

# Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos

B. Andreo<sup>(1)</sup>, J. Vías<sup>(1)</sup>, J.A. López-Geta<sup>(2)</sup>, F. Carrasco<sup>(1)</sup>, J.J. Durán<sup>(2)</sup> y P. Jiménez<sup>(1)</sup>

(1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA).  
Facultad de Ciencias. Departamento de Geología. Universidad de Málaga. 29071 Málaga.  
E-mail: andreo@uma.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME).  
Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.  
E-mail: jj.duran@igme.es

## RESUMEN

El método APLIS permite determinar la tasa media de recarga anual en acuíferos carbonáticos, expresada como porcentaje de la precipitación, a partir de las siguientes variables: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), áreas de absorción-Infiltración preferencial (I) y Suelo (S). De cada variable se han establecido categorías o intervalos, a cada uno de los cuales se le asigna un valor entre 1 (mínima influencia en la recarga) y 10 (máxima influencia) y se han almacenado en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permite la superposición en el SIG de las capas de información correspondientes a las variables para calcular la tasa de recarga mediante la expresión  $R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9$  y obtener la distribución espacial de la misma. El método propuesto ha sido aplicado satisfactoriamente en ocho acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, con diferentes características climáticas, geológicas, geomorfológicas, topográficas, edafológicas e hidrogeológicas. En este sentido se considera que el método APLIS puede ser especialmente aplicable en acuíferos carbonáticos de las cordilleras alpinas perimediterráneas.

Palabras clave: acuífero carbonático, método APLIS, recarga, Sistema de Información Geográfica

## ***Methodological approach for recharge assessment in carbonate aquifers***

### ABSTRACT

*APLIS is a method for determining the average rate of recharge in carbonate aquifers, expressed as a percentage of precipitation, using the following variables: Altitude (A), Slope (P), Lithology (L), preferential Infiltration layers (I) and Soil (S). Categories or intervals for each variable have been established, which vary between 1 (minimal influence in recharge) and 10 (maximum influence) and they have been displayed in a Geographical Information System. This permits us to superimpose the layers of all variables and thus to obtain the map of spatial distribution of the recharge rate and its mean value within the whole aquifer by means of the equation  $R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9$ . The proposed method has been successfully tested in eight pilot carbonate aquifers of the Betic Cordillera, which are representative of a wide range of characteristics in terms of their climate, geology, geomorphology, topography, edaphology and hydrogeology. In this respect, the APLIS method can be considered especially suitable for application to carbonate aquifers in peri-Mediterranean Alpine ranges.*

*Key words: APLIS method, carbonate aquifer, Geography Information System, recharge*

## Introducción

En la mayor parte de las investigaciones hidrogeológicas suele ser necesario estimar la recarga, es decir la cantidad de agua (generalmente de lluvia) que entra en un acuífero, como paso previo al establecimiento del balance hidrológico (entradas y salidas) del mismo. La recarga de un acuífero se suele expresar como el volumen medio anual de agua que entra en el acuífero, lo que generalmente se han denomi-

nado entradas o recursos medios anuales, o bien en forma de porcentaje respecto a la precipitación, también llamada tasa de recarga o infiltración eficaz.

La recarga de los acuíferos es una cuestión que se trata, de modo general, en distintos manuales de Hidrogeología (Custodio y Llamas, 1976; Freeze y Cherry, 1979) y, de modo más específico, en varias monografías (Lerner *et al.*, 1990; Sharma, 1990; Custodio *et al.*, 1997) que incluyen información detallada sobre la estimación de la recarga en distintas

circunstancias climáticas e hidrológicas. Una referencia importante y reciente es el volumen 10(1) de la revista *Hydrogeology Journal*, titulado *Groundwater Recharge*, en el que se abordan aspectos fundamentales de la recarga, aplicación de métodos para su cuantificación y el uso de la modelización. De acuerdo con Lerner *et al.* (1990) una de las condiciones que deben cumplir los métodos de estimación de la recarga es que sean fáciles de aplicar; si el método utiliza gran cantidad de datos e información muy especializada, difícilmente podrá aplicarse fuera del ámbito de la investigación. En este sentido, resulta especialmente interesante el trabajo de Civita y De Maio (2001), que calcularon la recarga en el acuífero del Monte Fenera (Prealpes italianos) mediante la utilización de un SIG.

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 los balances hidrogeológicos. En algunos acuíferos de la Cordillera Bética, los cálculos originales han sido precisados en posteriores informes técnicos del IGME y en los trabajos de diferentes investigadores (López Chicano, 1992; Cardenal, 1993; Pulido-Bosch, 1993; Andreo, 1997; Liñán, 2003, entre otros). Sin embargo, en la mayoría de los acuíferos, las estimaciones originales de recarga hechas en el PIAS, generalmente expresadas en forma de porcentaje respecto a la precipitación, se han aplicado después de una manera indiscriminada.

En este trabajo, complemento de otro publicado en este volumen (Durán *et al.*, 2004), se presentan resultados de un estudio (IGME-GHUMA, 2003) sobre la recarga en varios acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética (Fig. 1). El objetivo fundamental es desarrollar un método sencillo que permita: (1) estimar la tasa de recarga a los acuíferos carbonáticos (expresada en porcentaje de precipitación) mediante la combinación de diferentes variables (geológicas, geográficas, morfológicas y edafológicas), fácilmente disponibles en las bases de datos de las Administraciones Públicas; y (2) establecer el reparto zonal de la recarga en los acuíferos.

### Planteamiento metodológico

Se han considerado ocho acuíferos de la Cordillera Bética de los que se conoce bien la tasa media de recarga anual (expresada como porcentaje de la precipitación), en la mayoría de los casos deducida por diferentes métodos y contrastada con la descarga

que se produce en cada acuífero. Así, para una serie de años suficientemente larga y en condiciones naturales, el valor medio de la recarga (entradas) es igual a la descarga del sistema acuífero.

De Oeste a Este, los acuíferos seleccionados son: Sierra de las Cabras (Cádiz), Sierra de Líbar (Cádiz y Málaga), Sierra de las Nieves (Málaga), Sierras Blanca y de Mijas (Málaga), Sierra Gorda de Loja (Granada), Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Córdoba), Sierra de Cazorla (Jaén) y Sierra de María (Almería). En estos acuíferos afloran calizas y dolomías, y sus equivalentes metamórficos, implicados en estructuras geológicas plegadas y falladas. Igualmente el desarrollo del modelado kárstico varía desde acuíferos con gran abundancia de formas exokársticas y endokársticas a otros en los que son poco importantes. Por lo que respecta al clima, los acuíferos seleccionados cubren prácticamente el rango de variación de las precipitaciones en Andalucía, concretamente desde 1300 mm en la parte occidental hasta 500 mm en la parte oriental. En lo relativo a la topografía, aunque todos podrían considerarse acuíferos de montaña, como corresponde a una cordillera alpina fuertemente afectada por la neotectónica, se han seleccionado acuíferos con una topografía particularmente abrupta y acuíferos que, aún presentando unas laderas con pendiente relativamente importante, tienen en su parte alta una forma más o menos plana de tipo "plateau". Por tanto, los acuíferos seleccionados son representativos de un amplio abanico de las características geológicas, climáticas, topográficas, geomorfológicas y edafológicas que concurren en la Cordillera Bética y en otros dominios de las cadenas alpinas perimediterráneas.

Por otra parte, se dispone de información relativa a las diferentes variables que condicionan la recarga. La información procede de las bases de datos de diversos Organismos Públicos (en este caso de la Junta de Andalucía y del Instituto Geológico y Minero de España), a las que cualquier usuario puede acceder. De cada variable se ha elaborado una capa de información que se ha introducido en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se ha realizado un análisis previo de la información (Durán *et al.*, 2004), que ha permitido constatar cuáles son las variables influyentes en la recarga: precipitación, altitud, pendiente, litología, formas de infiltración preferencial y suelo. Dado que se pretende obtener un algoritmo para calcular la tasa de recarga expresada en forma de porcentaje con respecto a la precipitación, no se ha considerado la capa de información correspondiente a dicha variable, aunque es bien sabido que la distribución de las precipitaciones suele estar muy condicio-

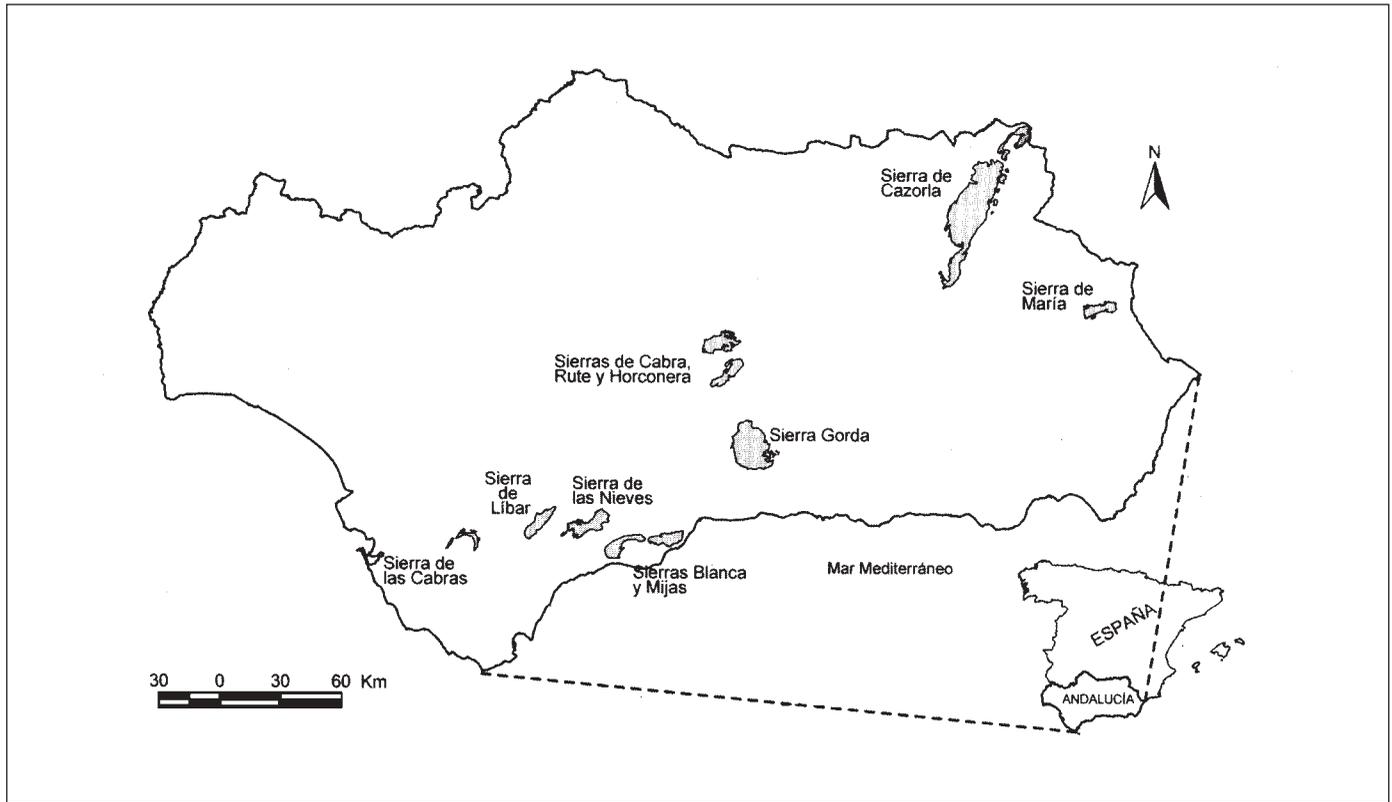


Fig. 1. Situación geográfica de los ocho acuíferos piloto estudiados en este trabajo  
Fig. 1. Geographical location of the eight pilot aquifers studied in this work

nada por la altitud y, en este sentido, la variable "precipitación" podría considerarse incluida en la variable "altitud". En cualquier caso, se asume que la recarga media anual será siempre proporcional a la precipitación y, por tanto, se trata de conocer la constante de proporcionalidad para cada acuífero, en función de variables intrínsecas del mismo: Altitud, Pendiente, Litología, Infiltración (formas de absorción preferencial) y Suelo. Las iniciales de dichas variables determinan el acrónimo que da nombre al método APLIS.

A continuación se enumeran las fuentes y algunas de las herramientas informáticas utilizadas para obtener las capas de información de dichas variables. La Altitud (A) se ha obtenido a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) del Instituto de Cartografía de Andalucía, considerando un tamaño de celda de 100 m. La misma fuente ha sido utilizada para el mapa de Pendientes (P); en Arcgis 8.2 se ha establecido una red irregular de triángulos correspondientes a unidades homogéneas de los diferentes intervalos de pendiente. La Litología (L) procede de la digitalización, en Autocad 14, de las hojas del mapa geológico nacional, a escala 1:50.000, elaborado por el IGME; posteriormente se han utilizado Arcgis 8.2 y Arcview 3.2

para elaborar la capa de información. El mapa de áreas preferenciales de infiltración (I) se ha obtenido de la cartografía geomorfológica, a escala 1:50.000; cuando no existía cartografía geomorfológica se han superpuesto los mapas de las dos variables anteriores en Arcview 3.2 y se han realizado reconocimientos sobre fotos aéreas y/o de campo para delimitar las zonas donde predominan las formas exokársticas mayores de absorción. El mapa de Suelos (S) procede del Sistema de Información Ambiental de Andalucía (Sinamb-A); se ha georreferenciado en Autocad 14 y, posteriormente, se han utilizado Arcgis 8.2 y Arcview 3.2 para generar la capa de información correspondiente a esta variable.

Dado que se conoce bien la tasa media de recarga anual de los acuíferos seleccionados y se dispone de las capas de información correspondientes a las variables intrínsecas que condicionan la recarga, se ha desarrollado un sistema de puntuaciones para crear el mapa de cada variable y se han aplicado diferentes procedimientos de combinación de dichas capas de información hasta llegar a obtener un único algoritmo de cálculo, que permita obtener el valor medio de la tasa de recarga y una zonación de ésta en

cada uno de los acuíferos. La distribución espacial de la recarga en los acuíferos se obtiene mediante superposición de las capas de información en un SIG (Fig. 2), concretamente en la versión 8.2 de Arcgis. Las herramientas utilizadas han sido la intersección de capas de información (comando *intersect* de Arcgis) y la creación de unidades homogéneas mediante la eliminación de fronteras entre polígonos con igual tasa de recarga (comando *dissolve* de Arcgis). El cálculo de la tasa de recarga se ha realizado en Arcview 3.2. dado que permite, de forma rápida y eficaz, manejar bases de datos y realizar operaciones de cálculo.

**Puntuación de las variables para generar las capas de información en el SIG**

De las cinco variables que utiliza el método APLIS, tres son de naturaleza cualitativa (Litología, zonas preferenciales de Infiltración y Suelo) y dos son cuantitativas (Altitud y Pendiente). Como 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 mapas (capas de información) relativos a cada variable, considerando los valores que se muestran a continuación en las tablas 1 a 5.

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. Siempre que ha sido posible se han establecido 10 clases, de forma que a cada categoría le corresponde una puntuación entre los valores 1 y 10.

La Altitud (Tabla 1) se ha dividido en clases que siguen una progresión aritmética de diferencia 1, de manera que conforme aumenta la altitud, aumenta la precipitación y 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.

Las puntuaciones asignadas a la Pendiente (Tabla 2) 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). Dado que en la versión del Sinamb-A utilizada había nueve clases o categorías de pendiente, en la tabla 2 se ha optado por suprimir la puntuación 6. Por encima del 100% de pendiente, se ha considerado que la recarga no sufre variaciones y es mínima.

La asignación de valores a las distintas Litologías se ha efectuado en función de criterios hidrogeológicos (Tabla 3). Dado que el método APLIS está concebido para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos, las puntuaciones entre 5 y 10 se atribuyen según el grado de fisuración y karstificación. Así, conforme aumenta el grado de fracturación y/o karstificación aumenta la recarga del acuífero.

La puntuación asignada a la variable relativa a las zonas de Infiltración preferencial únicamente presenta dos clases (Tabla 4): valor 10 para las zonas que son áreas preferenciales de absorción y valor 1 para el resto. Sólo se han distinguido estas dos clases extremas porque no se disponía para todos los acuíferos de cartografías geomorfológicas adecuadas. Por el contrario, es relativamente sencillo distinguir, a partir de fotografías aéreas y reconocimientos de campo, las áreas con formas kársticas mayores, donde predomina la infiltración.

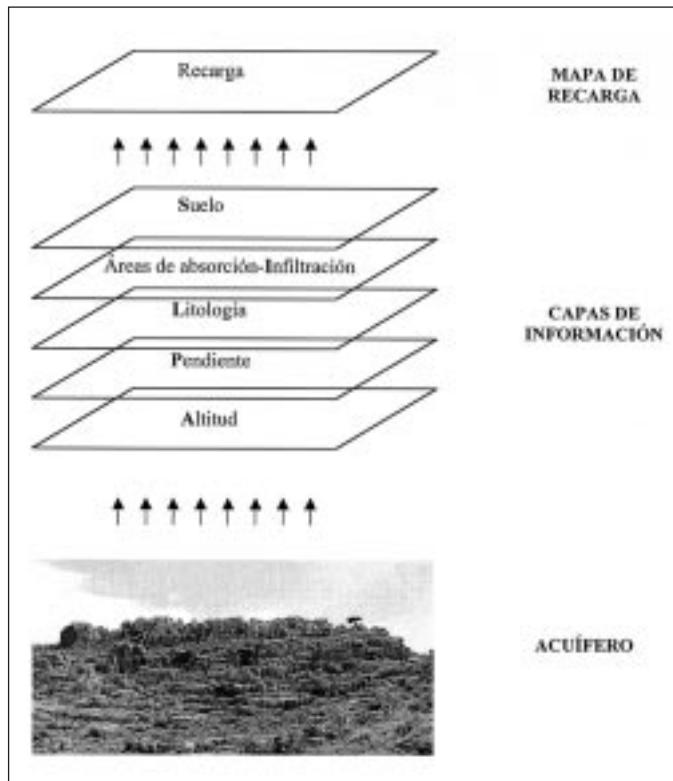


Fig. 2. Esquema conceptual de superposición cartográfica según el método APLIS  
 Fig. 2. Conceptual frame of superposition after the APLIS method

Altitud (m)	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 1. Puntuación de la variable Altitud  
Table 1. Rating for parameter Altitud

Pendiente (%)	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 2. Puntuación de la variable Pendiente  
Table 2. Rating for parameter Slope

Litología	Puntuación
Calizas y dolomías karstificadas	10, 9
Calizas y dolomías fracturadas, algo karstificadas	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 3. Puntuación de la variable Litología  
Table 3. Rating for parameter Lithology

Infiltración-absorción preferencial	Puntuación
Abundantes formas de infiltración preferencial	10
Escasas formas de infiltración preferencial	1

Tabla 4. Puntuación de la variable formas de Infiltración  
Table 4. Rating for parameter Infiltration features

En el caso del Suelo, las distintas clases se han agrupado en función de las características generales de espesor y textura que predominan en sus horizontes, de acuerdo con el Sinamb-A. Así, en suelos poco

evolucionados como los leptosoles (Tabla 5), generalmente con escaso espesor y textura muy gruesa, la recarga es máxima (puntuación 10), mientras que en suelos que suelen ser potentes y arcillosos (vertisoles crómicos), la recarga es mínima (puntuación 1).

### Algoritmo de cálculo de la recarga

Las capas de información correspondientes a cada variable, elaboradas según el sistema de rangos y puntuaciones previamente descrito, se han combinado mediante diferentes procedimientos matemáticos (IGME-GHUMA, 2003). El objetivo es encontrar un único algoritmo que permita calcular la tasa de recarga previamente obtenida en todos los acuíferos mediante técnicas convencionales y determinar la distribución espacial de la recarga en dichos acuíferos.

Se han aplicado varios métodos multicriterio como la sumatoria lineal ponderada, el análisis de distancia al punto ideal, que había dado buenos resultados en un trabajo reciente (Vías et al., 2002), y métodos de análisis de regresión (ajuste lineal por mínimos cuadrados). De la sumatoria lineal ponderada se han realizado varias combinaciones en los ocho acuíferos piloto. En la tabla 6 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos después de aplicar diferentes posibilidades de combinación de las capas. Como se puede apreciar, la expresión del método APLIS es la que permite obtener valores de la tasa de recarga más parecidos a los calculados previamente por técnicas convencionales.

La expresión del método APLIS para estimar la tasa de recarga es la siguiente:

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

Suelo	Puntuación
Leptosoles	10
Arenosoles álbicos y Xerosoles cálcicos	9
Regosoles calcáreos y Fluvisoles	8
Regosoles eútricos, dístricos y Solonchaks	7
Cambisoles cálcicos	6
Cambisoles eútricos	5
Histosoles eútricos y Luvisoles órticos y cálcicos	4
Luvisoles crómicos	3
Planosoles	2
Vertisoles crómicos	1

Tabla 5. Puntuación de la variable Suelo  
Table 5. Rating for parameter Soil

Acuífero \ Método	Recarga estimada previamente	Sumatoria lineal ponderada			Distancia punto ideal	Análisis Regresión	
		Método APLIS	Prueba [A]	Prueba [B]			Prueba [C]
Sierra Cabras	33	36	48	46	52	33	46
Sierra Líbar	55	52	60	60	64	40	54
Sierra Nieves	55	54	55	50	57	38	50
Blanca y Mijas	45	43	50	44	51	32	42
Sierra Gorda	55	53	57	52	56	38	45
Cabra y Rute	45	40	48	43	50	34	44
Sierra Cazorla	33	32	47	42	48	33	43
Sierra María	33	38	50	43	48	35	43

Tabla 6. Valores de la tasa de recarga, expresados como porcentaje de precipitación obtenidos mediante diferentes procedimientos  
 Table 6. Values of the recharge rate, as percentage of precipitation, obtained from different approaches

La ponderación de cada variable en la expresión anterior trata de responder a la importancia que ejerce cada una de ellas sobre la recarga, de acuerdo con los resultados del análisis previo de las variables que influyen en la recarga (Durán *et al.*, 2004). 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. Al dividir por 0'9, 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; es decir, siempre hay algo de recarga y nunca la recarga es del 100% de la precipitación. 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 tasa media de recarga anual se representa agrupada en cinco intervalos regulares, a cada uno de los cuales se le asigna una categoría (Tabla 7).

La expresión matemática del método APLIS es la única que permite obtener valores de la tasa de recarga coherentes con los que se habían determinado por técnicas convencionales en todos los acuíferos y, además, permite obtener una zonación de la recarga en los mismos.

**Aplicación del método APLIS a los acuíferos seleccionados**

**Cálculo de la tasa de recarga**

En la tabla 6 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. Si se exceptúan los acuíferos de la Sierra de María y de las Sierras de

Cabra y Rute-Horconera, donde las diferencias llegan al 5%, en el resto de acuíferos las diferencias entre los valores calculados con el método APLIS y los valores de referencia desciende a valores que no superan el 3%.

En general, la tasa de recarga calculada mediante el método APLIS es ligeramente superior en los acuíferos con menor tasa de recarga conocida (Sierra de las Cabras, Sierra de María y Sierra de Cazorla), aunque continúa siendo inferior al 40% de la precipitación en todos los casos. Sin embargo, en los acuíferos con una mayor tasa de recarga (Sierra de Líbar, Sierra Gorda y Sierra de las Nieves) los valores obtenidos con el método APLIS son algo inferiores a los calculados previamente con técnicas convencionales, pero siempre superiores al 50% de la precipitación.

**Distribución espacial de la recarga**

Además de calcular la tasa de recarga, el método APLIS permite obtener los mapas de distribución de la misma (Figs. 3 a 10) en cada acuífero.

En la Sierra de las Cabras (Fig. 3) la tasa de recarga predominante es de clase Baja. Las áreas de

Intervalos de Recarga (% P) Método APLIS	Clase recarga
≤ 20	Muy Baja
20-40	Baja
40-60	Moderada
60-80	Alta
> 80	Muy Alta

Tabla 7. Categorías de la tasa de recarga según el método APLIS  
 Table 7. Ratings of the recharge rate for the APLIS method

mayor recarga, clase Alta, se localizan en el sector sur de la Sierra del Valle donde existen zonas de infiltración preferencial. La superficie del acuífero que tiene una recarga de clase Moderada está condicionada por la presencia de afloramientos calizos fisurados con poca pendiente en los sectores más elevados de la sierra. La clase Muy Baja ocupa una superficie muy similar a la clase Alta y está caracterizada por la presencia de materiales de baja permeabilidad (arcillas, margas y margocalizas).

En la Sierra de Líbar (Fig. 4) predomina la clase de recarga Moderada pero, principalmente, destaca la presencia de zonas con recarga Alta o Muy Alta debido a la elevada karstificación de los materiales carbonáticos, que presentan abundantes formas de infiltración o absorción preferencial. Los sectores con una clase de recarga Baja y Muy Baja son aquellos en los que afloran materiales de baja permeabilidad (margas y margocalizas), sobre los que se desarrollan suelos.

La Sierra de las Nieves (Fig. 5) tiene características muy similares a la Sierra de Líbar, de manera que se observan zonas de recarga Alta y Muy Alta sobre rocas carbonáticas karstificadas con abundantes formas de absorción preferencial (p.e. llanos de la Nava, Torrecilla). El resto del acuífero tiene una recarga Moderada, a excepción de pequeños sectores del borde donde la presencia de materiales de baja permeabilidad (esquistos y peridotitas) disminuye la recarga hasta las clases Baja y Muy Baja.

En las Sierras Blanca y de Mijas (Fig. 6) las zonas de mayor recarga se localizan en los sectores central

y oriental de Sierra Blanca, constituidos por mármoles triásicos muy fisurados sobre los que se desarrollan áreas de infiltración preferencial (Llanos de Juanar, Pula y Coín). Las áreas con una recarga Moderada se localizan en los sectores de mayor altitud, donde afloran los mármoles desprovistos de suelo. En el resto, hay menor recarga debido a la menor altitud, la presencia de suelos y la existencia de materiales pliocuaternarios de baja permeabilidad.

En la Sierra Gorda de Loja (Fig. 7) la mayor recarga se produce en la parte central del acuífero, sector más elevado del macizo, donde abundan las formas de absorción preferencial (campos de dolinas). En el resto del acuífero predomina la clase de recarga Moderada y, allí donde la pendiente de las rocas karstificadas es baja, la recarga aumenta hasta la clase Alta. Las clases Baja y Muy Baja se corresponden con la presencia de materiales margosos y coluviales.

En las Sierras de Cabra y Rute-Horconera (Fig. 8) la clase de recarga predominante es Moderada, debido a la presencia de afloramientos carbonáticos karstificados que están cubiertos por suelos cámbicos y/o regosoles. Solamente 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 carbonáticos, 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.

La Sierra de Cazorla (Fig. 9) es el sistema con

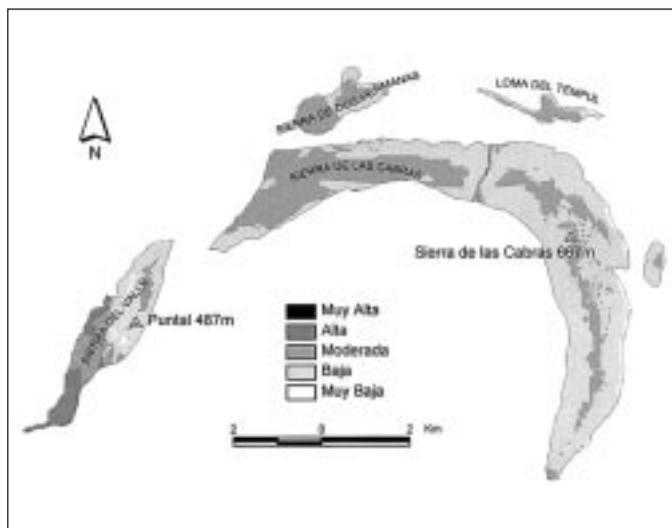


Fig. 3. Mapa de recarga de la Sierra de las Cabras  
Fig. 3. Recharge map of the Sierra de las Cabras

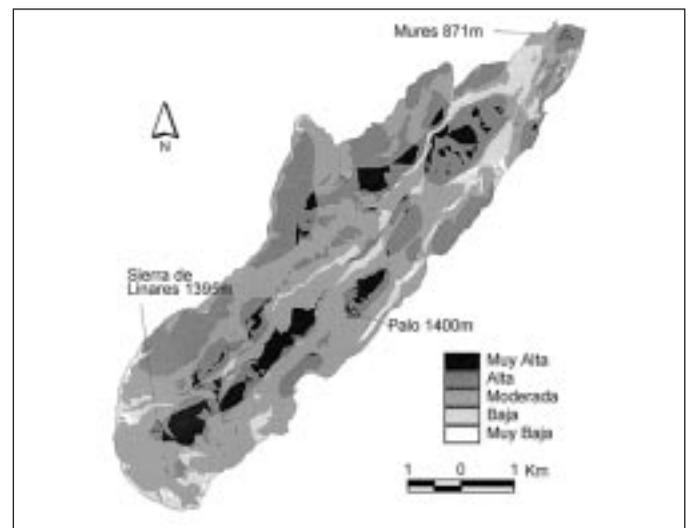


Fig. 4. Mapa de recarga de la Sierra de Líbar  
Fig. 4. Recharge map of the Sierra de Líbar

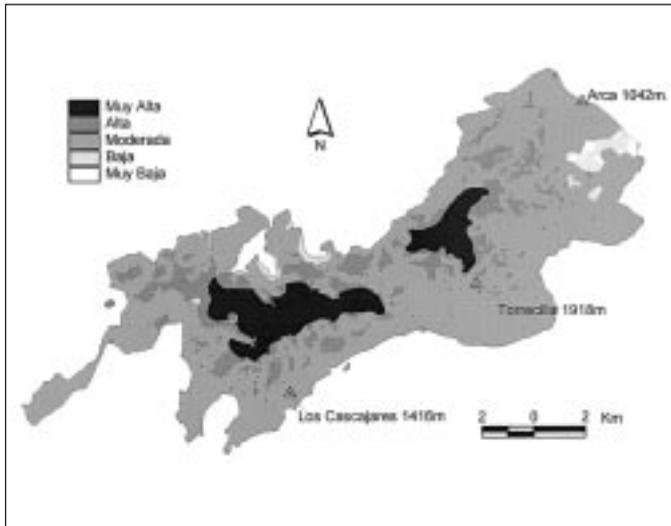


Fig. 5. Mapa de recarga de la Sierra de las Nieves  
Fig. 5. Recharge map of the Sierra de las Nieves

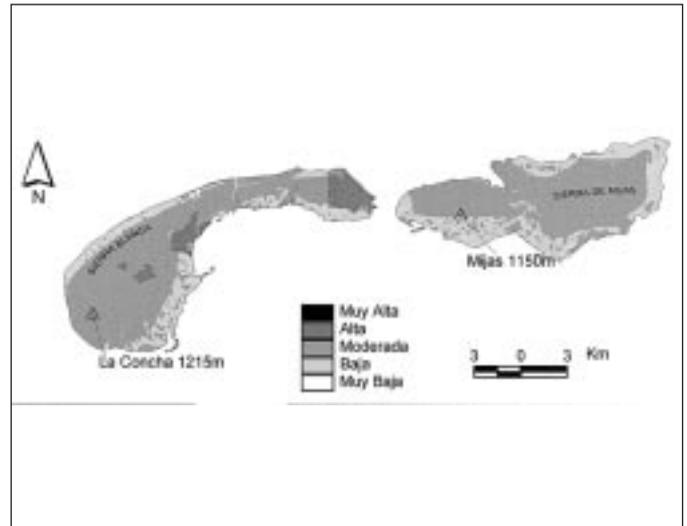


Fig. 6. Mapa de recarga de las Sierras Blanca y de Mijas  
Fig. 6. Recharge map of the Sierras Blanca and de Mijas

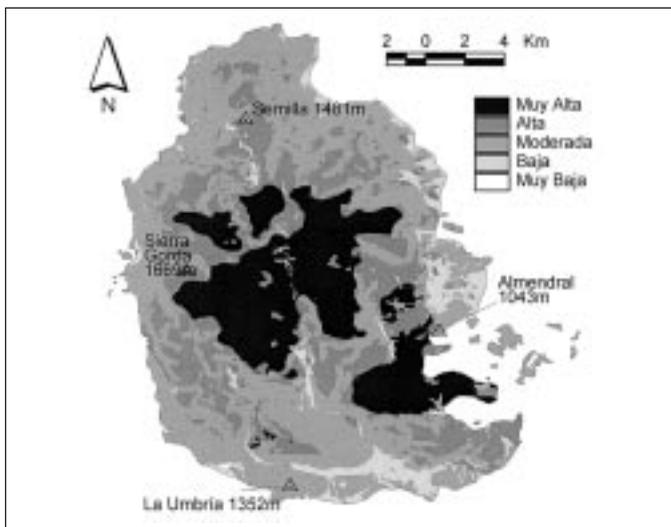


Fig. 7. Mapa de recarga de la Sierra Gorda de Loja  
Fig. 7. Recharge map of the Sierra Gorda de Loja

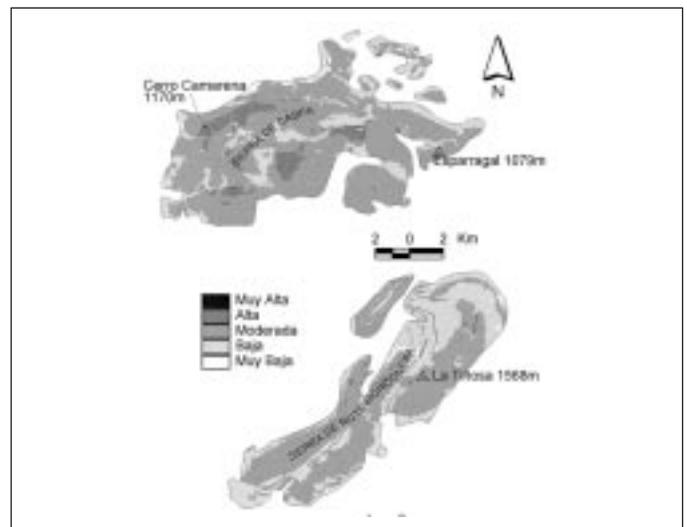


Fig. 8. Mapa de recarga de las Sierras de Cabra y Rute-Horconera  
Fig. 8. Recharge map of the Sierras Cabra and Rute-Horconera

menor tasa de recarga debido a la presencia de rocas dolomíticas fisuradas, lo que condiciona que la clase de recarga predominante sea Baja. La clase Moderada se encuentra en zonas elevadas, con baja pendiente dentro de los afloramientos carbonáticos. La clase Muy Baja está asociada a los afloramientos de materiales margosos de baja permeabilidad.

En la Sierra de María (Fig. 10) la recarga es, principalmente, de clase Baja y Moderada. Las áreas de recarga Moderada abarcan afloramientos carbonáticos sin cubierta edáfica, poco karstificados, principalmente en el sector septentrional de la sierra. Las

zonas con recarga de clase Alta se localizan en la parte occidental de la sierra donde la pendiente es baja y puede existir infiltración a través de algunas formas de absorción preferencial. Con recarga Muy Baja se encuentra un pequeño sector donde existen margocalizas con suelos cámbicos.

En resumen, la mayoría de los acuíferos estudiados presentan una tasa media anual de recarga de clase Moderada, a excepción de los acuíferos de Sierra de Cazorla, Sierra de las Cabras y Sierra de María donde la recarga predominante es de clase Baja. También se observa que los valores de mayor

tasa de recarga (clase Muy Alta) sólo se localizan en aquellos acuíferos que tienen una tasa media de recarga superior al 50% (Sierras de Líbar, Nieves y Gorda).

## Conclusiones

El método APLIS permite estimar la recarga media anual de los acuíferos carbonáticos, expresada como porcentaje de la precipitación, a partir de la combinación de variables intrínsecas de los mismos (Altitud, Pendiente, Litología, formas de Infiltración y Suelos). El método se ha desarrollado a partir de los trabajos efectuados en ocho acuíferos carbonáticos representativos de la diversidad climática y geológica de la Cordillera Bética.

En cada acuífero se ha elaborado un mapa o capa de información para cada una de las variables antes citadas utilizando, básicamente, las siguientes aplicaciones informáticas: Autocad 14, Arcgis 8.2 y Arcview 3.2. Todas las capas de información se han almacenado en un Sistema de Información Geográfica, lo cual permite la superposición de las mismas para llegar a obtener el valor medio de la recarga en el conjunto del acuífero y también el mapa de distribución espacial de ésta.

La expresión del método APLIS para estimar la tasa de recarga es la siguiente:

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

Los valores de la recarga obtenidos por este método en los ocho acuíferos son similares a los calculados previamente por otros métodos, cuyo valor de recarga se había contrastado con el de descarga, lo cual refuerza la validez del método. Las diferencias entre los valores previos de referencia y los calculados por el método APLIS no superan el 5%. En los acuíferos con menor tasa de recarga el método APLIS estima valores de recarga ligeramente superiores a los originales, mientras que en los acuíferos con mayor tasa de recarga se obtienen valores algo más bajos con este método. Es decir, el método tiene una ligera tendencia a disminuir el rango regional de valores de la recarga.

A diferencia de los otros métodos de estimación de la recarga, el método APLIS permite establecer la distribución espacial de la tasa de recarga en los acuíferos según las características de los mismos. Este aspecto es fundamental para una adecuada gestión y protección del agua subterránea, tanto de la cantidad como de la calidad. En los acuíferos considerados predomina la tasa de recarga Moderada y los únicos acuíferos en los que se ha detectado la clase Muy Alta son aquellos cuya tasa de recarga es superior al 50% de la precipitación.

El método APLIS es una herramienta diseñada para trabajar con bases de datos fácilmente accesibles de diversos Organismos Públicos, con lo cual se

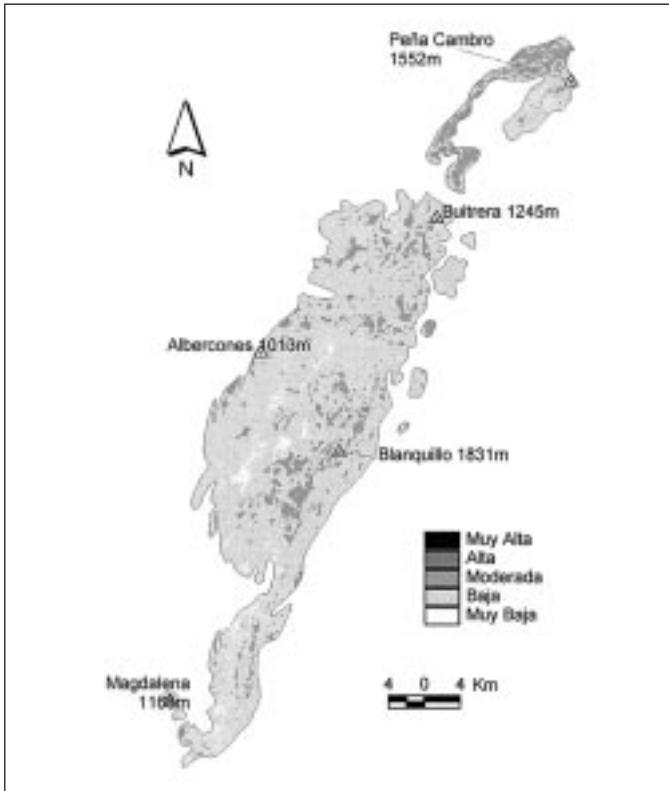


Fig. 9. Mapa de recarga de la Sierra de Cazorla  
Fig. 9. Recharge map of the Sierra de Cazorla

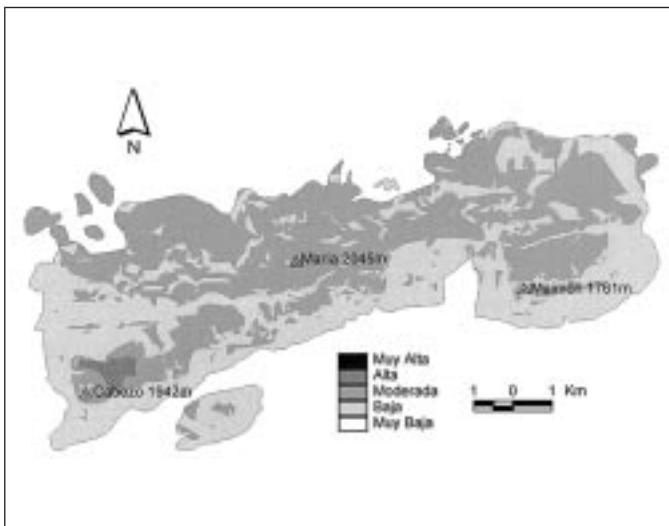


Fig. 10. Mapa de recarga de la Sierra de María  
Fig. 10. Recharge map of the Sierra de María

agiliza la aplicación de esta metodología y se reducen los costes asociados a su implantación en un sistema de gestión de los recursos naturales.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio de Colaboración existente entre la Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Es una contribución a los Proyectos REN2002-01797/HID y REN2003-01580/HID de la DGI e IGCP-448 de la UNESCO y al Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía.

### Referencias

- Andreo, B. 1997. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en las Sierras Blanca y Mijas (Cordillera Bética, Sur de España)*. Serv. Pub. Univ. de Málaga, 489 pp.
- Cardenal, J. 1993. *Hidrogeología del sector Sierra de Lújar-Albuñol (provincia de Granada)*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 402 pp.
- Civita, M. y De Maio, M. 2001. Average groundwater recharge in carbonate aquifers: a GIS processed numerical model. *7<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*, Besançon, 93-100.
- 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.
- Durán J.J, Andreo B., Vías J., López-Geta J.A., Carrasco F. y Jiménez P. 2004. Clasificación de acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética según la tasa de recarga. *Boletín Geológico y Minero*, 115, 2, 199-212.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood, New Jersey.
- IGME-GHUMA 2003. *Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos: aplicación a la Cordillera Bética*. 3 tomos.
- 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. 2003. *Hidrogeología de Acuíferos Carbonatados en la Unidad Yunquera-Nieves (Málaga)*. Tesis Doct. Univ. de Granada, 317 pp.
- López Chicano, M. 1992. *Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda (Granada y Málaga)*. Tesis Doct. Univ. Granada, 387 pp.
- Pulido Bosch, A. -Ed.- 1993. *Some Spanish karstic aquifers*. Univ. de Granada, 310 pp.
- Sharma, M.L. -Ed.- 1990. *Groundwater Recharge*. Balkema.
- Vías, J., Perles, M.J. y Andreo, B. 2002. Aplicación de un análisis cluster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. *X Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, Valladolid*.

Recibido: diciembre 2003

Aceptado: mayo 2004