una barrera hidrogeológica propiamente dicha, sino que permite el flujo hacia el Este, hacia el manantial de Río Grande. El ensayo de trazador realizado en la Sima G.E.S.M. (Durán y López Martínez, 1992) corrobora esta idea, ya que la fluoresceína vertida en el sifón final de la sima no se detectó en el manantial de Río Verde, como se esperaba por razones de proximidad, sino en el manantial de Río Grande, indicando que el flujo subterráneo se dirige hacia el NE.

La diferencia de cotas piezométricas y del contenido isotópico hicieron pensar, en un principio, en la existencia de dos sistemas acuíferos diferentes, que estarían separados por la falla de las Turquillas. Sin embargo, la continuidad de la estructura geológica a lo largo de todo el sector y el gran espesor de los materiales acuíferos en esta zona, sugieren que el accidente de las Turquillas no constituye una barrera hidrogeológica propiamente dicha, que impide el flujo hacia el Este, hacia el manantial de Río Grande. Se considera así, por lo tanto, un único sistema acuífero: el sistema de la Sierra de las Nieves (Liñán *et al.*, 2001).

El sector oriental de la Unidad se drena por el manantial de Jorox y otros de menor importancia situados en el borde del afloramiento carbonático. En concreto, el manantial de Jorox constituye el principal punto de descarga de Sierra Prieta; los mayores contenidos en isótopos estables de sus aguas, pueden estar relacionados con una altitud de recarga ligeramente menor pero también con una disminución de las precipitaciones de Oeste a Este en la Unidad Hidrogeológica.

En medio de los dos sectores anteriores hay un sector central, en los alrededores de la localidad de Yunquera, constituido por el isleto tectónico de la unidad del mismo nombre, que se drena por el manantial del Plano.

Desde el punto de vista hidrodinámico cabe señalar que los manantiales de la Sierra de las Nieves, en general, presentan un funcionamiento hidrogeológico de tipo kárstico (Fig. 2.8). El análisis de la forma de los hidrogramas de los tres manantiales principales, Río Genal, Río Verde y Río Grande pone de manifiesto rápidos e importantes aumentos del caudal en respuesta a los diferentes periodos lluviosos

registrados durante el período de estudio, con un desfase entrada-salida de un día o incluso inferior. En el hidrograma del manantial de Río Verde, aparecen abombamientos durante la decrecida, lo cual indica que, aunque existe cierto grado de desarrollo del drenaje en la zona no saturada (que favorece la infiltración rápida) éste tiene limitaciones, que favorecen el “colapso” del flujo en los conductos kársticos que alimentan al manantial y los fenómenos de inversión de gradiente (Liñán, 2003).

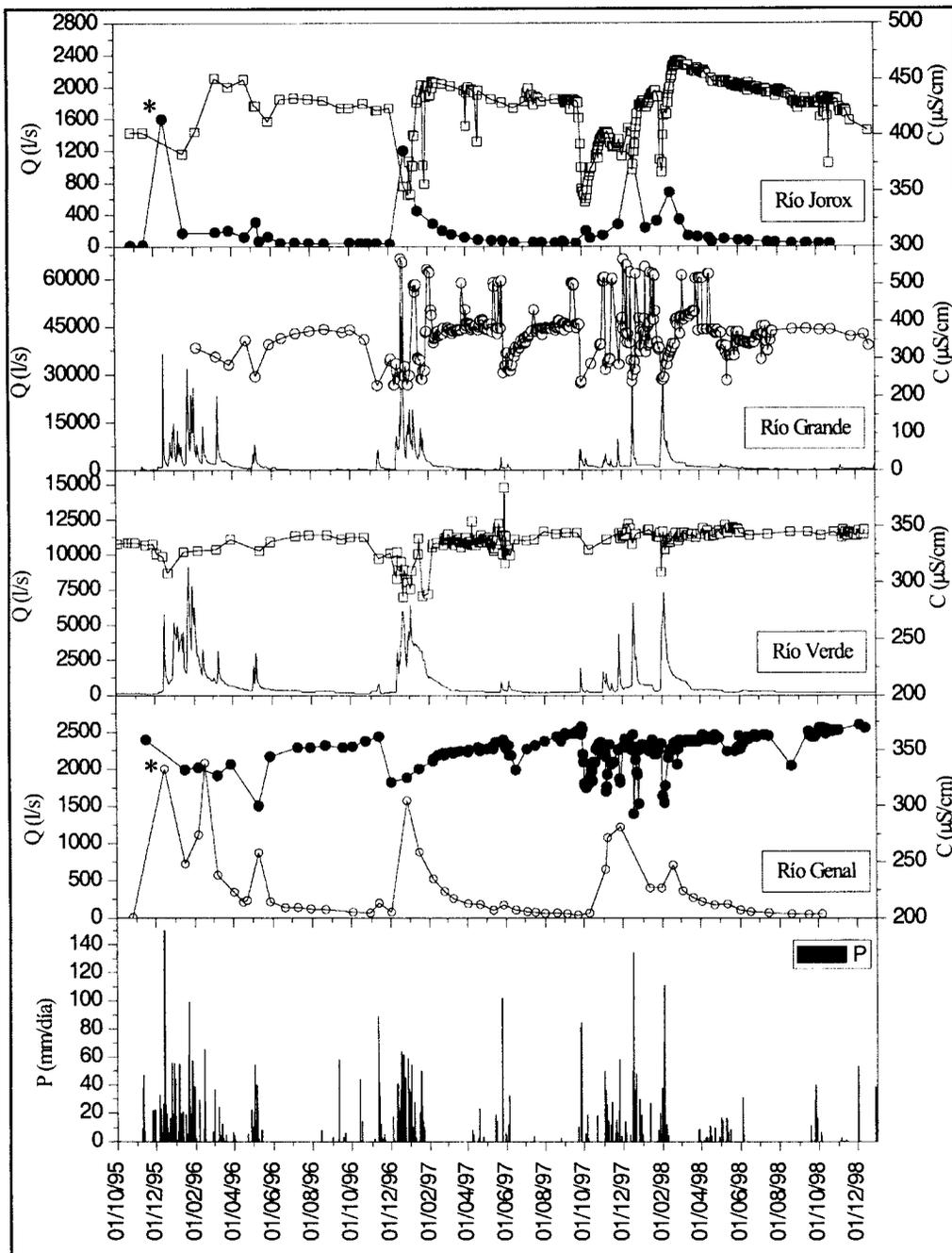


Fig. 2.8. Evolución temporal del caudal y de la conductividad eléctrica del agua en los principales manantiales de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves (Liñán, 2003).

A partir del análisis correlatorio y espectral se deduce que el sistema que drena el manantial de Río Verde posee un efecto memoria de 40 días, un tiempo de regulación de 40 días y una banda espectral ancha, con una frecuencia de corte de 0.20 (5 días), por lo que, en comparación con otros sistemas acuíferos estudiados en la Cordillera Bética, es un sistema con poca inercia (Liñán, 2003). La coincidencia entre los picos observados en los espectros simples de lluvia, caudal y de amplitud cruzada y la anchura de la banda espectral, indican la existencia de unos conductos kársticos bien desarrollados, a través de los cuales se produce un tránsito rápido del agua de lluvia, de manera que se conserva la información contenida en la señal de entrada. No obstante, la forma del correlograma cruzado, el relativamente elevado tiempo de regulación (40 días), el efecto memoria (40 días) y la importante atenuación de la señal de entrada para las altas frecuencias observada en el gráfico de la función de ganancia, ponen de manifiesto una circulación algo más lenta del agua de lluvia a través de una red kárstica menos desarrollada. Estos resultados estarían en consonancia con las observaciones realizadas sobre el hidrograma de la surgencia, en el sentido de que existe un cierto grado de desarrollo del drenaje, que favorece la infiltración rápida y la conservación de la señal de entrada, pero con ciertas limitaciones, que provocan los fenómenos de inversión de gradiente y una circulación más lenta del agua de lluvia a través del acuífero.

El menor rango de variación de la conductividad eléctrica en el gráfico de frecuencias y la menor magnitud de los procesos de dilución durante los períodos lluviosos observados en los manantiales de Río Verde y Río Genal, reflejan nuevamente la existencia de una red kárstica desarrollada, pero menos que en el caso del manantial de Río Grande, que muestra un rango de variación de la conductividad eléctrica mucho mayor y unos procesos de dilución más importantes desde el punto de vista cuantitativo.

Sin embargo, el manantial del Plano presenta un comportamiento más inercial, las variaciones de caudal y de composición química del agua en respuesta a las precipitaciones son más amortiguadas. Los mármoles fisurados de la unidad de Yunquera presentan, pues, un funcionamiento propio de un acuífero de flujo difuso más que de acuífero kárstico propiamente dicho.

En el sector oriental, el manantial más importante es el de Jorox, el cual presenta rápidos e importantes aumentos del caudal ante las precipitaciones (Liñán, 2003). El análisis de las curvas de recesión del hidrograma pone de manifiesto que el sistema drenado por la surgencia es relativamente kárstico. Los valores obtenidos del coeficiente de almacenamiento son del orden de 7×10^{-3} días⁻¹. Los aumentos de caudal van acompañados de rápidas e importantes disminuciones de los valores de la conductividad eléctrica del agua del manantial, reflejo de la existencia de una red kárstica relativamente desarrollada que permite la dilución del agua subterránea por la mezcla con el agua de lluvia, menos mineralizada. El amplio rango de variación de la conductividad eléctrica detectado en el gráfico de frecuencia refleja nuevamente la existencia de un cierto grado de karstificación funcional en el acuífero estudiado, confirmando así los resultados obtenidos en el estudio hidrodinámico.

2.6. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA BLANCA-MIJAS

Las Sierras Blanca y Mijas forman parte de la cadena montañosa que limita al Norte la Costa del Sol occidental, concretamente, están situadas entre las ciudades de Málaga y Marbella. Se trata de dos abruptos relieves carbonáticos, separados por el Puerto de Los Pescadores, en los que se alcanzan alturas superiores a 1000 m, a menos de 5 km de distancia media al mar. Las Sierras Blanca y Mijas constituyen una Unidad Hidrogeológica de gran interés, por la extensión que presenta (170 km²), en un área de elevada demanda de agua como la Costa del Sol, Sur de España. La precipitación media durante un periodo histórico (1963/64-1993/94) ha sido de 684 mm, aunque existe una importante variación espacial desde el sector occidental de Sierra Blanca (813 mm), hasta Sierra Mijas (607 mm)

La importancia estratégica de esta Unidad Hidrogeológica la ha convertido en una de las más estudiadas de España. En ella se han realizado diversos estudios hidrogeológicos (IGME, 1983 y 1985; CHS, 1992; ITGE 1992; DGOH, 1992; Andreo, 1997) con dos objetivos básicos: por una parte, conocer el funcionamiento hidrogeológico y las características hidráulicas de los acuíferos existentes y, por otra, realizar balances hidrogeológicos, precisar las entradas y salidas y el uso que se hace de éstas últimas.

Las Sierras Blanca y Mijas forman parte de la Unidad de Blanca (Mollat, 1968), perteneciente al Complejo Alpujárride, dentro de las Zonas Internas de la Cordillera Bética. La serie estratigráfica de la Unidad de Blanca está formada por dos conjuntos litológicos fundamentales: uno inferior metapelítico y otro superior carbonático. El conjunto inferior tiene una potencia del orden de 400 m, aflora principalmente en la vertiente meridional de las dos sierras (Fig. 2.9) y está constituido por migmatitas, gneises y esquistos, que se atribuyen al Paleozoico, por criterios de geología regional.

El conjunto superior presenta, a su vez, dos tramos claramente diferenciados. El tramo inferior está formado por mármoles blancos diaclasados, a menudo con aspecto sacaroideo, y de composición dolomítica; tiene una potencia aproximada de 300 m y su edad es Trías medio. El tramo superior está constituido por mármoles azules, de composición caliza, cuya potencia es de 300 m y la edad es Trías superior.

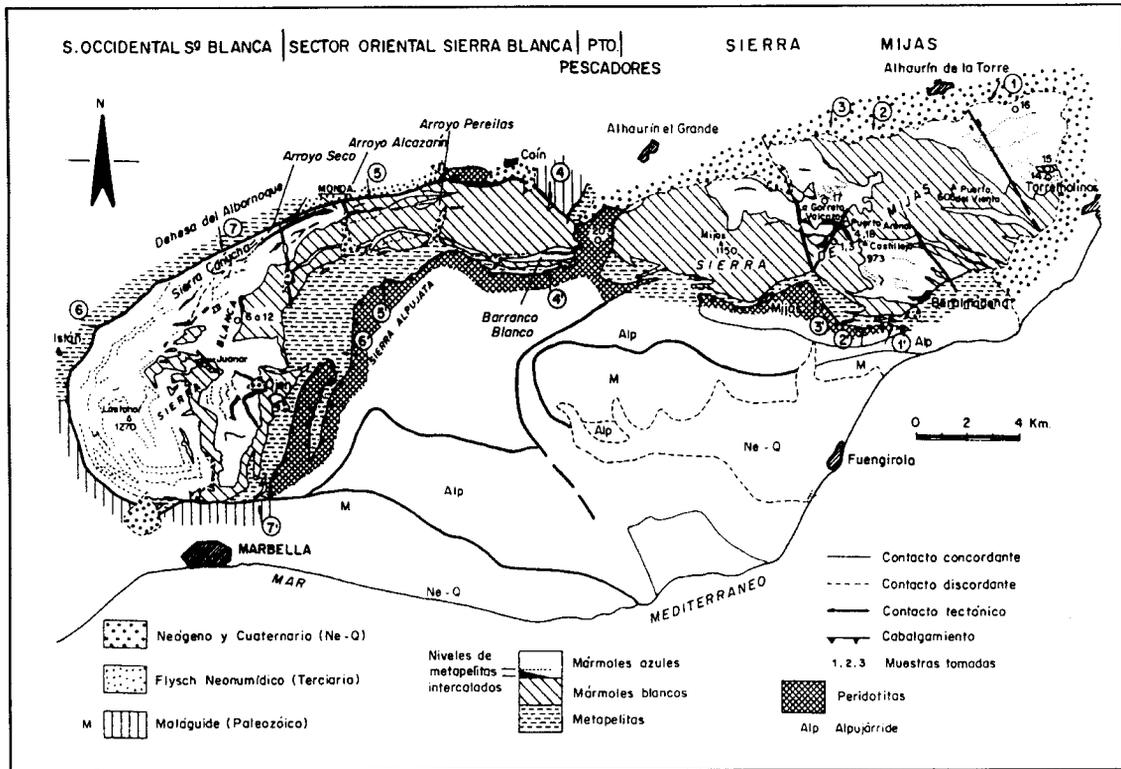


Fig. 2.9. Mapa geológico de las Sierras Blanca y Mijas (tomado de Sanz de Galdeano y Andreo, 1994).

La estructura geológica (Fig. 2.10) permite diferenciar tres sectores en la Unidad de Blanca (Sanz de Galdeano y Andreo, 1994): sector occidental de Sierra Blanca, sector oriental de dicha Sierra y sector de Sierra Mijas.

En el sector occidental de Sierra Blanca, la estructura geológica está determinada por la interferencia de pliegues con direcciones N-S y E-W, que dan lugar a una estructura en “caja de huevos”; esto es, un sistema de cubetas, ocupadas por los mármoles azules, y de domos, en cuyo núcleo afloran los mármoles blancos e incluso las metapelitas de la base de la serie. El sector oriental de Sierra Blanca presenta una estructura prácticamente tabular, constituida por los mármoles blancos, aunque hay un sinclinal vergente al Norte en la parte meridional. En Sierra Mijas, la estructura está formada por pliegues de dirección ENE-WNW, curvos en la terminación occidental y siempre vergentes hacia el interior de la Sierra.

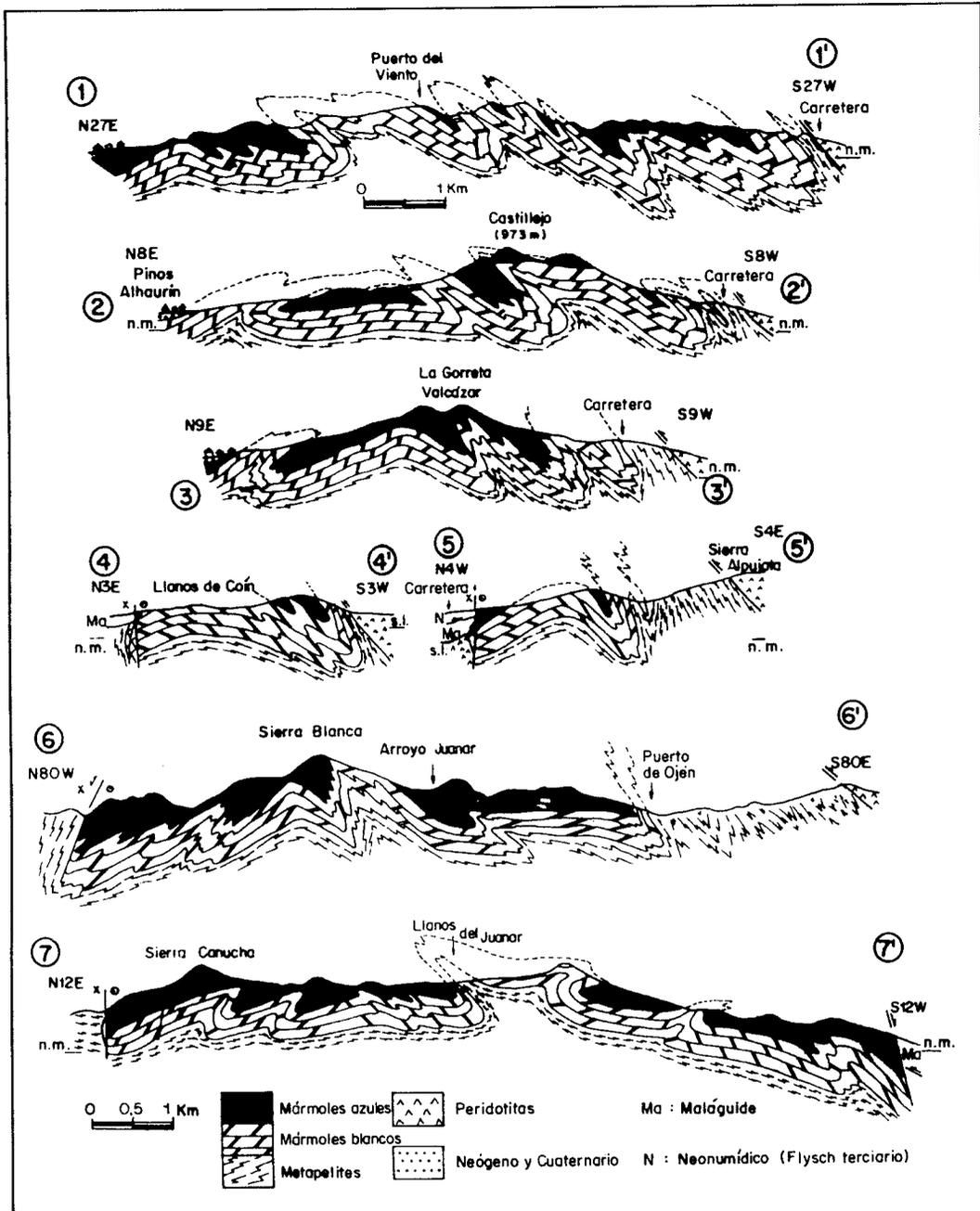


Fig. 2.10. Cortes geológicos de las Sierras Blanca y Mijas (tomado de Sanz de Galdeano y Andreo, 1994).

Las Sierras Blanca y Mijas están separadas, tanto en superficie como en profundidad, por un afloramiento de peridotitas existente en el Puerto de Los Pescadores, que no es más que la prolongación del macizo de Sierra Alpujata, perteneciente a la Unidad de Los Reales (Tubía, 1985), tectónicamente superpuesta a la de Blanca. Todas las estructuras plegadas han sido afectadas por fracturas, como las cartografiadas en el interior de la Unidad y en los bordes. Se ha realizado un estudio de

la fracturación que ha permitido constatar la existencia de dos orientaciones preferenciales de las fracturas (Andreo *et al.*, 1997): NNE-SSW y NNW-SSE.

En cuanto a las formas kársticas, cabe señalar que son escasas. Las formas exokársticas más abundantes son el lapiaz y los “llanos”, éstos últimos constituyen áreas topográficamente deprimidas, formadas por mármoles blancos que afloran a favor de estructuras tabulares. Las formas endokársticas (cavidades) también están poco representadas, la mayoría de ellas se reconocen en los mármoles azules calizos del sector occidental de Sierra Blanca y están condicionadas por fracturas de dirección NNW-SSE (Andreo, 1997).

Los mármoles triásicos que afloran en las Sierras Blanca y Mijas tienen una potencia total del orden de 600 m y ocupan una superficie de 170 km². Dichos materiales están muy fracturados y, en algunos sectores, también karstificados, lo que permite la circulación y acumulación de agua subterránea, constituyendo así la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas (Fig. 2.11.). Esta Unidad está limitada por fallas, al Norte, Este, Oeste y en algunos tramos del límite Sur, el cual es básicamente un contacto estratigráfico entre los mármoles y las metapelitas del substrato, que reposan en serie invertida sobre los mármoles.

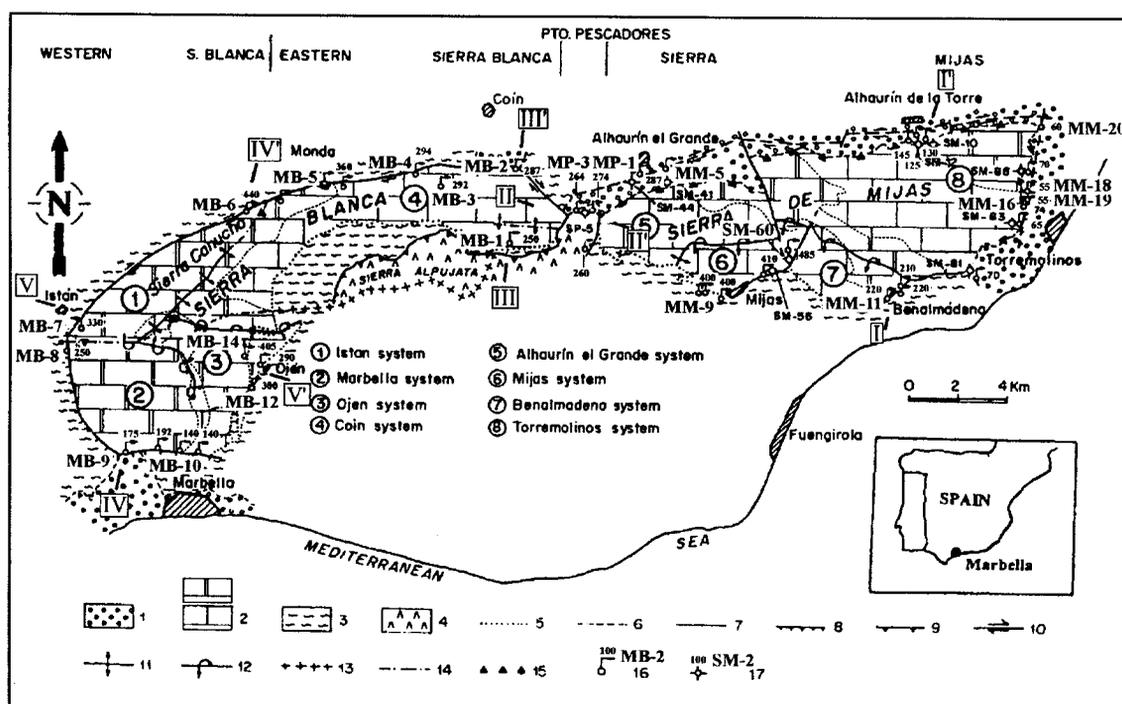


Fig. 2.11. Mapa hidrogeológico de la Unidad Blanca-Mijas (Andreo, 1997).

La geometría de la Unidad Blanca-Mijas está condicionada por la estructura geológica (Fig. 2.12). Así, la interferencia de pliegues con direcciones N-S y E-W en el sector occidental de Sierra Blanca determina su compartimentación en varios sistemas acuíferos que se drenan por los manantiales de los bordes. Las estructuras sinclinales vergentes hacia el interior de la Sierra dan lugar a geometrías en “fondo de saco”. El sector oriental de Sierra Blanca presenta una geometría casi tabular. En Sierra Mijas, también hay geometrías en “fondo de saco”, debido a la existencia, en sus bordes, de sinclinales tumbados vergentes hacia el interior del macizo. Los núcleos anticlinales ocupados por metapelitas originan divisorias hidrogeológicas que, junto con las fracturas NNE-SSW y NNW-SSE han dado lugar a la compartimentación de la sierra en sistemas acuíferos.

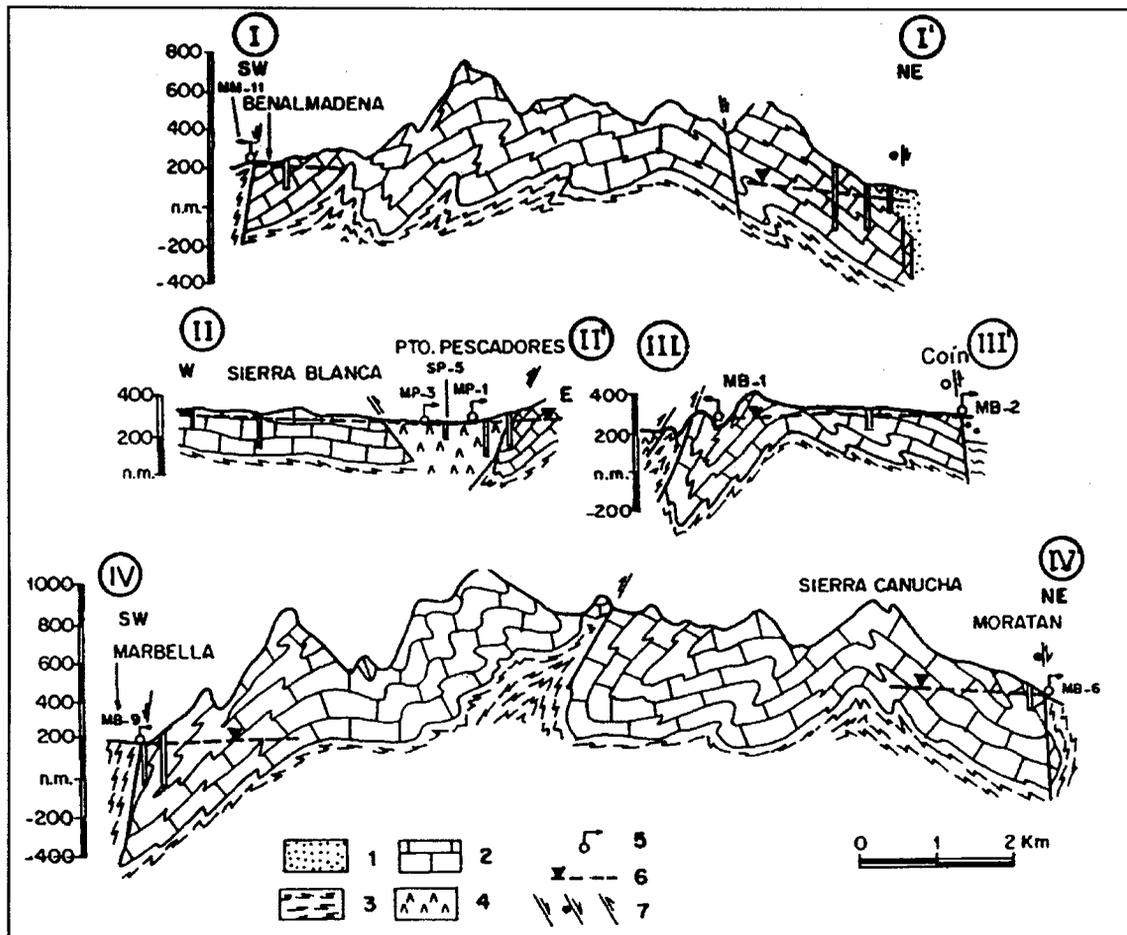


Fig. 2.12. Cortes hidrogeológicos de la unidad Blanca – Mijas (Andreo, 1997).

La recarga de la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas se produce por infiltración del agua de lluvia. La descarga tiene lugar, de modo natural, a través de los manantiales y, a través de bombeos, en los numerosos sondeos que existen, sobre todo en Sierra Mijas. Las cotas de surgencia de los manantiales y las cotas piezométricas en los sondeos son diferentes según el sector considerado, como ya se ha puesto de manifiesto en trabajos anteriores (IGME, 1983 y 1985; Andreo, 1997). En el sector occidental de Sierra Blanca las cotas de surgencia varían según el borde: 330-440 m s.n.m. en el septentrional, 175-192 m s.n.m. en el meridional y 290-405 m s.n.m. en el oriental. En el sector oriental de Sierra Blanca las cotas varían entre 250 y 360 m s.n.m. Y, en Sierra de Mijas, los manantiales también están a cotas diferentes según el área de que se trate: 287-290 m s.n.m. en Alhaurín el Grande, 400-485 m s.n.m. en Mijas, 210-220 m s.n.m. en Benalmádena, 125-145 m s.n.m. en Alhaurín de la Torre y 55-74 m s.n.m. en Torremolinos.

A la vista de estos datos, es evidente que existe una compartimentación de la Unidad Blanca-Mijas, tanto desde el punto de vista geológico como hidrogeológico.

A partir de los datos hidroquímicos de un muestreo realizado en 25 puntos representativos de la Unidad, mediante la aplicación de métodos de análisis multivariante, se pueden distinguir tres familias o grupos fundamentales de aguas, correspondientes a cada uno de los sectores diferenciados en la Unidad. Así, las aguas del sector occidental de Sierra Blanca son de facies bicarbonatada cálcica, presentan los contenidos más elevados en Sr, pero son las menos mineralizadas de la Unidad y no presentan radiactividad natural medible, porque drenan principalmente mármoles azules calizos, en los cuales existe un cierto grado de karstificación funcional y las aguas están poco tiempo en contacto con los materiales acuíferos.

En el sector oriental de Sierra Blanca, las aguas son de facies bicarbonatada magnésica y magnésico-cálcica, presentan contenidos más elevados en SiO_2 , SO_4^{2-} y Mg^{2+} , componentes éstos tradicionalmente asociados a flujos lentos. Son más mineralizadas que las del sector occidental y presentan radiactividad natural medible, porque drenan mármoles blancos dolomíticos, en los cuales existe un bajo grado de karstificación funcional y, por tanto, un mayor tiempo de permanencia del agua en contacto con los mármoles acuíferos.

Las aguas de Sierra Mijas, hidroquímicamente, son parecidas a las del sector oriental de Sierra Blanca, pero con la particularidad de que los contenidos en Cl^- y Na^+ son más elevados, porque el agua de lluvia que cae sobre Sierra Mijas presenta concentraciones más elevadas en dichos componentes.

A partir de la estructura geológica antes descrita y teniendo en cuenta la cota de surgencia de los manantiales, así como la distribución espacial del quimismo de las aguas, es posible distinguir ocho sistemas acuíferos en la Unidad Blanca-Mijas (Andreo, 1997; Andreo *et al.*, 2000): tres en el sector occidental de Sierra Blanca (Istán, Marbella y Ojén), uno en el sector oriental de dicha Sierra (Coín) y cuatro en Sierra Mijas (Alhaurín el Grande, Mijas, Benalmádena y Torremolinos).

Los manantiales del sector occidental de Sierra Blanca (Istán, Nagüeles, Ojén Y Moratán) presentan bruscos aumentos de caudal ante las precipitaciones, pasan de estar prácticamente agotados a drenar caudales de varios centenares de L/s (Fig. 2.13). En los manantiales equipados con aparatos de registro continuo (Ojén y Nagüeles) se ha podido constatar que la respuesta se produce al cabo de 2-3 horas de producirse el máximo pluviométrico. Del mismo modo, en los sondeos piezométricos se registran bruscas e importantes variaciones del nivel (en algún caso superiores a 100 m). La aplicación de métodos hidrodinámicos como los análisis de las curvas de recesión, correlatorio y espectral y de caudales clasificados, a los datos de caudal medidos en los manantiales de este sector, ponen de manifiesto que drenan sistemas de tipo kárstico, con escasa inercia y bajo poder regulador. En todos los casos el volumen dinámico se vacía, prácticamente, al cabo de un año; la mayor parte de éste volumen se drena en situación de aguas altas. Los datos hidrotérmicos e hidroquímicos permiten descomponer las distintas partes del hidrograma (crecida, decrecida y agotamiento), constatándose que la crecida es de corta duración y en ella se producen grandes diluciones, por la infiltración rápida de las aguas de lluvia. Los sondeos realizados en los sistemas del sector occidental de Sierra Blanca indican que la permeabilidad de los mármoles azules es baja, los valores de transmisividad obtenidos son inferiores a $100 \text{ m}^2/\text{día}$ y en los sondeos no es posible bombear caudales continuos de explotación superiores a 25 L/s, en el mejor de los casos. Por tanto, los sistemas acuíferos del sector occidental de Sierra Blanca, responden rápidamente ante las precipitaciones, porque drenan mármoles azules calizos, con un

cierto grado de karstificación funcional, presentan una baja inercia y un escaso poder regulador y, en definitiva, reservas limitadas. Se trata de acuíferos con un comportamiento propio de acuífero kárstico.

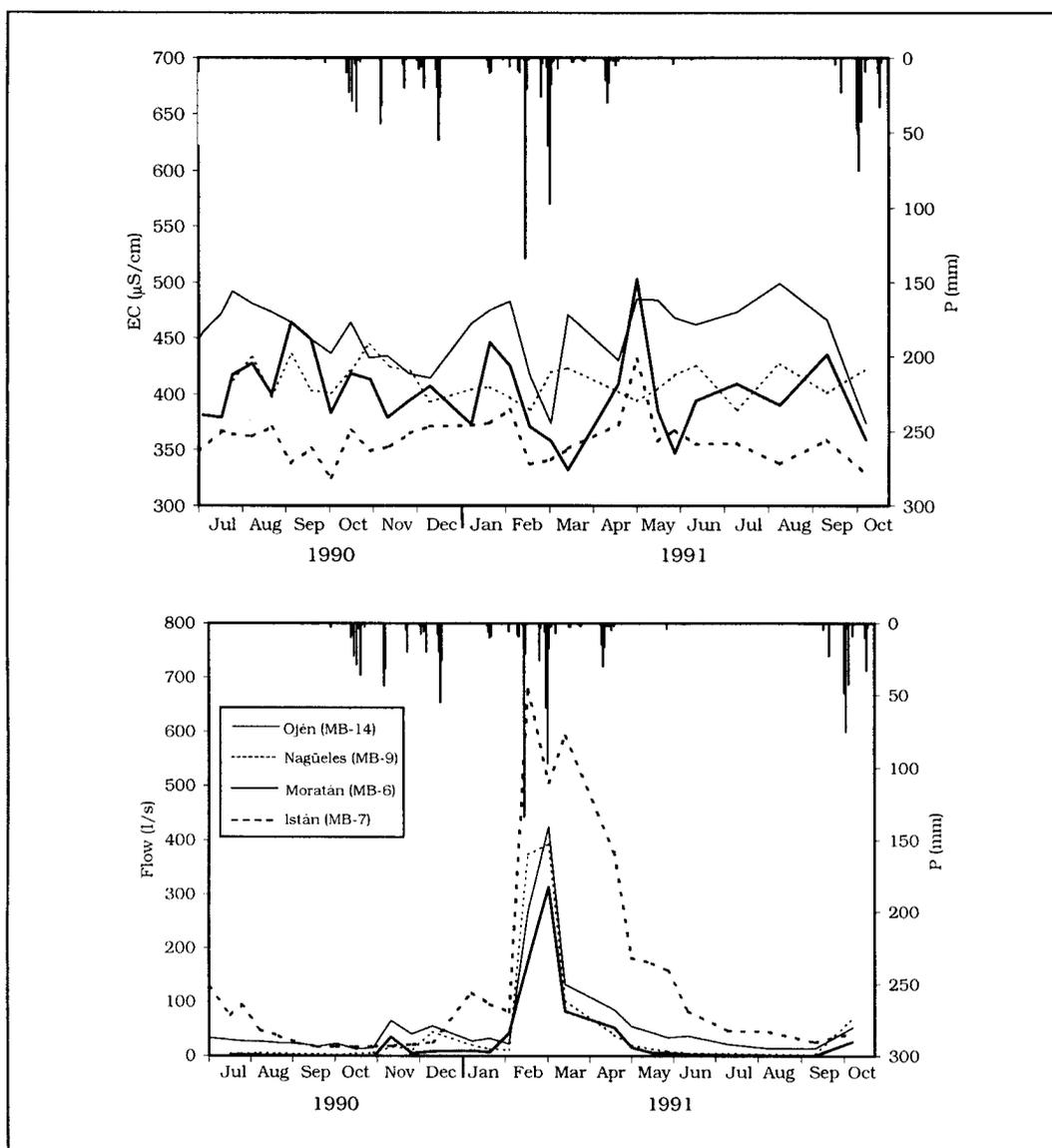


Fig.2.13. Evolución temporal del caudal y de la conductividad eléctrica del agua en los manantiales del sector occidental de Sierra Blanca.

El sector oriental de Sierra Blanca constituye el sistema de Coín, dentro del cual el flujo subterráneo se realiza de Oeste a Este, donde se encuentra el manantial de Coín, principal punto de descarga del sistema. Así lo corrobora la disminución progresiva de la cota piezométrica y el aumento de la temperatura del agua, de la radiactividad natural y de la mineralización; los mayores valores se registran siempre en el agua del manantial de Coín. El sistema de Coín está formado por mármoles, fundamentalmente blancos

dolomíticos, y por peridotitas y migmatitas que afloran en la vertiente septentrional de Sierra Alpujata. Los bajos contenidos en algunos componentes químicos mayoritarios (SiO_2 y Mg^{2+}) y en elementos trazas (Ni y Cr) de las aguas sugieren una escasa influencia de los materiales de baja permeabilidad en el funcionamiento del sistema.

El hidrograma del manantial de Coín (Fig. 2.14) y las evoluciones piezométricas de los sondeos del sistema, pese a estar afectados por bombeos, permiten interpretar que las respuestas ante las precipitaciones se producen de forma lenta. A los datos de caudal registrados en este manantial se han aplicado varias metodologías de estudio (análisis de la curva de recesión, análisis correlatorio y espectral, análisis de caudales clasificados), lo cual ha puesto de manifiesto que el sistema presenta bajo grado de karstificación funcional, gran inercia y poder regulador elevado. En este caso, al cabo de un año, no se drena ni la mitad del volumen dinámico del sistema. Los datos de temperatura y del quimismo del agua, indican que el manantial está, prácticamente, el mismo tiempo en situación de crecida y de agotamiento. Además, las variaciones de estos parámetros se producen de forma muy amortiguada.

Los sondeos perforados en las proximidades del manantial de Coín, permiten extraer caudales continuos de explotación del orden de 100 L/s, porque los mármoles son muy transmisivos (hasta 5000 $\text{m}^2/\text{día}$). Todos los datos apuntan a que el sistema de Coín responde lentamente a las precipitaciones, como consecuencia de la menor karstificación funcional de los mármoles que lo constituyen; en este caso, las reservas de agua son abundantes. El comportamiento de este sistema es más parecido al de un acuífero de flujo difuso.

En la Sierra de Mijas, sólo se dispone de datos de caudal de los manantiales de Torremolinos, cuyos hidrogramas muestran variaciones de caudal muy amortiguadas ante las precipitaciones (Fig. 2.14). La aplicación de los análisis de curvas de recesión, correlatorio y espectral y caudales clasificados ha puesto de manifiesto que el sistema de Torremolinos presenta una gran inercia y un enorme poder regulador, mayor que en el sistema de Coín, como consecuencia del bajo grado de karstificación funcional que presentan los mármoles blancos dolomíticos. En el sistema de Torremolinos el vaciado del volumen dinámico se produce lentamente, puesto que al cabo de un año se drena menos de un 25% del mismo.

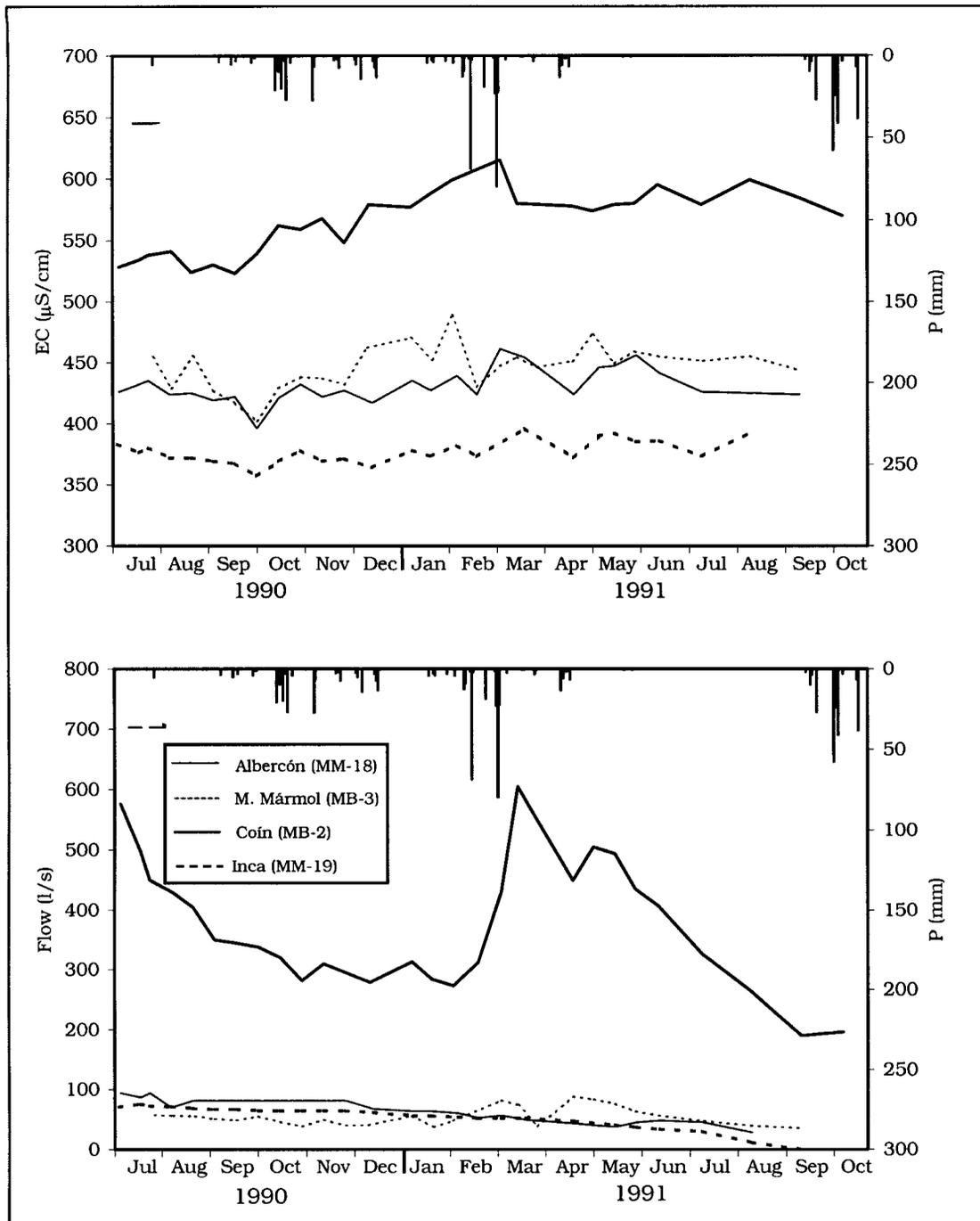


Fig. 2.14. Evolución temporal del caudal y de la conductividad eléctrica del agua en los manantiales del sector oriental de Sierra Blanca y Sierra de Mijas.

Los datos hidroquímicos e hidrotérmicos disponibles, relativos a las aguas de los sistemas de Sierra Mijas, indican que las variaciones temporales son prácticamente inexistentes, es decir, hay una gran homogeneidad hidroquímica como consecuencia de la homogeneidad hidrodinámica que caracteriza dichos sistemas.

La información procedente de los abundantes sondeos perforados, demuestra que las cavidades kársticas son muy escasas, pero los mármoles presentan abundantes tramos fisurados, con diaclasas abiertas de anchura centimétrica. En general, los sondeos realizados en los sistemas de Sierra Mijas permiten bombear caudales continuos de explotación superiores a 50 L/s, en el sistema de Torremolinos pueden llegar a ser de 100 L/s. Esto se debe a que los mármoles blancos diaclasados, son muy transmisivos; a partir de los ensayos de bombeo practicados se obtienen transmisividades del orden de $10^3 \text{ m}^2/\text{día}$.

Como consecuencia de la importante explotación que se lleva a cabo en los sistemas de Sierra Mijas, sobre todo en el de Torremolinos, las evoluciones piezométricas presentan tendencias descendentes, aunque interrumpidas por los ascensos del nivel correspondientes a los años húmedos.

Por tanto, todos los datos disponibles apuntan a que los sistemas de Sierra Mijas presentan comportamientos hidrogeológicos más parecidos a los del sistema de Coín que a los del sector occidental de Sierra Blanca; concretamente, el sistema de Torremolinos es claramente más inercial y tiene un poder regulador más elevado que el de Coín. Las reservas de agua almacenadas en Sierra Mijas son importantes, como lo corrobora la gran explotación que se está llevando a cabo de las mismas (del orden de $30 \text{ hm}^3/\text{año}$).

2.7. SIERRA GORDA DE LOJA

El acuífero kárstico de Sierra Gorda (Delgado *et al.*, 1974; López Chicano, 1992) está situado en la parte occidental de la provincia de Granada, cerca del límite con la de Málaga. Como otros muchos macizos carbonáticos del Sur de España se encuentra desprovista de cobertura vegetal. La precipitación media sobre el macizo es de 840 mm y la evapotranspiración real es aproximadamente el 46 % de la lluvia.

En la Sierra Gorda de Loja y su entorno afloran materiales correspondientes a dos unidades tectónicas (Fig. 2.15): la de Sierra Gorda correspondiente al dominio Subbético Interno y la de Zafarraya de atribución incierta (Martín Algarra, 1987). La serie estratigráfica de ambas unidades presenta, en la base, arcillas y evaporitas del Trías Keuper; encima, una secuencia carbonática (dolomías y calizas) de 1000 m de espesor y edad Jurásico, y, en la parte alta, margas y margocalizas del Cretácico-Paleógeno; en los poljes hay, discordantes, sedimentos detríticos recientes de edad neógeno-cuaternario.

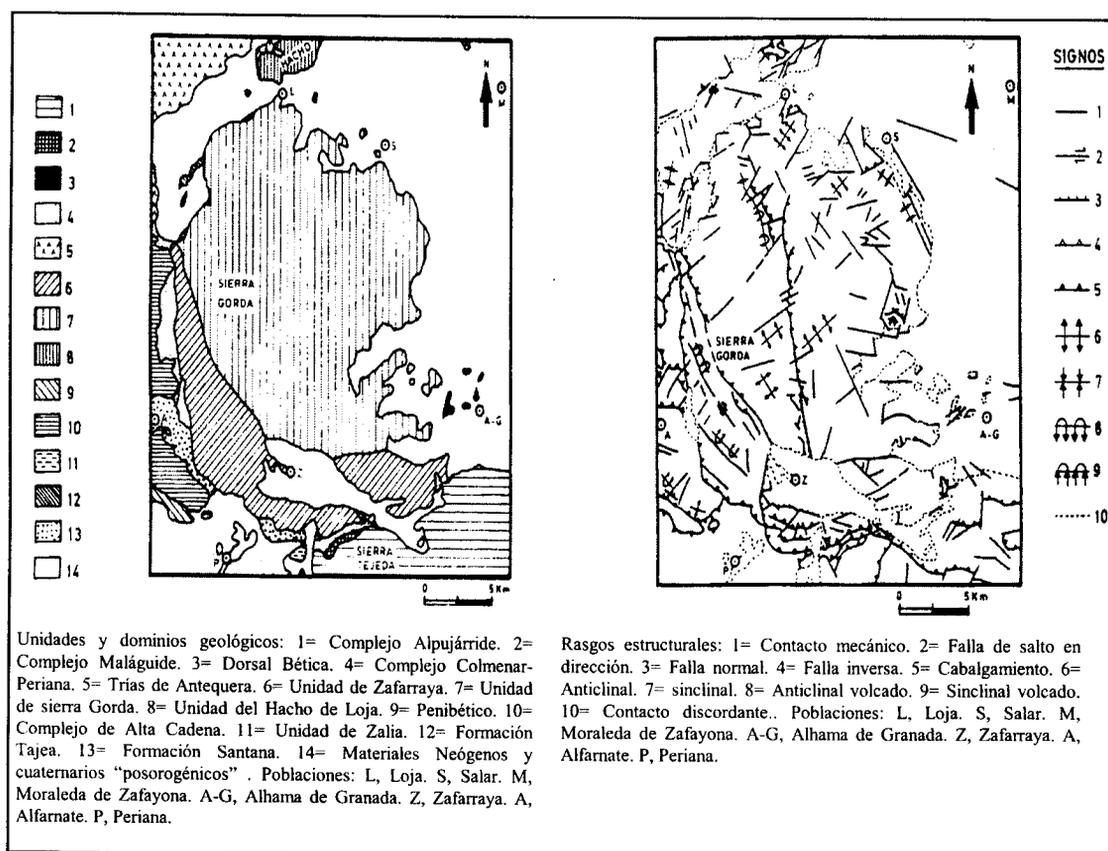


Fig. 2.15. Mapa geológico de Sierra Gorda de Loja y Sierra de Alhama (López-Chicano, 1992).

La unidad de Sierra Gorda presenta una estructura geológica (Fig. 2.16) que responde a un anticlinorio vergente hacia el Oeste, Sur y Sureste, según el sector considerado, resultado de la interferencia de dos sistemas de pliegues con ejes N150E y N30-50E (Lupiani y Soria, 1988).

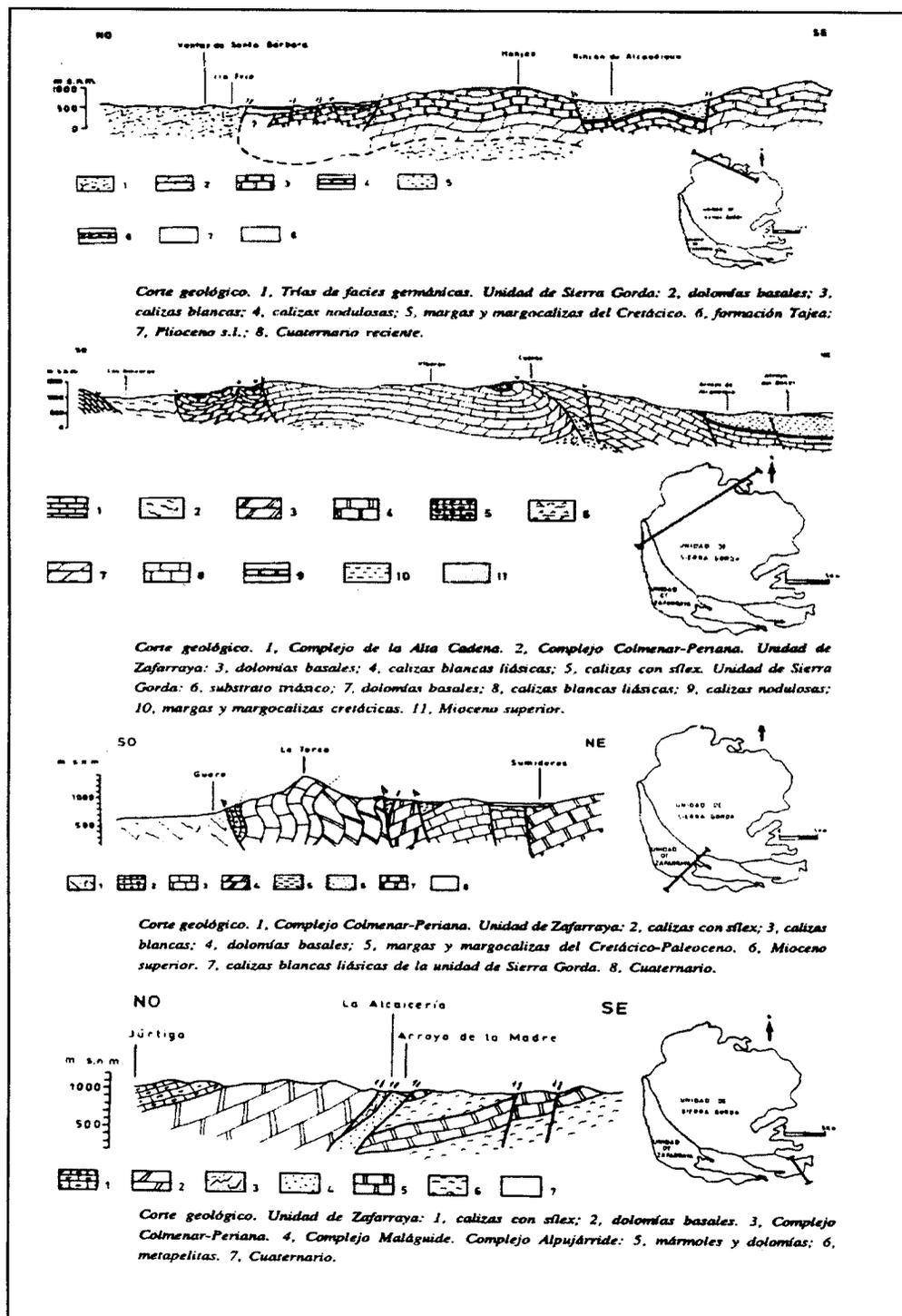


Fig. 2.16. Cortes geológicos de la Sierra Gorda de Loja y Sierra de Alhama de Granada (López-Chicano, 1992).

Esta unidad se encuentra superpuesta tectónicamente a la unidad de Zafarraya por medio de fallas subverticales. Ambas unidades han sido afectadas posteriormente por abundantes fracturas con cuatro direcciones principales (López-Chicano, 1992): N0-10E, N40-50E, N90-100E y N140-150E.

Desde un punto de vista geomorfológico abundan las formas kársticas como poljes (Zafarraya, Dona y Dedil), dolinas, lapiaces, sumideros, simas, cuevas, etc, cuyo control estructural es muy patente. La abundancia de formas kársticas provoca que la escorrentía superficial sea casi inexistente en Sierra Gorda, pues la que pudiera generarse termina infiltrándose en el acuífero.

La unidad hidrogeológica de Sierra Gorda está formada por dos acuíferos principales: el acuífero carbonático que constituyen las dolomías y calizas jurásicas de las unidades tectónicas de Sierra Gorda y Zafarraya, permeables por fisuración y karstificación, y el acuífero detrítico del polje de Zafarraya. Ambos acuíferos se encuentran conectados hidrogeológicamente.

El acuífero de Sierra Gorda presenta una superficie de 293 km² y es un acuífero libre, aunque se encuentra confinado, localmente, en los bordes norte y este bajo los sedimentos de la depresión de Granada. El acuífero se encuentra bien delimitado por los materiales de baja permeabilidad que hay en sus bordes; sólo en el borde septentrional podría existir conexión con el río Genil a través de los depósitos travertínicos (López Chicano, 1992).

La recarga de la unidad hidrogeológica se produce principalmente por infiltración de una parte del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos permeables (carbonáticos y detríticos). Otra parte de la recarga tiene su origen en la infiltración del Arroyo de la Madre a través de un sumidero existente en el polje de Zafarraya.

La descarga de la Unidad Hidrogeológica de Sierra Gorda se produce, fundamentalmente, en el borde norte, a través de los manantiales de Río Frío (caudal medio = 1300 L/s) y de otros situados más hacia el Este (Plines, Genazal). En el río Genil, a su paso por Loja, es muy probable que exista una descarga oculta o no controlada hacia el cauce. Una parte mínima del drenaje del acuífero se produce a través

del manantial de Guaro (Periana, Málaga), situado en la vertiente mediterránea. Existe una divisoria hidrogeológica a la altura de Zafarraya con variaciones locales del nivel piezométrico superiores a 100 m (López-Chicano, 1992).

El análisis de la descarga de los manantiales realizado por López Chicano (1992) pone de manifiesto que el sistema de Sierra Gorda presenta un comportamiento hidrodinámico más próximo al de un medio fisurado u homogéneamente karstificado que al de un medio fuertemente heterogéneo y anisótropo (Fig. 2.17). Los tiempos medios de respuesta a los impulsos pluviométricos son importantes, en general, superiores a una semana. La memoria del sistema también es alta, en cualquiera de los casos, superior a 40 días. La capacidad de regulación natural del sistema es, por lo tanto, muy elevada, pese a tratarse de un acuífero en rocas karstificadas.

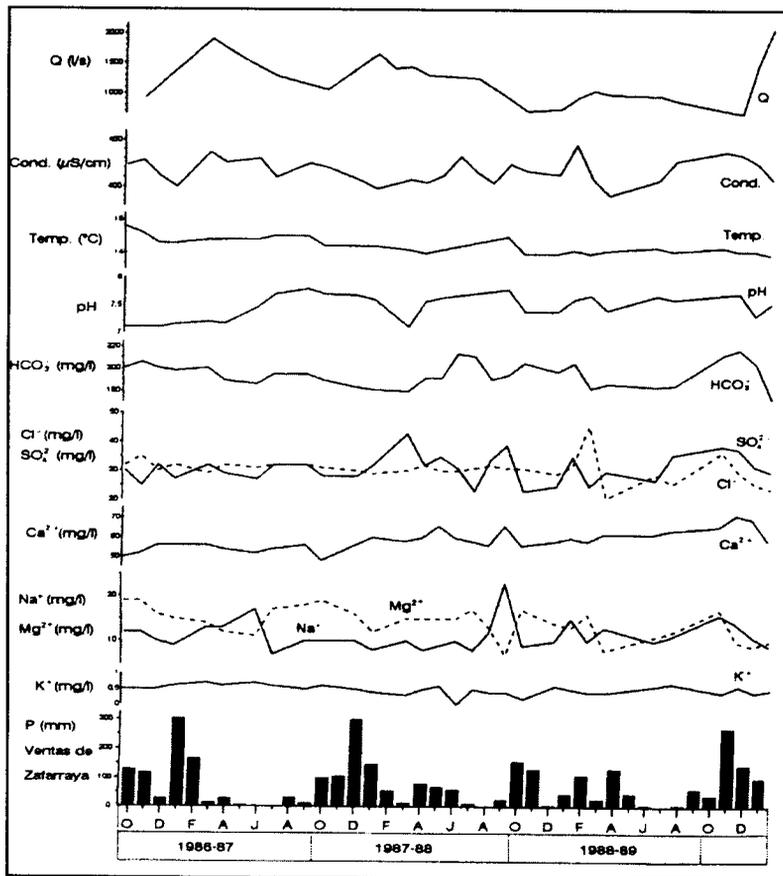


Fig. 2.17. Evolución temporal del caudal y de la conductividad eléctrica del agua en el manantial de la Trucha (Río Frio). Tomada de López-Chicano, 1992.

El análisis correlatorio y espectral y el análisis de hidrogramas de los manantiales de Río Frío corroboran el comportamiento inercial del acuífero de Sierra Gorda (López Chicano, 1992). Así, el efecto memoria es de 57-80 días y el coeficiente de agotamiento es de $5 \cdot 10^{-3}$ días⁻¹.

El análisis de las curvas de recesión del manantial de Guaro muestra coeficientes de agotamiento relativamente elevados ($2 \cdot 10^{-2}$ días⁻¹). Sin embargo, según López Chicano (1992), el análisis correlatorio y espectral permite constatar que el efecto memoria es de 70-90 días y que el funcionamiento del manantial, similar al de un *trop plein*, no es tan marcadamente kárstico como pudiera deducirse del análisis del hidrograma.

2.8. SIERRAS DE CABRA Y RUTE-HORCONERA

Estas sierras se sitúan al sureste de la provincia de Córdoba, aproximadamente en el centro geográfico de Andalucía y forman parte de la Zona Externa de la Cordillera Bética, concretamente de la Zona Subbética: la Sierra de Cabra pertenece al Subbético Externo, mientras que la Sierra de Rute-Horconera es más bien del Subbético Medio.

Las características tectónicas de las sierras subbéticas cordobesas son complejas, respondiendo su estructura a una superposición de mantos de corrimiento, resultado del desplazamiento horizontal, de sur a norte, de unidades alóctonas. La mayor parte de las veces es el Trías de facies germánicas, detrítico-evaporítico, el que actúa como nivel de despegue.

Desde el punto de vista estratigráfico, en el Subbético Externo se pueden diferenciar dos dominios: septentrional y meridional. El dominio Subbético Externo septentrional comprende las sierras de Cabra y Alcaide (Fig. 2.18) y aflora a modo de ventana tectónica en el núcleo de una gran anticlinorio. Sus series son potentes, presentando calizas y dolomías del Lías inferior y medio, calizas oolíticas del Dogger y calizas nodulosas del Malm.

El dominio Subbético Externo Meridional comprende las sierras de Gaena, Los Hoyones, otras pequeñas sierras localizadas al este y sureste de las anteriores y diversos afloramientos situados en el interior del macizo Cabra-Alcaide. Está constituido por una formación calizo-dolomítica del Lías inferior y medio, similar a la unidad anterior, y una formación menos potente de calizas con sílex del Dogger-Malm.

El Subbético Medio incluye la mayor parte de las sierras de Rute y de la Horconera, estando caracterizado por una base calizo-dolomítica similar a la del Subbético Externo, junto a niveles de Ammonítico Rosso, coladas volcánicas submarinas, radiolaritas y calizas turbidíticas con sílex en el Jurásico medio y superior.

En las sierras subbéticas existen múltiples cuencas hidrogeológicas de distinto tamaño e importancia. Los acuíferos principales (Fig. 2.18), de naturaleza carbonatada, coinciden con las grandes unidades montañosas: a) el macizo de Cabra-Alcaide, que es

el de mayor extensión e interés; b) las sierras de Gaena, los Hoyones y Cerros del Palajo (al este de los anteriores); c) las Sierras de Rute y de la Horconera; d) otros relieves de menor entidad.

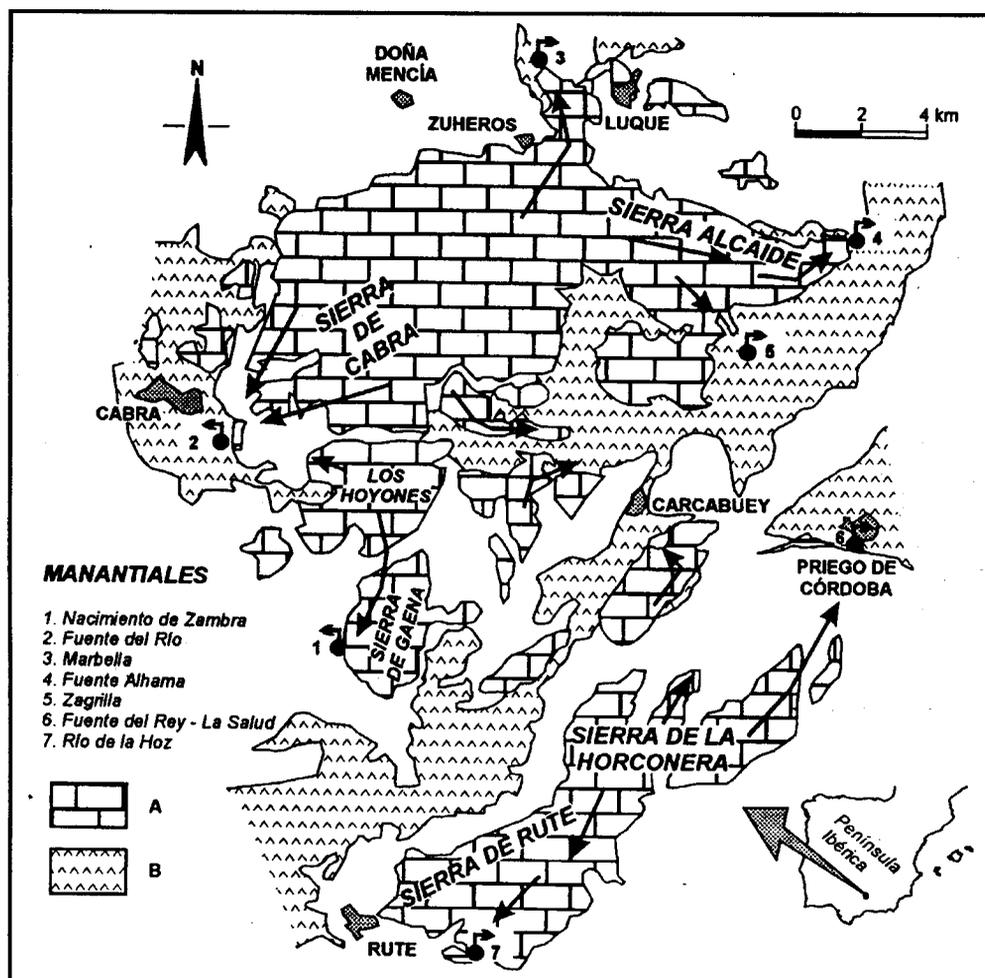


Fig. 2.18. Mapa geológico-hidrogeológico de las Sierras de Cabra y Rute-Horconera (tomado de Bouamama et al., 1996).

Los niveles de acuíferos del macizo de Cabra-Alcaide están constituidos fundamentalmente por las calizas y dolomías del Lías y las calizas oolíticas del Dogger, con una potencia total que alcanza los 600 m. An algunos puntos, sobre esos dos conjuntos carbonáticos se superponen tectónicamente afloramientos de calizas y dolomías del Lías inferior y medio, correspondientes a la unidad de Gaena. Cuando la base triásica de estos isleos se encuentra muy laminada, puede existir conexión hidráulica entre los tres paquetes carbonáticos. La extensión de materiales kársticos es de unos 105 km² en este macizo.

El substrato impermeable de esta unidad hidrogeológica corresponde, esencialmente, a margas y margocalizas cretácicas de otras unidades, en el sector septentrional, donde el Triásico está muy laminado. No ocurre así en buena parte de Sierra Alcaide. En el resto del acuífero no se observa el substrato, aunque debe corresponder a ambos tipos de materiales.

Al norte y al este de la unidad, el substrato aflora constituyendo sus bordes impermeables, mientras que al sur y al oeste la unidad se encuentra confinada, esencialmente, bajo el Trías de la unidad cabalgante (unidad de Gaena), existiendo áreas de artesianismo surgente como la localizada al noroeste de Carcabuey (Felgueroso y Coma, 1967).

La alimentación se produce, principalmente, a partir de la infiltración de parte del agua de lluvia; además, existe una pequeña recarga indirecta a partir de la infiltración del río Bailón. La descarga se produce a través de cuatro manantiales principales: Fuente del Río, con un caudal medio de unos 400 L/s, y de cota 500 m s.n.m.; el manantial de Marbella, con 70 L/s de descarga media, a cota 480 m; Fuente Alhama y el manantial de Zagrilla, en el sector oriental, situados a cota 470 y 580 m, y con caudales medios de 340 y 90 L/s, respectivamente. Todos los datos de caudal se refieren el período Octubre de 1995-Julio de 1996.

El Nacimiento de Zambra (300 L/s) se encuentra en la vertiente suroriental de la Sierra de Gaena, a 500 m de cota, y constituye el principal punto de drenaje de una serie de afloramientos carbonáticos integrados en la unidad de Gaena. Desde el punto de vista hidrogeológico, las únicas formaciones de interés son las dolomías y calizas del Lías inferior, con una potencia próxima a 200m. El límite septentrional viene impuesto por los materiales impermeables triásicos de la base, mientras que los restantes están definidos por potentes formaciones margosas postliásicas y cretácicas que terminan constituyendo barreras al flujo. La alimentación de este acuífero procede, prácticamente en su totalidad, de la infiltración de parte del agua de lluvia precipitada sobre los materiales carbonáticos aflorantes. Las salidas, como en el acuífero anterior, tienen lugar a través de surgencias naturales, dado que las extracciones por bombeo en pozos que captan los niveles son casi inexistentes.

Las dolomías y calizas dolomíticas del Lías constituyen básicamente los niveles acuíferos de la Sierra de Rute-Horconera. Este acuífero presenta un desarrollo alargado en dirección NE-SO, con una superficie total de 83 km². La potencia de carbonatos varía entre 600 y 1000 m (Pulido Bosch *et al.*, 1996). En todos los bordes de la unidad, a menudo confinándola, afloran materiales de baja permeabilidad posteriores al Lías medio, salvo en su extremidad nororiental (Priego de Córdoba), donde el límite cerrado viene marcado por afloramientos del substrato detrítico-evaporítico triásico. La alimentación procede, mayoritariamente, de la infiltración de la lluvia, aunque, una parte corresponde a la infiltración del arroyo de las Herreras o Río de la Hoz.

Este acuífero se divide en varios subsectores, aún mal establecidos y conocidos desde el punto de vista de su geometría y estructura. La descarga de sus recursos tiene lugar a través de varios manantiales de cierta importancia: el manantial Fuente del Rey-la Salud (150 L/s de caudal medio), situado en el extremo nororiental, a cota 660 m s.n.m. y la surgencia del Río de la Hoz (Fig. 2.19), el punto de mayor descarga (450 L/s), ubicado en el extremo SW de la unidad. Para éste último, Castillo y Padilla (1993) estiman un coeficiente de agotamiento de 0,01 días⁻¹ propio de sistemas kársticos.

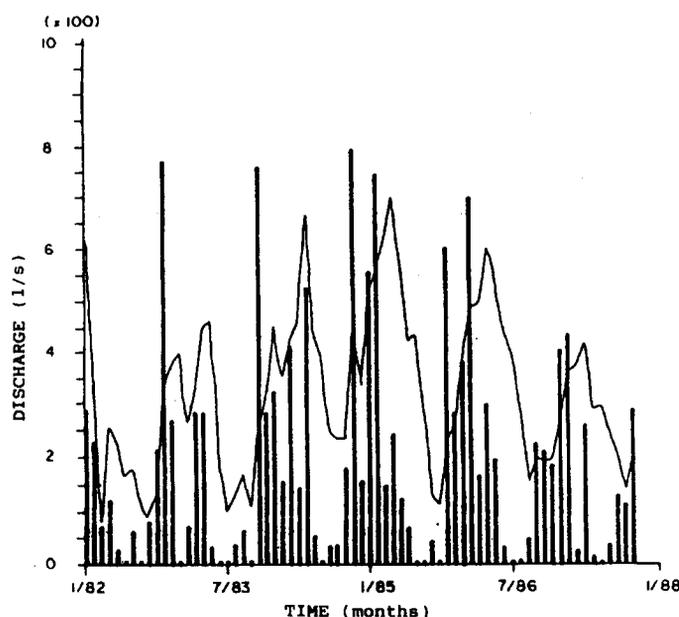


Fig. 2.19. Hidrograma del manantial de la Hoz obtenido mediante simulación matemática (tomado de Castillo y Padilla, 1993).

2.9. SIERRA DE CAZORLA

La Sierra de Cazorla está limitada al Norte por materiales triásicos de la cobertera tabular de la Meseta, al Sur y Oeste por sedimentos margosos de la depresión del Guadalquivir y al Este por el valle del Alto Guadalquivir que discurre por materiales triásicos en facies Keuper. En la Sierra de Cazorla existen dos unidades tectónicas (Fig. 2.20): la de Beas de Segura en posición inferior y la de Cazorla en posición superior. Ambas pertenecen al dominio paleogeográfico del Prebético Externo dentro de la Zona Externa de la Cordillera Bética. Los trabajos geológicos más importantes realizados en esta zona, que se han utilizado para la elaboración de este capítulo, han sido obra de Foucault (1971), López Garrido (1971), García Hernández (1978) y Acosta (1989).

La unidad de Beas de Segura se encuentra en la parte occidental del área de estudio cabalgando sobre las margas blancas del Mioceno que rellenan la cuenca del Guadalquivir. Al Este, queda limitada por el cabalgamiento de la Unidad de Cazorla sobre ella. La serie estratigráfica está formada por un miembro basal, de unos 70-80 m de espesor, en el que se pueden diferenciar tres tramos de dolomías tableadas separadas por dos bancos de margas y arcillas rojas y verdes, y otro superior, de 60 a 120 m de espesor, en el que predominan los materiales blandos sobre los calcáreos. Culmina esta sucesión con arenas y arcillas del Aptiense-Albiense (facies Utrillas) o con depósitos calcáreos y/o margosos del Mioceno medio-superior.

La unidad de Beas de Segura presenta una estructura monoclinal buzante hacia el SE afectada por una serie de escamas, cuyo nivel de despegue está formado por las arcillas con evaporitas del Trías Keuper. El estilo tectónico general permite encuadrar este área en la denominada "región de escamas". Sus rasgos estructurales más característicos son el gran número de fallas inversas N30E que dan lugar a una serie de escamas vergentes hacia la Meseta, con fallas transversales N45W y N85W que cortan a los anteriores. El resultado de esta estructuración ha sido el aumento de potencia de las dolomías y la creación de discontinuidades que compartimentan el tramo dolomítico. Así, se pueden distinguir dos sectores en la unidad de Beas:

- Sector de Beas de Segura s.e., con una extensión total de 135 km², de los cuales tan sólo 54 km² son permeables, debido al predominio de intercalaciones margoso-arcillosas (60%) sobre las carbonatadas (40%).
- Sector de la Sierra de las Villas, donde predominan los materiales dolomíticos sobre las intercalaciones margoso-arcillosas, ocupando una superficie de 78 km², de los que 59 km² corresponden a afloramientos permeables.

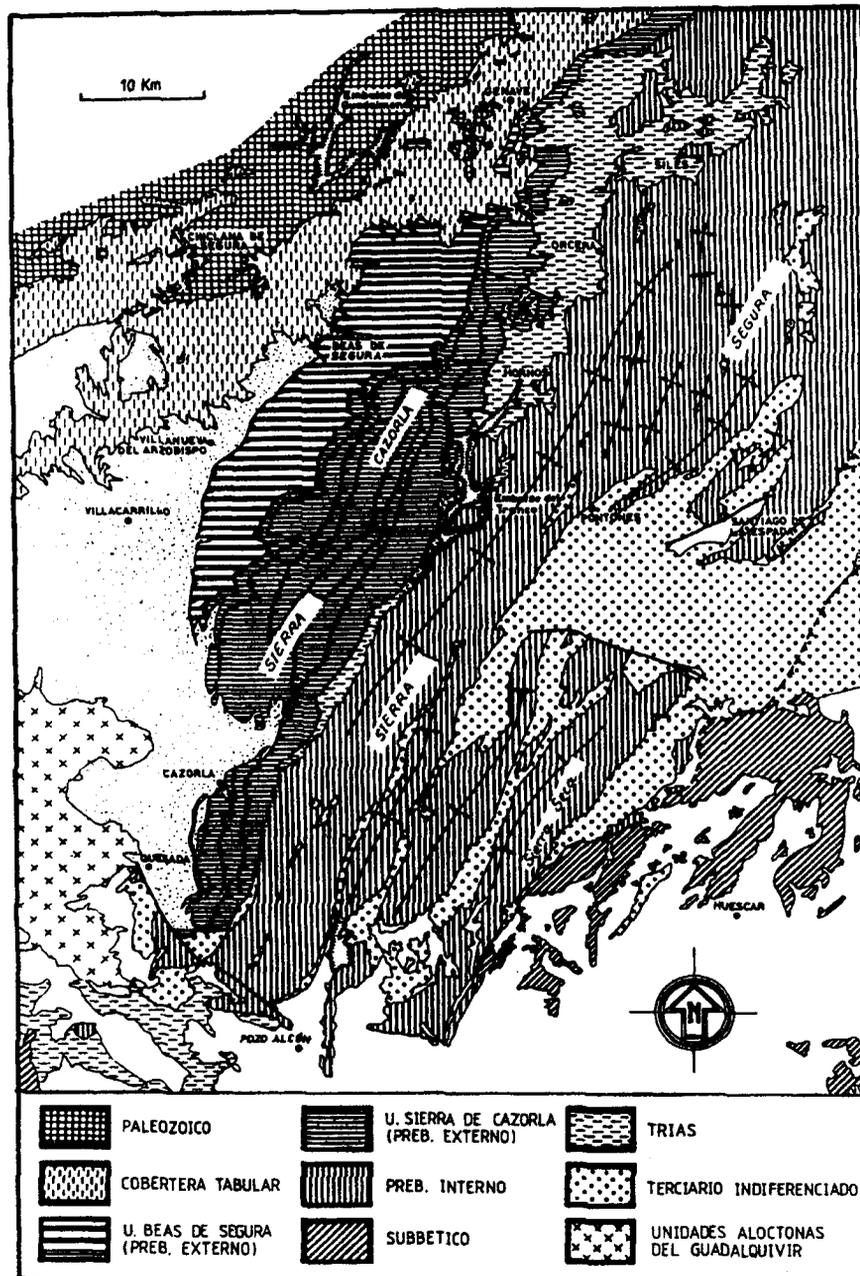


Fig. 2.20. Esquema geológico de la Sierra de Cazorra.

La unidad de la Sierra de Cazorla queda delimitada al Oeste por el cabalgamiento sobre la unidad de Beas de Segura y sobre la depresión del Guadalquivir (en la parte meridional). Al Norte queda limitada por los materiales triásicos, en facies Muchelkalk y Keuper, que constituyen la base de su serie estratigráfica. El jurásico inferior-medio está formado por un potente paquete carbonático, mayoritariamente dolomítico (sólo se identifican dos tramos carbonáticos), que puede alcanzar más de 400 m de espesor. El Jurásico superior tiene un espesor de unos 130 m y está constituido por calizas nodulosas y una alternancia margoso-calcárea. Los materiales cretácicos más antiguos de la Sierra de Cazorla son de edad Aptense superior y corresponden a un nivel de arcillas rojas y verdes con nódulos pisolitos ferruginosos. Por encima de dicho nivel se inicia la sucesión de margas dolomíticas y dolomías del Cenomanense y, sobre éstas, descansan directamente los materiales miocenos: conglomerados, areniscas, calcarenitas y calizas blancas del Mioceno inferior y margas del Mioceno medio.

El elemento estructural más significativo de la Sierra de Cazorla es una serie de fallas inversas de dirección NNE-SSW y buzamiento hacia el Este (Fig. 2.21), generalmente mayor de 45°, cuya anchura es de 1-2 km y la longitud puede superar 10 km. El nivel de despegue suele coincidir con los materiales incompetentes del Triás Keuper o con las margas y margocalizas del Jurásico superior. Asociados a las fallas inversas aparecen pliegues tumbados de dirección NNE-SSW y vergencia hacia el Oeste. El esquema estructural de la región se completa con un juego de fallas posteriores, normales o con importante componente de desgarre, de dirección aproximada E-W.

Desde el punto de vista geomorfológico las fallas inversas de dirección NNE-SSW y buzamiento $> 45^\circ$ hacia el Este (Fig. 2.21) dan lugar a escarpes casi verticales que, junto con los afloramientos de materiales blandos, configuran un relieve escalonado característico con una pendiente importante. Este hecho, unido al predominio de la naturaleza dolomítica de las rocas sobre la composición calcárea, conllevan un escaso desarrollo de las formas exokársticas.

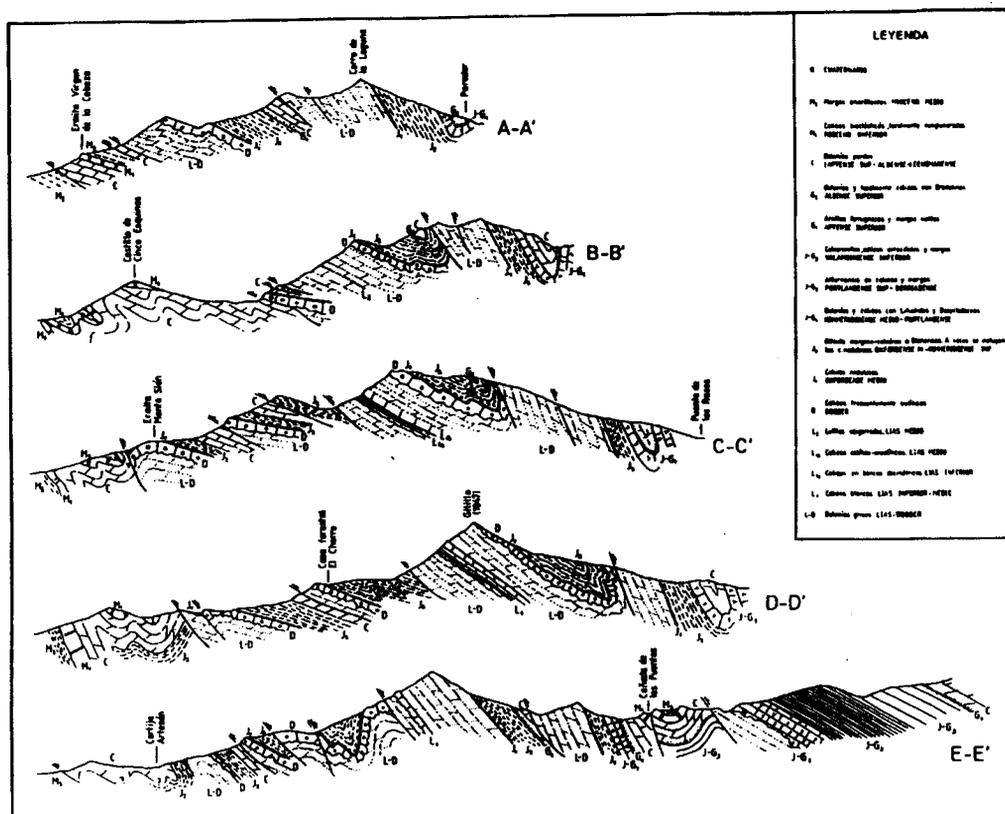


Fig. 2.21. Cortes geológicos de la Sierra de Cazorla (Acosta, 1989).

Por lo que respecta a la hidrogeología de la Sierra de Cazorla, se pueden distinguir dos unidades, en correspondencia con las unidades geológicas diferenciadas (Fig. 2.22). La unidad hidrogeológica de Beas de Segura coincide con la unidad geológica del mismo nombre. Ocupa una extensión del orden de 200 km², de los cuales el 50% corresponden a afloramientos arcillosos. La estratigrafía y la estructura geológica determinan que existan abundantes manantiales de pequeño caudal en el contacto entre los niveles carbonáticos y arcillosos. Esto provoca que la piezometría presente bruscos cambios de cota y aparezcan numerosas compartimentaciones (Rubio Campos *et al.*, 2001). En el sector de Beas de Segura hay una gran dispersión en las cotas de surgencia de los manantiales y en la posición del nivel estático en los sondeos, con valores comprendidos entre 600 y 900 m s.n.m., ubicándose los más bajos en las inmediaciones del río Beas, que circula transversalmente dividiendo el sector en dos partes. En el borde meridional se encuentra el manantial de Cútar, con un caudal de 23 L/s, ubicado a la cota 880 m s.n.m., mientras que en la parte norte se localiza el manantial de Cañamares, a la cota 710 m s.n.m., con un caudal de 2 a 8 L/s.

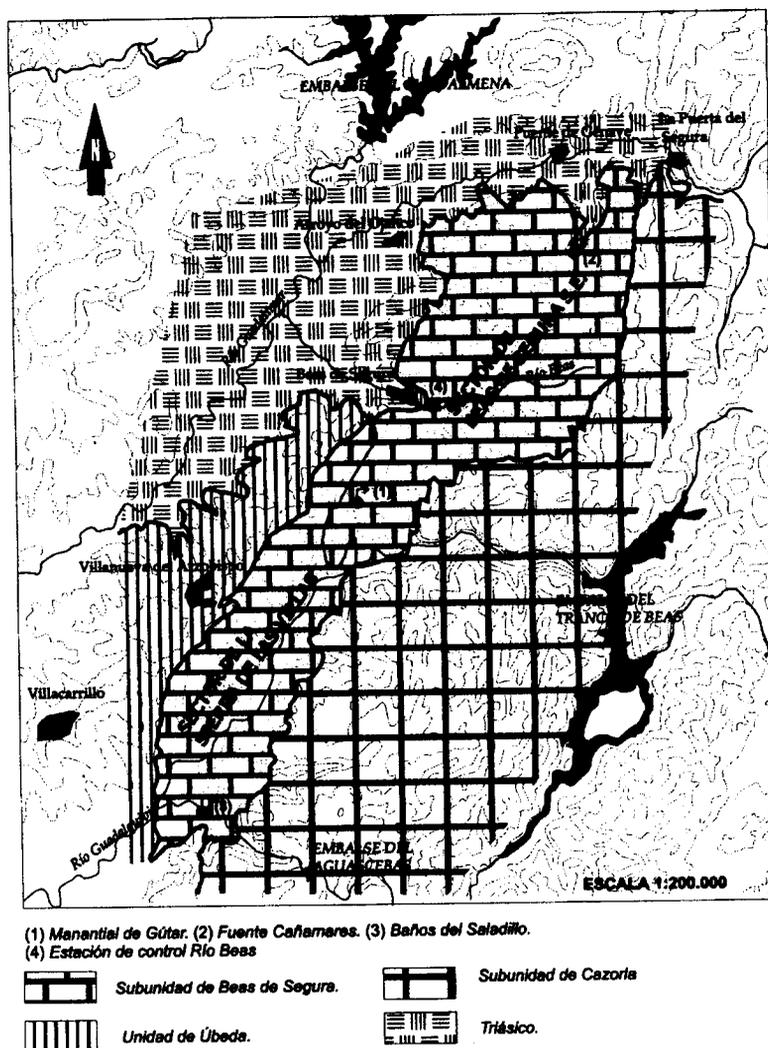


Fig. 2.22. Mapa hidrogeológico de la Sierra de Cazorla (Rubio Campos et al., 2001).

Esta distribución piezométrica sugiere que el flujo de agua tiene varias componentes. Tanto en la parte norte como en la sur, deben existir sendas divisorias hidrogeológicas entre el eje de drenaje del río Beas y las surgencias citadas. Quedarían así delimitadas las áreas de alimentación de las tres zonas de descarga definidas, en las que el agua tendría un movimiento de componente N-S y hacia el río Beas.

En el sector de la Sierra de las Villas se registran importantes variaciones del nivel piezométrico, pasando en una distancia de 4,5 km, desde 760 m s.n.m. en las proximidades de Villanueva del Arzobispo a la cota 450 m s.n.m. en el Río Guadalquivir. El gradiente hidráulico que resulta es del 6,8 % hacia el SE y con una posible divisoria hidrogeológica entre ambos puntos. La cota mínima del nivel

piezométrico es 420 m s.n.m., medida en los sondeos situados cerca del lugar donde el río sale del acuífero, que corresponde a la cota topográfica más baja del acuífero. Con este esquema piezométrico, la dirección general del flujo subterráneo sería de componente S-SE, hacia el Río Guadalquivir, si bien cerca del borde y a favor de la posible divisoria antes mencionada puede existir una zona con sentido de flujo hacia el acuífero adyacente de la Loma de Úbeda.

La unidad hidrogeológica de Sierra de Cazorla está formada por alineaciones montañosas de dirección SW-NE que configuran la divisoria entre las cuencas hidrográficas del alto y medio Guadalquivir. El paisaje está dominado por los relieves agrestes de las Sierras de Cazorla y Las Villas, con cotas próximas a 2000 m (El Gilillo, Blanquillo, Pardal, etc.) y el paisaje relativamente alomado de las áreas más septentrionales, con cotas que no superan los 1400 m. La red hidrográfica está muy encajada y jerarquizada. Cabe destacar el Río Guadalquivir que discurre paralelo al borde oriental de la Unidad y los ríos Cazorla, Quesada, Aguascebas y Beas que la atraviesan desde su núcleo hacia el Oeste.

La unidad de Cazorla tiene una extensión aproximada de 350 km² y coincide con la unidad geológica del mismo nombre. Los principales materiales acuíferos de esta unidad son, por tanto, las calizas y dolomías del Lías-Dogger. También podrían considerarse como tales los materiales correspondientes al Cretácico superior y Mioceno inferior, aunque su interés hidrogeológico es escaso, según los datos de campo disponibles (IGME-Universidad de Granada, 1990; Martínez Garrido *et al.*, 1991).

El acuífero carbonático jurásico presenta una potencia que varía entre 250 m en el Sur y 185 en el Norte y aflora en una extensión de 350 km². Se trata de un acuífero compartimentado por los cabalgamientos de dirección SW-NE, vergentes hacia el Oeste, y las fallas transversales. Además, no existen datos suficientes sobre la continuidad, en profundidad de los niveles de baja permeabilidad y, por tanto, no se conoce en detalle la geometría de los distintos sistemas. A partir de datos de isótopos estables se puede establecer, por una parte, la existencia de conexión hidráulica -en profundidad- en determinados sistemas meridionales y, por otra, se ha evaluado la cota media del área de recarga en 1200 m (IGME-Universidad de Granada, 1990).

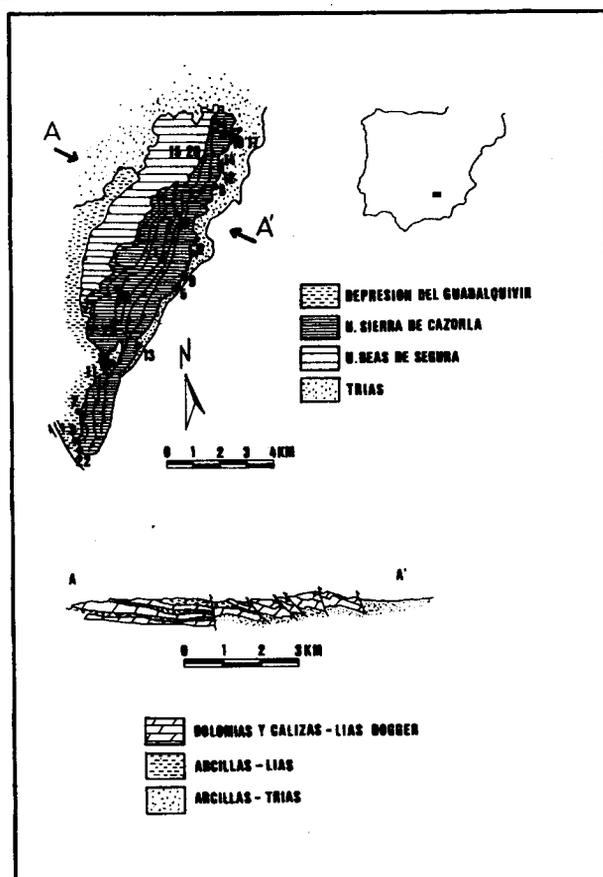


Fig. 2.23. Esquema y corte hidrogeológicos de la Sierra de Cazorla (Martínez Garrido *et al.*, 1991).

Otra consecuencia de la compleja estructura geológica es la existencia de un gran número de manantiales (más de 500), que surgen a muy diversas cotas (entre 500 y 1400 m), con la consiguiente dificultad a la hora de delimitar los diferentes sistemas acuíferos. Sin embargo, son escasos los manantiales con caudales superiores a 10 L/s y abundan los manantiales con caudales de 1 a 5 L/s que frecuentemente aparecen al pie de las escamas (Fig. 2.23), en el techo de los niveles margosos de baja permeabilidad. Por el contrario los manantiales más caudalosos (Nacerríos, Béjar, Artesón, La Raja,) se sitúan en la base de la unidad, próximos al contacto con las margas blancas de la depresión del Guadalquivir en el Sur, o con las arcillas triásicas en el Norte (El Macho, La Parrilla, Guabras). En un trabajo previo (Martínez Garrido *et al.*, 1991) se pone de manifiesto que los manantiales que drenan dolomías presentan facies hidroquímica bicarbonatada cálcico-magnésica y variaciones de la composición química más amortiguadas que las que se registran en los manantiales relacionados con la descarga de calizas. Es decir, que estos últimos presentan un comportamiento más de tipo kárstico que los primeros.

2.10. SIERRA DE MARÍA

Las Sierras de María y del Maimón están situadas en la parte septentrional de la provincia de Almería (Sur de España) y forman parte del Parque Natural Sierra de María-Los Vélez. Hacia el Oeste, la alineación montañosa de Sierra de María continúa con la Sierra de Orce. La Sierra de María constituye un abrupto relieve carbonático de 75 km² de superficie, jalonado en su cima por el Alto de la Burrica (2045 m) y limitado al Norte por la depresión de Guadix-Baza (sector de Orce) y al Sur por el corredor de Vélez-Rubio. La Sierra de María sirve de divisoria hidrográfica entre la vertiente atlántica, a través de la cuenca del Guadalquivir, y la vertiente mediterránea, vía cuenca del Segura.

Desde el punto de vista geológico, se encuentra inmediatamente al Norte del contacto entre las zonas Interna y Externa de la Cordillera Bética (también denominado Corredor de Vélez-Rubio en esta zona) dentro del dominio Subbético Interno (Fig. 2.24).

La serie estratigráfica de la Sierra de María está formada por materiales arcilloso-evaporíticos (facies Keuper) del Trías Superior, sobre los que se encuentran cuatro tramos carbonáticos en el registro jurásico (Andreo, 1990): dolomías del Lías Inferior, calizas de "Lithiotis" del Lías Medio, calizas oolíticas del Dogger, calizas nodulosas del Malm y margas y margocalizas durante el Cretácico-Terciario. En las laderas de Sierra María, especialmente en la meridional, existen importantes acumulaciones de sedimentos detríticos (arena, brechas y conglomerados) producto de la erosión del relieve.

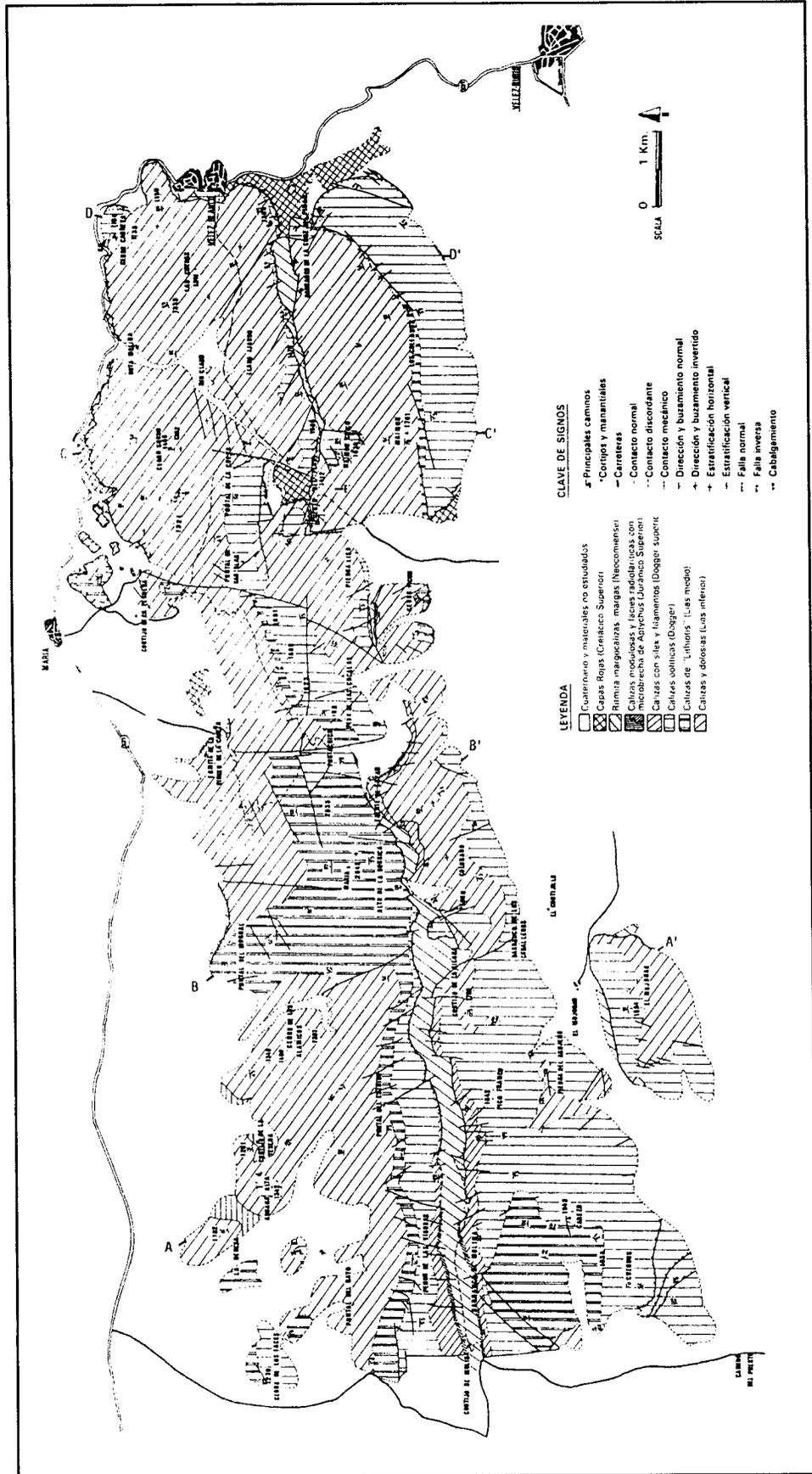


Fig. 2.24. Mapa geológico de la Sierra de Maria (Andreo, 1990).

La estructura geológica (Fig. 2.25) consiste, esencialmente, en tres pliegues de dirección aproximada Este-Oeste (Andreo, 1990): un sinclinal central limitado, al Norte y al Sur, por sendos anticlinales. Los núcleos anticlinales están formados por calizas jurásicas y el sinclinal está ocupado por margas y margocalizas cretácico-terciarias. Con posterioridad a los pliegues se han producido fracturas transversales de direcciones N10-30W y N40-60E.

Los afloramientos carbonáticos jurásicos que constituyen las Sierras de María y del Maimón no son isleos tectónicos sobre las margas y margocalizas cretácicas, sino que se encuentran enraizados por debajo de los materiales cretácicos (Andreo, 1990). Esta interpretación queda corroborada por los datos de dos sondeos mecánicos perforados recientemente por el IGME en el borde los afloramientos calizos. Los sondeos tienen profundidades de 258 m y 302 m y la columna litológica atravesada está formada únicamente por calizas.

Desde el punto de vista geomorfológico el macizo de Sierra María constituye un relieve estructural plegado y fallado, realizado por la evolución neotectónica reciente. El desarrollo de la karstificación es escaso, la forma exokárstica más desarrollada es el lapiaz. Se conocen algunas cavidades kársticas de pequeñas dimensiones (Gea Pérez, 1997; González Ramón, 2002): la sima más profunda tiene menos de 40 m de profundidad (Sima del Portal Chico) y la cueva más grande tiene 250 m de recorrido (Cueva de la Gitana).

La recarga del acuífero de Sierra María se produce por infiltración del agua de las precipitaciones que unas veces son en forma de lluvia y otras de nieve. La descarga tiene lugar, fundamentalmente, en régimen de descarga natural a través de los manantiales del borde oriental (Moreno Cayuela, 1983; Moreno Calvillo, 1981, 1983; IARA-IGME, 1988): Fuente de los Molinos (a la cota 1050 m s.n.m.) con un caudal medio >100 L/s y surgencias del barranco de las Fuentes en Vélez-Blanco cuyo caudal medio de 40 L/s). También se produce descarga a través de varios manantiales (Fuente Grande, Los Treinta, etc.) de escaso caudal (<10 L/s de valor medio total) existentes en el borde sur del acuífero, relacionados con los depósitos de piedemonte. La descarga mediante bombeos es escasa, puesto que únicamente se extrae agua para abastecimiento de las poblaciones de María y Vélez-Blanco.

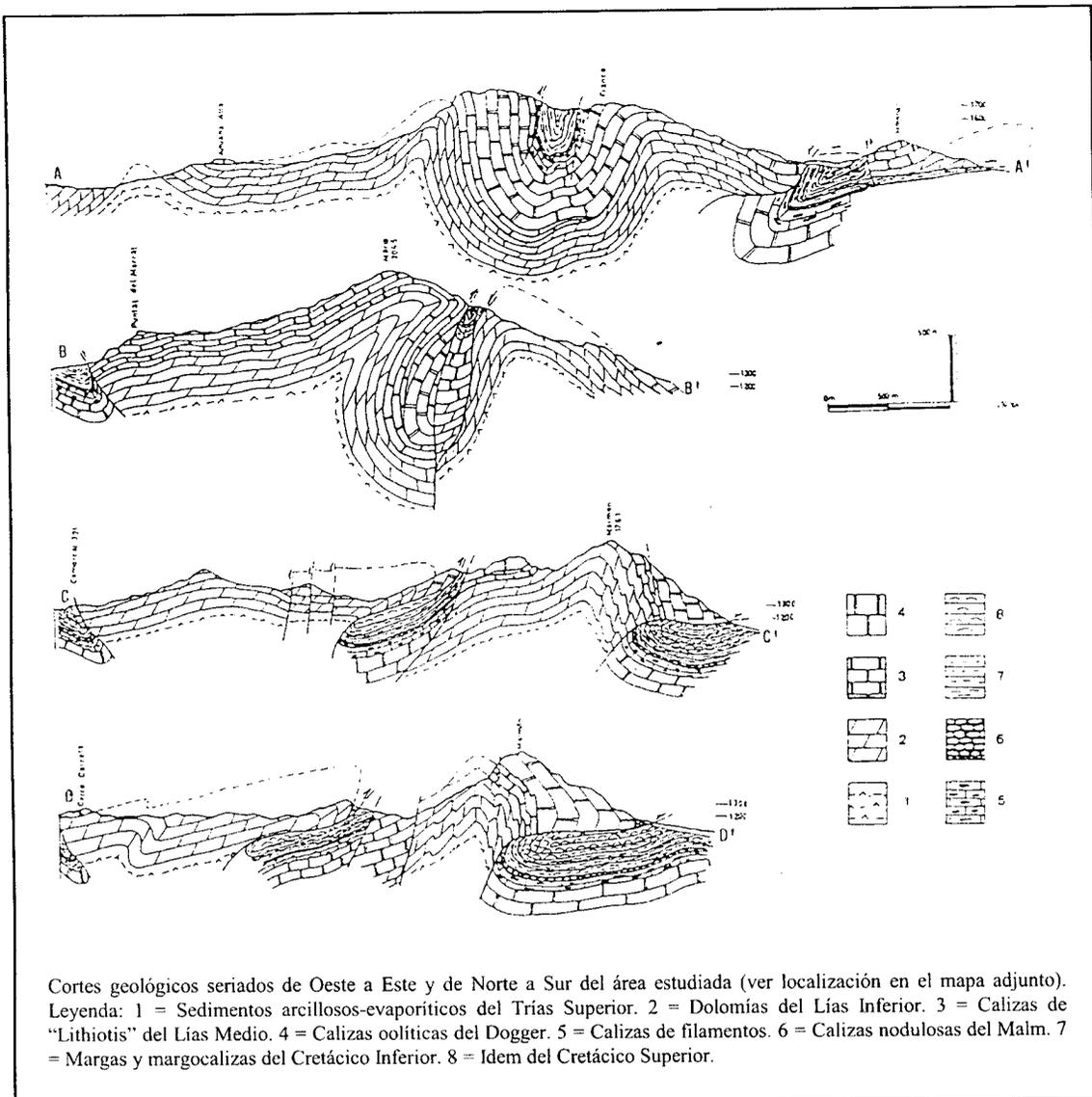


Fig. 2.25. Cortes geológicos de la Sierra de María (Andreo, 1990).

Existe un argumento, de carácter hidrogeológico, que implica una conexión hidráulica entre los afloramientos carbonáticos jurásicos (acuíferos) de las Sierras de María y del Maimón, por debajo de los cretácicos (materiales de baja permeabilidad). En efecto, los caudales de descarga que se drenan por la Fuente de los Molinos, corresponden a una superficie de recarga bastante mayor que el afloramiento carbonático del Maimón y, además, no se conocen manantiales de importancia comparable en los bordes de Sierra María.

El funcionamiento hidrodinámico del acuífero de Sierra María es del tipo de flujo difuso, como se deduce del análisis del hidrograma del principal punto de descarga (Fuente de los Molinos). El manantial responde de forma muy lenta a las precipitaciones con suaves aumentos de caudal (Marín *et al.*, 1996); la conductividad eléctrica del agua apenas varía (Fig. 2.26). El coeficiente de agotamiento presenta valores de $2 \cdot 10^{-3} \text{ días}^{-1}$, indicativo de un vaciado lento. Todas estas características son propias de acuíferos fisurados, poco karstificados.

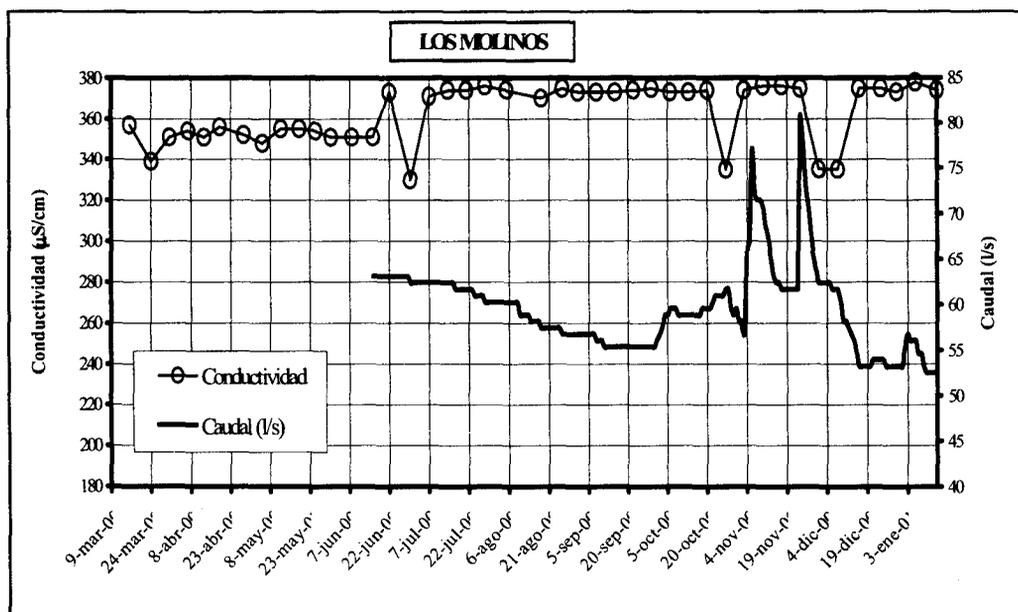


Fig. 2.26. Evolución temporal del caudal y de la conductividad eléctrica del agua en los manantiales de la Fuente de los Molinos.

**3. EVALUACIÓN DE LA RECARGA EN LOS ACUÍFEROS
SELECCIONADOS MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES**

3.1. SIERRA DE LAS CABRAS

3.1.1. Elementos del balance

Las entradas pueden proceder de la infiltración directa de las precipitaciones y de la escorrentía que circula por los arroyos Bogaz (Boca de Foz) y Bujalance (a la altura de San José del Valle). No obstante, la infiltración procedente de la escorrentía del arroyo Bujalance debe ser bastante limitada porque circula por materiales cretácicos (de baja permeabilidad) y no por calizas jurásicas. Asimismo, la infiltración en el arroyo Bogaz no debe ser tampoco muy importante; antes al contrario, en periodos de abundante recarga lo que parece que ocurre es una descarga del acuífero hacia el cauce. Además, la poca longitud del cauce permeable (1,5 km) puede actuar como factor limitante de la eventual recarga.

Las salidas tienen lugar de modo visible y controlado a través del manantial de El Tempul. De forma visible, pero no controlada, tiene lugar la descarga que se produce en el “trop plein” de Fuente Imbro y, eventualmente, también en la Boca de Foz, cuyo funcionamiento podría ser comparable al anterior.

Las distintas tentativas de balance que se plantean a continuación han sido descritas en trabajos previos (IGME, 2000; Jiménez *et al.*, 2001).

3.1.2. Tentativa de balance para el periodo 1862-1978

El caudal medio histórico del manantial es de 283 L/s, equivalente a una descarga de media anual cercana a 9 hm³. Como valor medio de las aportaciones no controladas podría suponerse 1 hm³/año, a tenor de las observaciones realizadas por Carreras (1996) en un periodo de emergencia de Fuente Imbro. Las salidas controlables alcanzarían, así, la cifra total aproximada de 10 hm³/año.

Por lo que respecta a las entradas, la precipitación media histórica en la estación de Gibraltar es de 825 mm y la superficie permeable es de 34 km², por lo que el volumen total de agua de lluvia que cae sobre dicha superficie es de 28

hm³/año como valor medio. Si las salidas controlables (10 hm³/año) constituyen la única descarga del sistema, entonces la tasa de recarga sería aproximadamente del 35%. Así, para un periodo suficientemente largo y representativo, como es el caso, las entradas al sistema (recursos) serían del orden de la tercera parte de las precipitaciones y equivaldrían a la descarga que se realiza por el manantial de El Tempul, Fuente Imbro y, eventualmente, Boca de Foz.

Se ha repetido el cálculo con los datos correspondientes a los años en los que el caudal del manantial ha sido inferior a 900 L/s, es decir, cuando no ha habido descarga por Fuente Imbro de acuerdo con el análisis de caudales clasificados realizado con los datos de caudal del manantial. La tasa de recarga obtenida ha sido también del orden del 30 %.

3.1.3. Tentativa de balance para el periodo 1985-1995

El caudal medio del manantial es de 253 L/s, equivalente a una descarga de media anual de 8 hm³. Como valor medio de las aportaciones no controladas podría suponerse también 1 hm³/año (Carreras, 1996). Las salidas controlables serían de 9 hm³/año.

La precipitación media en la estación de El Tempul, durante el periodo 1985-1995, es de 850 l/m² y la superficie permeable es también de 34 km², por lo que el volumen total de agua de lluvia que cae sobre dicha superficie es de 29 hm³/año como valor medio. Si las salidas controlables (9 hm³/año) constituyen la única descarga del sistema, entonces el coeficiente de infiltración eficaz sería del 31%.

La tasa de recarga del 30-35 % puede ser razonable, teniendo en cuenta las características de los afloramientos calizo-dolomíticos (anchura y pendiente), la escasez de formas kársticas de absorción y la presencia vegetación. Además, el dato anterior es coherente (si se admite alguna escorrentía) con los resultados de balances de Thornthwaite mensuales para capacidades de campo de 25 y 50 mm, utilizando datos de precipitación de la estación de El Tempul y de temperatura de la estación del embalse de Los Hurones.

3.1.4. Tentativa de balance para el periodo comprendido entre 17/6-96 y 17-11-99

Se ha seleccionado este periodo porque, además de los datos de precipitación y de descarga por el manantial de El Tempul, se dispone de una serie de datos de profundidad del nivel piezométrico en un sondeo situado en la Boca de Foz, que puede considerarse representativo del conjunto del acuífero. Para este periodo concreto, el balance del acuífero puede plantearse en los siguientes términos:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta V \text{ (variación de volumen)}$$

$$\text{Entradas} = P (2670 \text{ l/m}^2) \cdot S (34 \times 10^6 \text{ m}^2) \cdot R (0,3) = 27,2 \text{ hm}^3$$

$$\text{Salidas} = 29,7 \text{ hm}^3 \text{ (El Tempul)} + 1 \text{ hm}^3 \text{ (estimado a partir de Carreras, 1996)}$$

$$\Delta V = S_t (42 \times 10^6 \text{ m}^2) \cdot d (-18,39 \text{ m}) \cdot m_e (0,005) = -3,9 \text{ hm}^3$$

$$\text{Así, Entradas (27,2 hm}^3) \cong \text{Salidas (30,7 hm}^3) - \Delta V (3,9 \text{ hm}^3) \cong 26,8 \text{ hm}^3$$

siendo P la precipitación sobre la superficie permeable (S), R la recarga media, S_t la superficie total del acuífero, d el descenso piezométrico medido y m_e la porosidad drenable.

Esta segunda tentativa de balance viene a corroborar que la tasa de recarga debe ser del orden de la tercera parte de la lluvia que cae sobre la superficie permeable de Sierra de las Cabras.

3.2. SIERRA DE LÍBAR

Las salidas del acuífero se producen, fundamentalmente, de modo natural por los manantiales de la Cueva del Gato, Benaoján, Charco del Moro, Jimera de Líbar y otros puntos del cauce del Guadiaro. En total se estiman en unos 90 hm³/año aproximadamente (IGME, 1983), de los que 55 hm³/año proceden de la infiltración directa de las precipitaciones y 35 hm³/año proceden de la infiltración de la escorrentía.

A partir de los datos de lluvia registrados en la estación pluviométrica de Grazalema, el cálculo de la tasa de recarga por el método de Kessler dio como resultado un valor del 55 % de la precipitación. Aplicando el balance de Thornthwaite se obtiene una tasa de recarga del 59 % de la precipitación (IGME, 1983).

En el informe realizado por la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Medio Ambiente (DGOH, 1998), se evaluó la recarga en el 53 % de las precipitaciones.

A partir de datos recientes del contenido en cloruros del agua de lluvia (4,3 mg/l de valor medio) y del agua drenada por el manantial de Benaoján (8 mg/l), se ha calculado un valor medio de la tasa de recarga del 54 %.

Por tanto, con los datos disponibles se estima que la tasa media de recarga en la Sierra de Líbar es del orden del 55%. Este valor es acorde con las características tipo "Torcal" que presenta el área, con abundantes formas de absorción (poljes, dolinas, sumideros kársticos) y son su ubicación en la parte de Andalucía donde más llueve.

3.3. UNIDAD HIDROGEOLÓGICA YUNQUERA-NIEVES

Para la realización del balance hidrogeológico en la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves se han estimado, por una parte, las entradas (lluvia útil o infiltración eficaz) y, por otro lado, las salidas, que corresponden a los caudales drenados por los diferentes manantiales y a los extraídos en las perforaciones existentes. Se ha efectuado el balance correspondiente al período 1995/96-1998/99, tanto para la Unidad Hidrogeológica en su conjunto como para cada uno de los tres sistemas acuíferos en ella diferenciados (Liñán, 2003).

Para determinar las entradas o recursos de la Unidad Hidrogeológica hay que analizar, en primer lugar, la cantidad de precipitación (P) que cae sobre el acuífero y estimar la evapotranspiración real (ETR). Posteriormente se calcula la correspondiente lluvia útil (P-ETR), que producirá infiltración eficaz y/o escorrentía, dependiendo de las propiedades del sistema acuífero. Teniendo en cuenta que el área de investigación está formada íntegramente por rocas permeables por fisuración y karstificación, que presentan abundantes formas exokársticas de absorción, se ha considerado que la escorrentía superficial es prácticamente despreciable.

3.3.1. Precipitación

Durante el período 1995/96-1998/99, la precipitación total sobre la Unidad Hidrogeológica, calculada mediante planimetría de isoyetas, ha sido de 2910 mm (176 hm³/año): 1180 mm (129 hm³/año) en el sistema de la Sierra de las Nieves, 913 mm (11 hm³/año) en el sistema de Yunquera y 817 mm (36 hm³/año) en el sistema de Prieta-Bonela-Alcaparain.

3.3.2. Evapotranspiración real

Los métodos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración real han sido los de Turc (1955), Coutagne (1954) y Thornthwaite (1948), considerando en este último caso dos valores de capacidad de campo (25 y 50 mm).

Se han utilizado los datos de precipitación y de temperatura, mensuales y anuales, registrados en las estaciones meteorológicas repartidas por el área de estudio. En primer lugar, se han realizado los cálculos de la evapotranspiración real para cada estación meteorológica, obteniéndose posteriormente un valor medio de evapotranspiración real (y lluvia útil) para cada uno de los sistemas hidrogeológicos, correspondiente a la media aritmética de los valores de ETR de las estaciones ubicadas en cada sistema (Tabla 3.1).

Sistema Hidrogeológico	Estación pluviométrica	Estación termométrica	P media anual (mm)	Tª media anual (°C)	ETR media anual (mm)				ETR media anual (mm)			
					Turc	Coutagne	Thornthwaite mensual		Turc	Coutagne	Thornthwaite mensual	
							cc=25	cc=50			cc=25	cc=50
Sierra de las Nieves	Alpandere	Pujerra	1241	15,2	674	1075	349	374	642	1151	345	370
	Cartajima	Pujerra	1215	15,2	661	1048	353	378				
	Pujerra	Pujerra	1344	15,2	695	1165	372	397				
	Quejigales	Quejigales	1349	10,5	539	1315	308	333				
Yunquera	Alozaina	Alozaina	893	17,9	653	627	297	322	653	627	297	322
Prieta Bonela Alcaparain	Alozaina	Alozaina	893	17,9	653	627	297	322	610	583	307	332
	Casarabonela	Alozaina	866	17,9	649	624	313	338				
	Pto Sapo	Alozaina	764	17,9	592	564	305	330				
	Ardales	Alozaina	614	17,9	509	477	296	321				
	Carratraca	Alozaina	884	17,9	647	621	326	351				
Media			1006	16,4					635	787	317	342

Tabla 3.1. Cálculo de la evapotranspiración real media anual (en mm) mediante los métodos de Turc, Coutagne y Thornthwaite a escala mensual, para cada una de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio y para cada uno de los sistemas acuíferos diferenciados.

Los valores medios de evapotranspiración real obtenidos mediante los métodos de Turc y Coutagne son de 635 y 787 mm/año, respectivamente (Tabla 3.1). Estos valores, que equivaldrían a un 67 y a un 79 % de la precipitación anual, respectivamente (Tabla 3.2), no son coherentes con los datos de descarga de los manantiales por lo que se consideran poco fiables. La razón debe ser, en ambos casos, que se utilizan datos anuales de precipitación y de temperatura, sin tener en cuenta la distribución de estas dos variables a lo largo del año.

El método de Thornthwaite se considera más adecuado para el cálculo de la evapotranspiración real ya que no contempla un reparto uniforme de las lluvias y de las temperaturas a lo largo del año, lo cual está más en consonancia con las características climáticas del área de estudio. Los valores medios de evapotranspiración real obtenidos han sido 317 mm para una capacidad de campo de 25 mm y 342 mm para una capacidad de campo de 50 mm, aproximadamente equivalentes a un 33 y a un 36 % del valor de la precipitación anual, respectivamente (Tabla 3.2). Este último resultado es bajo e incoherente con los datos de campo disponibles.

Sistema hidrogeológico	Superficie (km ²)	ETR media anual										% ETR respecto a la P media			
		P media (isoyetas)		Turc		Coutagne		Thornwhite mensual				Turc	Coutagne	Thornwhite mensual	
								cc=25		cc=50				cc=25	cc=50
		(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)				
Sierra de las Nieves	109	1180	129	642	70	1151	125	345	38	370	40	54	98	29	31
Yunqueira	12	913	11	653	8	627	8	297	4	322	4	72	69	33	35
Prieta Bonela Alcaparain	44	817	36	610	27	583	26	307	14	332	15	75	71	38	41
Media												67	79	33	36

Tabla 3.2. Evapotranspiración real media anual (en mm y en hm³/año) y porcentaje de ésta con respecto a la precipitación media anual, mediante los métodos de Turc, Coutagne y Thornthwaite a escala mensual.

También se ha calculado el valor de la evapotranspiración real, para cada uno de los sistemas acuíferos, como la diferencia entre la precipitación y el valor de la infiltración obtenido por los métodos de Kessler (1965) y del balance de cloruros, suponiendo que la escorrentía superficial es despreciable. A partir del método de Kessler se obtiene un valor de evapotranspiración real de 466 mm, equivalente a un 48 % de la precipitación (Tabla 3.3). Si en la determinación de la infiltración se utiliza el balance de cloruros, se obtiene un valor de evapotranspiración real de 523 mm, equivalente a un 55 % de la precipitación (Tabla 3.3). Aunque en los dos casos resultan valores intermedios con relación a los métodos restantes (Turc, Coutagne y Thornthwaite), se ha optado por utilizar en el cálculo del balance el valor de evapotranspiración real calculado mediante el método de cloruros, porque los

resultados que de él se obtienen son los más coherentes con los datos de campo disponibles en todos los sistemas acuíferos diferenciados.

Sistema hidrogeológico	Superficie (km ²)	P media (isoyetas)		Método de Kessler						Balance de Cl					
				Infiltración		ETR		% Pmed		Infiltración		ETR		% Pmed	
		(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	I	ETR	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	I	ETR
Sierra de las Nieves	109	1180	129	602	66	578	63	51	49	649	71	531	58	55	45
Yunquera	12	913	11	502	6	411	5	55	45	365	4	548	7	40	60
Prieta Boncha Alcaparain	44	817	36	409	18	408	18	50	50	327	14	490	22	40	60
Media		504		466		52		48		447		523		45 55	

Tabla 3.3. Cálculo de la infiltración eficaz (I) y de la evapotranspiración real (ETR) media anual (en mm y en hm³/año) y del porcentaje de éstas con respecto a la precipitación media anual (% Pm) mediante los métodos de Kessler y del balance de cloruros.

3.3.3. Lluvia útil o infiltración eficaz

La lluvia útil se calcula como la diferencia entre los valores de precipitación y los de evapotranspiración real. Dicha lluvia útil se ha multiplicado por la superficie de cada sistema, para obtener el volumen anual de lluvia útil (en hm³) en cada uno de los sistemas acuíferos y en la Unidad Hidrogeológica en su conjunto (Tabla 3.4).

Esta lluvia útil produciría escorrentía superficial y/o infiltración, en diferente proporción, según las características topográficas y litológicas de cada uno de los sistemas considerados. Sin embargo, como se indicó al inicio del presente capítulo, en este estudio se ha considerado que la escorrentía superficial es despreciable en el cálculo del balance por lo que, en este caso, la lluvia útil es equivalente a la infiltración eficaz y, en definitiva, a los recursos.

Durante el período de investigación, los valores medios de lluvia útil calculados por los diferentes métodos son bastante dispares, entre 183 y 654 mm (tabla 6.4). El valor más elevado corresponde al calculado por el método de Thornthwaite, con una capacidad de campo de 50 mm, mientras que el valor más

bajo se obtiene al aplicar este mismo método pero con una capacidad de campo de 25 mm (Tabla 3.4).

Sistema hidrogeológico	Superficie (km ²)	Lluvia útil media anual										% Lluvia útil respecto a la P media					
		P media (isoyetas)		Turc		Coutagne		Thornthwaite mensual				Turc	Coutagne	Thornthwaite mensual			
								cc=25		cc=50				cc=25	cc=50		
		(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)						
Sierra de las Nieves	109	1180	129	538	59	29	3	835	91	810	88	46	2	71	69		
Yunquera	12	913	11	260	3	286	3	616	7	591	7	28	31	67	65		
Prieta Bonela Alcaparaín	44	817	36	207	9	234	10	510	22	485	21	25	29	62	59		
Media		335		183		654		629		33		21		67		64	

Tabla 3.4. Cálculo de la lluvia útil media anual (en mm y en hm³/año) y del porcentaje de ésta con respecto a la precipitación media anual, mediante los métodos de Turc, Coutagne y Thornthwaite a escala mensual.

Se ha determinado también la infiltración eficaz que se produce en cada uno de los sistemas a partir del método de Kessler y del método del balance de cloruros (Tabla 3.3). En este último caso, se han utilizado los datos del contenido en cloruros del agua de lluvia recogida durante el período de investigación en las estaciones de Llanos de la Nava, Los Quejigales y Cuevas del Moro para el sistema de la Sierra de las Nieves; en la estación de Cueva del Agua para el sistema de Yunquera y en los puntos de muestreo ubicados en las sierras de Casarabonela y Alcaparaín para el sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín.

El valor medio anual de la infiltración eficaz sobre la Unidad Hidrogeológica, determinado a partir del método de Kessler, es de 504 mm, equivalente a un 52 % de la precipitación anual, mientras que con el método del balance de cloruros se obtiene un valor medio anual de infiltración de 447 mm, que equivale a un 45 % de la precipitación.

Si se consideran por separado los diferentes sistemas hidrogeológicos, se obtienen los siguientes valores medios de infiltración anual (Tabla 3.3):

1. Sistema de la Sierra de las Nieves: 602 mm (51 %), según el método de Kessler y 649 mm (55 %), según el balance de cloruros.
2. Sistema de Yunquera: 502 mm (55 %), según el método de Kessler y 365 mm (40 %), según el balance de cloruros.
3. Sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín: 409 mm (50 %), según el método de Kessler y 327 mm (40 %), según el balance de cloruros.

Los valores medios anuales de la infiltración eficaz determinados por los diferentes métodos son bastante desiguales, aunque los obtenidos a partir del método de Kessler y del balance de cloruros son intermedios entre todos los calculados (Tablas 3.3 y 3.4) y, además, son más coherentes con las observaciones geológicas e hidrogeológicas realizadas en el campo.

3.3.4. Salidas de la unidad hidrogeológica Yunquera-Nieves

En el sistema de la Sierra de las Nieves, la descarga media del período 1995/96-1998/99 ha sido de 71 hm³/año, correspondiente en su totalidad al caudal drenado por los diferentes manantiales (Tabla 3.5): Río Grande (825 L/s de caudal medio), Río Verde (750 L/s), Río Genal (355 L/s), Algoma (115 L/s), Cuevas del Moro (73 L/s), surgencias del Río Horcajos (63 L/s), Granados (20 L/s), Seco (19 L/s), Piloncillo (16 L/s) y Cañada Fuente (10 L/s).

En el sistema de Yunquera, la descarga media anual es de 4 hm³/año: 94 L/s correspondientes a la surgencia del Plano, 16 L/s de caudal conjunto de los restantes manantiales del sistema y 18 L/s extraídos en las perforaciones de abastecimiento a Yunquera.

En el sistema Prieta-Bonela-Alcaparaín, el volumen medio de descarga anual ha sido de 13 hm³, de los cuales 12 hm³ corresponden a la descarga de manantiales: 196 L/s en Río Jorox, 77 L/s en Carratraca, 48 L/s en Fuente Quebrada, 26 L/s en las

surgencias de Comparate y Naranjal, 13 L/s en Nacimiento de Casarabonela, 7 L/s de caudal conjunto de los manantiales situados en el borde norte del sistema y 5 L/s en la surgencia de Ardales. El hm^3 restante corresponde a las extracciones de agua realizadas en los sondeos de Alozaina (5 L/s), Casarabonela (7 y 8 L/s) y Ardales (7 L/s).

El total de las salidas de la Unidad Hidrogeológica durante el período de estudio ha sido, por lo tanto, de $88 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Salidas periodo de investigación		l/s	($\text{hm}^3/\text{año}$)	l/s	($\text{hm}^3/\text{año}$)	
Sierra de las Nieves	M	Río Grande	825	26,0	2246	71
		Río Verde	750	23,7		
		Río Genal	355	11,2		
		Algoma	115	3,6		
		Cuevas del Moro	73	2,3		
		Río Horcajos	63	2,0		
		Granados	20	0,6		
		Seco	19	0,6		
		Piloncillo	16	0,5		
	Cañada Fuente	10	0,3			
Yunquera	M	Plano	94	3,0	128	4
		Otras surgencias	16	0,5		
	S	Abastecimiento	18	0,6		
Prieta Boncla Alcaparain	M	Río Jorox	196	6,2	399	13
		Carratraca	77	2,4		
		Fuente Quebrada	48	1,5		
		Comparate-Naranjal	26	0,8		
		Nac. Casarabonela	13	0,4		
		Borde Norte	7	0,2		
		Ardales	5	0,2		
	S	Alozaina	5	0,2		
		Casarabonela	15	0,5		
	Ardales	7	0,2			
TOTAL				2773	88	

Tabla 3.5. Salidas de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves durante el período el periodo 1995/96-1998/99. Leyenda: M: manantial, S: sondeo.

El valor medio anual de la tasa de recarga que mejor se adapta a las salidas controladas es el obtenido por el método del balance de cloruros. Por tanto, en el

cálculo del balance de cada uno de los sistemas acuíferos diferenciados, los valores de evapotranspiración real y de infiltración eficaz que se utilizarán serán del 45 y 55 %, respectivamente (sistema de la Sierra de las Nieves) y del 60 y 40 %, respectivamente (sistemas de Yunquera y Prieta-Bonela-Alcaparaín).

3.3.5. Balance hidrogeológico de la unidad Yunquera-Nieves

La precipitación media caída sobre la Unidad Hidrogeológica durante el período de investigación fue de 176 hm³/año. Debido a su mayor superficie y pluviometría, sobre el sistema de la Sierra de las Nieves se registró la mayor parte de la lluvia (129 hm³/año). En el sistema de Prieta-Bonela-Alcaparaín, la cantidad de lluvia totalizada fue de 36 hm³/año mientras que, en el sistema de Yunquera, la cantidad de lluvia registrada fue bastante menor, 11 hm³/año (Tabla 3.6.).

Sistema acuífero	P	ETR		I =Entradas		Salidas
	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)
Sierra de las Nieves	129	45	58	55	71	71
Yunquera	11	60	7	40	4	4
Prieta-Bonela-Alcaparaín	36	60	22	40	14	13
Unidad Hidrogeológica	176		87		89	88

Tabla 3.6. Resumen de las componentes del balance hidrogeológico realizado para la Unidad Yunquera Nieves y para cada uno de los sistemas diferenciados en ella. Leyenda: P: precipitación, ETR: evapotranspiración real, I: recarga o infiltración eficaz (lluvia útil).

Los recursos obtenidos para el período de investigación son ligeramente superiores a los valores recogidos en bibliografía. De acuerdo con el Atlas hidrogeológico de la Provincia de Málaga (DPM, 1988), los recursos de la Unidad Yunquera-Nieves son 75 hm³/año. Según los cálculos del IGME (1983a) para un período histórico, los recursos son 72 hm³/año, considerando que se infiltra el 43 % de la precipitación caída sobre la Unidad (166 hm³/año). Las diferencias existentes entre los recursos calculados para el período el período 1995/96-1998/99 y el

histórico pueden atribuirse al hecho de que el primero ha sido ligeramente húmedo desde el punto de vista pluviométrico.

Aplicando los correspondientes coeficientes de infiltración, se obtiene un total de entradas de 89 hm³/año, que mayoritariamente recargan el sistema de la Sierra de las Nieves (71 hm³/año), en el que se registran las mayores precipitaciones y en el que mayor es el coeficiente de infiltración (55 %). En los sistemas de Yunquera y Prieta-Bonela-Alcaparain, cuyo porcentaje de infiltración con respecto a la lluvia es similar (40 %), se infiltran 4 y 14 hm³/año, respectivamente (Tabla 3.6).

Las salidas calculadas durante el período de investigación ascienden a 88 hm³/año, por lo que son prácticamente similares a las entradas (tabla 3.6), como corresponde a sistemas en los que la explotación mediante bombeos es muy escasa. La mayor parte de las salidas corresponden al sistema de la Sierra de las Nieves (71 hm³/año), en el cual se ubican los manantiales más caudalosos de la Unidad Hidrogeológica.

3.4. SIERRAS BLANCA Y MIJAS

En este capítulo se pretende, por una parte, realizar el balance hidrológico de la Unidad Blanca-Mijas y de cada uno de los sistemas acuíferos que la constituyen y, por otra parte, efectuar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en el cálculo de la recarga por diferentes métodos. El balance sólo se efectuará de forma completa con los valores medios del periodo 1990/91-1993/94, por razones de disponibilidad de datos, pero siempre que ha sido posible se ha efectuado el balance para el año medio de un periodo histórico, para el valor medio de los años húmedos y para el valor medio de los años secos. Se pretende así que los resultados obtenidos tengan la máxima representatividad, no sólo por la diversidad de métodos aplicados y las condiciones hidrogeológicas (diferentes sistemas con distintas características geológicas e hidrogeológicas) sino también por la diversidad de condiciones climáticas consideradas.

Con respecto a las salidas, cabe señalar que hay registros históricos de los caudales drenados por los manantiales y del volumen de agua extraído en los numerosos sondeos existentes, particularmente en Sierra de Mijas. Los datos históricos de aforos de los manantiales que se han utilizado en este estudio proceden de la base de datos del IGME y han sido completados con la información obtenida por Andreo (1997).

Con respecto a las precipitaciones sobre la Unidad Blanca-Mijas se ha calculado la lluvia media por el procedimiento de planimetría de isoyetas para cada uno de los sistemas que constituyen la unidad y para el conjunto de la misma.

Para evaluar las entradas o recursos hídricos de la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas y de los sistemas acuíferos, se han utilizado fórmulas empíricas que permiten estimar la evapotranspiración real (ETR) y la correspondiente lluvia útil o precipitación efectiva (PU). Esta lluvia útil produce recarga por infiltración y/o escorrentía superficial, en diferente proporción, según las características de la Unidad o sistema investigados (topografía, permeabilidad de los materiales).

Una vez analizadas las precipitaciones y la evapotranspiración se ha evaluado, para cada sistema y para el conjunto de la Unidad, el porcentaje de la precipitación que produce

lluvia útil (PU). Ello permite determinar un volumen medio anual de PU, y en definitiva de recursos, si la escorrentía fuera despreciable. El cálculo se hace para diferentes periodos (1990/91-1993/94 y 1963/64-1993/94) y para diferentes años tipo (medios, húmedos y secos). Los resultados obtenidos permiten contrastar la aplicabilidad de los métodos de cálculo utilizados.

Las pérdidas por escorrentía sobre los mármoles de Sierra Blanca se han determinado mediante la diferencia entre las entradas teóricas y las salidas controlables. En Sierra de Mijas la escorrentía se controló en una cuenca experimental, instalada a tal efecto en la vertiente meridional de dicha Sierra.

Después de conocer las distintas componentes del balance hidrológico en cada uno de los sistemas diferenciados se calculan los recursos medios anuales en cada sistema y en el conjunto de la Unidad. Finalmente se lleva a cabo un balance hidrogeológico global.

3.4.1. Salidas de la unidad Blanca-Mijas

En el sector occidental de Sierra Blanca el volumen medio de descarga anual, calculado a partir de aforos puntuales, asciende a 8,8 hm³: 4,8 hm³/año en el sistema de Istán, 2,5 hm³/año en el de Marbella y 1,5 hm³ en el de Ojén.

El volumen medio de descarga anual controlada en el sistema de Istán (4,8 hm³/año), corresponde al caudal conjunto de los manantiales de Istán (128 L/s) y Moratán (24,5 L/s).

En el sistema de Marbella, se han controlado los manantiales de Nagüeles y Camoján, cuyos caudales medios durante el periodo de investigación son 48 y 41 L/s, respectivamente. No se ha medido el caudal de manantiales de cierta importancia como Alfahuara, Calaña y Represas, con volumen de descarga que se estima es del mismo orden de magnitud que el de los manantiales controlados. Por tanto, las salidas controlables del sistema de Marbella deben ser próximas a 5 hm³/año.

La situación descrita para el sistema de Marbella puede hacerse extensiva al sistema de Ojén. En este caso, se ha medido el caudal drenado por los manantiales de Ojén (38,5

L/s) y Fuente Cañada (8 L/s), pero no los de Puerto Rico y Bajo Ojén. El valor medio estimado de las salidas controlables es 3 hm³/año.

Por tanto, el volumen de salidas controlables en el sector occidental de Sierra Blanca debe ser del orden de 12,8 hm³/año.

En el sector oriental de Sierra Blanca (sistema de Coín) la descarga media anual obtenida a partir de los aforos directos en manantiales es de 13,9 hm³/año: Pereilas (140 L/s), Coín (206,5 L/s), Barranco Blanco (65 L/s) y Las Torres (26,5 L/s). Las cifras anteriores no incluyen la escorrentía superficial procedente de Sierra Alpujata (14,9 hm³/año), porque la recarga que produce ésta en el acuífero de Coín es despreciable a efectos de balance hidrológico del sistema. Además, en el sistema de Coín, se bombea un volumen medio anual de 3 hm³, la mayor parte del mismo en el propio manantial (2,5 hm³/año). Por consiguiente, en el Sierra Blanca oriental las salidas son de 16,9 hm³/año.

En la Sierra de Mijas toda la descarga se produce mediante explotación por bombeo en los numerosos sondeos que existen. El control del volumen de agua extraída en los sondeos es algo que aún no puede hacerse con precisión, dado que no hay contadores volumétricos instalados en todos ellos. La mayoría de los datos relativos al volumen de agua bombeado procede de los cálculos efectuados mediante el consumo de energía eléctrica de los motores de las bombas, del control del tiempo de bombeo multiplicado por un caudal supuestamente constante, así como de las encuestas a comunidades de regantes, ayuntamientos y/o empresas gestoras del agua; en el caso de algunas fincas privadas (varias urbanizaciones y campos de golf), se ha estimado el volumen de agua bombeado ante la negativa de sus propietarios a facilitar datos. Según la información disponible, en Sierra Mijas, se ha bombeado un volumen medio anual del orden de 31 hm³ (5,7 hm³/año en el sistema de Alhaurín el Grande, 2,5 hm³/año en el Mijas, 2,5 hm³/año en el de Benalmádena y 20,3 hm³/año en el de Torremolinos).

En trabajos previos sobre Sierra Mijas se dan cifras de salidas del orden de 19 hm³/año (ITGE, 1992) y 29 hm³/año (DGOH, 1992). Conviene precisar que el primer dato corresponde a los años hidrológicos 1988/89 y 1989/90, época en la que había menos sondeos funcionando.

Por consiguiente, durante el periodo 1990/91-1993/94, el valor medio de las salidas controlables de la Unidad Blanca-Mijas es de 60,7 hm³/año: 26,7 hm³/año por manantiales y 34'0 hm³/año mediante bombeos. Las salidas por manantiales tienen lugar en Sierra Blanca, sobre todo en su sector occidental, mientras que los bombeos se producen, mayoritariamente, en Sierra Mijas.

3.4.2. Precipitaciones

Las precipitaciones durante el periodo de investigación se recogen en la tabla 3.7 donde se puede constatar que disminuyen de Oeste a Este, independientemente del periodo considerado, es decir, son más abundantes en Sierra Blanca, particularmente en el sector occidental de ésta, que en Sierra Mijas. Así, históricamente, en el sistema de Ojén es donde más llueve (857 mm de media anual) mientras que en el de Torremolinos se registran los valores más bajos de precipitación (610 mm).

La precipitación media anual obtenida mediante planimetría de isoyetas, en la Unidad Blanca-Mijas, durante el periodo histórico 1963/64-1993/94, es de 720 mm. Durante el periodo 1990/91-1993/94 la precipitación media, deducida por el mismo método, ha sido de 640 mm, es decir, que este último periodo es ligeramente seco.

El volumen de agua de lluvia que cae sobre las Sierras Blanca y Mijas es de 122,3 hm³ en un año de tipo medio histórico, 108,9 hm³ como valor medio anual durante el periodo 1990/91-1993/94, 188 hm³ en un año de tipo húmedo y 85 hm³ en un año de tipo seco. En la tabla 3.7 se detalla la precipitación media anual, durante cada periodo, en los distintos sistemas que constituyen la Unidad estudiada.

Durante el periodo 1990/91-1993/94, la precipitación media anual sobre el sector occidental de Sierra Blanca ha sido de 731 mm (38,6 hm³/año): 710 mm (11,6 hm³/año) en el sistema de Istán, 735 mm (17,2 hm³/año) en el de Marbella y 750 mm (9,8 hm³/año) en el de Ojén.

En el sector oriental de Sierra Blanca la precipitación media anual sobre el afloramiento de mármoles ha sido de 665 mm (25,3 hm³/año).

	Istán		Marbella		Ojén		Coin		Alh. Grande		Mijas		Benalmádena		Torremolinos		SB-SM	
	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)	(mm)	(hm ³ /año)
90-94	710	11.6	735	17.2	750	9.8	665	25.3	615	10.3	618	5.0	550	4.8	544	24.9	640	108.9
64-94	810	13.2	837	19.6	857	11.2	735	27.9	666	11.1	698	5.7	650	5.7	610	27.9	720	122.3
mAH	1294	21.1	1244	29.1	1344	17.6	1146	43.5	1018	17.0	1050	8.5	1004	8.7	926	42.4	1105	188.0
mAS	618	10.1	532	12.4	642	8.4	501	19.0	450	7.5	450	3.6	450	3.9	429	19.6	498	84.7

Tabla 3.7. Precipitaciones medias anuales obtenidas mediante planimetría de isoyetas en la Unidad Blanca-Mijas, para la media del periodo 1990-1994, del periodo histórico (1964-1994) de los años húmedos (mAH) y de los años secos (mAS).

		Istán		Marbella		Ojén		Coin		Alh. Grande		Mijas		Benalmádena		Alh. Torre		Manantiales		Torremolinos		SWB		SEB		SM		SB-SM			
		ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU	ETR	PU		
TURC	90-94	609	127	561	81	627	137	511	40	537	50	554	61	511	38	485	37	523	53	449	25	599	115	511	40	510	44	537	65		
	64-94	621	150	561	127	670	211	516	72	523	76	606	134	554	94	469	66	610	159	474	49	617	163	516	72	539	96	560	114		
	mAH	772	374	763	333	844	543	681	206	685	216	800	367	737	285	741	264	785	372	630	144	793	416	681	206	730	275	744	310		
	mAS	500	39	417	69	553	66	386	8	396	11	462	23	482	45	325	7	517	47	390	12	490	58	386	8	429	24	443	33		
COUTAGNE	90-94	565	171	514	127	583	181	461	90	485	102	502	113	461	89	439	83	475	100	418	56	554	160	461	90	463	91	490	111		
	64-94	616	155	520	152	677	203	477	111	483	115	554	187	510	138	442	94	558	211	442	81	604	170	477	111	498	138	528	145		
	mAH	959	187	713	383	1097	289	626	262	628	274	741	426	678	344	693	312	725	432	579	195	923	286	626	262	674	331	744	310		
	mAS	451	87	391	45	503	116	367	27	378	29	416	70	457	70	313	20	468	95	366	36	448	83	367	27	400	53	411	59		
THORNWHITE cc = 50 mm	90-94	407	329	415	227	413	350	356	195	364	224	376	273	357	200	332	191	353	223	340	135	412	302	356	195	353	208	371	235		
	64-94	378	393	359	313	384	492	324	271	328	270	349	396	321	297	302	238	374	396	316	207	374	399	324	271	332	301	343	327		
	mAH	419	740	381	727	413	987	354	558	356	545	375	794	362	661	365	624	415	742	354	420	404	818	354	558	371	631	379	680		
	mAS	322	216	304	132	332	273	271	123	280	127	296	215	269	170	252	103	312	252	279	123	319	207	271	123	281	165	292	173		
THORNWHITE MENSUAL cc = 25 mm	90-94	376	360	387	254	386	378	328	223	336	251	348	301	328	229	304	218	327	249	313	162	383	331	328	223	326	235	343	262		
	64-94	349	422	331	341	355	522	296	299	300	298	318	427	291	327	272	260	345	424	287	236	345	428	296	299	302	329	314	356		
	mAH	388	765	350	752	378	1016	326	586	327	573	344	826	332	690	331	657	383	774	326	448	372	844	326	586	341	662	348	700		
	mAS	292	247	278	158	302	302	245	149	254	153	264	247	240	198	223	109	287	277	250	151	291	236	245	149	253	189	263	199		
Th _d cc=50	90-94	391	394	474	330	390	389	313	268	323	254	400	352	374	266	298	247	371	271	277	170	418	371	313	268	341	260	361	294		
Th _m cc=25	90-94	316	467	402	404	301	478	271	311	264	317	344	408	322	318	231	312	317	326	220	227	340	450	271	311	283	318	299	357		
KESSLER	90-94	333	403	267	374	279	485	239	312	237	350	275	371	232	317	209	313					198	277	293	421	239	312	230	326	252	356
	64-94	342	428	277	395	368	513	268	320	269	329	324	424	295	352	229	306					227	296	329	445	268	320	269	342	289	374
	mAH	476	671	375	721	555	832	335	553	361	541	450	717	511	511	419	587					340	435	468	741	335	553	416	558	425	619
	mAS	255	283	187	249	282	337	180	214	189	218	221	289	260	266	142	191					168	234	241	290	180	214	196	240	209	253
CLORUROS	90-94	351	385	344	298	436	328	247	304	291	297	377	269	344	205	251	271					257	218	377	337	247	304	304	252	322	286

Tabla 3.8. Valores de evapotranspiración real (ETR) y de lluvia útil (PU), calculados a partir de los datos termopluviométricos registrados en las estaciones de las Sierras Blanca y Mijas. Leyenda: Th_d= Thornthwaite diario, Th_m= Thornthwaite mensual, cc= capacidad de campo.

Finalmente, en Sierra de Mijas la precipitación media ha sido de 568 mm (45 hm³/año): 615 mm (10,3 hm³/año) en el sistema de Alhaurín el Grande, 618 mm (5 hm³/año) en el de Mijas, 550 mm (4,8 hm³/año) en el de Benalmádena y 544 mm (24,9 hm³/año) en el de Torremolinos.

3.4.3. Evapotranspiración real y lluvia útil

Para calcular la evapotranspiración real y la lluvia útil se han tenido en cuenta las series históricas de precipitaciones y temperaturas anuales registradas en las estaciones del área de estudio. En primer lugar, el tratamiento se ha efectuado por estaciones meteorológicas y, posteriormente, para cada uno de los sistemas hidrogeológicos.

En el sector occidental de Sierra Blanca se han utilizado los datos pluviométricos de las estaciones de Istán, Marbella y Ojén y los datos de temperatura de la estación de Puerto Banús (Marbella), por lo que la serie de datos manejada comprende desde 1972/73 hasta 1993/94. En el sector oriental de Sierra Blanca, se han empleado los datos de la estación termopluviométrica de Coín, que comprende el periodo 1977/78-1993/94. En Sierra Mijas, se han utilizado los datos pluviométricos de las estaciones de Alhaurín el Grande y Mijas, con las temperaturas de Coín; y los datos de lluvia de las estaciones de Benalmádena, Alhaurín de la Torre, Manantiales (Alhaurín de la Torre) y Torremolinos con las temperaturas medidas en la estación del Aeropuerto de Málaga. En éstas últimas estaciones la crónica empieza en 1972/73 y termina en 1993/94, excepto en las de Benalmádena y Manantiales, debido a que las series de datos pluviométricos empiezan en los años 1979/80 y 1989/90, respectivamente.

Con los datos disponibles se han calculado, a nivel anual, los valores de ETR y PU (expresados en mm) y, a partir de ellos, se han obtenido los valores medios para la media del periodo 1990/91-1993/94 y, cuando ha sido posible, también para un año medio histórico, para la media de los años húmedos y para la media de los años secos.

Los métodos utilizados para el cálculo de la evapotranspiración real y lluvia útil han sido los de Turc, Coutagne, Thornthwaite (a nivel mensual y diario), balance de cloruros y

método de Kessler. Conviene precisar que los dos últimos métodos permiten calcular la infiltración eficaz, más que la lluvia útil propiamente dicha, por tanto, su aplicación para el cálculo de ETR y PU se hace suponiendo, en principio, que la escorrentía superficial es despreciable. Los cálculos hechos por los otros métodos se han efectuado mediante el paquete de programas HIDROBAS (ITGE-ETSIM, 1991), excepto el balance de Thornthwaite a nivel diario que se ha realizado con el programa SIMU, puesto a punto por el Dr. Manuel Olías Álvarez en el Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada.

Una vez conocidas la evapotranspiración real y la lluvia útil en las distintas estaciones meteorológicas, se ha determinado el porcentaje de la precipitación que produce lluvia útil en cada una de ellas y a cada sistema hidrogeológico se le ha asignado el valor correspondiente a la estación más próxima o, en su caso, el valor medio de las estaciones más cercanas. Dicho porcentaje se ha multiplicado por la precipitación media anual en cada sistema, determinada mediante planimetría de isoyetas, obteniendo así el volumen anual (en hm^3) de lluvia útil en cada sistema, para distintos periodos.

Cálculo de la evapotranspiración real y lluvia útil a partir de los datos de las estaciones meteorológicas

Los métodos de Turc y Coutagne permiten obtener, para el periodo de investigación, valores medios anuales de evapotranspiración real de 537 mm (Turc) y 490 mm (Coutagne), con una lluvia útil de 65 y 111 mm, respectivamente. Estas cifras globales son muy diferentes de las calculadas por los otros métodos y no pueden considerarse representativas, al igual que los resultados obtenidos por estos métodos para cada uno de los sistemas investigados (Tabla 3.8).

El método de Thornthwaite se ha aplicado con datos termopluviométricos mensuales y diarios. En el primer caso, para el conjunto de la Unidad durante el periodo 1990/91-1993/94 se obtienen los siguientes valores medios anuales de evapotranspiración

real y lluvia útil: 371 y 235 mm (con una capacidad de campo $cc = 50$ mm) y 343 y 262 mm ($cc = 25$ mm), respectivamente.

El balance de Thornthwaite a nivel diario, se ha calculado utilizando como valor de ETP el calculado a nivel mensual repartido por el número de días de cada mes, porque esto simplifica mucho el tratamiento y el error de estimación de la PU difiere apenas un 0,5 % del que se obtendría con la ETP diaria (Padilla y Pulido, 1986). Durante el periodo de investigación los valores medios anuales de ETR y PU, calculados por este método, son de 361 y 294 mm ($cc = 50$ mm) y 299 y 357 mm ($cc = 25$ mm), respectivamente.

El valor medio anual de evapotranspiración real, obtenido por el método de Kessler (suponiendo que no hay escorrentía superficial), es de 252 mm y la lluvia útil (recarga) de 356 mm.

Finalmente, con el balance de cloruros la evapotranspiración real calculada es de 322 mm y la lluvia útil de 286 mm, valores éstos intermedios entre todos los obtenidos por los distintos métodos.

Los valores medios anuales de ETR obtenidos por todos los métodos, para el periodo 1990/91-1993/94, son siempre mayores que los de lluvia útil, excepto los resultados de los métodos de Kessler y de Thornthwaite a nivel diario con 25mm capacidad de campo.

Cálculo de la lluvia útil en los diferentes sistemas hidrogeológicos

Los valores medios anuales de la lluvia útil obtenidos durante el periodo de investigación (Tabla 3.9), mediante las fórmulas de Turc y Coutagne, son del 10,9 y 18,6% de la precipitación (11,2 y 19,7 $hm^3/año$, respectivamente), muy inferiores a los obtenidos por otros métodos.

La lluvia útil obtenida por el método de Thornthwaite, para el mismo periodo, varía entre el 39,1 y el 59,4 % de la precipitación (entre 41,1 y 63,5 $hm^3/año$) dependiendo de la capacidad de campo y de que el balance se haya efectuado a nivel mensual o diario.

		Istán		Marbella		Ojén		Coiñ		Alh. C	Torremolinos		SWB		SEB		SM		SB-SM	
		% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P	(hm ³ /año)	% P
TURC	90-94	17,2	2,0	12,6	2,2	17,9	1,7	7,2	1,8	8,6	7,2	1,8	15,9	5,9	7,2	1,8	8,0	3,5	10,9	11,2
	64-94	19,5	2,5	18,9	3,7	24,0	2,7	12,2	3,4	12,7	14,1	3,9	20,8	8,9	12,2	3,4	14,8	7,2	16,7	19,5
	mAH	32,6	6,9	30,4	8,8	39,1	6,9	23,3	10,1	24,0	25,6	10,9	34,0	22,6	23,3	10,1	27,2	20,0	29,3	52,8
	mAS	7,2	0,7	15,8	2,0	10,7	0,9	2,0	0,4	2,7	4,5	0,9	11,2	3,6	2,0	0,4	5,1	1,6	7,0	5,8
COUTAGNE	90-94	23,2	2,7	19,8	3,4	23,7	2,3	16,3	4,1	17,4	15,1	3,8	22,2	8,4	16,3	4,1	16,5	7,2	18,6	19,7
	64-94	20,1	2,3	22,7	3,9	23,1	2,3	18,9	4,8	19,3	20,1	5,6	22,0	8,5	18,9	4,6	21,4	10,4	21,3	23,6
	mAH	16,3	3,4	34,9	10,2	20,8	3,7	29,5	12,8	30,4	31,1	13,2	24,0	17,3	29,5	12,8	32,9	24,4	29,2	54,5
	mAS	16,1	1,6	10,3	1,3	18,8	1,6	7,0	1,3	7,1	10,6	2,1	15,1	4,5	7,0	1,3	11,2	3,6	12,1	9,4
THORNWHITE MENSUAL cc = 50 mm	90-94	44,7	5,2	35,3	6,1	45,9	4,5	35,3	8,9	38,1	34,6	8,8	42,0	15,8	35,3	8,9	37,8	16,4	39,1	41,1
	64-94	51,0	5,9	46,6	8,0	55,9	5,5	46,0	11,6	45,2	45,1	12,6	51,2	19,4	48,0	11,8	47,3	23,2	48,6	54,2
	mAH	64,5	13,6	66,3	19,3	71,2	12,5	62,8	27,4	60,4	59,9	25,4	67,4	45,5	62,8	27,4	63,3	47,1	64,7	119,9
	mAS	40,2	4,1	30,3	3,8	44,1	3,7	31,2	5,9	31,2	35,4	6,9	38,2	11,5	31,2	5,9	35,2	12,1	35,8	29,6
THORNWHITE MENSUAL cc = 25 mm	90-94	48,9	5,7	39,6	6,8	49,5	4,8	40,4	10,2	42,8	39,7	9,9	46,0	17,3	40,4	10,2	42,7	18,6	43,7	46,1
	64-94	54,7	6,3	50,7	8,7	59,3	5,8	50,8	12,8	49,9	49,5	13,8	54,9	20,9	50,8	12,8	51,7	25,5	52,8	59,2
	mAH	66,7	14,1	66,6	20,0	73,3	12,9	66,0	28,7	63,6	63,2	26,8	69,5	46,9	66,0	28,7	66,3	49,5	67,5	125,2
	mAS	45,8	4,6	36,2	4,5	48,6	4,1	37,9	7,2	37,7	39,9	7,8	43,6	13,2	37,9	7,2	40,9	13,9	41,6	34,3
Thd cc=50	90-94	53,6	6,2	51,4	8,8	50,9	5,0	48,6	12,3	43,2	43,3	10,8	52,0	20,0	48,6	12,3	47,4	20,3	49,2	52,6
Thd cc=25	90-94	63,4	7,3	62,9	10,8	62,6	6,1	56,4	14,2	54,0	54,8	13,6	63,0	24,2	56,4	14,2	57,4	25,1	59,4	63,5
KESSLER	90-94	54,8	6,4	58,3	10,0	63,5	6,2	56,7	14,3	59,6	59,1	14,7	58,9	22,6	56,7	14,3	58,5	26,5	58,4	63,4
	64-94	55,6	6,4	58,7	10,1	58,2	5,7	54,4	13,7	55,1	56,9	15,9	57,5	22,3	54,4	13,7	55,8	28,3	56,3	64,3
	mAH	58,5	12,3	65,6	19,1	60,0	10,6	62,3	27,1	60,0	57,3	24,3	61,4	42,0	62,3	27,1	57,2	44,1	59,4	113,2
	mAS	52,6	5,3	57,1	7,1	54,4	4,6	54,2	10,3	53,7	57,8	11,3	54,7	17,0	54,2	10,3	54,7	19,4	54,6	46,7
CLORUROS	90-94	52,6	6,1	46,5	8,0	42,8	4,2	55,0	14,0	50,5	45,9	11,4	47,3	18,3	55,2	13,9	45,6	20,5	48,4	52,8

Tabla 3.9. Datos de lluvia útil expresados en forma de porcentaje de precipitación y como caudal (hm³/año) y como caudal (hm³/año), para los distintos sistemas acuíferos y para la Unidad Hidrogeológica Blanca-Mijas. Misma leyenda que tablas 3.7 y 3.8.

A partir del método de Kessler se obtienen valores de lluvia útil (de recarga, considerando que no hay escorrentía) menos variables de un periodo a otro, pero claramente superiores al resto de métodos empleados. Para el periodo 1990/91-1993/94 el valor medio anual de la infiltración eficaz es del 58,4 % de la precipitación (63,4 hm³/año).

Durante el mismo periodo, el valor medio de la lluvia útil, obtenido por el balance de cloruros, equivale al 48,4 % de la precipitación (52,8 hm³/año). Concretamente, según los resultados del balance de cloruros (Tablas 3.8 y 3.9), el valor medio anual de la lluvia útil en el sector occidental de Sierra Blanca es 18,3 hm³/año (6,1 hm³/año del sistema de Istán, 8 hm³/año del sistema de Marbella y 4,2 hm³/año del sistema de Ojén), en el sector oriental de Sierra Blanca o sistema de Coín es 13,9 hm³/año y en Sierra Mijas es 20,5 hm³/año (5,2 hm³/año del sistema de Alhaurín el Grande, 2,1 hm³/año del sistema de Mijas, 1,8 hm³/año del sistema de Benalmádena y 11,4 hm³/año del sistema de Torremolinos).

Comentarios sobre los métodos utilizados en el cálculo de la lluvia útil

Los métodos de Turc y Coutagne permiten obtener valores elevados de la evapotranspiración real y, por tanto, bajos de la lluvia útil, debido a que utilizan datos medios anuales de precipitación y temperatura, sin tener en cuenta su distribución a lo largo del año. Los resultados obtenidos no son coherentes con los datos hidrogeológicos conocidos de las Sierras Blanca y Mijas, en particular los datos relativos a las descargas.

Por tanto, los métodos de Turc y de Coutagne no son adecuados para calcular la ETR y PU en la Unidad Blanca-Mijas. No obstante, Cardenal (1993), en Sierra Lújar, situada en un contexto geológico y geográfico similar al área aquí investigada, considera que dichos métodos dan cifras coherentes para altitudes de recarga inferiores a 300 m. Asimismo, Blavoux *et al.* (1992), aplican el método de Turc a nivel mensual, en el sistema de Vaucluse, con resultados satisfactorios.

Con respecto al método de Thornwhite, cabe señalar que la lluvia útil obtenida para el conjunto de la Unidad, a nivel diario, es, entre 10 y 15 %, superior a la estimada a nivel mensual. Estas mismas diferencias son observadas más al Este, en Sierra Lújar, por

Cardenal (1993), quien constató, además, que en los balances a nivel mensual se valora por defecto la PU, tanto más cuanto menor sea la capacidad de campo. Los valores de lluvia útil obtenidos por el método de Thornthwaite a nivel diario son, teóricamente, más adecuados porque dicho método tiene en cuenta la distribución de las precipitaciones a lo largo del mes (Padilla y Pulido-Bosch, 1986).

El método de Kessler permite obtener valores elevados de la lluvia útil (recarga, considerando que no hay escorrentía), mayores que los obtenidos por casi todos los otros métodos, y los volúmenes de descarga calculados son muy superiores a los medidos. Los resultados obtenidos por este método en el conjunto de la Unidad, para el periodo de investigación, son similares a los calculados por el balance de Thornthwaite a nivel diario con 25 mm de capacidad de campo. En otras partes de la Cordillera Bética, el método de Kessler ha sido aplicado con resultados satisfactorios (López-Vera y Saiz, 1975).

El balance de cloruros (Schoeller, 1962) es el método más utilizado, en sistemas acuíferos carbonáticos como los de la Unidad Blanca-Mijas, debido al carácter conservativo de dicho ión. Los porcentajes de precipitación que producen lluvia útil, obtenidos mediante el balance de cloruros, presentan valores intermedios entre los calculados por los otros métodos. Teniendo en cuenta las cifras totales de la Unidad, los valores de PU obtenidos por este método son muy parecidos a los calculados por el de Thornthwaite a nivel diario con una capacidad de campo de 50 mm; sin embargo, cuando se analizan los resultados por sistemas hidrogeológicos existen diferencias de hasta un 10%.

Por otra parte, se han efectuado correlaciones lineales entre los porcentajes de precipitación que producen lluvia útil calculados por todos los métodos (Tabla 3.10), excepto los de Turc y Coutagne, cuyos resultados son claramente inadecuados. Los coeficientes de correlación así obtenidos sólo son significativos cuando se correlacionan los resultados del método de Thornthwaite a un mismo nivel, mensual o diario; sin embargo, cuando se correlacionan a un nivel distinto, el coeficiente es relativamente elevado pero no significativo. Los resultados del método de Kessler y del balance de cloruros están mal correlacionados con todos los restantes y, además, con signo negativo, sobre todo, en el caso del segundo método.

	Th _m 50	Th _m 25	Th _d 50	Th _d 25	Kessler	CI
Th _m 50	1,0000					
Th _m 25	0,9965	1,0000				
Th _d 50	0,6058	0,5879	1,0000			
Th _d 25	0,6566	0,6206	0,9402	1,0000		
Kessler	0,1871	0,1533	-0,2910	-0,0806	1,0000	
CI	-0,0877	-0,0905	-0,1487	-0,2289	-0,3738	1,0000

Tabla 3.10. Matriz de coeficientes de correlación lineal entre los valores de lluvia útil calculados por diferentes métodos.

Las correlaciones realizadas indican que la lluvia útil calculada en cada sistema varía según el método utilizado. Por tanto, a escala de sistemas hidrogeológicos, los resultados son diferentes, probablemente, porque los datos de partida son diferentes en cada caso (precipitaciones, temperaturas y contenidos en cloruros) y los tratamientos efectuados también son distintos. Cada uno de éstos métodos permitirá obtener resultados satisfactorios en unas determinadas condiciones climáticas, topográficas y geológicas, pero evidentemente no son aplicables por igual en un mismo sistema.

Sin embargo, a escala de la Unidad Hidrogeológica, se obtienen resultados de la misma magnitud aplicando métodos distintos: Thornthwaite diario con $cc = 50$ mm y balance de cloruros, Thornthwaite diario con $cc = 25$ mm y método de Kessler. Esto significaría, lógicamente, que a un mismo resultado final se puede llegar haciendo diferentes pasos intermedios. Parece oportuno examinar esos pasos para ver cuales responden más a la realidad.

La lluvia útil calculada por estos métodos, debe ser contrastada con la diferencia entre la precipitación que cae sobre cada sistema en cuestión y los caudales de descarga del mismo; lógicamente, cuanto más precisas sean las medidas de estas dos variables, más precisos serán los resultados del balance final.

Los métodos que dan resultados globales más coherentes con las observaciones hidrogeológicas son el balance de cloruros y el de Thornthwaite a nivel diario con una $cc=50$ mm. Es decir que, en principio, cualquiera de ellos podría utilizarse para el periodo 1990/91-1993/94.

En los sistemas del sector occidental de Sierra Blanca, la lluvia útil obtenida con el método de Thornthwaite ($20 \text{ hm}^3/\text{año}$) es mayor que la calculada suponiendo que no hay escorrentía, por el balance de cloruros ($18,3 \text{ hm}^3/\text{año}$). Podría pensarse que la diferencia entre ambos es precisamente la escorrentía, pero es que cuando se cuantifican los volúmenes de descarga medidos resulta que las salidas controlables ascienden a $12,8 \text{ hm}^3/\text{año}$, todavía menos que la lluvia útil deducida por el balance de cloruros.

En el sistema de Coín la lluvia útil calculada por el método de Thornthwaite ($12,3 \text{ hm}^3/\text{año}$) es inferior a la calculada por el balance de cloruros ($13,9 \text{ hm}^3/\text{año}$) y, también en este caso, las salidas controladas en los manantiales ($13,9 \text{ hm}^3/\text{año}$) y las observaciones hidrogeológicas realizadas sobre este sistema se adaptan más a los resultados del segundo método.

En Sierra de Mijas, si se consideran las cifras de obtenidas por el método de Thornthwaite, resulta que habría sistemas, como los de Mijas y Benalmádena, que presentarían una lluvia útil ($2,7$ y $2,3 \text{ hm}^3/\text{año}$, respectivamente) del mismo orden de magnitud que el caudal medio anual de bombeo ($2,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ en ambos casos), algo que está en desacuerdo con la importante explotación de que están siendo objeto dichos sistemas y los descensos piezométricos que allí se originan.

Por tanto, se considera que el método más adecuado para la evaluación de la lluvia útil es el balance de cloruros y la evaluación de los recursos de cada uno de los sistemas hidrogeológicos, así como los del conjunto de la Unidad Blanca-Mijas, deben hacerse mediante este procedimiento.

3.4.4. Escorrentía

En el sector occidental de Sierra Blanca hay una gran diferencia en los datos de lluvia útil calculados ($18,3 \text{ hm}^3/\text{año}$) y salidas controlables ($12,8 \text{ hm}^3/\text{año}$) lo que pone de manifiesto la existencia de escorrentía superficial sobre los mármoles. Casi todos los arroyos o barrancos que drenan superficialmente los mármoles de este sector llevan agua durante e incluso algunos días después de una tormenta. Esto es un hecho constatado en

numerosas ocasiones, aunque no ha sido posible cuantificar realmente su magnitud. En bastantes casos se ha observado que la escorrentía producida, durante e inmediatamente después de dichos periodos lluviosos, se debe a la descarga por niveles de karstificación situados a cotas elevadas.

Dentro del sistema de Istán se han controlado los dos puntos de descarga más importantes por lo que el caudal medio aforado debe corresponder, fundamentalmente, al caudal realmente infiltrado. Como la lluvia útil deducida por el método de los cloruros es de $6,1 \text{ hm}^3$ y en los manantiales sólo se han medido $4,8 \text{ hm}^3$, se deduce que las pérdidas por escorrentía son del orden de $1,3 \text{ hm}^3/\text{año}$ (el 11,2 % de la precipitación). Por tanto, según esto, la tasa de recarga en el sistema de Istán es, realmente, del 41,4 % de la precipitación.

En el sistema de Marbella, el volumen medio de descarga controlable se estimó en $5 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que la lluvia útil obtenida mediante el balance de cloruros es de $8 \text{ hm}^3/\text{año}$; por tanto, la escorrentía superficial sobre el sistema asciende a $3 \text{ hm}^3/\text{año}$ (17,4 % de la precipitación). Es decir, el coeficiente de infiltración en este sistema es de orden del 29,1 %.

La situación descrita para el sistema de Marbella puede hacerse extensiva, en su totalidad, al sistema de Ojén. En este caso el valor medio anual de la PU es de $4,2 \text{ hm}^3$ mientras que el de descarga controlable es 3 hm^3 . Se deduce así que hay $1,2 \text{ hm}^3/\text{año}$ de escorrentía, equivalente a algo más de un 12,2 % de la precipitación media anual. Por tanto, la infiltración eficaz en el sistema de Ojén es superior al 30,6 % de la precipitación.

La lluvia útil calculada para el sector oriental de Sierra Blanca (sistema de Coín), por el balance de cloruros, asciende a $13,9 \text{ hm}^3/\text{año}$ y la descarga natural controlada es también de $13,9 \text{ hm}^3/\text{año}$ (sin contar las extracciones mediante bombeo); por tanto, según estos datos, no existe escorrentía sobre los mármoles de este sector, predominantemente dolomíticos, muy fracturados y de aspecto sacaroideo.

En el sector de Sierra de Mijas se controló la escorrentía superficial en una cuenca experimental, la del Arroyo de Don Pedro, situado a una distancia de 2,5 km al Este de la localidad de Mijas. La cuenca hidrográfica de este Arroyo ocupa una superficie de $1,8 \text{ km}^2$

y está constituida enteramente por mármoles blancos dolomíticos, diaclasados y a veces sacaroideos. En el punto donde el Arroyo deja de circular por mármoles, aprovechando el puente de la carretera que une Benalmádena y Mijas, se realizó una estación de aforos equipada con un vertedero rectangular de doble canal y un aparato (INSIDER MDS-II) para registrar la altura de la lámina de agua y, en definitiva, controlar el caudal de escorrentía superficial sobre los mármoles. El periodo de registro utilizado comprende desde el día 1/5/93 hasta el 23/10/94 y las medidas de altura de lámina de agua se realizaron cada 5 minutos. Al mismo tiempo, se controló la precipitación en el pluviógrafo instalado en la localidad de Mijas, propiedad de la Comisaría de Aguas del Sur de España; en este caso, la precisión máxima del registro analógico es horaria.

En la figura 3.1 se ha representado la precipitación y la escorrentía media diaria; en ella puede observarse que, durante todo el periodo de registro, la lámina de agua en el vertedero superó el cero en 10 días y siempre con alturas medias menores de 1 cm, equivalentes a caudales inferiores a 1 L/s. Conviene tener presente que la poca escorrentía medida, en su mayor parte, no procede de los mármoles propiamente dichos, sino del agua que circula por la cuneta de la carretera durante periodos lluviosos.

Los dos primeros periodos de escorrentía (Fig. 3.1), y más importantes (27/10/93 y 3/11/93), se produjeron durante episodios de lluvias continuadas (del orden de 40 mm/día) que, a su vez, estuvieron precedidos de otros periodos lluviosos aunque de menor pluviometría (15 mm/día). El tercer periodo de escorrentía (6/1/94) sucedió como consecuencia de un día de precipitación abundante (70 mm) y, sin embargo, no fue precedido de precipitaciones considerables. Ahora bien, hubo periodos lluviosos (por ejemplo en Abril de 1994) en los que se registraron precipitaciones superiores a 40 mm/día, del mismo orden de magnitud que algunas de las más arriba indicadas, y, sin embargo, no se produjo escorrentía superficial.

El día 6/10/94 hubo otro periodo de escorrentía como consecuencia de unas precipitaciones inferiores a 30 mm y, en este caso, si fue precedido de unas precipitaciones de 20 mm/día.

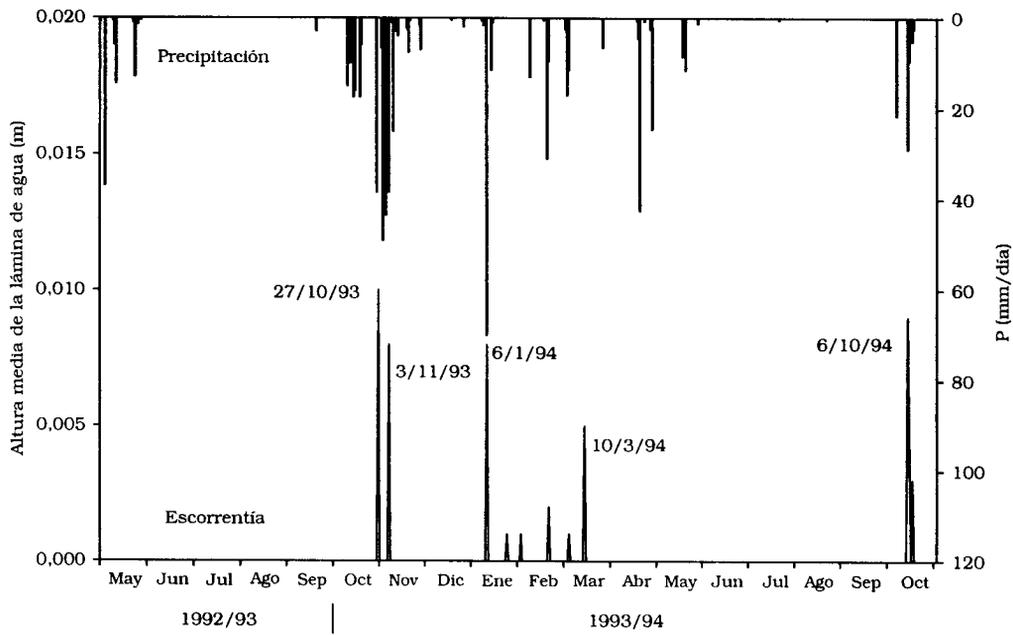


Fig. 3.1. Evolución de la altura media de la lámina de agua según la precipitación, durante el periodo 1/5/92-23/10/94, en la estación de aforos de Arroyo de Don Pedro.

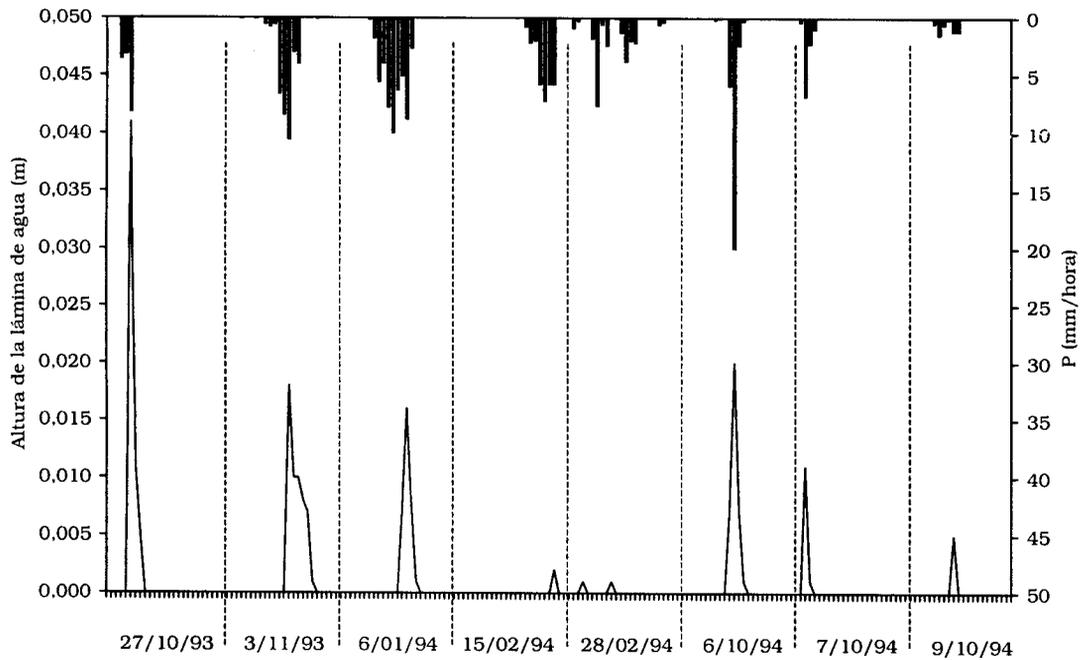


Fig. 3.2. Variación de la lámina de agua durante los periodos en los que se ha registrado escorrentía en la estación de aforos de Arroyo de Don Pedro.

El hidrograma correspondiente a cualquier periodo de escorrentía, a paso de tiempo horario (Fig. 3.2), permite constatar que la parte creciente del mismo tiene lugar de forma rápida pero siempre va precedida de varias horas en las que hay precipitación. El máximo del hidrograma coincide con el máximo de precipitación. En cualquier caso, la altura máxima registrada fue de 4 cm (27/10/93) y la duración de los periodos de escorrentía varía entre 2 y 7 horas.

Los datos disponibles indican que la escorrentía superficial se produce como consecuencia de periodos lluviosos continuados (con precipitaciones del orden de 10 mm/hora) precedidos de otros con las mismas características y cuando ocurren tormentas de cierta importancia (superiores a 20 mm/hora), aunque no se hayan registrado precipitaciones en los días anteriores.

En la cuenca experimental y probablemente en un entorno bastante amplio, dentro de Sierra Mijas, la escorrentía superficial durante el periodo de registro es prácticamente nula y, a efectos de cálculo del balance hidrogeológico, se puede considerar despreciable. Ahora bien, cabe pensar que, en épocas de pluviometría muy abundante, se produzca escorrentía superficial, como se ha constatado en Sierra Gádor (Martín-Rosales *et al.*, 1995), en un contexto geográfico y geológico parecido, aunque allí la vegetación es más escasa que en la cuenca de Arroyo Don Pedro.

3.4.5. Recursos hídricos

Recarga procedente de la escorrentía de Sierra Alpujata

Este apartado se refiere sólo al sector oriental de Sierra Blanca, es decir, al sistema de Coín. El afloramiento de peridotitas y migmatitas que forma parte de las cuencas de los Arroyos Seco, Alcazarín, Pereilas y Barranco Blanco ocupa una superficie de 22,4 km². La precipitación media anual sobre dicho afloramiento es de 780 mm durante el periodo 1963/64-1993/94, 666 mm durante el periodo 1990/91-1993/94, 1393 mm durante un año húmedo medio y 550 mm durante un año seco medio. Expresando en hm³/año las cifras anteriores equivalen a 17,5, 14,9, 31,2 y 12,3 respectivamente.

El agua de lluvia que cae sobre las peridotitas y migmatitas, en parte, se evapotranspira y, en parte, se almacena en la capa de alteración de estos materiales, dando lugar a surgencias de escaso caudal, que vierten sus aguas a los arroyos, prácticamente durante todo el año, y son aprovechadas para regar las fincas existentes en el contacto entre mármoles y migmatitas; por tanto, una mínima parte de ellas pueden recargar el acuífero carbonático como retorno de riegos. Sin embargo, la mayor parte del agua de lluvia caída sobre las peridotitas produce escorrentía que circula, a través de los cauces antes citados, hacia los mármoles del sector oriental de Sierra Blanca.

En este sentido, cabe señalar que Barranco Blanco y el río Pereilas son siempre ganadores, es decir, en ellos no tiene lugar recarga procedente de la escorrentía. Los cauces más favorables a dicho proceso son los arroyos Alcazarín y Seco, pero la recarga debe ser reducida porque la escorrentía sólo se produce cuando las precipitaciones son abundantes y, entonces, el agua circula de forma rápida debido a la elevada pendiente de las cuencas. Además, el agua de escorrentía sólo circula sobre mármoles en un espacio reducido, porque la anchura del afloramiento carbonático es pequeña (2 km).

Desde el punto de vista hidroquímico, no se han detectado procesos de mezcla importantes de las aguas procedentes de Sierra Alpujata con las almacenadas en el acuífero carbonático. Los contenidos en componentes químicos mayoritarios, como SiO_2 y Mg^{2+} , o trazas, como Cr y Ni, característicos de las aguas que drenan peridotitas, se presentan en las aguas subterráneas del sistema de Coín, en concentraciones similares a las detectadas en otras partes de la Unidad Blanca-Mijas.

Por consiguiente, la recarga de la escorrentía procedente de Sierra Alpujata en los mármoles del sistema de Coín se considera nula a efectos del balance hidrogeológico correspondiente al periodo 1990/91-1993/94. Las entradas o recursos hídricos de la Unidad Blanca-Mijas proceden, fundamentalmente, de la infiltración del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos de mármoles.

Recarga procedente de la lluvia

Esta componente del ciclo hidrológico incluye la alimentación o recarga que se produce en la Unidad Blanca-Mijas, calculada como la diferencia entre la precipitación y la suma de la evapotranspiración real más la escorrentía. Las entradas medias anuales a la Unidad, durante el periodo de investigación, ascienden a 47,2 hm³/año (Tabla 3.11), es decir el 43,4 % de la precipitación total caída sobre la misma (108,9 hm³/año).

	SIERRA BLANCA OCCIDENTAL						SEB		SIERRA MIJAS						S. BLANCA S. MIJAS			
	Istán		Marbella		Ojén		Coín		Alh. Grande		Mijas		Benalmádena		Torremolinos		S. MIJAS	
	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año	% P	hm ³ /año
PRECIPITACIÓN		11,6		17,2		9,8		25,3		10,3		5,0		4,8		24,9		108,9
EVAPOTRANSPIRACIÓN	47,4	5,5	53,5	9,2	57,2	5,6	45,0	11,4	49,5	5,1	58,4	2,9	62,6	3,0	54,1	13,5	51,6	56,2
ESCORRENTÍA	11,2	1,3	17,4	3,0	12,2	1,2		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0	5,0	5,5
RECURSOS	41,4	4,8	29,1	5,0	30,6	3,0	55,0	13,9	50,5	5,2	41,6	2,1	37,4	1,8	45,9	11,4	43,4	47,2
DESCARGA MANANTIALES		4,8		5,0		3,0		13,9		0,0		0,0		0,0		0,0		26,7
DESCARGA BOMBEO		0,0		0,0		0,0		3,0		5,7		2,5		2,5		20,3		34,0
DESCARGA-RECURSOS		0,0		0,0		0,0		3,0		0,5		0,4		0,7		8,9		13,5

Tabla 3.11. Resumen de las componentes del balance hidrogeológico realizado para la Unidad Blanca-Mijas y para cada uno de los sistemas diferenciados en ella.

En el sector occidental de Sierra Blanca los recursos medios anuales son de 12,8 hm³/año (33,1 % de la precipitación): 4,8 hm³/año (41,4 %) en el sistema de Istán, 5 hm³/año (29,1 %) en el de Marbella y 3 hm³/año (30,6 %) en el de Ojén. En el sector oriental de Sierra Blanca (sistema de Coín) las entradas medias anuales se cifran en 13,9 hm³/año (55 %). Y en Sierra Mijas los recursos son de 20,5 hm³/año (45,5 %): 5,2 hm³/año (50,5 %) en el sistema de Alhaurín el Grande, 2,1 hm³/año (41,6 %) en el de Mijas, 1,8 hm³/año (37,4 %) en el de Benalmádena y 11,4 hm³/año (45,9 %) en el de Torremolinos.

Si se comparan los volúmenes de entradas y salidas (Tabla 3.11) se deduce que ambos datos son iguales en los sistemas del sector occidental de Sierra Blanca porque no hay explotación por bombeos. En el sistema de Coín se extrae un caudal medio de 3 hm³/año superior a las entradas. Y, en Sierra Mijas, se bombean 10,5 hm³/año más que los recursos medios anuales.

La tasa de recarga varía según los sectores considerados de la Unidad. En el sector occidental de Sierra Blanca se obtienen los valores más bajos (entre el 29 y el 41 %),

aunque la pluviometría es mayor, porque está constituido por mármoles azules calizos que dan lugar a un abrupto relieve cuya pendiente media es superior al 50% y, además, presentan niveles de karstificación “colgados”.

En el sector oriental de Sierra Blanca, se registra la tasa de recarga más elevada (55%), porque afloran los mármoles blancos dolomíticos, generalmente muy fracturados y a veces con textura sacaroidea, que dan lugar a formas llanas en el relieve (llanos de Pula y Coín), con pendientes medias inferiores al 20 %.

En la Sierra de Mijas también afloran, fundamentalmente, mármoles blancos dolomíticos y la pendiente es inferior al 50% en la mayor parte de la misma; sin embargo, la tasa de recarga varía entre el 37,4 % de la precipitación (sistema de Benalmádena) y el 50,5 % (sistema de Alhaurín el Grande); precisamente en éste último la infiltración eficaz es mayor, a pesar de que la pendiente es más elevada, probablemente debido a que la ETR es menor, porque se encuentra en la umbría de la Sierra.

Se han efectuado correlaciones lineales entre los coeficientes de infiltración eficaz obtenidos y las variables altitud, distancia a Istán (longitud) y distancia al mar (latitud y efecto “continentalidad”), para ver la influencia de estas variables geográficas en la recarga de la Unidad. Los coeficientes de correlación no son significativos en ningún caso, lo cual indica que la recarga no está controlada por alguna de ellas en particular.

La correlación entre coeficientes de infiltración y altitud es de signo negativo, porque los sistemas de mayor altitud de recarga (los del sector occidental de Sierra Blanca) son aquellos en los que se ha detectado escorrentía superficial y la infiltración eficaz es menor, aunque la pluviometría es mayor en este sector. Sin embargo, la correlación con la distancia a Istán es positiva, al igual que con la distancia al mar y, con esta última, incluso más elevada. Todo ello pone de manifiesto que la recarga es mayor donde menos llueve porque afloran los mármoles blancos diaclasados y la pendiente del relieve es menor. Por tanto, en la Unidad de Blanca-Mijas, no se pueden aplicar gradientes como el propuesto por Cardenal (1993) en la Sierra de Lújar para calcular la infiltración eficaz en función de la altitud de recarga.

3.5. SIERRA GORDA DE LOJA

3.5.1. Elementos del balance

El balance de esta Unidad Hidrogeológica que se describe a continuación está tomado enteramente de López-Chicano (1992). Según este autor, el balance se ha planteado para el conjunto del macizo (subsistemas detríticos de los poljes y acuífero carbonático).

Las entradas proceden de la recarga de la lluvia y de la infiltración de aguas superficiales generadas en sectores externos a la unidad. Otros posibles mecanismos de recarga, como la condensación del vapor de agua en las cavidades y los aportes laterales de otros sistemas acuíferos localmente en contacto con el de Sierra Gorda, se consideran de poca importancia frente a los antes citados.

Por lo que respecta a las salidas cabe señalar: extracciones en sondeos, descarga visible por manantiales y descarga oculta a otros sistemas hidrogeológicos o al río Genil. La escorrentía superficial se considera despreciable en el balance.

Para un intervalo de tiempo de varios años, como es este caso, y dado que las explotaciones en Sierra Gorda no afectan a las reservas, se considera nula la variación de la reserva, por lo que en el balance las entradas deben igualarse a las salidas.

La recarga a partir del agua de lluvia constituye la principal alimentación del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda, muy por encima de cualquier otra fuente de recarga. La lluvia útil del sistema se estima en un valor total, medio anual, en torno a 149 hm^3 (López-Chicano, 1992). La mayor parte de este volumen anual ($133 \text{ hm}^3/\text{año}$) corresponde al macizo carbonático de Sierra Gorda *s. str.* y el resto a los acuíferos detríticos aluviales de los poljes de Zafarraya, de la Dona y de Pilas Dedil.

Supuesta nula la escorrentía superficial sobre los materiales carbonáticos y que la que se genera en los poljes termina infiltrándose en el sistema, toda la lluvia útil se puede considerar como recarga en el mismo. De forma intuitiva, el valor de la infiltración de la lluvia debe ser alto, dada la desnudez que muestran los afloramientos kársticos, la abundancia de formas exkársticas de absorción y la escasa pendiente del terreno en buena parte del área estudiada.

La lluvia útil se ha estimado a partir del método de Thornthwaite (1948), para un período de 30 años hidrogeológicos (1956/57-1985/86), considerando un valor de la reserva de agua utilizable por las plantas de 25 mm para los materiales carbonáticos, de 50 mm para los materiales detríticos del polje de Zafarraya, y de 100 mm para los poljes de la Dona y Pilas Dedil (el relleno detrítico en estos casos es más arcilloso que en Zafarraya). En la práctica, este método es el que suele dar mejores resultados en las condiciones climáticas (templadas subhúmedas) de los macizos calizos del sector occidental de Andalucía, aplicando una capacidad de campo baja para los materiales carbonáticos, de acuerdo con la escasa extensión de la cubierta edáfica y vegetal de los macizos.

Sin embargo, la existencia de áreas abruptas, extensas superficies con una cubierta edáfica poco desarrollada o nula, y escasa superficie cultivada, son elementos poco favorables en la aplicación de las fórmulas empíricas disponibles para el cálculo de la evapotranspiración, de cara a la realización de un balance hidrometeorológico, por lo que las cifras obtenidas deben ser tomadas con las debidas precauciones. No obstante, los métodos empíricos utilizados por otros autores (Delgado Moya *et al.*, 1974; Hidalgo, 1974) para la estimación de la recarga pluviométrica en Sierra Gorda (el método de Turc, por ejemplo), han caído en desuso progresivamente, ya que infravaloran en exceso la recarga pluviométrica. Tampoco parece correcto utilizar una capacidad de campo mayor para los terrenos calizos con vistas al ajuste del balance, ya que ello puede hacer infravalorar una probable descarga oculta del sistema.

Es necesario hacer una salvedad a los valores medios de lluvia útil obtenidos, de gran importancia a la hora de compararla con los datos disponibles sobre extracciones y descarga por manantiales. En la segunda mitad del periodo 1956/57-1985/86 se han registrado precipitaciones anuales medias hasta un 10% más bajas que del periodo de 30 años (López Chicano, 1992). Los datos sobre la descarga de manantiales y de cursos superficiales corresponden esencialmente a esta segunda mitad, por lo que he considerado conveniente utilizar un valor corregido de la recarga de la lluvia, del orden de 134 hm³/año: 120 hm³ corresponden a la recarga en los materiales carbonáticos, mientras que unos 14 hm³ sería la recarga pluviométrica de los materiales detríticos.

No se tienen en cuenta las posibles, aunque no probables, aportaciones laterales a Sierra Gorda procedentes de las unidades carbonatadas alpujárrides. No hay ningún indicio de que éstas sean de una importancia tal que obligue a considerarlas.

Respecto a la recarga por infiltración de aguas superficiales procedentes del exterior del sistema hidrogeológico, una parte de la misma se produce en los acuíferos detríticos de los poljes, actuando éstos de filtro, y otra parte accede directamente al acuífero carbonático de Sierra Gorda. Los aforos diferenciales llevados a cabo en el arroyo de la Madre (principal curso perdedor hacia el sistema) indican que la mayor parte de la recarga sigue la primera modalidad, si bien el detrítico actúa como un mero conductor del agua, cuyo destino final es principalmente el acuífero carbonático subyacente.

En general, la recarga de aguas superficiales procedentes del exterior del sistema, especialmente del arroyo de la Madre, se estima en unos 5 hm³ /año; sólo una pequeña parte de estos recursos, difícil de evaluar, accede a los sumideros localizados sobre los materiales carbonáticos. El valor obtenido es un dato intermedio entre los calculados previamente por otros autores.

Para la determinación del volumen de agua extraído por bombeo (bombeos netos) se han considerado los datos del inventario de puntos de agua, así como la estimación de la demanda actual para riego (a partir de dotaciones reales sin retornos). En la totalidad del sistema hidrogeológico se bombean, aproximadamente, unos 8 hm³/año, correspondiendo unos 3,6 hm³ /año a las extracciones netas realizadas en los pozos excavados en materiales detríticos, y unos 4,8 hm³/año a los bombeos netos realizados sobre el acuífero carbonático, destinados al regadío en los poljes y el abastecimiento de los núcleos del polje de Zafarraya y de Periana (López Chicano, 1992). Es preciso señalar que estas cifras corresponden a datos relativamente recientes, por lo que su extrapolación al periodo considerado daría valores algo diferentes.

La evaluación de las salidas por manantiales es difícil, sobre todo si se tiene en cuenta que los datos de caudal disponibles no son muy continuos y que no se han controlado todas las sugerencias por igual. La mayor parte de los datos corresponde al período 1974/75-1988/89 facilitados por el IGME, pero existen otros datos de la CAG (para

el periodo 1968/69-1971/72) que también se han considerado, así como los datos de aforos en el río Frío.

La descarga más importante por surgencias se realiza hacia el río Genil y sus principales afluentes en el sector de Loja, donde se contabiliza un aporte medio anual de $110 \text{ hm}^3/\text{año}$ (sin tener en cuenta la descarga por el manantial del Frontil). Según los datos del IGME, y los del inventario, la descarga media por el Sur del macizo es de unos $8 \text{ hm}^3/\text{año}$; la práctica totalidad de estos recursos drena por el sector de Guaró. Por lo tanto, la descarga visible total, más real, corregidos los datos del IGME con las aportaciones a estaciones de aforos y los aforos realizados por la CAG en cursos superficiales, resulta ser de unos $118 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Sin tener en cuenta más términos que los reseñados anteriormente se observaría un claro desajuste en el balance hídrico, no justificándose totalmente las entradas al sistema. El valor residual resultante ($11 \text{ hm}^3/\text{año}$), que aún podría ser mayor si se considera que los bombeos no han permanecido constantes en el período establecido para el balance, hay que atribuirlo a la existencia de una descarga oculta hacia el río Genil, o bien a una falta de control de la descarga visible.

Esta descarga oculta -o no controlada- parece muy probable por varias razones, siempre según López Chicano (1992): hay varias surgencias junto al cauce del río Genil, algunas de las cuales presentan caudales superiores a 40 L/s , especialmente en lugares tan poco accesibles como las gargantas existentes en cauce del río a su paso por Loja (Infiernos Bajos y Altos de Loja); la aportación diferencial estimada entre la estación de aforos de Loja (E-45) y la estación de aforos -hoy en día desaparecida- de Iznájar (E-46), así como los aforos diferenciales, realizados con flotador, antes y después del área de influencia de la descarga de Sierra Gorda sobre el río, indican aportes cuantiosos al mismo que no se incluyen en la descarga visible; existe un gran desconocimiento sobre el valor de la descarga de muchas de las surgencias incorporadas a la red de abastecimiento de Loja, es frecuente que no se disponga de datos de caudales de éstas en periodos de recarga pluviométrica intensa.

En contra de esta hipótesis se tienen los aforos diferenciales realizados con micromolinete por López-Chicano (1992), los cuales no demostraron la existencia de esa aportación oculta.

Otra posibilidad que se puede señalar para explicar el desajuste es la existencia de aportes laterales ocultos hacia otros sistemas hidrogeológicos. En este sentido, varios autores han utilizado este argumento para explicar las importantes aportaciones medias que muestra el manantial del Frontil, situado al pie del Hacho de Loja, en la margen derecha del río Genil. Los resultados que obtenidos por López Chicano (1992), tanto hidrológicos como hidroquímicos, no permiten desmentir categóricamente la hipotética conexión hídrica de Sierra Gorda con el Hacho de Loja, aunque tampoco la favorecen. No obstante, si se atiende al buen sentido hidrogeológico, el nivel de descarga impuesto por el río Genil para ambos acuíferos, hace muy difícil dicha conexión.

Las diferencias con otras valoraciones del balance realizadas anteriormente hay que buscarlas, por tanto, en: la no coincidencia en los métodos de estimación de la lluvia útil o diferencias en la estimación de la superficie de recarga, la falta de registro continuo del caudal de los manantiales o la no valoración de la descarga de determinadas surgencias importantes (río Genazal, por ejemplo), el uso de periodos más cortos, etc.

3.5.2. Tasa de recarga o coeficiente de infiltración eficaz

En la tabla 3.12 se exponen los resultados obtenidos por López Chicano (1992) sobre la estimación de la recarga pluviométrica, según distintas metodologías.

El dato más dispar, respecto al valor de referencia obtenido por la descarga visible por manantiales, es el que suministra el método del balance de los cloruros, no pudiendo ser admitido ni tan siquiera como aproximado. Una información complementaria se desprende de esta falta de inaplicabilidad debido a la existencia de aportes de cloruros desde la franja saturada del acuífero, tal como se deduce de las características hidroquímicas de las aguas subterráneas.

<u>Método</u>	<u>Recarga (% respecto a la lluvia)</u>
Thornthwaite	54%
Coutagne	30%
Turc	28%
Kessler	58%
Balance de cloruros	18%
Descarga por manantiales (+ bombeos)	46-49%

Tabla 3.12. Tasa de recarga obtenida mediante diferentes métodos en la Unidad Hidrogeológica de Sierra Gorda.

Los valores obtenidos mediante la aplicación de los métodos empíricos de Coutagne (1954) y Turc (1955) infravaloran, también, la recarga pluviométrica, no pudiendo ser aplicados en las condiciones climáticas que muestra Sierra Gorda, al igual que ocurre en numerosas áreas de estas latitudes.

Los métodos empíricos de Thornthwaite (1948) y Kessler (1965) sobreestiman la recarga pluviométrica. De ser aplicables estas metodologías, habría que admitir la existencia de un drenaje oculto o no controlado en Sierra Gorda.

La tasa media de recarga en el acuífero kárstico de Sierra Gorda, de acuerdo con los datos obtenidos por López-Chicano (1992), es del orden del 50 %.

3.6. SIERRAS DE CABRA Y RUTE-HORCONERA

Este balance hidrogeológico se basa en los datos procedentes del Atlas Hidrogeológico de Andalucía (ITGE, 1998).

Las salidas de esta Unidad Hidrogeológica corresponden, sobre todo, a surgencias que presentan variaciones de caudal relativamente importantes a lo largo del año y que muestran una marcada estacionalidad relacionada con la distribución de las precipitaciones. La suma de todos los caudales medios de descarga de estos manantiales es de 67,4 hm³/año. Otras salidas de la Unidad, que se cifran aproximadamente en unos 4 hm³/año, corresponden a descargas hacia formaciones aluviales adyacentes.

Las entradas al sistema corresponden exclusivamente a la partida infiltrada de la precipitación caída sobre la superficie del acuífero. Estas entradas son de 72,5 hm³/año que corresponden a una tasa de recarga del 45%.

Sin tener en cuenta más términos que los reseñados anteriormente se observaría un claro ajuste en el balance hídrico, por lo que el valor residual (1 hm³/año), habría que atribuirlo a las extracciones por bombeo que tienen lugar en el sector de Cabra .

3.7. SIERRA DE CAZORLA

3.7.1. Subunidad de Beas de Segura

Para estimar las entradas a esta subunidad, Rubio Campos *et al.* (2001) han utilizado una tasa de recarga obtenida en el acuífero próximo de Sierra Seca (IGME-Universidad de Granada, 1990), único dato con cierta fiabilidad en este entorno, que corresponde a un acuífero de similares características. En dicho acuífero se ha estimado una tasa de recarga del 33%, obtenida de la correlación de las salidas registradas durante el período 1996-97 con la lluvia media del período 1960 a 1995 (IGME-DGOH, 2001). Este apartado se ha elaborado a partir de las referencias anteriores.

En el sector de Beas de Segura el acuífero está formado por un conjunto de afloramientos dolomíticos limitados por materiales de baja permeabilidad a través de los cuales no cabe esperar que se produzca una transferencia hídrica de importancia con otras formaciones acuíferas. En este sentido, los elementos que integran el balance de la subunidad de Beas corresponden a la alimentación por infiltración de la precipitación y escorrentía y a unas salidas naturales por manantiales y bombeos en las perforaciones.

La evaluación de la recarga procedente de la lluvia se ha hecho partiendo de una precipitación media anual de 900 mm. Sobre una superficie de afloramientos permeables de 54 km², y aplicando una tasa de recarga del 33%, resulta una recarga del orden de 16 hm³/año.

Para estimar las salidas del acuífero durante el año hidrológico 1996-97, se ha controlado el caudal del río Beas, y el manantial de Gútar, haciéndose una asignación alzada para las salidas del resto de los manantiales, en función del caudal asignado en la ficha de inventario. En el río Beas se ha aforado un caudal medio de 543 L/s. Este registro incluye el drenaje en la cabecera del río por los manantiales de la Subunidad de Cazorla, estimado en 90 L/s, por lo que el caudal medio drenado por el acuífero al cauce se evalúa en 453 L/s (14,3 hm³/año). En el manantial de Gútar el caudal medio aforado ha sido de

22,3 L/s (0,7 hm³/año). Otros manantiales (incluidos los captados para abastecimiento urbano) presentan un caudal estimado en 16 L/s (0,5 hm³/año). Las salidas totales para el año 1996-97 se estiman en 15,5 hm³/año.

La diferencia entre entradas y salidas, así estimadas, es de 0,5 hm³/a, que puede ser atribuible a la escasez e incertidumbre de los datos de partida (Campos *et al.*, 2001).

Por su parte, el sector de Las Villas aparece independizado del de Beas de Segura y de las Escamas del Tranco mediante límites impermeables, por lo que no debe existir transferencia hídrica con ellos. Sin embargo, sí que existe continuidad con el acuífero profundo carbonático de la Loma de Úbeda (que se extiende ampliamente por el borde norte de la Depresión del Guadalquivir) como parece ponerse de manifiesto con el análisis de los datos piezométricos existentes, los cuales permiten definir un sentido de flujo, desde el primero al segundo.

Descartada la alimentación lateral desde otros conjuntos permeables, los recursos del acuífero proceden de la infiltración de las precipitaciones. Teniendo en cuenta que la precipitación media anual es de 700 mm y que la superficie permeable es de 59 km², se obtiene un volumen medio anual de lluvia de 41,3 hm³. Aplicando la tasa de recarga del 33%, citada anteriormente, resulta una alimentación media de 13,6 hm³/año.

Las salidas controladas del acuífero se producen por manantiales de pequeño caudal (se estima un volumen total de 0,2 hm³/año) y por sondeos para el abastecimiento de Villanueva del Arzobispo (del orden de 0,6 hm³/año). Se desconoce la explotación de agua subterránea utilizada para riego aunque probablemente es superior a 1 hm³/año. El volumen total extraído es del orden de 1,6 hm³/año, como mínimo.

Existen, además, otras salidas no controladas hacia el cauce del río Guadalquivir, donde se localizan los mínimos niveles piezométricos, y posiblemente hacia el acuífero profundo de la Loma de Úbeda. La asignación de los recursos que se dirigen hacia una y otra parte, podía determinarse si se conociese la posición de la divisoria hidrogeológica que debe existir entre ambas. Desgraciadamente no existen sondeos en esta zona de acuífero

para poder establecer la situación de la divisoria. No obstante hay que hacer constar que en el tramo del río Guadalquivir que atraviesa el acuífero, se observa una importante ganancia de caudal cuando las compuertas del embalse del Tranco se encuentran cerradas.

La diferencia entre las entradas y las salidas controladas arroja un superávit de hasta 11,8 hm³/a, que deben estar siendo drenados hacia el cauce del río Guadalquivir y posiblemente hacia el acuífero profundo de la Loma de Úbeda.

3.7.2. Subunidad de Cazorla

El drenaje de la subunidad se produce principalmente hacia el Oeste a través de los ríos Guadalquivir, Aguascebas, Beas, Cazorla y Quesada IGME-Universidad de Granada (1990). Hacia el Este las salidas son menos significativas, siendo las de mayor interés el Arroyo del Membrillo y los ríos Hornos (Sur y Norte). Los recursos hídricos subterráneos medios anuales medidos en esta subunidad por medio de aforos directos en los cauces mencionados y en diferentes períodos son :

- Octubre-Noviembre 1989= 30 hm³/año
- Mayo 1990= 57 hm³/año.
- Octubre-Noviembre 1990= 32 hm³/año.
- Enero 1991= 55 hm³/año.
- MEDIA = 43,5 hm³/año.

Teniendo en cuenta que el área de recarga de la subunidad es algo inferior a 350 km² (300-330 km²), los caudales específicos medios obtenidos son:

- Octubre-Noviembre 1989= 3,2 – 2,9 L/s/km²
- Mayo 1990= 6,0 – 5,5 L/s/km²
- Octubre-Noviembre 1990= 3,4 – 3,1 L/s/km²
- Enero 1991= 5,8 – 5,3 L/s/km²
- MEDIA = 4,4 – 4,2 L/s/km²

A estas cifras hay que añadir una media de 100-150 L/s de caudal captado para abastecimiento: Manantiales de Béjar, Artesón, Cerrada de Villena, Río Cañamara, Aguascebas Chico y Fuente Pinilla, y los caudales bombeados en el Charco y La Majuela (30 L/s). Estos caudales suponen un incremento medio de 5.7 hm^3 en los recursos totales y de $0.6 - 0.5 \text{ L/s/km}^2$.

Las cifras anteriores parecen relativamente bajas si se tiene en cuenta que en otras unidades se obtienen valores medios de $7-8 \text{ L/s/km}^2$. Este déficit se acentúa al considerar la posible influencia del Embalse del Tranco, cuyo frente se apoya en niveles carbonáticos de la subunidad, en la recarga con aguas procedentes de las sierras de Segura y del Pozo. Para explicar esta aparente anomalía se puede suponer que una parte importante del agua de precipitación se transforma en escorrentía superficial debido a los bajos coeficientes de infiltración de las dolomías y calizas liásicas. Sin embargo, han de tenerse en cuenta otros procesos más complejos. Existen indicios de la realización de sondeos muy productivos en la zona de la campiña, es decir, sobre las margas del Mioceno Medio que descansan sobre los materiales Jurásicos. Una cuestión a dilucidar es si existe o no conexión hidráulica a través de las unidades de la Sierra de Cazorla, Beas de Segura y parte de la Depresión del Guadalquivir.

Por tanto, el control foronómico realizado en el marco de un estudio previo (IGME-Universidad de Granada, 1990) en los principales ríos que drenan la subunidad hidrogeológica de Cazorla permitieron obtener un caudal específico de 5 L/s/km^2 . Este valor es algo inferior al obtenido para otras unidades del Prebético (Sierra Seca), debido a la abundancia de dolomías respecto de las calizas, a la discontinuidad de los afloramientos, al fuerte buzamiento de las capas en el frente de las escamas y a la pronunciada pendiente topográfica.

3.8. SIERRA DE MARÍA

El balance hidrogeológico de este acuífero que se describe más adelante ha sido tomado de la Tesis de Licenciatura de Ildefonso Moreno Calvillo (Moreno, 1981; Moreno *et al.*, 1983) y de un informe realizado por el IGME para el IARA (IARA-IGME, 1988).

A partir de datos termopluviométricos de una serie de 23 años hidrológicos (1950/51-1973/74), se ha obtenido una precipitación media anual de 480 mm, equivalentes a 37 hm³/año y un valor medio anual para la temperatura de 9°C.

Con los datos antes citados se ha calculado la evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite (1948), para lo cual se ha considerado dividido el acuífero en tres franjas altimétricas (< 1400 m, 1440-1700 m y > 1700 m) en cada una de las cuales se ha estimado la precipitación y la temperatura. La ETP así obtenida queda comprendida entre 500 y 650 mm, con un valor medio de 600 mm (42 hm³/año). La evapotranspiración real ha sido estimada mediante los métodos de Thornthwaite (1948), Coutagne (1954) y Turc (1955), con los resultados siguientes:

- Thornthwaite: 320 mm = 22 hm³ = 66 % de la precipitación
- Coutagne: 370 mm = 25 hm³ = 77 % de la precipitación
- Turc: 375 mm = 26 hm³ = 78 % de la precipitación

Los métodos utilizados para calcular la ETR permiten obtener una aproximación al porcentaje infiltrado considerando nula la escorrentía superficial. En este caso se obtienen los siguientes valores de la tasa de recarga: 22% (Coutagne), 23% (Turc) y 34% (Thornthwaite). Para la estimación del porcentaje de lluvia que se infiltra y constituye la recarga al acuífero, Moreno (1981) aplicó también el método de Kessler a los datos históricos de precipitación y obtuvo una tasa de recarga del 48% de la precipitación, con valores extremos del 23% (1960/61) y 69 % (1968/69).

La mayor parte de la descarga del acuífero de Sierra María se produce por manantiales situados en el borde oriental del macizo, en el paraje denominado Fuente de Los Molinos, aunque hay algunos sondeos utilizados para abastecimiento de las poblaciones de Vélez-Blanco y María. También puede existir descarga del acuífero carbonático de Sierra María a través de los depósitos cuaternarios de piedemonte existentes, sobre todo, en su vertiente meridional.

La cuantificación de las salidas totales del sistema para los años hidrológicos 1978/79 y 1979/80 arroja unas cifras de 7-8 hm³ y 13-16 hm³, respectivamente. La lluvia útil calculada para el mismo periodo por el método de Kessler, sería de 12 y 24 hm³ (suponiendo que la recarga es equivalente a la lluvia útil). Ciertamente ambas cifras no coinciden por lo que podría pensarse que dicho método permite obtener valores por exceso, y/o que existen otras salidas ocultas no cuantificadas, y/o que existe una fracción de la precipitación que escurre superficialmente. Sin embargo, mediante el balance de Thornthwaite, en el año 1978/79 se obtiene una lluvia útil de 39-43 % más acorde con la cantidad estimada en las salidas.

En la Sierra de María se han llevado a cabo estimaciones más recientes de la tasa de recarga a partir del balance de cloruros. El valor medio de la concentración en cloruros del agua de lluvia es de 2,1 mg/L mientras que en el agua del manantial es de 7,8 mg/L, lo cual permite calcular un coeficiente de infiltración eficaz o tasa de recarga del 27 %.

Por tanto, a tenor de todos los datos expuestos anteriormente, el valor medio de la infiltración eficaz en la Sierra de María debe ser de la tercera parte de las precipitaciones (aproximadamente 33%).

**4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE VARIABLES QUE
INFLUYEN EN LA RECARGA. PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN
TIPOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS PARA
EL CÁLCULO DE LA RECARGA**

4.1. PRINCIPALES VARIABLES QUE INTEVIENEN EN LA RECARGA

Un repaso de la bibliografía comentada en los antecedentes de este volumen (Capítulo 1.2.) permite deducir que, en el estudio de la recarga de acuíferos carbonáticos como los de la Cordillera Bética, las variables más importantes pueden ser las siguientes:

- Climatología: precipitación
- Topografía: altitud y pendiente
- Litología: calizas, dolomías y sus equivalentes metamórficos
- Geomorfología: áreas de absorción (infiltración) preferencial
- Suelo

Las variables anteriores son las que se han considerado en el presente proyecto de investigación y, de cada una de las áreas piloto seleccionadas, se ha creado una base de datos en un Sistema de Información Geográfica que incluye mapas de dichas variables (ver Volumen II de este informe). Ello permite obtener parámetros climáticos, geológicos, geomorfológicos, topográficos y edafológicos de interés para llevar a cabo una clasificación tipológica de los acuíferos estudiados en función de la recarga. A continuación se explica el procedimiento y las fuentes de información utilizadas.

4.1.1. Mapa pluviométrico (isoyetas)

Los mapas pluviométricos representan la precipitación media mediante isoyetas cada 100 mm de precipitación.

Los mapas de precipitación media se han elaborado en varias etapas: entrada de datos en el SIG, creación de la topología y corrección de errores, asignación de atributos a las entidades espaciales.

La entrada de datos se ha realizado mediante la digitalización de los mapas de isoyetas en un tableta digitalizadora utilizando el programa Autocad 14. Las fuentes

utilizadas han sido varias. Para el sistema de Sierra de las Cabras se ha utilizado el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz (DPC, 1985). En la Sierra de Líbar el informe del IGME (1984). En la Sierra de las Nieves se ha realizado el mapa de isoyetas con motivo del presente informe. En las Sierras Blanca y Mijas el mapa de isoyetas elaborado por Andreo (1997) para el periodo 1963-1994. En la Sierra Gorda se ha utilizado el mapa de precipitación media elaborado por López Chicano (1992). En la Sierra María el mapa de (Moreno *et al.*, 1983). En la sierra de Cazorla el mapa de precipitación media del Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Jaén. Por último, el mapa de las sierras de Cabra y Rute-Horconera se ha elaborado en el marco del presente estudio.

La creación de la topología se ha realizado en Arcinfo 8.0.2. A través de la topología se crea la estructura arco-nodo de las entidades espaciales, lo cual permite detectar errores de digitalización que introducirían errores en la posterior asignación de atributos a los polígonos elaborados. La asignación de atributos se ha realizado en el programa Arcview 32 de forma interactiva, es decir, se selecciona la entidad espacial y se le asigna un valor temático, en este caso un valor numérico que expresa la precipitación media para un área entre dos isoyetas mediante la siguiente fórmula [1] en la que S_i es el área entre dos isoyetas y P_i la precipitación media:

$$\text{Precipitación media} = \frac{S_1 \cdot P_1 + S_2 \cdot P_2 + \dots + S_n \cdot P_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad [1]$$

4.1.2. Mapas topográficos

Mapa hipsométrico

Para elaborar el mapa hipsométrico se ha utilizado como fuente el modelo digital de elevaciones (DEM) del Instituto de Cartografía de Andalucía (1999), el cual presenta coordenadas UTM (huso 30) a través de ficheros en formato GRID¹ con una malla de 100 m de lado.

¹ GRID es una malla regular de celdas o pixels (unidad mínima indivisible).

El modelo utiliza como fuentes los datos empleados en el mapa digital de Andalucía del Instituto de Cartografía de Andalucía a partir de la cartografía 1/10.000, del cual se han tomado las curvas de nivel con equidistancia de 100 m, la red hidrográfica, las superficies de agua (embalses y lagos) y los límites autonómicos. Por otro lado, se han considerado los vértices de la Red Geodésica Nacional pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional. Además, ha sido necesario insertar datos altimétricos en las zonas próximas a la costa en forma de puntos acotados obtenidos a partir de la cartografía 1/10.000.

El algoritmo empleado para generar el modelo ha sido el de interpolación de Elementos Finitos, procedimiento diseñado para tomar las ventajas computacionales de una interpolación local sin perder la continuidad de una superficie obtenida por interpolación global. Este método permite incluir los datos procedentes de la traza de los ríos para obtener modelos de mayor precisión, además de ser hidrológicamente correctos. También permite controlar la suavidad de la superficie mediante una serie de tolerancias que hacen referencia al error altimétrico y planimétrico de los datos de entrada. El error cuadrático final de la superficie es 23'21 m, obtenido sobre una muestra de 46.966 puntos procedentes de la cartografía 1/10.000 y no incluidos en el modelo. El resultado del modelo es una cuadrícula de 1 ha de superficie en la que cada píxel tiene un valor medio de altitud. El mapa hipsométrico final muestra zonas² de igual valor temático, en este caso intervalos de altitud cada 100 m, desde el intervalo ≤ 100 hasta el intervalo (2000 – 2100].

Para realizar el mapa hipsométrico se han agrupado los píxels del modelo digital de elevaciones mediante consultas realizadas con operadores lógicos (AND) y aritméticos a la base de datos temáticos. La agrupación final de celdas o píxels según los intervalos de altitud establecidos es una operación de análisis espacial realizada a través del comando DISSOLVE del programa Arcinfo previa conversión de los archivos a un formato con estructura topológica de arco-nodo del programa Arcinfo 8.0.2. Este comando elimina los bordes de polígonos contiguos con igual valor temático (Fig 4.1).

² Zona se denomina a cada agrupación de píxels con igual valor temático y sin necesidad de ser contiguos

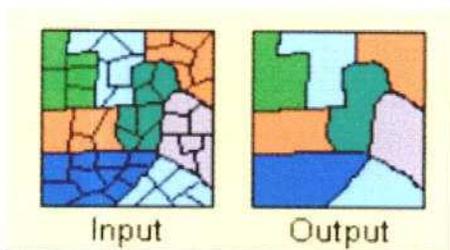


Fig. 4.1. Esquema de procesamiento del comando DISSOLVE de Arcinfo.

Mapa de pendientes

El mapa de pendientes muestra una representación de los intervalos de desnivel del terreno recogidos en la tabla 4.1:

Intervalo de pendiente	Tipo de desnivel
≤ 3	Plano
(3 – 8]	Casi plano
(8 – 16]	Ondulado
(16 – 21]	Inclinado
(21 – 31]	Muy inclinado
(31 – 46]	Escarpado
(46 – 76]	Muy escarpado
(76 – 100]	Extremadamente escarpado
≥ 100	Vertical

Tabla 4.1. Intervalos de pendiente.

El mapa de pendientes se ha obtenido a partir del modelo digital del terreno (MDT). El MDT procede de la transformación del modelo digital de elevaciones del Instituto de Cartografía de Andalucía (1999), en formato GRID, a una red irregular de triángulos (TIN³, Triangle Irregular Network). Además de la pendiente, este proceso permite obtener la orientación y el área real⁴. Cada uno de los triángulos representa una unidad homogénea de terreno en función de la escala de entrada de datos y de la resolución adoptada en la elaboración del modelo digital de elevaciones.

³ TIN es un método de optimización para conectar una distribución irregular de puntos o líneas mediante triángulos lo más equiláteros posible.

⁴ Tiene en cuenta la elevación del terreno o coordenada Z, mientras que el área calculada en un plano es la proyección de ese espacio en un sistema de coordenadas de dos dimensiones (X e Y).

La agrupación de triángulos según los intervalos de pendiente establecidos se ha realizado a través de consultas a la base de datos utilizando operadores lógicos y aritméticos. Una vez que se han individualizado los triángulos dentro del mismo intervalo se ha utilizado el comando DISSOLVE del programa Arcinfo, por el cual se eliminan las líneas de los polígonos contiguos con igual valor temático (Fig 4.1).

4.1.3. Mapa litológico

Los mapas litológicos se han realizado agrupando litologías con características hidrogeológicas afines. Para llevar a cabo las agrupaciones litológicas se han realizado cuatro etapas: entrada de datos, creación de la topología, realización de consultas a la base de datos, eliminación de fronteras entre polígonos.

La entrada de datos en el sistema ha consistido en la digitalización de los mapas geológicos en el programa Autocad 14. La fuente cartográfica utilizada ha sido, principalmente, el Mapa Geológico de España a escala 1/50.000 del IGME en los acuíferos de la Sierra de las Cabras, Líbar, Gorda y Cabra-Rute-Horconera. En el caso de acuíferos donde se disponía de información adicional, el criterio utilizado, para tener en cuenta una fuente u otra, ha sido la escala y fecha de la cartografía. En la Sierras Blanca y Mijas se ha utilizado la cartografía de Andreo y Sanz de Galdeano (1994) a escala 1/25.000. En el acuífero de la Sierra María el mapa de Andreo (1990) a escala 1/25.000. En el sistema de Nieves la cartografía de Martín Algarra (1987). Por último, en la Sierra Cazorla se ha utilizado el mapa a escala 1/100.000 del Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Jaén.

La topología se ha llevado a cabo de forma análoga a como se ha hecho en el mapa hipsométrico, utilizando Arcinfo 8.0.2. y Arcview 32. La realización de consultas de entidades espaciales, a la base de datos temáticos asociada, se ha hecho con el programa Arcview 32, utilizando operadores lógicos (AND), para individualizar las litologías con características similares desde el punto de vista hidrogeológico. A cada conjunto se le ha asignado un valor cualitativo para su posterior identificación y tratamiento. Finalmente, se han eliminado los límites de polígonos con iguales atributos temáticos a través del comando DISSOLVE.

4.1.4. Mapa de áreas de absorción preferencial

Las formas de absorción preferencial hacen referencia a las zonas favorables a la recarga en función de criterios geológicos y topográficos. Los criterios geológicos que se han tenido en cuenta para delimitar las zonas de absorción preferencial han sido la presencia de litologías permeables (materiales carbonatados) y la existencia de formas del modelado favorables a la infiltración. En cuanto a los criterios topográficos se ha tenido en cuenta la presencia de zonas de baja pendiente, inferior al 8%. La yuxtaposición de ambos tipos de criterios ha permitido diferenciar áreas donde la absorción de agua se realiza preferentemente. La delimitación de estas áreas se ha contrastado con los oportunos reconocimientos de campo.

Los mapas de formas de absorción preferencial se han elaborado a partir de la información de pendiente, litología y topografía. Las fuentes utilizadas han sido los mapas clinométricos, con los intervalos de pendientes establecidos en este informe, mapas litológicos (agrupaciones litológicas) y los mapas topográficos de España a escala 1/50.000. En Sierra de Líbar y Sierra de las Nieves se han utilizado mapas geomorfológicos.

Los mapas fuente se han superpuesto en Arcview 32 para digitalizar en pantalla con las herramientas de edición del programa. El procedimiento que se ha llevado a cabo consta de varias etapas. La primera, en la superposición visual de los mapas de referencia para la delimitación de las áreas de absorción preferencial. La segunda, en la edición de polígonos que delimitan dichas áreas. La tercera, en la creación de la base de datos en la que se definen las características de los campos donde se muestra el área y un valor cualitativo de la zona, en este caso una referencia toponímica. Y, la cuarta, en la asignación, de forma interactiva, de los atributos toponímicos a cada entidad espacial y obtención automática del área de cada polígono mediante fórmulas de cálculo derivadas de la forma del polígono.

4.1.5. Mapas de suelos

Se ha utilizado el mapa de suelos del Sistema de Información Ambiental de Andalucía (Sinamb-A) de 1997, elaborado a partir de la información disponible en el Instituto de Reforma Agraria de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía y en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Sevilla.

Para la clasificación y asociación de suelos se ha utilizado el criterio de la FAO-UNESCO (1984, 1985). Se han realizado 16 agrupaciones de las 65 unidades originales elaboradas por la Agencia de Medio Ambiente (AMA). El criterio utilizado ha sido el tipo de suelo dominante y se han eliminado las zonas que no son representativas a la escala de salida del mapa de suelos. Las agrupaciones realizadas son: fluvisoles, regosoles eútricos, regosoles calcáreos, litosoles, arenosoles albcos, vertisoles crómicos, solonchaks, xerosoles cálcicos, cambisoles eutricos y dístricos, cambisoles cálcicos y vérticos, luvisoles órticos, luvisoles cromicos, luvisoles cálcicos, planosoles, histosoles eútricos, regosoles dístricos. De estas 16 agrupaciones establecidas en el conjunto de la comunidad andaluza, sólo se han localizado 9 en los acuíferos considerados (Tabla 4.2).

El procedimiento para la elaboración de los mapas edafológicos ha sido similar al realizado para otras variables: georreferenciación del mapa de suelos de Andalucía, digitalización de la unidades edáficas en cada sistema acuífero, creación de la topología y corrección de errores, asignación de atributos a la base de datos temáticos.

El mapa de suelos de la comunidad andaluza se ha georreferenciado en Autocad 14. La georreferenciación ha consistido en escalar y posicionar la imagen *.tiff en la que está el mapa de suelos del Sinamb-A. Ambas herramientas se han utilizado sin una secuencia jerárquica, es decir, se han utilizado indistintamente conforme se mejoraba el resultado final. Para posicionar el mapa se ha utilizado como guía la coordenada X e Y del punto más meridional de la comunidad andaluza. Para escalar el mapa de suelos se ha utilizado como mapa de referencia el límite administrativo de la comunidad autónoma andaluza en coordenadas UTM (huso 30) utilizado por el mapa digital de Andalucía a escala 1/100.000.

Clasificación tipológica de acuíferos para el cálculo de la recarga

Tipo	Localización	Horizontes	Características
Fluvisoles	Suelos desarrollados sobre sedimentos aluviales recientes. Generalmente, ocupan los valles fluviales	Perfiles poco diferenciados de tipo AC	Son suelos profundos, fértiles, ricos en bases cambiables y normalmente dedicados a los cultivos en regadío
Regosoles eútricos	Suelos desarrollados sobre materiales no calcáreos, asociados a laderas de fuerte pendiente	Perfil tipo AC	son suelos poco profundos, salvo los desarrollados sobre sedimentos arenosos. Su fertilidad química es muy limitada y no tienen vocación agrícola
Regosoles calcáreos	Suelos desarrollados sobre materiales calcáreos, poco evolucionados. Normalmente desarrollados sobre laderas con fuertes pendientes	Perfil tipo AC	La profundidad es variable en función del sustrato geológico. Su dedicación puede ser tanto forestal como agrícola, de acuerdo con sus características particulares
Litosoles	Estos suelos se circunscriben a las zonas de montaña con afloramientos rocosos	Perfil tipo es AR	Suelos limitados en profundidad por roca dura y coherente. Presentan una profundidad muy escasa, apenas 10 cm
Vertisoles crómicos	Suelos desarrollados sobre materiales ricos en arcillas. Localmente se han denominado "Bujeos"		Presentan color oscuro, predominio de textura fina y bajo contenido en materia orgánica. Es característico de estos suelos el agrietamiento cuando se secan. Tradicionalmente estos suelos se han dedicado al cultivo en secano
Cambisoles eútricos y distrícos	Suelos desarrollados sobre materiales no calcáreos (pizarras, esquistos, areniscas silíceas...) en zonas de relieves más o menos accidentados	Perfil de tipo ABC	Son suelos desarrollados con una baja fertilidad química y, generalmente, poco profundos. Están dedicados en gran parte a la producción ganadera (dehesas) y a la producción corchera en algunas zonas
Cambisoles cálcicos y vérticos	Suelos desarrollados sobre materiales calcáreos. Generalmente, se desarrollan sobre relieve ondulado-colinado. Es el suelo típico de la campiña andaluza	Perfil tipo es ABC	Suelos muy afectados por la erosión dada su tradicional dedicación a los cultivos
Luisoles crómicos	Suelos desarrollados sobre materiales no calcáreos o descarbonatados	Perfil tipo es ABtC.	Presentan en general colores rojos, textura arcillosa y profundidad moderada
Luisoles cálcicos	Suelos desarrollados sobre materiales calizos. Su perfil tipo es ABtC	Normalmente, tienen un horizonte de acumulación de carbonatos Bk o Ck.	Son suelos desarrollados sobre relieves planos o ligeramente ondulados que presentan buena profundidad. Tradicionalmente se ha dedicado al cultivo

Tabla 4.2. Tipos de suelos considerados.

Después de la georreferenciación del mapa fuente se han digitalizado en pantalla las unidades edáficas de los distintos acuíferos, con el programa Autocad 14. Las herramientas utilizadas han sido las de edición de polilíneas.

La creación de la topología se ha realizado con la opción CLEAN de Arcinfo 8.0.2. Mediante esta herramienta se crea la estructura de arco-nodo que permite la identificación de errores en la digitalización para su posterior corrección.

La asignación de atributos temáticos a las entidades espaciales se ha realizado de forma interactiva en el programa Arcview 32. En primer lugar se definen las características de los campos de la base de datos temáticos, en este caso, los campos "área" y "tipo de suelo". Los valores del campo "tipo de suelo" se han introducido de forma interactiva, es decir, se ha seleccionado una entidad espacial (mediante herramientas de selección de entidades espaciales) y se le ha asignado un valor cualitativo en la base de datos temáticos. Los valores del campo "área" se han calculado de forma automática mediante fórmulas de cálculo de un área derivadas de la forma geométrica de un polígono.

4.2. CARTOGRAFÍA E INFORMACIÓN BÁSICA DE LAS VARIABLES EN LOS ACUÍFEROS PILOTO SELECCIONADOS

A partir de las fuentes y los procedimientos descritos en el apartado anterior se han elaborado los mapas de cada una de las variables antes citadas para cada uno de los acuíferos pilotos considerados en este proyecto: Sierra de las Cabras, Sierra de Líbar, Sierra de las Nieves, Sierras Blanca y Mijas, Sierra Gorda, Sierras de Cabra y Rute Horconera, Sierra de Cazorla y Sierra de María. En este apartado se resumen las características fundamentales de cada uno de dichos mapas recogidos en el anexo I del volumen II del presente informe.

4.2.1. Sierra de las Cabras

Las precipitaciones varían entre los 800 mm registrados en el sector oeste de las sierras y los 1100 mm en el sureste. La distribución de las precipitaciones es regular y se concentra principalmente entre los 800 y los 1000 mm registrados en el 85 % de la superficie de las sierras. La precipitación media obtenida por planimetría de isoyetas es de 960 mm.

La altitud de la sierra de Cabras varía entre los 100 m y los 700 m sobre el nivel del mar y un desnivel de 600 m. Es el sistema, de los ocho estudiados, con menor altitud máxima, no supera los 700 m. Las mayores alturas se localizan en el eje longitudinal de dirección E-W de la Sierra de Las Cabras. La mayor parte de la superficie, 55 %, está comprendida entre los 200 y 400 m de altitud.

La pendiente es muy elevada en el sector meridional de la sierra de las Cabras y disminuye hacia el Oeste. La estructura geológica influye considerablemente en la distribución de las pendientes. Así, se observa una disminución de la pendiente en el interior de la sierra asociados con las zonas más elevadas que se corresponden a la charnela de un anticlinal. En la Sierra del Valle la pendiente es inferior al 10 % de inclinación, excepto en las zonas de mayor altitud donde la pendiente aumenta hasta un 45 %. Se observa una distribución bastante equitativa de los distintos intervalos de

pendiente representados siendo los de menor importancia, en cuanto a superficie ocupada, las zonas con pendiente superior al 76 %.

La litología de la sierra es principalmente caliza. Un 80 % de la misma está formada por calizas jurásicas. Donde mayor representación tienen es en las sierras de las Cabras, Dos Hermanas y el Tempul, mientras que en la Sierra del Valle tiene especial importancia la presencia de materiales cuaternarios y terciarios. Las dolomías ocupan el 10 % de la superficie y se localizan en el eje longitudinal E-W de la Sierra de las Cabras y del Valle y en el sector noroccidental de la Sierra de Dos Hermanas.

Las áreas de absorción preferencial se localizan en la mitad occidental de la Sierra del Valle y en la Garganta que divide la Sierra de las Cabras. Ambas zonas equivalen al 7 % de la superficie de las sierras destacando la zona más occidental.

Los suelos del sistema de las Cabras tienen una fuerte componente calcárea en su composición. Los suelos son litosoles, cambisoles y regosoles calcáreos. Los litosoles representan el 26 % de la superficie y se localizan en la parte occidental y en el eje longitudinal de la Sierra de las Cabras. Los cambisoles son los suelos más representativos de estas sierras, se caracterizan por la presencia de horizontes A, B y C y se han localizado allí donde las condiciones topográficas permiten un desarrollo edáfico superior al de los litosoles, salvo en la Sierra de Dos Hermanas. En la Sierra de Dos Hermanas hay regosoles calcáreos, los cuales son suelos poco evolucionados, en comparación con los cambisoles y presentan horizontes del tipo A y C. Estos suelos son los que tienen menor representación espacial ya que ocupan el 6 % de la superficie de las sierras.

4.2.2. Sierra de Líbar

En los mapas de la Sierra de Líbar se muestran las cuencas de los arroyos Álamos y Gaduares debido a la influencia directa que tienen en la recarga del acuífero de Líbar, pero las referencias cuantitativas que se hacen más adelante se refieren estrictamente a la superficie de la Sierra de Líbar.

La precipitación media es de 1300 mm. Esta media es la más alta de los ocho sistemas acuíferos estudiados. En la mitad Sur las isoyetas son paralelas a las sierras del acuífero de Líbar, el gradiente es muy bajo y varían entre los 1300 y 1500 mm de precipitación. En cambio, en la mitad Norte, las isoyetas se disponen transversalmente a la sierra y varían entre un máximo de 1500 mm y un mínimo de 500 mm, presentando así un gradiente mayor que en la mitad Sur. Esta distribución de las isoyetas hace que la mayor parte de la superficie, 68 %, está comprendida entre 1200 y 1500 mm de precipitación.

El mapa hipsométrico de la Sierra de Líbar muestra, en general, un incremento de la altitud de Norte a Sur, desde los 400 hasta los 1400 m, lo que indica un desnivel relativo de 1000 m. Hay un predominio, en cuanto superficie ocupada (86 %), de altitudes comprendidas entre los 700 y los 1200 m. El 34 % está comprendido entre los 1000 y los 1200 m de altitud correspondiente a las sierras menores que bordean al polje de Líbar. Las menores altitudes, cotas inferiores a 700 m, se encuentran en el fondo de valle del arroyo de Montejaque. La curva hipsométrica de la Sierra de Líbar muestra una pendiente elevada excepto en el tramo central de la misma que corresponde al área de los poljes existentes.

La presencia de zonas con pendiente inferior al 16 % es muy destacada, debido a los poljes existentes. Las zonas de baja pendiente están asociadas a los poljes de Líbar, Zurraque, Pozuelo y Benaoján que equivalen al 48 % de la sierra. Las zonas de mayor pendiente se desarrollan en las zonas de mayor altitud que se corresponden con las sierras de Juan Diego, del Palo y de los Pinos, salvo en la cima plana de las mismas donde la pendiente no supera el 21 %.

Desde el punto de vista litológico, la Sierra de Líbar está formada en un 80 % por materiales carbonatados. Estos materiales carbonatados son calizas jurásicas que afloran en un 76 % de la sierra y el 4 % restante son dolomías localizadas en varios sectores meridionales. Las margocalizas afloran un 16 % de la superficie y su localización está asociada a la presencia de poljes, como son los de Líbar, Pozuelo y Zurraque. El polje de Benaoján está relleno por materiales cuaternarios. Al Norte de la sierra se ha localizado flysch calcáreo que representa el 1 % de la superficie considerada.

El mapa de áreas de absorción preferenciales de la Sierra de Líbar es, claramente, el más destacable en cuanto a la presencia de áreas de infiltración favorables si se compara con el resto de acuíferos. La importancia de los procesos de disolución se manifiestan en el elevado desarrollo de las formas kársticas, principalmente lapiazes, dolinas y poljes. Las áreas preferenciales de absorción son especialmente importantes en el 45 % de la superficie de la sierra

Los suelos de la Sierra de Líbar están muy poco desarrollados. En el sector central de la misma afloran litosoles, que representan un 42 % de la superficie. El resto, 58 %, está formado por cambisoles dispuestos en una orla bordeando a los litosoles.

4.2.3. Sierra de las Nieves

En este apartado se describen los mapas correspondientes a al sistema acuífero de la Sierra de las Nieves *sensu stricto*, que es el que finalmente se ha considerado para el desarrollo de este proyecto, sin tener en cuenta los otros acuíferos relacionados con el mismo: Yunquera y Prieta-Bonela-Alcaparaín.

El mapa de isoyetas de la Sierra de las Nieves refleja que las precipitaciones varían entre un valor mínimo de 800 mm en el sector noreste y los 1100 mm en el sector central de la sierra. La precipitación media obtenida por planimetría de isoyetas es de 1000 mm.

El mapa de altitudes muestra las mayores cotas altimétricas en el sector central de la sierra donde se localiza el pico más alto de la provincia de Málaga: el vértice Torrecilla, con 1918 m. A partir de esta cima las altitudes van descendiendo progresivamente hasta las cotas mínimas situadas en la parte oriental de la sierra a 398 m de altitud. El desnivel relativo es de 1528 m. El 45 % de la superficie de la sierra está comprendido entre 900 y 1200 m de altitud y se corresponde, en gran parte, con la mitad oeste de la misma.

En el mapa de pendientes se pueden establecer dos sectores. Así, en el sector oriental predominan las pendientes superiores al 45 %, mientras que en la mitad occidental predominan las pendientes bajas (en torno al 10 %) correspondientes a los

llanos de la Nava. Dentro del sector de bajas pendientes se localiza un área, donde la pendiente es inferior al 10 %, relacionado con el área del puerto de los Pilonos. Las pendientes inferiores al 16 % se encuentran en un 37 % de la superficie, mientras que las pendientes entre un 21 y un 76 % representan el 49 %.

La litología de la Sierra de la Nieves está formada en un 96 % de su superficie por rocas carbonatadas, entre las cuales predominan las sedimentarias en un 83 % de la misma. Las rocas carbonatadas sedimentarias (calizas, dolomías y brecha de la Nava) afloran a lo largo de toda la sierra excepto en el borde sur, donde existen mármoles dolomíticos que representan un 12 % de la superficie. En la mitad oeste, las rocas carbonatadas sedimentarias se disponen en bandas de dirección NE-SW con el siguiente orden de Norte a Sur: dolomías, calizas y brecha de la Nava. En cambio, en la mitad oriental de la sierra las calizas afloran en torno a la cima del Torrecilla y de forma irregular las dolomías. En la parte norte de este sector aflora también la brecha de la Nava. Otros materiales presentes son esquistos en la parte más oriental y arcillas del flysch (al norte) que equivalen a un 2'5 % de la superficie.

Las áreas de absorción preferencial están muy desarrolladas en comparación con otros acuíferos, siendo especialmente abundantes en el 12 % de la superficie total. Estas áreas están localizadas en los llanos de la Nava (pseudopolje) y en el puerto de los Pilonos, zonas de baja pendiente donde se han localizado numerosas formas kársticas como dolinas y simas.

Los suelos de la sierra de las Nieves son principalmente litosoles, los cuales están presentes en un 66 % de la superficie, principalmente en la parte central. Las áreas que marcan los límites de la sierra están formadas por luvisoles crómicos, 16 % de la superficie, directamente relacionados con la presencia de mármoles dolomíticos. Los cambisoles se localizan en los bordes oriental, septentrional y occidental, 18 % de la superficie, distinguiéndose entre cambisoles cálcicos en el Norte y eútricos en el Este y Oeste.

4.2.4. Sierras Blanca y Mijas

La precipitación media en las Sierras Blanca y Mijas es de 710 mm. La variabilidad pluviométrica no llega a alcanzar los 400 mm. Las precipitaciones más elevadas, en torno a los 900 mm, se localizan en los sectores más elevados de Sierra Blanca y disminuyen progresivamente hacia la parte oriental de la Sierra Mijas hasta bajar de los 600 mm. En dos tercios de la zona, la precipitación está comprendida entre los 600 y los 800 mm.

El mapa hipsométrico muestra las mayores alturas en la sector occidental de cada sierra donde se alcanzan los 1200 m (Sierra Blanca) y 1100 m (Sierra de Mijas), respectivamente. Estas alturas disminuyen progresivamente hacia el Este hasta alcanzar los 200 y 100 m en Blanca y Mijas respectivamente. En ambos relieves el desnivel relativo es de 1000 m aproximadamente. La mayor proporción de superficie se sitúa entre los 300 y 600 m, alrededor del 50 % de la superficie de los dos macizos está comprendido entre dichas cotas. El gráfico de distribución de altitudes muestra un rápido ascenso hasta los 300 m cota, a partir de la cual la altitud asciende hasta superar los 1000 m.

Las pendientes son muy pronunciadas principalmente en el sector occidental de ambas sierras. El 75 % de la superficie de la sierras tiene una pendiente superior al 30%. Al igual que las altitudes, la pendiente muestra una disminución desde el Oeste hacia el Este. Esta disminución de la pendiente se observa claramente en la Sierra Blanca donde gran parte del sector oriental tiene un desnivel inferior al 10 %. En la Sierra de Mijas la disminución de la pendiente no es tan clara, pero se observa un menor porcentaje de la pendiente en la zona de Alhaurín de la Torre, Torremolinos y en el interior del acuífero de Torremolinos asociadas con la presencia de canteras y cimas planas.

Desde el punto de vista litológico, las sierras están formadas, en un 97 % por mármoles triásicos. Los mármoles están diferenciados en dos conjuntos en función de su composición mineralógica, así en un 49 % de la sierra hay mármoles calizos y en un 48 % mármoles dolomíticos. En la sierra Blanca se observa un predominio de mármoles calizos en el sector occidental, lo cual a su vez, está asociado con las zonas de mayor pendiente y mayor altitud, mientras que hacia el Este, Llanos de Coín, predominan los

mármoles dolomíticos. En la Sierra de Mijas los mármoles dolomíticos están indistintamente en zonas de alta y baja pendiente, mientras que los calizos sí están localizados principalmente en áreas de fuerte pendiente. Los materiales metapelíticos representan un 0'8 % de la superficie de las sierras y corresponden a intercalaciones dentro de los mármoles calizos. Los depósitos cuaternarios está asociados a conos de deyección de los numerosos arroyos y, principalmente, a fondos de valle en la sierra Blanca.

Las, principales, áreas de absorción se han localizado en los Llanos de Pula, Juanar y Coín, todos ellos en la Sierra de Blanca, mientras que en la Sierra de Mijas no se han localizado zonas de absorción preferencial. Estas zonas de infiltración preferencial representan el 7 % de la superficie de las sierras y están localizadas sobre mármoles dolomíticos donde la pendiente no supera el 8 %.

Desde el punto de vista edafológico, ambas sierras se caracterizan por el escaso desarrollo del suelo que raramente supera los 10 cm de espesor allí donde está presente. Estos suelos son, principalmente, litosoles desarrollados sobre los mármoles. Los litosoles ocupan el 64 % de la superficie y se localizan en el interior de ambas sierras donde, a su vez, están las mayores alturas y pendientes. El resto de suelos presentan horizontes ricos en arcillas salvo en los bordes de las sierras donde hay cambisoles.

4.2.5. Sierra Gorda de Loja

La precipitación media es de 860 mm. Los mayores valores de precipitación se han registrado en el centro de la sierra donde se encuentran las zonas de mayor altitud. En más de un 80 % de la sierra la precipitación es superior a 800 mm, destacando las zonas donde llueve más 900 mm que representan un 50 % del total. En el sector meridional la precipitación varía entre los 800 y 1000 mm.

El desnivel de la sierra es de 1200 m, resultado de la diferencia de su cota mínima (500 m) y su cota máxima (1700 m). El mapa de altitudes de Sierra Gorda muestra la importancia de las cotas superiores a los 900 m. La superficie existente entre 900 m y 1400 m de altitud equivale al 75 % del total. Se pueden diferenciar dos

sectores: uno en el centro de la sierra donde se dan las mayores altitudes, cotas por encima de los 1000 m, y, otro, una orla alrededor del anterior, con cotas entre los 800 m y 1000 m en el que se incluye el polje de Zafarraya. Las cotas más bajas se localizan en la parte norte de la sierra y están comprendidas entre los 500 y 700 m.

El mapa de pendientes muestra valores bajos en los sectores central y meridional, en relación con las cimas planas y el polje de Zafarraya. La importancia de las pendientes bajas se observa en el gráfico de porcentajes de pendientes: la mayor parte del área presenta una pendiente inferior al 16 %, concretamente, el 58 % de la superficie; el resto tiene pendientes entre el 16 y 76 %.

La litología de Sierra Gorda está constituida en un 86 % por calizas y dolomías. Las calizas jurásicas afloran en un 76 % de la superficie, en la parte central y septentrional de la sierra, mientras que las dolomías, 10 %, se localizan, principalmente, en el sector meridional correspondiente a Sierra de Alhama. En Sierra Gorda destacan, por el porcentaje de superficie que ocupan en relación al resto de acuíferos estudiados, los materiales aluviales asociados al polje de Zafarraya, concretamente un 9 % del total.

Las áreas de infiltración o absorción preferencial están en el sector central, de elevada altitud y baja pendiente, en el polje de Zafarraya al sur y, al este, con zonas de baja pendiente y presencia de materiales cuaternarios existentes en otros poljes. En el sector central se han localizado numerosas dolinas mientras que al Sur y Este es la presencia de poljes lo que determina que éstas zonas sean áreas de absorción preferencial. En conjunto suman una superficie de 96 km² que equivale al 30 % de la superficie total.

Los suelos son principalmente litosoles, es decir, suelos con muy poco desarrollo, localizados sobre las calizas y dolomías jurásicas. Estos suelos se encuentran en un 81 % de la superficie. El resto está formado por regosoles, cambisoles y fluvisoles con una fuerte componente calcárea debido al sustrato carbonatado sobre el que se asientan. Los fluvisoles, existentes en el polje de Zafarraya, son suelos potentes y fértiles dedicados a los cultivos de regadío. Los cambisoles están muy extendidos por la Sierra de Alhama y ocupan un 13 % de la superficie.

4.2.6. Sierras de Cabra y Rute-Horconera

La precipitación media es de 805 mm. La distribución de las isoyetas marca una mayor pluviometría en la Sierra de Cabra, donde se alcanzan los 1000 mm de precipitación, que en la Sierra de Rute-Horconera, donde los valores varían entre 600 y 700 mm. También se observa un mayor gradiente en las isoyetas en la Sierra de Cabra respecto a Rute-Horconera.

El mapa hipsométrico muestra las mayores altitudes de ambas sierras en sus sectores centrales. El desnivel relativo es de 1100 m y las alturas descienden, desde 1567 m hasta 476 m, de forma centrífuga desde el centro hacia los bordes de las sierras. El 75 % de la superficie se sitúa entre los 700 y los 1100 m y el 90 % entre los 600 y los 1200 m. En términos generales, se observa que la altitud de la Sierra de Cabra es mayor que la de Rute en la medida que predomina el intervalo entre 800 y 900 sobre el intervalo 700 – 800 m (de mayor presencia en la Sierra de Rute-Horconera).

En general, las pendientes dominantes son bajas y medias, mientras que las pendientes elevadas (superiores al 76 %) tienen muy escasa representación. El 40 % de la superficie tiene pendientes inferiores al 16 % y un 55 % de la superficie entre 16 y 76% de pendiente. Las pendientes de la sierra de Cabra son inferiores a las de Rute-Horconera en la mayor parte de la superficie. Se observan zonas de baja pendiente en el sector central de la Sierra de Cabra, mientras que en la Sierra Rute-Horconera las zonas de baja pendiente se localizan en los extremos Norte y Sur y las mayores pendientes en el centro y Oeste.

La litología de las sierras está formada, en un 68 % de la superficie, por rocas carbonatadas, con mayor presencia en la Sierra de Cabra. Dentro de este grupo se puede diferenciar entre calizas, que corresponden a un 54 % de la superficie, y dolomías que equivalen al 14 % restante. En la Sierra de Rute-Horconera la presencia de rocas carbonatadas es inferior a la de Cabra debido a la mayor presencia de otros materiales como margas, margocalizas y arcillas localizadas principalmente en el sector norte de la sierra, lo cual está directamente relacionado con las bajas pendientes de esta zona.

Las áreas preferenciales de absorción son escasas, apenas representan el 2 % de la superficie. Se han localizado dos áreas de absorción especialmente importantes: una en el centro-oeste de la Sierra de Cabra y otra al norte de la Sierra de Rute-Horconera, ambas en zonas de baja pendiente.

Por último, con respecto a los suelos, se han diferenciado cambisoles, que afloran en el 74 % de las sierras, y, localmente, litosoles en zonas de fuerte pendiente y roca carbonatada y regosoles en la parte meridional de la Sierra de Rute-Horconera, los cuales representan el 8 % de la superficie total.

4.2.7. Sierra de Cazorla

El mapa de isoyetas muestra las menores precipitaciones (< 800 mm) en la mitad septentrional, mientras que las mayores precipitaciones se registran en la parte sur de la sierra (hasta 1000 mm). La precipitación media es de 740 mm y en el 70% de la sierra la precipitación está comprendida entre los 600 y 800 mm.

La Sierra de Cazorla tiene un desnivel relativo de 1600 m entre los 400 m de cota mínima y 2000 m de su máxima cota. Aproximadamente, dos tercios de la superficie de la sierra están entre 700 m y 1200 m de altitud, siendo la altitud media de 975 m. Las mayores alturas, superiores a los 1200 m, se alinean según los meridianos en la parte oriental. En el sector occidental la altimetría es menor, con cotas que no superan los 700 m.

Las pendientes son elevadas (>46 %) en los sectores sur, centro y este. Estas zonas de fuerte pendiente están muy relacionadas con las zonas de mayor altitud, mientras que el resto de la sierra tiene pendientes inferiores al 30 %. Los intervalos de pendiente entre 21 y 46 % son los que mayor superficie ocupan (40 % del territorio).

Desde el punto de vista litológico, la Sierra de Cazorla tiene una elevada presencia de dolomías y calizas (fundamentalmente dolomías), en concreto, el 83 % de la superficie de la sierra. La distribución de las rocas carbonatadas es muy homogénea en la mitad septentrional de la sierra, mientras que en la mitad meridional hay otras litologías (margocalizas, calcarenitas y arenas) que representan el 17 % de la superficie.

Un hecho destacable en la Sierra de Cazorla es la escasez de áreas de absorción preferencial. No se han localizado zonas formas exokársticas que favorezcan la infiltración y que presenten zonas con una topografía favorable (poca pendiente).

Los suelos son, principalmente, cambisoles cálcicos en un 97 % de la superficie. También se han localizado litosoles en el sector más septentrional, en un 6 % de la superficie; se trata de suelos muy poco evolucionados que están asociados a afloramientos rocosos. En áreas muy reducidas existen regosoles calcáreos y luvisoles cálcicos, aproximadamente 17 km², que equivalen a un 2 % de la superficie total.

4.2.8. Sierra de María

Las precipitaciones en la Sierra de María son escasas: el valor medio es de 480 mm. Las isoyetas que se han trazado varían entre un valor mínimo de 400 mmm y un valor máximo de 500 mm. La isoyeta de 500 m dibuja una orla alrededor de las principales cimas de la sierra: Maimón y María. El conjunto de la Sierra de María está bordeado por la isoyeta de 400 mm. De esta manera, el 62 % de la superficie de la sierra tiene una precipitación entre 400 y 500 mm mientras que por encima de 500 mm está un 35 % de la superficie. Nuevamente se observa la influencia orográfica en el trazado de las isoyetas.

La Sierra María se caracteriza por tener las mayores altitudes de los sistemas acuíferos estudiados. La curva hipsométrica presenta un perfil propio de relieve joven. Las cotas altimétricas varían entre un mínimo de 1000 m, en la parte oriental, y un máximo de 2100 m en la sector central del sistema. Las altitudes disminuyen de forma centrífuga desde el centro y oeste de la sierra (picos de María y Cabezo, respectivamente) donde se localizan las mayores altitudes. El hecho más significativo de la distribución de altitudes es la proporción, más o menos constante, de los intervalos de altitud. El 91 % de la superficie esta comprendido entre los 1100 y 1800 m de altitud y dentro de este gran rango no se observan áreas que destaquen por la superficie ocupada de un intervalo concreto.

La pendiente de la Sierra María es muy elevada; de hecho, la mitad de la misma tiene pendientes superiores al 30 %. Las mayores pendientes se encuentran en torno a las Sierras de Maimón y María que, a su vez, se corresponden con las zonas más elevadas. Las áreas de baja pendiente, inferiores al 16 %, se localizan en la cima del Cabezo (en la parte suroeste), y en los sectores noroeste y este de la Sierra María. Estas áreas equivalen al 22 y 5 % de la superficie total. El sector sur, correspondiente al Collado del Mojonar, se caracteriza por las fuertes pendientes de sus laderas.

Desde el punto de vista litológico, la sierra está formada en un 94 % por materiales carbonatados, concretamente calizas y dolomías. Las calizas afloran principalmente en la mitad Sur, en un 42 % de la superficie, mientras que las dolomías afloran en un 52 % de la superficie y se asocian, en general, a la mitad septentrional. El resto de la sierra está formado por margocalizas y depósitos cuaternarios.

Las áreas de infiltración de favorables o preferenciales son muy escasas. Únicamente se ha localizado la cima del Cabezo y ocupa una superficie equivalente al 0'96 % del total de la sierra.

Los suelos de la Sierra de María son principalmente litosoles y cambisoles. Los litosoles se localizan en la mayor parte del área, en la parte central de la misma, y ocupan una superficie equivalente al 58 %. Los cambisoles se localizan alrededor de los litosoles en los sectores oeste, sur y este. Por último, hay regosoles calcáreos en el sector central y nororiental ocupando una superficie de 3 km² que equivale al 5 % de la sierra.

4.3. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA RECARGA

A partir de los mapas recogidos en el anexo I del volumen II de este informe, descritos en el apartado 4, se han obtenido una serie de variables geográficas, geológicas y climáticas (Tabla 4.3) con las que se han realizado Análisis de Componentes Principales (ACP) para poder determinar qué variables juegan un papel más importante en la recarga de los diferentes sistemas acuíferos y qué agrupaciones pueden establecerse de acuíferos con afinidades desde el punto de vista de la recarga.

	SISTEMAS							
	Blanca-Mijas	Cabras	Cazorla	Gorda	Libar	María	Nieves	Rute-Hor
amplitud relieve (m)	1131,0	571,0	1918,0	1145,0	930,0	976,0	1528,0	1091,0
altitud media (m)	620,0	361,5	1136,0	594,0	948,5	1515,5	1107,5	956,0
percentil 25 (m)	360,0	241,3	788,0	565,0	748,8	1296,3	782,3	724,0
percentil 75 (m)	885,0	507,8	1484,0	626,0	1148,3	1746,8	1439,8	1188,0
inferior 8% (%)	14,1	21,5	18,7	37,1	19,7	10,9	17,4	21,4
superior 46% (%)	22,4	19,4	14,7	7,2	21,4	28,5	21,9	13,0
percentil 50 (%)	64,5	51,0	80,5	81,0	61,5	61,0	66,5	65,5
% metamorfica	97,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,4	0,0
% sedimentaria	0,0	90,3	83,6	86,5	80,4	94,6	80,3	69,0
% calcareas	49,7	79,6	27,9	76,0	76,5	42,2	41,5	54,2
% dolomíticas	48,3	10,6	55,7	10,5	4,0	52,4	55,3	14,8
pp media (mm)	712,2	963,9	740,4	860,7	1299,0	484,4	917,5	800,0
volumen (hm ³)	123,0	32,9	609,3	287,2	115,5	34,0	171,8	118,4
temperatura (°C)	18,3	17,3	14,6	13,1	15,8	12,0	15,1	15,7
ETP (mm)	925,0	925,0	850,0	825,0	850,0	850,0	875,0	850,0
formas (%)	6,7	7,1	5,0	29,0	45,7	1,0	8,2	2,1
litosol (%)	64,5	26,0	6,2	79,6	80,4	57,9	53,1	15,4
Coef. Recarga (%)	40,0	33,0	30,0	55,0	55,0	33,0	55,0	45,0
Superficie (km ²)	172,7	34,1	823,0	333,7	88,9	70,2	187,3	195,5

Tabla 4.3. Parámetros obtenidos de los mapas del anexo I del Volumen II de este informe.

Se ha llevado a cabo un primer ACP con el conjunto de variables y sistemas acuíferos considerados. Los tres ejes o factores principales de este primer ACP explican el 77% de la varianza muestral.

El factor I (34, 3%) está determinado por variables que en gran medida aportan la misma información, como es el caso de la amplitud de relieve, altitud media, percentil 25 y 75 de la curva hipsométrica, los cuales caracterizan el relieve de los

sistemas acuíferos (Fig. 4.2). El eje II (26,5%) queda definido por la oposición entre el porcentaje de rocas sedimentarias, porcentaje de superficie con pendientes <8% y porcentaje de superficie ocupada por formas kársticas de absorción frente a los porcentajes de rocas metamórficas y de superficie con pendientes >46% y a la ETP.

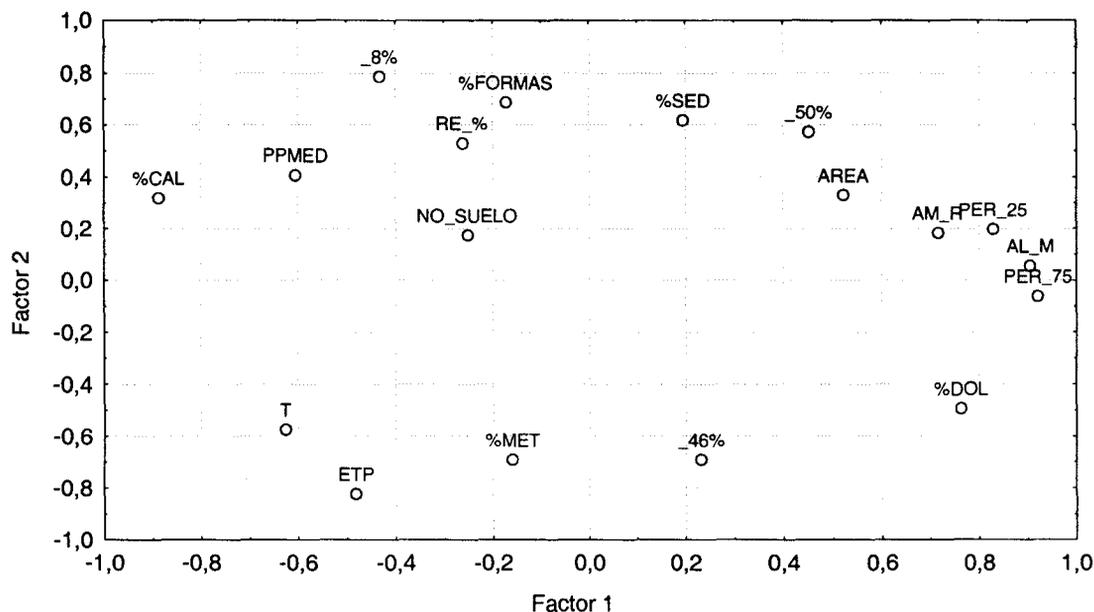


Fig. 4.2. Representación del plano I-II de las variables del primer ACP.

En este primer ACP hay gran cantidad de variables que son redundantes y se superponen el gráfico, por lo que se ha realizado un segundo ACP eliminando algunas de esas variables. Los datos utilizados para el segundo ACP se presentan en la tabla 4.4.

	SISTEMAS							
	Blanca-Mijas	Cabras	Cazorla	Gorda	Libar	María	Nieves	Rute-Hor
altitud media (m)	620,0	361,5	1136,0	594,0	948,5	1515,5	1107,5	956,0
inferior 8% (%)	14,1	21,5	18,7	37,1	19,7	10,9	17,4	21,4
superior 46% (%)	22,4	19,4	14,7	7,2	21,4	28,5	21,9	13,0
% calcareas	49,7	79,6	27,9	76,0	76,5	42,2	41,5	54,2
% dolomíticas	48,3	10,6	55,7	10,5	4,0	52,4	55,3	14,8
pp media (mm)	712,2	963,9	740,4	860,7	1299,0	484,4	917,5	800,0
formas (%)	6,7	7,1	5,0	29,0	45,7	1,0	8,2	2,1
litosol (%)	64,5	26,0	6,2	79,6	80,4	57,9	53,1	15,4
Coef. Recarga (%)	40,0	33,0	30,0	55,0	55,0	33,0	55,0	45,0

Tabla 4.4. Variables utilizadas en el segundo ACP.

En este segundo ACP (Fig. 4.3), los dos primeros factores explican el 71,7% de la varianza. El eje I (51,5%) queda determinado por la oposición de las variables precipitación media, % calizas, % formas kársticas y % superficie con pendientes <8% frente al % dolomías y en menor medida altitud media, por lo que parece caracterizar en gran parte la recarga. El eje II (20,7%) queda definido por las variables % superficie con pendientes <46% y % litosol (no suelo); este factor da cuenta del relieve.

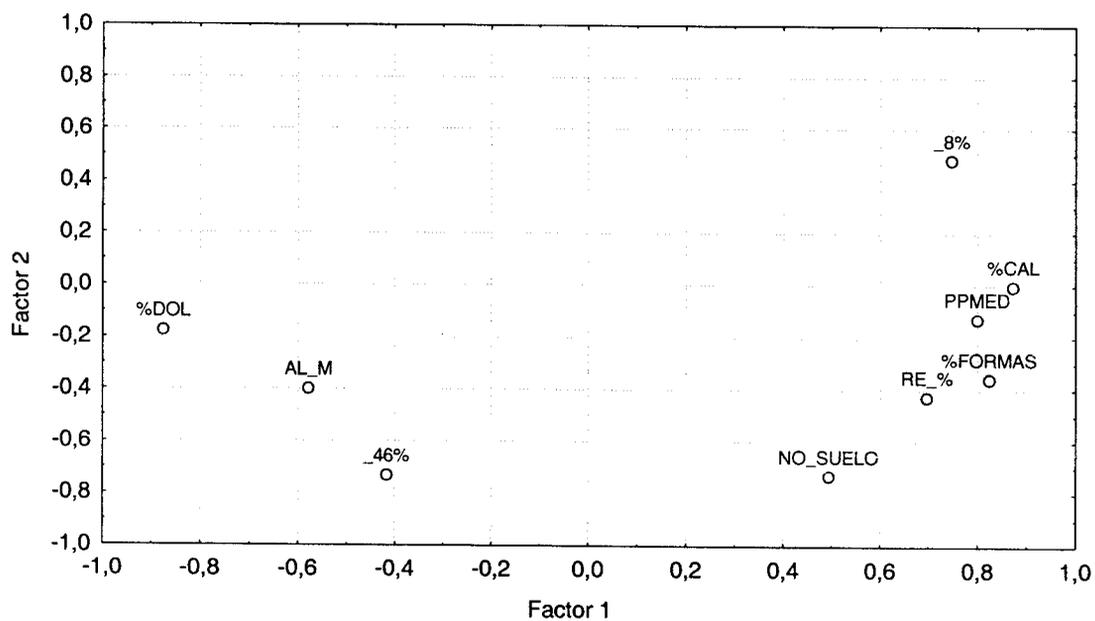


Fig. 4.3. Representación del plano I-II de las variables del segundo ACP.

En el campo I-II de las unidades estadísticas pueden distinguirse tres grupos o familias de sistemas acuíferos que están ordenados dentro del plano I-II (Fig. 4.4), de izquierda a derecha, según el valor creciente de la tasa de recarga. No obstante, dos de los casos se sitúan en una posición anómala: Sierra de las Cabras y Sierra de las Nieves. En este último caso, cabe recordar que dentro de esta unidad hidrogeológica existen dos áreas o sectores (ver apartado 2.5): sector de Yunquera-Prieta-Alcaparaín y sector de Nieves *sensu strictu*, los cuales presentan características bastante diferentes en cuanto al valor de las variables que se han utilizado para realizar este segundo ACP.

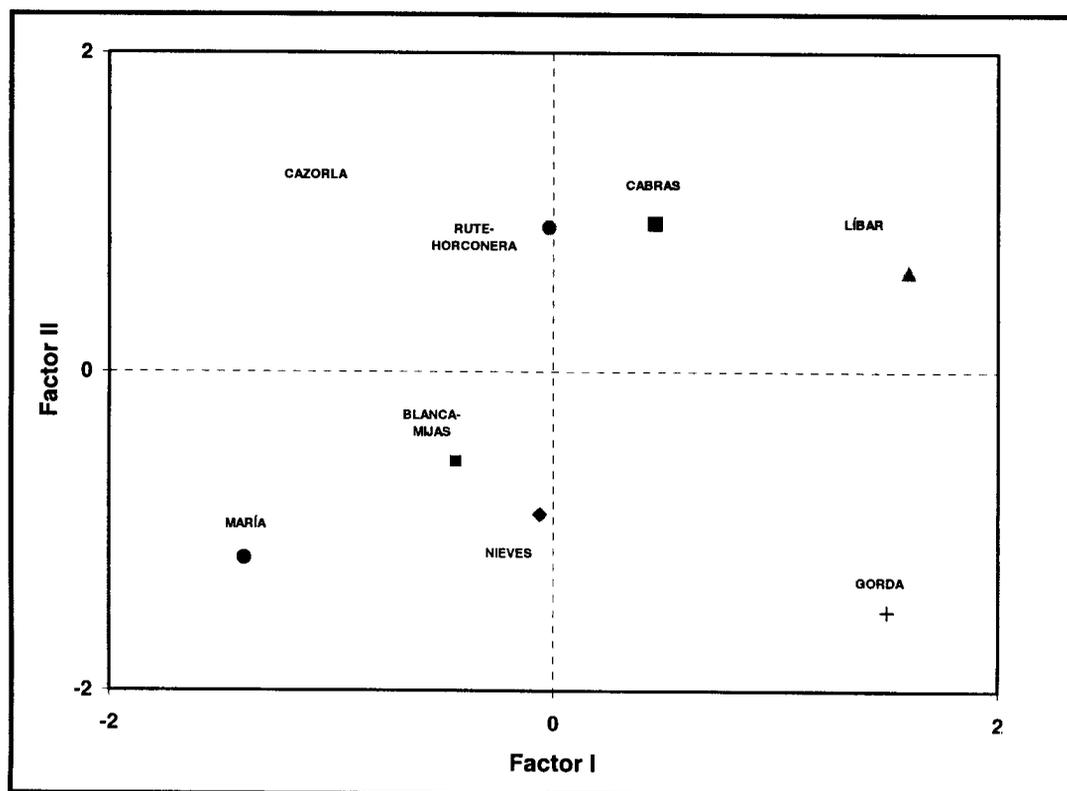


Fig. 4.4. Representación del plano I-II de las unidades estadísticas del segundo ACP.

Ante la situación descrita en el párrafo anterior se ha efectuado un tercer ACP utilizando el valor de las variables correspondiente a la Sierra de las Nieves *sensu strictu*, excluidas las Sierras de Yunquera, Prieta, Bonela y Alcaparaín. En la tabla 4.5 se muestran los datos utilizados para este tercer ACP.

	SISTEMAS							
	Blanca-Mijas	Cabras	Cazorla	Gorda	Líbar	María	Nieves (s.s.)	Rute-Hor
altitud media (m)	620,0	361,5	1136,0	594,0	948,5	1515,5	1140,0	956,0
inferior 8% (%)	14,1	21,5	18,7	37,1	19,7	10,9	19,5	21,4
superior 46% (%)	22,4	19,4	14,7	7,2	21,4	28,5	19,8	13,0
% calcareas	49,7	79,6	27,9	76,0	76,5	42,2	52,6	54,2
% dolomíticas	48,3	10,6	55,7	10,5	4,0	52,4	44,8	14,8
pp media (mm)	712,2	963,9	740,4	860,7	1299,0	484,4	1003,7	800,0
formas (%)	6,7	7,1	5,0	29,0	45,7	1,0	11,9	2,1
litosol (%)	64,5	26,0	6,2	79,6	80,4	57,9	65,9	15,4
Coef. Recarga (%)	40,0	33,0	30,0	55,0	55,0	33,0	60,0	45,0
Superficie (km ²)	172,7	34,1	823,0	333,7	88,9	70,2	128,8	195,5

Tabla 4.5. Datos utilizados en el tercer ACP.

En este tercer ACP, el factor I explica un 49,9% de la varianza muestral. También en este análisis, el factor I está determinado por variables que representan la recarga de los sistemas acuíferos (Fig 4.5). El eje II (21,0%) caracteriza el relieve con la variable área en su parte positiva y % de superficie con pendientes >46% en la negativa.

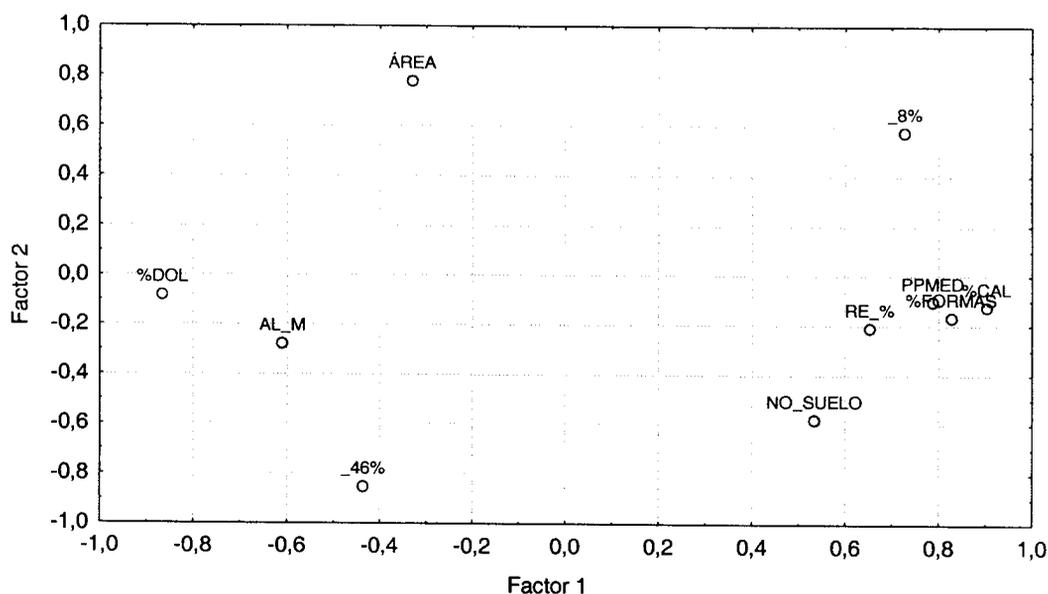


Fig. 4.5. Representación del plano I-II de las variables del tercer ACP.

En el campo de las unidades estadísticas (Fig. 4.6), la diferenciación de tres grupos de sistemas acuíferos en relación al coeficiente de recarga es bastante más

patente en este tercer ACP en relación con el anterior, aunque la Sierra de las Cabras sigue manteniendo una posición algo incongruente, ya que la caracterización de la recarga efectuada por otros métodos lleva a pensar que su posición dentro del campo de las unidades estadísticas debería estar desplazada hacia la parte negativa del factor I.

En cambio, la posición que muestra la Sierra de las Nieves dentro del campo de las unidades estadísticas es más acorde que la que muestra para el segundo ACP (Fig. 4.4).

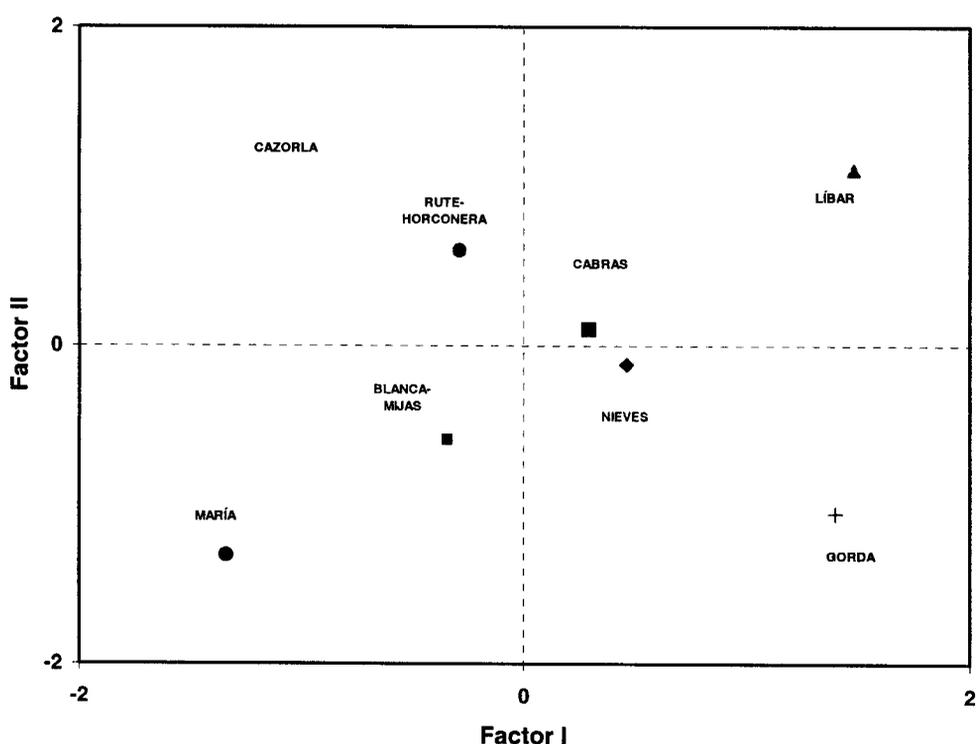


Fig. 4.6. Representación del plano I-II de las unidades estadísticas del tercer ACP

Hasta este punto, los tres Análisis de Componentes Principales que se han llevado a cabo han incluido al coeficiente de recarga como otra variable más a considerar dentro de dichos análisis. Por ello, se ha realizado un cuarto ACP para comprobar si existe una influencia importante de esta variable en los resultados obtenidos hasta el momento.

Los datos que se han utilizado para este cuarto ACP son los que se muestran en la tabla 5.3, a excepción de la variable “% recarga”.

En el cuarto ACP (Fig. 4.7) los dos ejes principales explican el 72,9% de la varianza muestral. El eje I (50,8%) está determinado nuevamente por la oposición de las variables precipitación media, % calizas, % formas kársticas y % superficie con pendientes <8% frente al % dolomías y en menor medida altitud media; por lo que parece bien claro que este es el factor recarga.

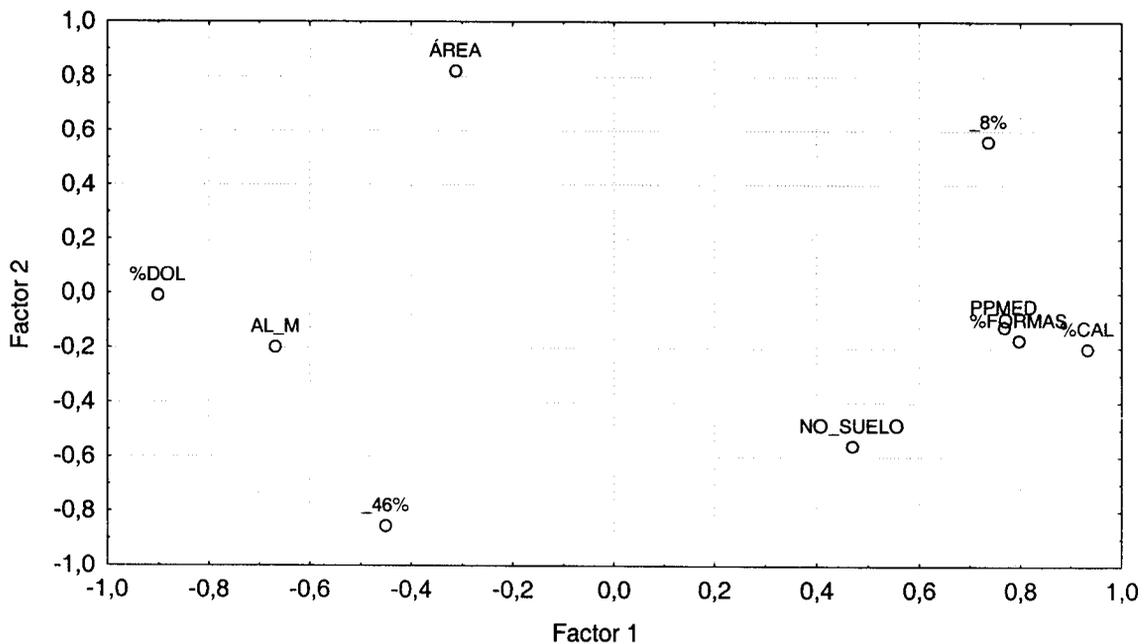


Fig. 4.7. Representación del plano I-II de las variables del cuarto ACP.

El eje II (22,1%), también queda nuevamente definido, al igual que el tercer ACP, por la variable “área” en su parte positiva, y “% superficie con pendientes >46%” en la negativa. Por tanto, este factor refleja de nuevo el factor “relieve”.

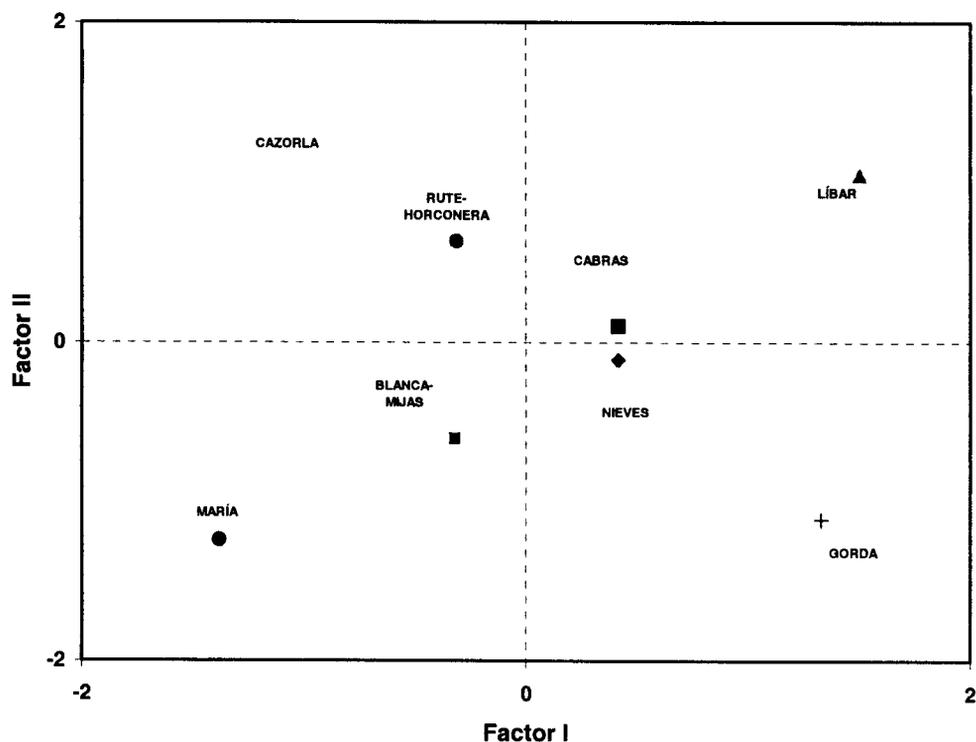


Fig. 4.8. Representación del plano I-II de las unidades estadísticas del cuarto ACP.

En el campo I-II de las unidades estadísticas (Fig. 4.8) pueden distinguirse los tres grupos de sistemas acuíferos que se habían descrito anteriormente y que están controlados en gran medida por el coeficiente de recarga. No obstante, la posición de la Sierra de las Cabras es similar a la que ocupa la Sierra de las Nieves en el campo de la unidades estadísticas, lo que indicaría un comportamiento similar en cuanto a la recarga. Este última hipótesis no resulta coherente con la caracterización de la recarga efectuada por otros métodos para cada uno de estos sistemas, lo cual debe estar relacionado con la baja altitud de recarga de la Sierra de las Cabras.

4.4. CLASIFICACIÓN TIPOLOGICA DE LOS ACUÍFEROS CARBONÁTICOS EN FUNCIÓN DE LA RECARGA

Los trabajos desarrollados en el marco del presente proyecto de investigación permiten proponer una clasificación tipológica preliminar de los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética atendiendo a varios criterios de carácter geológico, climático, hidrogeológico y geomorfológico. La clasificación que aquí se propone no es más que una primera aproximación que debe ser completada en el futuro de acuerdo con los resultados de futuras investigaciones. La introducción de la información básica de los acuíferos en un SIG, como se ha hecho en el marco de este proyecto, permitirá revisar y actualizar los balances hidrológicos de los diferentes acuíferos considerados y de otros existentes en la Cordillera Bética. Este aspecto es de enorme interés de cara a la planificación hidrológica y a la gestión de los recursos hídricos.

Teniendo en cuenta el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos estudiados, deducido a partir del análisis de sus respuestas naturales (véase volumen III de este informe), y el análisis de las variables efectuado (apartado 4.3) se han establecido tres conjuntos de acuíferos con diferentes tasas de recarga (Tabla 4.9):

- Acuíferos carbonáticos con elevada karstificación funcional: son acuíferos donde la precipitación es abundante, generalmente superior a 800 mm, la pendiente topográfica es baja en las partes altas de los afloramientos (a menudo “plateaux”) y en ellos existe gran abundancia de formas kársticas de absorción. Estos últimos aspectos están fuertemente condicionados por la estructura geológica que en la mayoría de los casos da lugar a una disposición horizontal (o casi) de la estratificación. Como ejemplos tipo se han considerado la Sierra de Líbar, la Sierra de las Nieves y la Sierra Gorda de Loja, aunque, de acuerdo con autores previos, los resultados obtenidos pueden ser extrapolables a otros macizos kársticos andaluces como el Torcal, la Sierra de Grazalema, las sierras situadas al Oeste de Ronda (Blanquilla-Merinos) y algunos sectores de la Sierra de Segura. La mayoría de los ejemplos corresponden al dominio Penibético de la Cordillera Bética, aunque también hay de otros dominios: Dorsal-Rondaide (Sierra de las Nieves), Prebético Interno (Sierra de Segura) y Subbético Interno (Sierra Gorda). En cualquier caso, son los acuíferos que presentan la tasa de recarga más elevada de todos los

estudiados (55% de la precipitación) pero, paradójicamente, presentan una rápida descarga porque el grado de karstificación funcional que presentan es mayor; los manantiales que drenan estos acuíferos suelen tener un funcionamiento típicamente kárstico, con rápidas respuestas ante las precipitaciones y, consecuentemente, con bajo poder regulador natural.

- Acuíferos carbonáticos con moderada karstificación funcional: la precipitación es inferior a la que se registra en los acuíferos antes citados (del orden de 600-800 mm). Los acuíferos tipo que se han considerado son las sierras de Yunquera, Mijas y Alfaguara. Se trata de macizos carbonáticos con una estructura fuertemente plegada y una pendiente importante, formados por dolomías alpujárrides (“kakiritas”) a menudo desarrollan un horizonte arenoso superficial por disgregación intergranular de los cristales de dolomita. Este hecho condiciona mucho la infiltración, que es relativamente importante, pero que se produce de forma lenta puesto que no existen formas exokársticas de absorción y, consecuentemente, los acuíferos tienen un gran poder regulador natural. Además de los acuíferos tipo antes citados, en este grupo se pueden incluir los acuíferos formados por dolomías alpujárrides que afloran en los bordes de Sierra Nevada, Sierra Almirajara y las Sierras de Lújar y Gádor, así como otros acuíferos subbéticos del sur de las provincias de Córdoba (Sierra de Cabra, Rute-Horconera) y Jaén (Sierras de Pandera-Parapanda). En cualquier caso se trata de acuíferos con un coeficiente de infiltración del 40-45% de la precipitación.

- Acuíferos carbonáticos fisurados y con escasa karstificación funcional: son acuíferos formados por calizas y dolomías fuertemente plegadas y fracturadas que dan lugar a relieves de elevadas pendientes, donde la escorrentía puede alcanzar valores relativamente importantes. En este tipo de acuíferos la precipitación puede variar entre 500 mm (Sierra María) y 850 mm (Sierra de las Cabras, Cádiz). Aparte de los acuíferos anteriores, a este tipo pueden atribuirse la Sierra de Cañete y Sierra Arana, entre otros. El análisis de las descargas de estos sistemas muestra una gran inercia ante la recarga de las precipitaciones (a veces en forma de nieve como en Sierra Arana o Sierra María). Son acuíferos con bajo grado de karstificación funcional y gran poder regulador natural, donde la tasa de recarga es del orden de la tercera parte de las precipitaciones.

DOMINIO PALEOGEOGRÁFICO	ACUÍFERO TIPO	PRECIPITACIÓN (mm)	SUPERFICIE (km ²)	EJEMPLOS	PENDIENTE	ENERGÍA RELIEVE (m)	LITOLOGÍA	ESTRUCTURA	FORMAS DE ABSORCIÓN ACTIVAS	TIPO DE DESCARGA	TASA DE RECARGA (% P)
Prebético	Cazorla	740	400	Sierra del Pozo	Elevada	1477	dolomías	Escamas	Escasas	Lenta	30
Subbético Externo y Subbético Medio	Cabra-Rute-Horconera	800	195	Sierra de Pandera-Parapanda	relativamente Elevada	1091	dolomías y calizas J	Pliegues y cabalgamientos	Abundantes	intermedio entre kárstico y difuso	45
	Sierra Cabras	825	42	Cañete	Elevada	370	dolomías y calizas J	Escamas, pliegues verticales	Escasas	Lenta. Flujo difuso	30-35
Subbético Interno	Sierra Gorda	840	293	Sierra de Cabra, Pandera-Parapanda	Baja en la parte alta	1300	dolomías y calizas J	Escamas, pliegues isopacos	Abundantes	intermedio entre kárstico y difuso	50
	Sierra María	480	75	Sierra Arana	Elevada	1000	dolomías y calizas J	pliegues "fallados".	Escasas	Lenta. Flujo difuso	30-35
Penibético	Sierra Líbar	1474	103	Grazalema, E. de Ronda, Segura	Muy baja en la parte alta	960	dolomías y calizas J	pliegues en cofre	Muy Abundantes	Rápida. Flujo por conductos	55
Dorsal-Rondaide	Sierra de Nieves	1000	100	Similar al Penibético	Baja en la parte alta	1500	dolomías y calizas T-J	pliegue tumbado	Muy Abundantes	Rápida. Flujo por conductos	60
	Yunquera, Prieta-Alcaparín	800	55	Similar a Mijas	Elevada, salvo Yunquera	1000	mármoles, dolomías, calizas	pliegues y escamas	Escasas	Lenta. Flujo difuso	40
Alpujáride	Blanca	833	53	algunos sectores de S. Tejada?	Elevada	1200	Mármoles T	pliegues isodinales	Poco abundantes	Rápida. Flujo por conductos	30-35
	Mijas	636	80	Almijara, Lújar, Gádor, La Peza	Elevada	1000	dolomías T	pliegues isodinales	Escasas	Lenta. Flujo difuso	45

Tabla 4.9. Propuesta de clasificación tipológica de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética para la estimación de la recarga.

**5. ELABORACIÓN Y SUPERPOSICIÓN DE CAPAS DE
INFORMACIÓN. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL
CÁLCULO DE LA RECARGA**

5.1. ELABORACIÓN DE LAS CAPAS DE INFORMACIÓN

Las características intrínsecas de cada acuífero consideradas hasta ahora para estimar la recarga son las siguientes:

- Precipitación media (Is)
- Altitud del terreno (A)
- Pendiente del terreno (P)
- Características litológicas de los materiales acuíferos (L)
- Zonas preferenciales de infiltración (I)
- Características edáficas (S)

Las variables anteriores son de naturaleza cualitativa (litología, zonas preferenciales de infiltración y suelos) y cuantitativa (altitud, pendiente y precipitación media). Dado que la recarga tiene un marcado carácter cuantitativo, las variables cualitativas se han transformado en variables cuantitativas mediante el establecimiento de rangos a los que se han asignado valores ordinales para su posterior tratamiento. De esta manera, para cada acuífero considerado, se han elaborado unos nuevos mapas (capas de información) relativos a cada variable, atendiendo a los valores que se muestran a continuación en las tablas 5.1 a 5.6. Estos mismos valores han sido los que se han considerado en todo el análisis y tratamiento posterior dentro de este informe.

Los valores ordinales utilizados varían entre 1 y 10, siguen una progresión aritmética de diferencia 1, con el objetivo de que se puedan equiparar fácilmente con valores de porcentaje de recarga del acuífero. El valor 1 indica mínima incidencia de los valores de esa variable en la recarga del acuífero, mientras que el valor 10 expresa la máxima influencia en la recarga. Se han dividido las distintas variables en 10 clases de manera que a cada categoría le corresponde una puntuación. En el caso de no contar con un amplio número de categorías, como ocurre con la variable “zonas preferenciales de infiltración”, se han utilizado los valores extremos, en este caso 1 para las zonas de menor incidencia en la recarga y 10 para las áreas con mayor influencia.

La variable referida a la precipitación “isoyetas (Is)” incide en la recarga de manera que conforme aumenta la precipitación aumenta la recarga según una progresión

aritmética de diferencia 1 (Tabla 5.1.). Los intervalos de precipitación son cada 200 mm/año excepto para la clase más de 1800 mm/año en la cual se estima que por encima de esta cantidad la recarga sería máxima.

Isoyetas (Is)	Puntuación
≤ 200	1
200 - 400	2
400 - 600	3
600 - 800	4
800 - 1000	5
1000 - 1200	6
1200 - 1400	7
1400 - 1600	8
1600 - 1800	9
> 1800	10

Tabla 5.1. Puntuación asignada a los valores de la variable "precipitación".

La "altitud" (Tabla 5.2) sigue una progresión aritmética de diferencia 1, de manera que conforme aumenta la altitud aumenta la recarga del acuífero. Los valores de altitud se han agrupado en intervalos de 300 m y a partir de 2700 m de altitud se ha estimado que las diferencias en la recarga son inapreciables.

Altitud (A)	Puntuación
≤ 300	1
300 - 600	2
600 - 900	3
900 - 1200	4
1200 - 1500	5
1500 - 1800	6
1800 - 2100	7
2100 - 2400	8
2400 - 2700	9
> 2700	10

Tabla 5.2. Puntuación asignada a los valores de la variable "altitud".

Las puntuaciones asignadas a la variable "pendiente" (Tabla 5.3) disminuyen una unidad conforme aumenta la pendiente, es decir, a mayor pendiente menor recarga del acuífero. Los valores de pendiente se han agrupado en intervalos irregulares según la clasificación utilizada en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía, Sinamb-A. Por encima del 100 % de pendiente la recarga no sufre variaciones y es mínima.

Pendiente (P)	Puntuación
≤ 3	10
3 - 8	9
8 - 16	8
16 - 21	7
21 - 31	5
31 - 46	4
46 - 76	3
76 - 100	2
> 100	1

Tabla 5.3. Puntuación asignada a las clases de la variable "pendiente" establecidas por el Sinamb-A. El número de clases es 9, por lo que se ha quitado una puntuación (6)

La asignación de valores a las distintas litologías se ha efectuado en función de criterios de hidrogeológicos (Tabla 5.4.). De esta forma, conforme aumenta la permeabilidad, grado de fracturación, karstificación, etc. aumenta la recarga del acuífero. Los valores más elevados se corresponden con los materiales carbonatados y aquellos que tienen un comportamiento acuífero, mientras que los materiales esquistosos, arcillosos, etc. tienen un comportamiento más de tipo acuífugo o acuitardo y reciben una menor valoración en la recarga.

Litología (L)	Puntuación
Rocas carbonatadas karstificadas	10
Rocas carbonatadas fisuradas ligeramente karstificadas	9
Gravas y arenas bien seleccionadas	8
Coluviones, arenas, limos y rocas volcánicas permeables	7
Brechas y conglomerados con indicios de karstificación	6

Areniscas y arcillas con yesos	5
Rocas plutónicas y metamórficas fisuradas	4
Margas y margocalizas	3
Esquistos, pizarras, filitas y arcillas tipo flysch	2
Rocas plutónicas y metamórficas no fisuradas	1

Tabla 5.4. Puntuación asignada a las clases de la variable "litología".

La puntuación asignada a la variable relativa a las zonas de absorción preferencial ("Infiltración") únicamente presenta dos casos por lo que la asignación de valores se ciñe a dos situaciones (Tabla 5.5): valor 10 para los zonas que son áreas preferenciales de absorción y valor 1 para el resto.

Infiltración (I)	Puntuación
Áreas preferenciales	10
Resto	1

Tabla 5.5. Puntuación asignada a la variable "zonas preferenciales de absorción".

En el caso la variable "suelo", las distintas clases se han agrupado en función de las características de espesor y textura de sus horizontes. Así, conforme el espesor es menor y la textura más gruesa, la recarga es mayor. Los tipos de suelos agrupados son los descritos en el mapa de suelos del Sistema de Información Ambiental de Andalucía (Tabla 5.6).

Suelos (S)	Puntuación
Leptosoles	10
Arenosoles Álbicos y Xerosoles Cálculos	9
Regosoles Calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles Eútricos, Dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles Cálculos	6
Cambisoles Eútricos	5
Histosoles Eútricos, Luvisoles Órticos y Cálculos	4
Luvisoles Crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles Crómicos	1

Tabla 5.6. Puntuación asignada a las clases de la variable "suelo".

5.2. SUPERPOSICIÓN CARTOGRÁFICA. ENSAYO METODOLÓGICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

5.2.1. Consideraciones previas

La obtención de unidades homogéneas del acuífero, para definir la tasa media de recarga del mismo, se ha realizado mediante superposición cartográfica de las distintas capas de información elaboradas previamente de acuerdo con las tablas 5.1 a 5.6. La realización de la superposición cartográfica cuenta de varias etapas que se resumen como sigue a continuación según Bosque (1992): introducción de datos, realización de la topología, análisis espacial, obtención de resultados

La introducción de datos en el Sistema de Información Geográfica (Arcinfo workstation 7.4.1) y las relaciones topológicas entre las distintas entidades de cada capa temática se describieron en el capítulo 4 de este volumen.

Por lo que se refiere al análisis espacial, se ha trabajado con unidades espaciales analíticas no coincidentes, las cuales presentan una adscripción directa con el espacio geográfico y por tanto con la realidad, de ahí la elección del formato vectorial en detrimento del raster. *El modelo vectorial* utiliza objetos geográficos georreferenciados con exactitud por medio de un sistema de coordenadas y los atributos se almacenan en bases de datos asociadas a la base cartográfica. Sin embargo, *el modelo raster* utiliza el píxel en la representación de la cartografía mediante una malla de puntos que contienen un valor numérico en función de sus atributos (Comas y Ruiz, 1993).

En el análisis espacial, mediante SIG, se utilizan cuatro funciones analíticas: recuperación, superposición, vecindad y conectividad. Para el análisis de los polígonos se ha utilizado la superposición (Fig. 5.1), principal valuarte del SIG desde sus inicios (Tomlin, 1990), dado que las capas con las que se ha trabajado presentaban la misma delimitación geográfica.

La intersección (comando *intersect* de Arc/info) genera unidades homogéneas, con un carácter multivariable, constituidas por todas las capas de información temáticas introducidas (precipitación, altitud, pendiente, litología, áreas de absorción o infiltración preferencial y suelos) lo cual facilita el manejo de cualquier tipo de método para estimar la recarga.

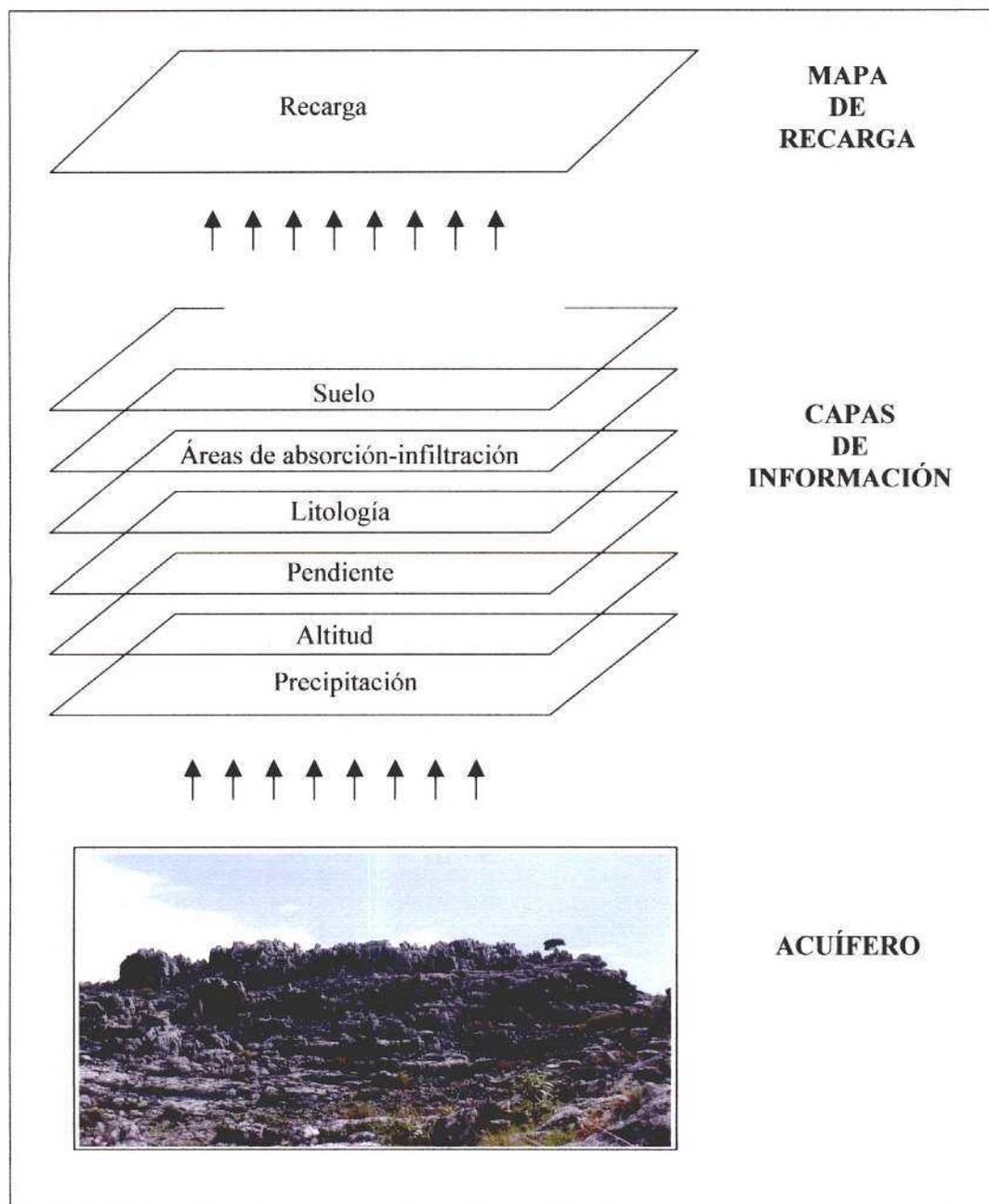


Fig. 5.1. Esquema conceptual de la superposición cartográfica.

La obtención de resultados es el apartado más importante del trabajo realizado puesto que se trata de fijar un algoritmo de cálculo de la tasa de recarga que sea común a todos los acuíferos, tomando como referencia los valores de la tasa de recarga obtenidos mediante técnicas convencionales (capítulo 3 de este volumen). En los siguientes apartados se detallan todos los resultados del ensayo llevado a cabo aplicando diferentes técnicas o métodos para combinar las capas de información.

5.2.2 Análisis de regresión lineal múltiple

Hay varias posibilidades de realizar este tipo de análisis, dado que se dispone de un amplio número de unidades homogéneas derivadas de la superposición de las seis variables descritas en el apartado 5.1 (variables independientes), mientras que solo se dispone de un solo valor de recarga para cada acuífero (variable dependiente) calculado por técnicas convencionales. El objetivo es obtener los coeficientes de ponderación de las variables, por los cuales se multiplicará cada uno de los valores de las mismas, de forma que el valor de la recarga se aproxime al calculado por técnicas convencionales y, además, se obtenga un mapa de distribución o zonación de la recarga.

En primer lugar, se realizó un análisis con todos los datos de los ocho acuíferos piloto. Se dispone así de un amplio número de casos para las variables independientes y de ocho valores distintos para la variable dependiente Y (recarga), que se corresponden con los ocho valores de recarga determinados previamente para cada acuífero. Con este análisis se obtienen unos coeficientes de ponderación de las seis variables válidos para todos los acuíferos, pero los estadísticos complementarios al análisis (coeficiente de determinación, coeficiente alfa¹) son prácticamente nulos (Tabla 5.7).

	Constante $a \neq 0$	Constante $a = 0$
Coefficiente de correlación múltiple	0,38	65535
Coefficiente de determinación R^2	0,14	-0,24
R^2 ajustado	0,14	-0,24
Error típico	8,35	10,02
Valor F	121'087	- 137'47
Valor crítico de F	6,712E-142	error

Tabla 5.7. Resultados del análisis de regresión múltiple para todos los datos de los acuíferos.

En la tabla 5.7 se muestran los resultados de aplicar un valor cero a la constante a ($Y = a + bX_1 + cX_2 + \dots + zX_n$), lo cual implica que la recta pasa por el origen de coordenadas, o un valor distinto de cero que es calculado por el método. En el caso de forzar la constante $a = 0$ los parámetros estadísticos que se obtienen invalidan el análisis

¹ El coeficiente alfa (valor F) determina la probabilidad que la correlación entre dos variables, a través del coeficiente de *Determinación* R^2 , se produzca por azar.

realizado (coeficiente alfa), mientras que en el caso de $a \neq 0$ los resultados estadísticos tienen muy baja influencia en la estimación de la recarga (Tabla 5.7).

Una segunda tentativa realizada mediante el análisis de regresión lineal múltiple ha consistido en calcular los coeficientes de ponderación y resto de estadísticos para cada acuífero concreto. De esta manera se obtiene un ajuste perfecto pero los estadísticos que indican la validez del análisis no son aceptables. En cualquier caso, se obtiene una adecuada distribución de la recarga pero siempre ajustada a cada acuífero, es decir, se obtienen unos coeficientes de ponderación distintos, para cada variable en cada acuífero (Tabla 5.8).

Variable	Blanca-Mijas	Cabras	Cazorla	Gorda	Líbar	María	Nieves	Cabra-Rute-Horconera
Altitud (A)	0,11	-1,42	1,14E-14	0,62	3,71	3,23	0,55	3,45
Pendiente (P)	0,43	0,41	-7,57E-16	0,50	0,54	0,49	0,60	0,83
Litología (L)	2,57	0,70	-7,18E-15	1,03	0,65	1,22	2,23	0,37
Isoyetas (Is)	3,24	4,20	-5,16E-14	4,48	3,00	-0,10	5,89	3,11
Infiltración (I)	-0,05	0,21	3,00E+01	-0,37	0,15	0,32	-0,50	0,84
Suelo (S)	0,37	0,51	9,40E-15	2,38	1,51	0,35	-0,09	1,65

Tabla 5.8. Coeficientes de ponderación derivados de un análisis de regresión lineal múltiple para cada acuífero por separado.

Finalmente, el tercer intento de regresión lineal múltiple ha consistido en ajustar una recta que proporcione unos coeficientes de ponderación únicos para los ocho acuíferos, pero a diferencia del primera análisis de regresión efectuado, en este caso se dispone de un extenso número de casos de la variable dependiente Y. Para ello, primero, se calcula la distribución de la recarga ajustada a cada acuífero, con lo que se dispone un amplio número de casos de la variable dependiente (recarga), de manera que los parámetros estadísticos de correlación y validación no estén influenciados por la existencia de un solo dato de recarga. Después, se realiza el ajuste de la recta de regresión para todos los acuíferos, pero la variable Y es el resultado de la estimación

realizada de forma individual para cada acuífero, es decir, el número de casos de las variables independientes es similar al de la variable dependiente.

Los resultados obtenidos muestran una elevada correlación entre las variables independientes y la variable dependiente (Tabla 5.9), aunque los valores medios de recarga obtenidos se alejan de los obtenidos previamente por técnicas convencionales.

	Constante $a \neq 0$	Constante $a = 0$
Coeficiente de correlación múltiple	0'782	0'991
Coeficiente de determinación R^2	0'611	0'981
R^2 ajustado	0'611	0'981
Error típico	6'5087	6'5394
Valor F	23912	790708

Tabla 5.9. Resultado del análisis de regresión tras estimar la variable Y de forma individual para cada acuífero.

5.2.3. Análisis de distancia al punto ideal

Se basa en el cálculo de los desvíos de cada variable con un punto ideal teórico. A continuación se compara la distancia entre cada variable y el ideal en un espacio multivariable (Fig. 5.2), donde cada variable representa un eje (Barredo, 1996).

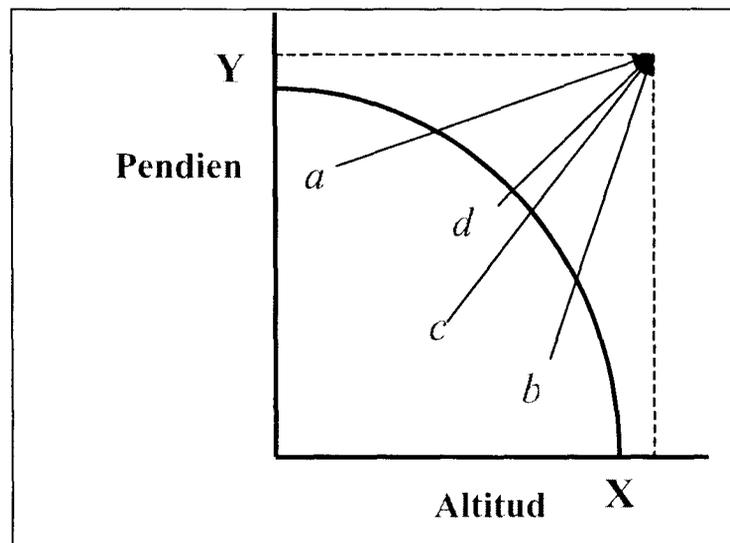


Fig. 5.2. Esquema gráfico de la distancia al punto ideal.

El punto ideal se considera inalcanzable como forma de asegurar la situación óptima Pareto del método de evaluación. Un conjunto se encuentra en su estado

óptimo si ningún elemento de ese conjunto puede mejorar su situación sin que empeore la situación de algún otro elemento del conjunto (Romero, 1993).

Para el cálculo de la distancia al punto ideal se parte de una variante de la distancia euclidiana. La distancia euclídea [1], o distancia entre pares de valores (x,y) en un eje cartesiano n-dimensional, es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de cada variable.

$$\text{Distancia euclidiana} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + \dots + (Z_1 - Z_2)^2} \quad [1]$$

Al sustituir la diferencia entre variables por la diferencia entre el valor de una variable y el valor del punto ideal, para esa variable, se obtiene la distancia al punto ideal (dpi) como muestra la siguiente expresión [2].

$$dpi = \sqrt{\sum (X_i - pi)^2} \quad [2]$$

Los valores de “dpi” calculados mediante la fórmula [2] varían entre 0 y 22. Los valores cercanos a cero indican una distancia mínima al punto ideal, es decir, que la recarga es muy elevada, mientras que los valores próximos a 22 indican que la recarga es muy baja.

Con este método se obtiene una distribución de la recarga en los acuíferos aparentemente aceptable, pero el valor medio de la tasa de recarga se aleja de los valores de referencia obtenidos por métodos convencionales.

5.2.4. Sumatoria lineal ponderada

La sumatoria lineal ponderada es otra técnica de análisis multicriterio basada en la adicción aritmética de variables [3].

$$RECARGA (R) = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad \begin{array}{l} W_j = \text{coeficiente ponderación} \\ X_{ij} = \text{valor de la variable } X \end{array} \quad [3]$$

En este caso se han analizado varias posibilidades utilizando distintos coeficientes de ponderación. De esta manera fueron empleadas tres variantes de la misma ecuación que se muestran continuación en las expresiones [4], [5] y [6].

$$R = (A + P + L + Is + I + S) / 0'6 \quad [4]$$

$$R = (A + P + 2 \cdot L + 2 \cdot Is + 3 \cdot I + S) / 1 \quad [5]$$

$$R = (A + 2P + 5 \cdot L + 3 \cdot Is + 4 \cdot I + S) / 0'16 \quad [6]$$

A = Altitud; P = Pendiente; L = Litología; Is = Precipitación (Isoyetas); I = Infiltración; S = Suelos

Mediante las fórmulas anteriores se han obtenido unos valores de la tasa de recarga que varían entre 0 y 100 % de la precipitación.

Los valores medios de la tasa de recarga obtenidos en cada sistema acuífero muestran fuertes variaciones, según la expresión utilizada. Ninguna de estas expresiones permite calcular valores de la tasa de recarga similares a los determinados previamente por técnicas convencionales en todos los acuíferos. En la tabla 5.10 se recogen los valores obtenidos mediante cada expresión y la desviación que presentan respecto a los valores de recarga conocidos. En color se han marcado los valores de la tasa de recarga que menor diferencia presentan con respecto a los valores previos. En general, se observa que los acuíferos con mayor tasa de recarga (Sierra de las Nieves, Sierra Gorda y Sierras de Cabra-Rute-Horconera) son los que presentan unos valores más próximos a los calculados previamente. Los acuíferos con menor tasa de recarga (Sierra de Cabras, Cazorla y María) son los que muestran mayores diferencias entre el valor de recarga obtenido mediante las expresiones [4], [5] y [6] y el calculado previamente por técnicas convencionales.

Acuífero	% Recarga conocido	Expresión [4]		Expresión [5]		Expresión [6]	
		%	Variación	%	Variación	%	Variación
Blanca-Mijas	43	48,7	5,68	44,2	1,22	50,6	7,56
Cabras	33	48,5	15,5	45,6	12,57	51,9	18,94
Cazorla	30	46,9	16,9	42,3	12,27	47,6	17,57
Gorda	55	56,8	1,8	51,0	-4,00	56,5	1,51
Líbar	55	59,8	4,8	60,2	5,23	63,8	8,77
María	33	50,4	17,4	43,4	10,35	48,2	15,22
Nieves	55	54,9	-0,1	50,2	-4,80	56,7	1,70
Cabra-Rute-Horconera	45	48,4	3,4	43,5	-1,49	49,0	4,03

Tabla 5.10. Tasa y variación de la recarga (respecto a la conocida) utilizando las expresiones [4], [5] y [6].

5.3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA. MÉTODO *APLIS*

5.3.1. Fundamentos del método *APLIS*

Los resultados del ensayo metodológico llevado a cabo en el apartado anterior (5.2) no permiten obtener valores de la tasa de recarga coherentes con los calculados previamente por métodos convencionales, ni disponer de un mapa de zonación o de distribución de la recarga coherente con el grado de conocimiento que se tiene de varios acuíferos. En todas las tentativas del apartado 5.2. se ha considerado la precipitación (“isoyetas”) como una capa de información, algo que no parece del todo acertado porque lo que se pretende calcular es precisamente el porcentaje de la lluvia media anual que constituye la recarga. La precipitación es un factor externo al acuífero mientras que el resto de variables consideradas (altitud, pendiente, formas de absorción y suelo) son intrínsecas de cada sistema acuífero y son las que influyen en que un determinado porcentaje de la precipitación media anual produzca recarga.

Por las razones anteriores, en este apartado se ha aplicado nuevamente la sumatoria lineal ponderada, pero utilizando las cinco variables intrínsecas de cada acuífero, sin considerar el mapa de isoyetas (precipitación) como una de las capas de información. El resultado ha sido un método (*APLIS*) que se propone para estimar la recarga a los acuíferos carbonatados. El acrónimo que da nombre al método responde a las iniciales de las variables utilizadas: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), zonas preferenciales de Infiltración (I) y Suelo (S).

Los valores utilizados para cada una de estas cinco variables son los descritos en las tablas 5.1 a 5.6, de manera que los valores cercanos a 1 indican mínima incidencia en la recarga del acuífero y los valores cercanos a 10 indican la mayor influencia. La única variación se corresponde con los valores de la tabla 5.4 (Litología) con el fin establecer una mayor diferenciación entre los distintos tipos de materiales carbonatados

que constituyen los acuíferos estudiados. De este modo se ha creado una nueva puntuación de la variable Litología que se recoge en la tabla 5.11.

Litología (L)	Puntuación
Calizas y Dolomías karstificadas	10 - 9
Mármoles fracturados algo karstificados	8 - 7
Calizas y Dolomías fisuradas	6 - 5
Arenas y gravas, coluviones.	4
Brechas y conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1

Tabla 5.11. Puntuación asignada a los valores de la variable litología. Las puntuaciones más altas se asignan según el grado de fisuración y/o karstificación.

La expresión propuesta en el método *APLIS* para estimar la tasa de recarga [7] es la siguiente:

$$R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0.9 \quad [7]$$

De esta manera, se obtienen valores de la tasa de recarga que varían entre un mínimo de 8'88 % y un máximo de 88'8 % de la lluvia sobre el acuífero. El valor medio de la tasa de recarga (R) en cada acuífero se ha obtenido como la media de los valores de R correspondientes a cada una de las unidades espaciales del mapa de recarga.

La ponderación de cada variable trata de responder a la importancia que ejerce cada una de ellas sobre la recarga. Así, se ha estimado que la variable Litología influye el triple que las variables Altitud, Pendiente y Suelo, mientras que la variable áreas de Infiltración preferencial tiene el doble de importancia. La ponderación recogida en la expresión [7] es la única que permite obtener valores de la tasa de recarga coherentes con los que se habían determinado por técnicas convencionales y, además, permite obtener una zonación de la recarga en los acuíferos.

El resultado de aplicar la expresión [7] del método *APLIS* se muestra en los mapas de recarga correspondientes a cada acuífero que se recogen en el anexo II del volumen II del presente informe. En cada mapa se muestra la distribución de la recarga en el acuífero, cuyo comentario se presenta en el apartado siguiente (5.3.2).

La tasa media de recarga anual se representa agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría (Tabla 5.12).

Intervalo	Clase
≤ 20 %	Muy Baja
20 – 40 %	Baja
40 – 60 %	Moderada
60 – 80 %	Alta
> 80 %	Muy Alta

Tabla 5.12. Categorías de la tasa de recarga obtenida por el método APLIS.

5.3.2. Resultados de la aplicación del método APLIS en los acuíferos piloto

En la tabla 5.13 se muestran los valores de la tasa media de recarga anual calculados por el método APLIS y los valores de referencia previamente determinados mediante técnicas convencionales. En ella se aprecia que las diferencias son siempre inferiores al 5% y, únicamente, en los acuíferos con menor tasa de recarga (Sierra de las Cabras, Sierra Cazorla y Sierra de María) las diferencias superan el 1%.

Acuífero	Tasa de recarga conocida (%)	Método APLIS	
		Tasa de recarga (%)	Variación
Blanca-Mijas	40	42,94	-2,94
Cabras	33	36,03	-3,03
Cazorla	30	31,63	-1,63
Gorda	55	53,10	1,90
Líbar	55	51,90	3,10
María	33	38,17	-5,17
Nieves	55	54,00	1,00
Cabra-Rute-Horconera	44	38,69	5,31

Tabla 5.13. Tasa de recarga mediante la expresión [7] del método APLIS.

Desde un punto de vista cartográfico, la mayoría de los acuíferos presenta una tasa media anual de recarga principalmente de clase Moderada a excepción de los

acuíferos de Sierra de Cazorla, Sierra de las Cabras y Sierra de María donde la recarga es de clase Baja. A continuación se muestran los distintos resultados para cada acuífero.

Sierra de las Cabras

La clase de recarga predominante es la Baja, correspondiente a afloramientos carbonatados con pendientes superiores al 16 %. No se han observado zonas que presenten una recarga de clase Muy Alta.

El sector sur de la Sierra del Valle presenta zonas con una recarga de tipo Alto debido a la presencia de zonas donde apenas hay pendiente y se produce una infiltración preferencial. En la sierra de las Cabras también hay zonas con una recarga Alta allí donde hay áreas de absorción preferencial.

En poco más de una cuarta parte de la superficie hay recarga de clase Moderada debido, principalmente, a la presencia de afloramientos calizos cuya pendiente es inferior al 16 %.

La clase Muy Baja representa un porcentaje de superficie muy similar a la clase Alta, pero a diferencia de esta última se caracteriza por la presencia de materiales impermeables como arcillas, margas y margocalizas.

Sierra de Líbar

La sierra de Líbar es la que tiene mayor superficie de clases de recarga elevada. El 37 % de la sierra corresponde a las clases Muy Alta y Alta lo que da idea de la elevada tasa de recarga que en ella se produce. Estas clases de recarga están estrechamente relacionadas con la abundancia de formas de absorción preferencial, diferenciándose una y otra en función de la pendiente: las zonas de recarga Muy Alta tienen una pendiente inferior al 8 %.

Casi la mitad de la Sierra de Líbar tiene una recarga de clase Moderada.

Las clases Baja y Muy Baja están relacionadas con la presencia de materiales de baja permeabilidad (margas y margocalizas) de las cuencas de los arroyos Álamos y Gaduares.

Sierra de la Nieves

La Sierra de las Nieves presenta una recarga, principalmente, de clase Moderada pero, al igual que en la Sierra Líbar, las clases de recarga elevada tienen un importante peso en la distribución espacial (20 % de la superficie del acuífero). La clase de recarga Muy Alta está directamente ligada a zonas carbonatadas con baja pendiente donde hay formas que favorecen la infiltración (llanos de la Nava, por ejemplo).

Las zonas de recarga Alta también se corresponden con las áreas comentadas anteriormente pero se diferencian en que el grado de pendiente es algo mayor. Otras zonas con una recarga Alta que no tienen formas preferenciales de absorción se caracterizan por tener un porcentaje de pendiente muy bajo.

El resto de materiales carbonatados tienen una recarga Moderada y ocupan tres cuartas partes de la superficie de la sierra.

Las zonas con recarga Baja y Muy Baja están relacionadas con la presencia de materiales de baja permeabilidad (esquistos y arcillas) en los bordes del acuífero.

Sierras Blanca y Mijas

La tasa de recarga en las Sierras de Blanca y Mijas varía entre un máximo de 72'2 % y un mínimo de 16'7 %. En el mapa se pueden diferenciar, principalmente, tres sectores: áreas con un porcentaje de recarga entre el 20 y el 40 %, entre el 40 y el 60 % y entre el 60 y 80 %. Áreas con una tasa de recarga entre 0 y 20 % son muy poco representativas de ambas sierras.

Las zonas de mayor recarga, entre un 60 y 80 %, se localizan allí donde hay una absorción preferencial del agua de lluvia y las condiciones litológicas son favorables. Estas zonas se localizan en la parte centro y este del acuífero de Sierra Blanca y se caracterizan por estar constituidas por mármoles triásicos muy fisurados, en áreas de infiltración preferencial (Llanos de Juanar, Pula y Coín). En la Sierra de Mijas no hay recarga de clase Alta porque no existen áreas de infiltración preferencial.

Las áreas con una recarga Moderada son las que mayor superficie ocupan en las Sierras Blanca y Mijas y se localizan sobre mármoles triásicos descubiertos de suelo.

Las zonas de recarga Baja representan, aproximadamente, un cuarto de la superficie y están asociadas a dos características: por un lado, y de forma genérica, a la presencia de suelos sobre los mármoles en los bordes de los sistemas acuíferos, y, por otro lado, al afloramiento de materiales metapelíticos en la parte central de la Sierra Mijas y al Norte de la Sierra Blanca.

Sierra Gorda

La clase de recarga Muy Alta está directamente relacionada con la presencia de áreas de infiltración preferencial salvo en el sector del polje de Zafarraya, en la parte meridional de la sierra, donde la recarga es inferior debido a la presencia de materiales detrítico-arcillosos. En este sector, la presencia de zonas con una recarga de clase Muy Alta tiene un carácter puntual y está directamente relacionada con pequeños afloramientos carbonatados en los que existen sumideros kársticos.

Las zonas de recarga Alta son áreas de absorción preferencial con pendiente superior a la de la clase de recarga Muy Alta y áreas de afloramientos carbonatados donde no hay infiltración preferencial pero la pendiente es inferior al 16 %.

La clase de recarga Moderada representa más de la mitad de la superficie, donde afloran materiales carbonatados no incluidos en las clases de recarga anteriores.

Las clases Baja y Muy Baja se corresponden con la presencia de materiales margosos y coluviales, respectivamente. Ambas clases son las que tienen menor representación en el acuífero: tan solo el 7 % de la superficie de la sierra.

Sierras de Cabra y Rute-Horconera

La distribución espacial de las distintas clases de recarga en estas sierras es muy similar a la obtenida en las Sierras de Blanca y Mijas. En ambos casos la clase de recarga Moderada representa dos tercios de la superficie de las sierras, hecho que coincide con una tasa media de recarga muy similar para ambos sistemas acuíferos (40 % para las Sierras de Blanca y Mijas y 44 % para las de Cabra y Rute-Horconera). Se trata de afloramientos carbonatados que están cubiertos por suelos cámbicos y/o regosoles.

Sólamente se ha localizado un pequeño sector con recarga Muy Alta, en una zona desprovista de suelo donde hay formas de absorción preferencial.

Las zonas con recarga Alta están estrechamente vinculadas a la ausencia de suelo sobre materiales carbonatados, donde la pendiente es suave.

Las áreas con recarga Baja o Muy Baja están asociadas a afloramientos de materiales de baja permeabilidad como arcillas, limos, margas y margocalizas.

Sierra de Cazorla

Solo se han obtenido tres clases de recarga: Moderada, Baja y Muy Baja. La clase Baja es la que predomina (88 % de la superficie) y la que establece la tasa media de recarga del acuífero.

La clase Moderada se caracteriza porque son zonas elevadas, con baja pendiente (inferior al 21 %) dentro de lo que es el afloramiento carbonatado.

La clase Muy Baja está asociada a los afloramientos de materiales de baja permeabilidad como margas.

Sierra María

La Sierra María, al igual que la Sierra de las Cabras, está representada básicamente por la clase de recarga Moderada y la distribución del resto de clases es muy similar en ambos casos. Las áreas de recarga Moderada abarcan dos tercios de la superficie de la Sierra de María y están constituidas por afloramientos carbonatados sin cubierta edáfica.

La clase Alta se corresponde con la presencia de una pequeña área en la parte occidental de la sierra donde la pendiente es baja y puede existir infiltración a través de formas de absorción preferencial.

Los sectores donde los afloramientos carbonatados están cubiertos por suelos, ya sean cambisoles o regosoles, tienen una recarga de clase Baja.

Las zonas con recarga Muy Baja se encuentran en un pequeño sector de apenas una hectárea, donde existen margocalizas con suelos cámbicos.

5.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS DISTINTOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA RECARGA

Para llevar a cabo esta comparación se han tenido en cuenta, por una parte, la clasificación tipológica de los acuíferos en función de la tasa de recarga establecida en el apartado 4.4 y, por otra, los resultados obtenidos aplicando los diferentes métodos de evaluación de la recarga basados en la superposición de capas de información (ver apartados previos de este capítulo 5).

En la tabla 5.14 se muestran las diferencias entre la tasa de recarga calculada mediante los diferentes procedimientos y la tasa de recarga de referencia calculada por técnicas convencionales. En color naranja se han marcado los valores que indican una menor diferencia, en color verde aquellos valores que muestran la mayor desviación y en color amarillo los que presentan una diferencia intermedia.

Método Acuífero	Distancia punto ideal	Sumatoria lineal ponderada				Análisis Regresión	
		Expresión [4]	Expresión [5]	Expresión [6]	APLIS	Individual	Conjunta
María	1,95	17,40	10,35	15,22	5,2	-0,33	9,79
Cabras	0,32	15,50	12,57	18,94	3,0	-0,17	12,63
Cazorla	2,64	16,89	12,27	17,57	1,6	0,00	13,00
Blanca-Mijas	-8,05	8,68	4,22	10,56	2,9	-0,24	2,36
Cabra y Rute	-10,77	3,41	-1,49	4,03	-5,3	-0,66	-0,98
Gorda	-16,86	1,77	-4,00	1,51	-1,9	-0,79	-5,29
Líbar	-14,82	4,76	5,23	8,77	-3,1	-0,44	-0,78
Nieves	-16,82	-0,11	-4,80	1,70	-1,0	-0,55	-5,12

Tabla 5.14. Variación entre la tasa media de recarga obtenida por diferentes procedimientos y la tasa de recarga calculada por métodos convencionales.

En general, se observa que los acuíferos que presentan una tasa de recarga del 33% (Sierras de María, Cabras y Cazorla) son los que presentan las mayores diferencias entre los valores de referencia y los calculados mediante superposición cartográfica. Por el contrario, en los acuíferos que presentan mayor tasa de recarga (> 40%) se produce una atenuación de las diferencias entre los valores de referencia y los ahora obtenidos.

En relación con el método de la distancia al punto ideal, se observa que los acuíferos con menor tasa de recarga (33 % de la precipitación) son los que presentan unos valores de la tasa media de recarga más similares a los establecidos previamente como referencia. Las diferencias más importantes se encuentran en los acuíferos con mayor tasa de recarga (55 %). En una situación intermedia se encuentran los acuíferos con tasa de recarga del orden de 40-45 % de la precipitación. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede considerar que la estimación de la recarga, mediante el análisis de la distancia al punto ideal, ofrece buenos resultados en acuíferos con menor recarga.

Con los métodos de sumatoria lineal ponderada y regresión lineal conjunta, la situación, aunque con ciertas matizaciones, es justamente la contraria. Así, en los acuíferos con mayor tasa de recarga, se obtienen escasas variaciones entre el valor de referencia y los ahora calculados, mientras que en los acuíferos con menor tasa de recarga se registran las mayores desviaciones.

El único método que permite obtener valores de la tasa de recarga media anual similares a los tomados como referencia, a partir de una única expresión matemática, es el método APLIS. Según este método, todos los acuíferos tienen una tasa de recarga de tipo Moderado (entre 40 y 60 % de la precipitación) excepto los acuíferos de Cazorla y las Cabras donde predomina la clase Baja (Tabla 5.15).

	Blanca y Mijas	Cabras	Cazorla	Gorda	Líbar	María	Nieves	Cabra, Rute y Horconera
Superficie (Km²)								
Muy Alta	0,00	0,00	0,00	65,15	4,19	0,00	11,74	0,02
Alta	7,92	0,57	0,00	53,67	30,84	0,67	15,34	5,48
Moderada	117,21	9,43	58,96	191,61	43,31	47,26	98,44	132,90
Baja	47,44	23,58	731,02	22,72	8,29	22,14	2,16	49,94
Muy Baja	0,10	0,51	32,85	0,57	2,28	0,12	1,09	7,11
Total	172,68	34,10	822,83	333,72	88,91	70,19	128,77	195,46
Superficie (en % respecto del total)								
Muy Alta	0,00	0,00	0,00	19,52	4,71	0,00	9,12	0,01
Alta	4,59	1,68	0,00	16,08	34,68	0,95	11,91	2,81
Moderada	67,88	27,67	7,17	57,42	48,71	67,33	76,45	68,00
Baja	27,47	69,15	88,84	6,81	9,33	31,55	1,67	25,55
Muy Baja	0,06	1,50	3,99	0,17	2,57	0,17	0,85	3,64
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabla 5.15. Superficie (en km² y % del total de la superficie) de las distintas clases de recarga según el método APLIS.

Los acuíferos de las sierras de Líbar, Nieves y Gorda, con una mayor tasa de recarga, son los que muestran mayor superficie de las clases de recarga elevadas, es decir, clases Alta y Muy Alta. Destaca el hecho de que estos tres acuíferos son los únicos que presentan clases de recarga Muy Alta, mientras que los porcentajes referidos a la clase Alta son claramente más elevados respecto al resto de acuíferos. Conforme disminuye el valor medio de recarga para cada acuífero disminuye la importancia de la clase de recarga Alta. Los acuíferos de Blanca y Mijas y los de Cabra, Rute y Horconera, que tienen unos valores de recarga en torno al 40 %, son los que destacan a continuación en cuanto a superficie con esta clase de recarga, mientras que en los acuíferos de las Cabras, Cazorla y María apenas tiene peso esta categoría de la recarga.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se han realizado estudios metodológicos para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos con dos objetivos fundamentales: por una parte, realizar una clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética para la estimación de la tasa de recarga media anual y, por otra, desarrollar un método nuevo que permita evaluar la recarga y establecer su reparto zonal en los acuíferos. Se pretende, además, que los resultados del proyecto sean aplicables con la información que suele haber en las bases de datos de los Organismos Públicos y, por tanto, que sean útiles en términos de planificación y gestión hidrológica.

Para llevar a cabo el proyecto se han seleccionado varios acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética representativos de la diversidad geográfica (localización, topografía), climática y geológica (litológica, estructural-tectónica y geomorfológica). De Oeste a Este, estos acuíferos son los siguientes: Sierra de las Cabras (Cádiz), Sierra de Líbar (Cádiz y Málaga), Sierra de las Nieves (Málaga), Sierras Blanca y Mijas (Málaga), Sierra Gorda de Loja (Granada), Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Córdoba), Sierra de Cazorla (Jaén) y Sierra de María (Almería).

En los acuíferos piloto seleccionados, a partir de datos previos y de los resultados obtenidos en el marco del proyecto, se estimó la recarga utilizando métodos convencionales (Turc, Coutagne, Thornwhite, balance de cloruros y método de Kessler). En la mayoría de los casos se han comparado entre sí los resultados obtenidos por diferentes métodos y se han contrastado con los volúmenes de agua que circulan por los acuíferos (entradas y salidas) e incluso se ha tenido en cuenta el funcionamiento hidrogeológico de éstos abordado en el volumen III de este informe.

A continuación, tras un análisis de la bibliografía existente, se ha llevado a cabo una selección de variables que intervienen en la recarga: precipitación, altitud, pendiente, litología, formas de absorción preferencial y suelo. Se trata de variables que están en bases de datos (archivos, informes técnicos, páginas *web*) de Organismos Públicos a las que se puede acceder con relativa facilidad. Se ha elaborado un mapa o capa de información de cada variable en un Sistema de Información Geográfica. Ello ha posibilitado cuantificar determinados parámetros topográficos, climáticos, geológicos, geomorfológicos y edafológicos a partir de los cuales se ha llevado un análisis

Estudio metodológico para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos

multivariante. Este tratamiento ha permitido constatar que las variables más influyentes en la recarga son la precipitación, la litología y las formas de absorción preferencial y que se pueden distinguir tres grandes tipos de acuíferos según la tasa de recarga:

- Acuíferos carbonáticos con elevada karstificación funcional: son acuíferos donde la precipitación es abundante, generalmente superior a 800 mm, la pendiente topográfica es baja en las partes altas de los afloramientos y en ellos existe gran abundancia de formas kársticas de absorción. Son los acuíferos que presentan la tasa de recarga más elevada de todos los estudiados (55% de la precipitación) pero presentan una rápida descarga porque tienen un mayor grado de karstificación funcional. Como ejemplos tipo se han considerado las sierras de Líbar, de las Nieves y Gorda de Loja, aunque los resultados obtenidos pueden ser extrapolables a otros macizos kársticos andaluces: Torcal de Antequera, Sierra de Grazalema, las sierras situadas al Oeste de Ronda (Blanquilla-Merinos) y algunos sectores de la Sierra de Segura.

- Acuíferos carbonáticos con moderada karstificación funcional: la precipitación es del orden de 600-800 mm. Se trata de macizos carbonáticos con una estructura fuertemente plegada y una pendiente importante, formados por dolomías alpujárrides en las que la infiltración se produce de forma lenta puesto que no existen formas exokársticas de absorción. Se trata de acuíferos con una tasa de recarga media anual del 40-45% de la precipitación. Los acuíferos tipo que se han considerado son las sierras de Yunquera, Mijas y Alfaguara. Además, en este grupo se pueden incluir los acuíferos formados por dolomías alpujárrides que afloran en los bordes de Sierra Nevada, Sierra Almirajara y las Sierras de Lújar y Gádor, así como otros acuíferos subbéticos del sur de las provincias de Córdoba (Sierra de Cabra, Rute-Horconera) y Jaén (Sierras de Pandera-Parapanda).

- Acuíferos carbonáticos fisurados y con escasa karstificación funcional: son acuíferos formados por calizas y dolomías fuertemente plegadas y fracturadas que dan lugar a relieves de elevadas pendientes, donde la escorrentía puede alcanzar valores relativamente importantes. En este tipo de acuíferos la precipitación puede variar entre 500 mm (Sierra María) y 850 mm (Sierra de las Cabras, Cádiz). Aparte de los acuíferos anteriores, a este tipo pueden atribuirse la Sierra de Cañete y Sierra Arana, entre otros.

El análisis de las descargas de estos sistemas muestra una gran inercia ante la recarga de las precipitaciones. Son acuíferos con bajo grado de karstificación funcional y gran poder regulador natural, donde la tasa de recarga es del orden de la tercera parte de las precipitaciones.

De esta clasificación se deduce que en los acuíferos carbonáticos considerados la tasa media anual de recarga varía entre un tercio de la precipitación y el 55 % de la misma dependiendo de las características topográficas, climáticas, geológicas, geomorfológicas y climáticas. Conocidas estas características, aunque sea de una manera general, en un acuífero carbonático de la Cordillera Bética se puede hacer una estimación de la tasa media de recarga anual.

Las variables consideradas son de naturaleza cualitativa (litología, áreas de absorción preferencial y suelos) y cuantitativa (altitud, pendiente y precipitación media). Dado que la recarga tiene carácter cuantitativo, las variables cualitativas se han transformado en variables cuantitativas mediante el establecimiento de rangos o clases a los que se han asignado puntuaciones para su posterior tratamiento. Así, de cada acuífero piloto, se han elaborado nuevos mapas (capas de información) de las distintas variables, atendiendo a las nuevas puntuaciones (Tablas 5.1 a 5.6). A partir de estos datos se han llevado a cabo varios ensayos sobre las distintas posibilidades de combinar dichas capas de información, de forma que la tasa de recarga obtenida fuera similar al valor medio anual calculado por técnicas convencionales y, además, se obtuviera una zonación de la recarga coherente con el conocimiento que se tiene de los acuíferos. Como la tasa de recarga se ha expresado en forma de porcentaje respecto de la precipitación, ha sido necesario eliminar esta variable del tratamiento.

Las variables que más influyen en que un determinado porcentaje de la precipitación media anual produzca recarga a un acuífero carbonático son, precisamente, el resto de variables consideradas en este proyecto: Altitud, Pendiente, Litología, formas de absorción o Infiltración preferencial y Suelo. Las iniciales de estas variables determinan el acrónimo APLIS que da nombre al nuevo método para evaluación de la recarga en acuíferos carbonáticos. La expresión propuesta en el método *APLIS* para estimar la tasa de recarga es la siguiente:

$$R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9$$

De esta manera, se obtienen valores de la tasa de recarga (R) que varían entre un mínimo de 8'88 % y un máximo de 88'8 % de la lluvia sobre el acuífero. El valor medio de la tasa de recarga (R) en cada acuífero se ha obtenido como la media de los valores de R correspondientes a cada una de las unidades espaciales del mapa de recarga. El mapa de recarga se representa a partir de los valores de R agrupados en cinco clases.

Después de numerosos ensayos realizados en el marco de este proyecto, el método APLIS es el único que ha permitido obtener unos valores de la tasa media de recarga anual similares a los valores de referencia, calculados y contrastados por técnicas convencionales, y, al mismo tiempo, obtener la zonación de la recarga. En los acuíferos piloto considerados el método ha dado resultados satisfactorios, pero será la aplicación que de él se haga en el futuro la que determinará su validez y/o las modificaciones que sean necesario introducir de cara a la optimización de los resultados. El método APLIS se convierte así en una herramienta potencialmente útil, relativamente sencilla y versátil, de interés en la planificación y gestión de los recursos hídricos porque permite evaluar la recarga y establecer su zonación a partir de información disponible en las bases de datos de las Administraciones Públicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, P. (1989): Estudio del Jurásico de un sector de la Sierra de Cazorla (Zona Prebética). Tesis de Licenciatura Univ. de Granada, 102 pp.
- Andreo, B. (1990): El Subbético Interno de las Sierras de María y Maimón (provincia de Almería). Tesis de Licenciatura Univ. de Granada, 89 pp.
- Andreo, (1997): Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España). Serv. Pub. Univ. de Málaga, 489 pp.
- Andreo, B. y Sanz de Galdeano, C. (1994): Structure of the Sierra de Mijas (Alpujarride Complex, Betic Cordillera). *Ann. Tectonicae*, 3(1):23-35.
- Andreo, B.; Carrasco, F. y Sanz de Galdeano, C. (1997): Types of carbonate aquifers according to the fracturation and the karstification in a southern Spanish area. *Environmental Geology*, 30(3/4): 163-173.
- Andreo, B.; Carrasco, F.; Durán, J.J.; Fernández, G.; Linares, L.; López-Geta, J.A.; Mayorga, R. and Vadillo, I. (2000): Hydrogeological investigations for groundwater exploitation in the Sierras Blanca and Mijas (Málaga, southern Spain). *Hydrogéologie*, 3: 69-83.
- Bouamama, M.; López Chicano, M. y Pulido Bosch, A. (1996): Comportamiento hidrogeoquímico estacional de los principales manantiales kársticos del Sur de Córdoba (Parque Natural de las Sierras Subbéticas). IV Simposio del Agua en Andalucía, Almería, 2:37-47
- Bayó, A.; Castiella, J.; Custodio, E.; Niferola, S. y Virgos, 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 en Euskadi, San Sebastián, 2:255-340.
- Blavoux, B.; Mudry, J. y Puig, J.M. (1992): Bilan, fonctionnement et protection du système de la Fontaine de Vaucluse (Sud-Est de la France). *Geodinamica Acta*, 5(3):153-172.
- Burillo, F.J. (1998): El karst del Torcal de Antequera. In: *Karst en Andalucía* (Durán J.J. Y López Martínez, J. Eds.), 153-164.
- Carreras, A. 1996. Investigación y explotación del acuífero de la Sierra de las Cabras (S. José del Valle, Cádiz). *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 9-21.
- Cardenal, J. (1993): Hidrogeología del sector Sierra de Lújar-Albuñol (provincia de Granada). Tesis Doct. Univ. de Granada, 402 pp.
- Carrasco, F.; Andreo, B. y Benavente, J. (1995): Chemistry of the water in the Nerja Cave system (Andalusia, Spain). *Int. Symposium Changing Karst Environments: Hydrogeology, Geomorphology and Conservation*, Huddersfield (Reino Unido). Abstract, 6-7.
- Castillo, E. y Padilla, A. (1993): Regulation possibilities for the La Hoz spring. In: *Some Spanish karst aquifers* (Pulido Bosch, A. *et al.*, Ed.), Univ. de Granada, 19-36.
- CHS (1992): Estudio hidrogeológico y de evaluación de recursos subterráneos en la zona de Alhaurín de la Torre (Málaga, Sierra de Mijas), 4 tomos.
- Custodio, E (1997): Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. In: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica* (Custodio *et al.*, Eds.). IAH-GE e ITGE, 19-39.
- Custodio, E (1998): Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero*, 109:13-29.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. -Eds- (1976): *Hidrología Subterránea*. Omega, Barcelona, 2359 pp.

- Custodio, E.; Llamas, M.R. y Samper, J. –Eds- (1997): La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. IAH-GE e ITGE, 455 pp.
- Chauve, P (1960-62): Structure Géologique de la Région Centrale de la Province de Cadix (Espagne). Memories hors de série de la Societe Geologique de France.
- Delannoy, J.J. (1987): Reconocimiento biofísico de Espacios Naturales de Andalucía. (Editado por Junta de Andalucía, Casa de Velazquez; Madrid.)
- Delannoy, J.J. (1998): Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las Serranías de Grazalema y de Ronda. El Karst en Andalucía, p. 93-129; Instituto Tecnológico Geominero de España; Madrid.
- Delannoy J.J. y Guendon (1986): La Sierra de las Nieves (Málaga). La Sima GESM. Karstologia Memoires, 1:71-85.
- Delgado, S.; Hidalgo, J.; Fernández Rubio y Valle M. del (1974): Características hidrogeológicas del embalse subterráneo de Sierra Gorda (provincia de Granada). Doc. Invest. Hidrol. Barcelona, 16:53-68.
- DGOH (1992): Recopilación de datos hidrogeológicos de la Unidad hidrogeológica Sierra Blanca-Sierra de Mijas.
- DPC (1984): Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz.
- DPM (1988): Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga, 151 pp.
- 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 p.
- Durán, J.J.; López Martínez J. y Vallejo, M. (1998): Distribución, caracterización y síntesis evolutiva del karst en Andalucía. In: Karst en Andalucía (Durán J.J. Y López Martínez, J. Eds.), 13-19.
- Dürr, S.H. (1967): Geologie der Sierra de Ronda und ihrer Südwestlichen Ausläufer (Andalusien). Tesis Univ. de Bonn, 122 pp.
- Felgueroso, C y Coma, J.E. (1967): Estudio hidrogeológico de la parte más meridional de la provincia de Córdoba. Área situada en las hojas de Lucena, Puente Genil, Baena y Montilla. Boletín Geológico y Minero, 78:48-91
- Fernández Rubio, R. y Delgado, J. (1975): Fisuración y kartificación del Torcal de Antequera (Málaga). Cuad. Geogr. Univ. Granada, Ser. Mon., 1:93-107.
- Fernández Rubio et al., (1981): Análisis de la fracturación y directrices estructurales en el acuífero kárstico del Torcal de Antequera (Málaga). SIAGA, 2:659-673.
- Foucault, A. (1971): Etude géologique des environs des sources du Guadalquivir (provincias de Jaen et de Granada, Espagne meridionale). Tesis Univ. Paris, 633 pp.
- García Hernández, M. (1978): El Jurásico terminal y Cretácico inferior en las Sierras de Cazorla y Segura. Tesis Univ. de Granada, 344 pp.
- Gea Pérez, D. (1997): Espeleología de la Comarca de Los Vélez. Revista Velezana, 16:63-86.
- González-Ramón, A. (2002): Consideraciones sobre el desarrollo kárstico en el Parque Natural de la Sierra de María-Los Vélez (provincia de Almería). In: Karst and Environment (Carrasco *et al.*, Eds.), 337-345.
- Hidalgo, J. (1974): Estudio hidrogeológico del polje de Zafarraya y zonas adyacentes (provincias de Granada y Málaga). Tesis de Licenciatura Univ. de Granada, 165 pp.
- IARA-IGME (1988): Estudio hidrogeológico de la Comarca de Los Vélez (Almería). Informe inédito, 212 pp.
- IGME (1983): Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España, Sistema Acuífero nº 38 (Mármoles de Sierra Blanca-Mijas). Informe técnico nº6, 2 tomos.

- IGME (1984): Estudios de investigación hidrogeológica para la regulación de los recursos hídricos subterráneos de la divisoria Guadalete-Guadiaro. 2 tomos.
- IGME (1985): Estudio del Sistema Acuífero nº 38 (Sierra Blanca-Sierra de Mijas). Hidrogeología, calidad y utilización del agua. 5 tomos.
- IGME, CEDEX, DGOH y DGPA (1995): Captaciones de aguas subterráneas en la Sierra de las Nieves. Análisis medioambiental y plan de investigación, 36 pp y 6 anexos.
- IGME-Universidad de Granada (1990): Investigación de acuíferos carbonatados (Sierras de Cazorla y Segura). Informe inédito, 253 pp, 4 anexos.
- IGME-DGOH (2001): Proyecto de Actualización de la Infraestructura Hidrogeológica de la unidades 05.01, 05.02, 07.07. Sierras de Cazorla, Segura y Quesada.
- ITGE (1990): Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja 1063. Algar. Madrid.
- ITGE (1992): Informe sobre la situación actual del acuífero carbonatado de Sierra Blanca-Sierra de Mijas (Málaga). Cuenca Sur. Nota técnica nº 389, 1 tomo.
- ITGE (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía.
- ITGE (1996): Funcionamiento hidrodinámico y regulación hidrogeológica del manantial de El Tempul (Cuenca del Guadalquivir, Cádiz). Informe realizado por IDRENA.
- ITGE (2000): Análisis del funcionamiento hidrogeológico y optimización del aprovechamiento de las aguas del manantial de El Tempul (acuífero de la Sierra de las Cabras, provincia de Cádiz).
- ITGE-ETSIM (1991): Programas de apoyo informático ala hidrogeología (PAI). Evaluación de aportaciones (HIDROBAS), Madrid, 34 pp.
- Jiménez, P., Andreo, B., Durán, J.J., Carrasco, F., López-Geta, J.A., Vadillo, I. y Vázquez, M. (2001): Estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul (Sierra de las Cabras, Cádiz, Sur de España). Boletín Geológico y Minero, 2: 85-101.
- Lerner, D.N.; Issar, A.S. y Simmers, I. (1990): Groundwater Recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. International Contributions to Hydrogeology. IAH, Vol. 8, Heise.
- Liñán, C., Jiménez de Cisneros, C., Caballero, E., Carrasco, F., y Andreo, B. (1999). Composición isotópica de las aguas de la Unidad Hidrogeológica Yunquera-Nieves (Provincia de Málaga). Geogaceta, 25: 127-130 p.
- Liñán. C; Carrasco, F. y Andreo, B. (2001): Consideraciones hidrogeológicas sobre el sistema acuífero de la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). V Simposio sobre el Agua en Andalucía, Almería, 2, 63-72.
- Liñán. C. (2003): Hidrogeología de Acuíferos Carbonatados en la Unidad Yunquera-Nieves (Málaga). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 317p.
- López Chicano, M. (1992): Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda (Granada y Málaga). Tesis Doct. Univ. de Granada, 387 pp.
- López Garrido, A.C. (1971): Geología de la Zona Prebética al NE de la provincia de Jaén. Tesis Univ. de Granada, 317 pp.
- López Rodríguez, J.J. (1997): Medida de la recarga por la lluvia: métodos instrumentales en parcelas y de trazadores. In: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica (Custodio *et al.*, Eds.). IAH-GE e ITGE, 111-124.
- López Vera, F.; Sáiz, J. (1975): Cálculo de la infiltración eficaz en materiales karstificados. Aplicación al macizo kárstico de Cabra (Córdoba). Tecniterrae, 32-41.

- Lupiani, E. y Soria, J. (1988): Mapa y memoria explicativa de la hoja 1025 (Loja) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000. IGME.
- Mangin, A. (1982): L'approche systématique du karst, conquences conceptuelles et méthodologiques. Reunión Monográfica Karst Larra, 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.
- Marín Marín, A.; Mediavilla, C.; López Segura, J.G. y Lupiani, E. (1996): Hidrogeología del Parque Natural de Sierra María-Los Vélez (Almería-España). IV Simposio del Agua en Andalucía, 1:281-283.
- Martín Algarra, A. (1987): Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental). Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 1171p.
- Martín Rosales, W.; Pulido Bosch, A. y Vallejos, A. (1995): Mecanismos generadores de escorrentía en la vertiente de Sierra Gádor (Almería). *Geogaceta*, 18:134-137.
- Martínez Garrido, J. C.; Moral Martos F.; Cruz San Julián, J.J.; Benavente Herrera, J.; Rubio Campos, J.C. y López Geta, J.A. (1991): Caracterización hidrogeológica de los acuíferos carbonatados de la sierra de Cazorla (Jaén). III Simposio del Agua en Andalucía, Vol I: 499-511. Córdoba.
- Mollat, H. (1968): Schichtfolge und tektonischer Bau der Sierra Blanca und ihrer Umgebung. *Geol. Jb.*, 86: 471-532.
- Moreno Calvillo, I. (1981): Contribución al conocimiento hidrogeológico de las Sierras de María y Maimón (provincia de Almería). Tesis de Licenciatura Univ. de Granada, 146 pp.
- Moreno Calvillo, I.; Pulido Bosch, A. y Fernández Rubio, R. (1983): Hidrogeología de las Sierras de María y del Maimón (Almería). *Boletín Geológico y Minero*, 44:321-338.
- Moreno Cayuela, F. (1983): Las aguas del Maimón-Sierra de María. Recursos y posibilidades de aprovechamiento en la vega de Los Vélez. *Revista Velezana*, 2: 67-76.
- Padilla, A. y Pulido Bosch, A. (1986): El programa EVADIA para la evaluación automática de la lluvia útil a nivel diario. II Simposio del Agua en Andalucía, Granada, 2: 631-636.
- Peyre, Y. (1974): Géologie d'Antequera et sa région (Cordillères Bétiques, Espagne). Tesis Publ. Inst. Agr. Paris, 528 pp.
- Pezzi, M. (1979): Análisis morfológico del Torcal de Antequera. *Jabega*, 26:54-65.
- Pistre, S.; Liñán, C.; Andreo, B.; Carrasco, F., Drogue, C. et 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.
- Pulido Bosch, A. -Ed.- (1993): Some Spanish karstic aquifers. Univ. de Granada, 310 pp.
- Pulido Bosch, J. y Benavente, J. (1986): Aplicación de la deconvolución al estudio de la descarga de el Torcal de Antequera. II SIAGA, 1:413-422.
- Pulido Bosch, A.; López Chicano, M. y Bouamama, M. (1996): Condiciones hidrogeológicas y explotación de los recursos hídricos en el entorno de Priego de Córdoba. *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 1:23-24.

- Rubio Campos, J. C.; González Ramón, A.; Pozo Gómez, M.; Lupiani Moreno, E.; Luque Espinar, J.A. y Gollonet, J.: Nuevos datos sobre la hidrogeología de la subunidad de Beas de Segura. Unidad 05.01 Sierra de Cazorla. V Simposio sobre el Agua en Andalucía, Almería, 2, 187-195.
- Samper, J. (1998): Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, 109: 347-370.
- Sanz de Galdeano, C. and Andreo, B. (1995): Structure of Sierra Blanca (Alpujarride Complex, West of the Betic Cordillera). *Estudios Geol.*, 51: 43-55.
- Sharma, M.L. -Ed.- (1990): *Groundwater Recharge*. Balkema.
- Thauvin, J.P. (1981): Alimentación y descarga del macizo kárstico del Torcal de Antequera (Málaga). *I SIAGA*, 1:379-386.
- Tubía, J.M. (1985): Sucesiones metamórficas asociadas a rocas ultramáficas en los Alpujarrides occidentales (Cordilleras Béticas, Málaga). Tesis Doct. Univ. País Vasco. In: *Bol. Geol. y Min.*, 99, (2, 3, 4, 5), 1988.