

ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL MÉTODO APLIS EN EL ACUÍFERO JURÁSICO DE EL MAESTRAZGO (CASTELLÓN, NE ESPAÑA)

B. Andreo ⁽¹⁾, J.M. Vías ⁽¹⁾, M. Mejías ⁽²⁾, B.J. Ballesteros ⁽²⁾ y A.I. Marín ⁽¹⁾

(1) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (GHUMA). Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. E-29071, Málaga, España. andreo@uma.es, jmvias@uma.es, aimarin@uma.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España, m.mejias@igme.es, b.ballesteros@igme.es

RESUMEN

Se ha aplicado el método APLIS en un área de 2400 km² situada en El Maestrazgo (NE de España). El acuífero carbonatado jurásico es el más importante de la zona, aunque existen acuíferos carbonatados cretácicos y otros de naturaleza detrítica, de menor entidad. La recarga del acuífero jurásico se produce, principalmente, por infiltración directa del agua de lluvia, así como por el drenaje de las formaciones acuíferas detríticas y carbonatadas cretácicas y de los materiales de baja permeabilidad suprayacentes. Gran parte de la descarga se realiza directamente al mar, lo cual dificulta conocer la magnitud de la misma y contrastar la cifra de recursos hídricos medios anuales. La aplicación del método APLIS ha permitido estimar la tasa media de recarga anual, la distribución espacial de la misma y evaluar los recursos hídricos medios anuales para toda el área de estudio. La tasa media de recarga anual o infiltración eficaz es del 32% de la precipitación total, con una variación espacial que depende de la altitud, pendiente, litología, formas de infiltración y suelos de la zona. Así, por ejemplo, en los afloramientos del acuífero carbonatado jurásico la tasa de recarga media es del 45%. Los recursos medios anuales estimados son de 420 hm³/año. Los resultados calculados son coherentes con los obtenidos por otras técnicas convencionales (balance de Thornthwaite, balance de Cloruros), aunque el método APLIS está diseñado para acuíferos carbonatados y distorsiona los resultados cuando existe una amplia extensión de materiales de baja permeabilidad, como ocurre en el área de estudio.

Palabras clave: acuífero carbonatado, acuífero profundo, método APLIS, recarga, SIG

ABSTRACT

The APLIS method has been applied in an area of 2400 km² located in El Maestrazgo (NE Spain). The Jurassic carbonated aquifer is the most important although both Cretaceous carbonated and detrital aquifers also exist. The recharge of the Jurassic aquifer comes directly from the rainfall infiltration, from the drainage of Cretaceous and detrital aquifers and from the runoff over the low permeability rocks. Most of the discharge occurs directly toward the sea, which difficult to know its magnitude and to check the value of annual average groundwater resources. The application of APLIS method permits to estimate the annual average recharge rate for the whole of the study area, its spatial distribution, and to evaluate the mean value of annual water resources. The recharge rate or effective infiltration is about 32% of the precipitation but its spatial distribution depends on the altitude, slope, lithology, infiltration features and soils. Thus, for example, in the outcrops of Jurassic carbonated aquifer the average recharge rate is 45%. The annual mean water resources are around 420 hm³/year. These results are coherent with those obtained by means other conventional techniques (Thornthwaite balance and Chloride balance) although the APLIS method was developed for carbonated aquifers and its results can be deformed when big extension of low permeability rocks outcrops such as in the study area.

Key words: carbonated aquifer, deep aquifer, APLIS method, recharge, GIS

1. INTRODUCCIÓN

La recarga de un acuífero puede definirse como el volumen medio anual de agua que entra en él durante un periodo de tiempo. Esta cantidad puede expresarse como el volumen medio anual (recursos medios anuales) o como porcentaje de la precipitación que se infiltra (tasa de recarga o la

infiltración eficaz). Para un periodo suficientemente largo, el volumen de recarga (entradas) es igual al volumen de descargas (salidas), siempre que el acuífero no esté sujeto a extracciones por bombeos.

La recarga de los acuíferos es una cuestión que se trata, de modo general, en distintos manuales de Hidrogeología y, de modo más específico, en varias monografías (Lerner *et al.*, 1990; Custodio *et al.*, 1997). Una referencia importante es el volumen 10 (1) de la revista *Hydrogeology Journal*, titulado *Groundwater Recharge*. Sin embargo, la distribución espacial de la recarga es un aspecto menos estudiado, sobre todo, en los acuíferos kársticos debido a las características especiales de este tipo de medios en lo que se refiere a su comportamiento hidrogeológico y modalidades de infiltración. Tradicionalmente, la técnica utilizada ha sido la interpolación de los datos de recarga obtenidos en varios puntos. Andreo *et al.* (2004) desarrollaron un método para evaluar la recarga media y la distribución espacial de la misma en acuíferos carbonatados, a partir de las investigaciones realizadas en acuíferos del Sur de España, situados en diferentes contextos geológicos y climáticos. Este método se basa en las características intrínsecas de los acuíferos carbonatados: Altitud, Pendiente, Litología, formas de Infiltración preferencial y Suelos. Las iniciales de estas variables, en español, forman un acrónimo que da nombre al método (APLIS).

Con este trabajo se pretende determinar la tasa media de recarga anual, la distribución espacial de la misma y la estimación de los recursos medios anuales, por el método APLIS, en el acuífero jurásico de El Maestrazgo (NE España). Los valores obtenidos se han contrastado con los calculados mediante el balance de Thornthwaite y el balance de cloruros. El interés de aplicar este método está en estimar las entradas del acuífero, dado que sus descargas se producen, principalmente, de forma submarina en el litoral de la provincia de Castellón (COPUT, 1990; ITGE, 1989; Mejías *et al.*, 2006).

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el sector oriental de la Cordillera Ibérica, donde se produce el enlace con la Cordillera Costero-Catalana (NE de España). Ocupa 2400 km² de superficie, prácticamente en su totalidad, en la provincia de Castellón y en ella se encuentra la divisoria entre las demarcaciones hidrográficas del Júcar y del Ebro (Fig 1A). Comprende, entre otras, las sierras del Turmell, Valdancha, Engarcerán, Irta y Ensellé (Fig. 1A). Hay muchos ríos, arroyos y ramblas que surcan esta zona; los principales son: Río Servol, Río San Miguel, Río Torre Segura, Rambla de Carbonera y Rambla Seca.

Desde el punto de vista geológico, el área está constituida por materiales mesozoicos. El acuífero principal está formado por calizas y dolomías del Jurásico, aunque hay otros acuíferos suprayacentes que corresponden a diferentes periodos del Cretácico, separados en la mayoría de los casos por formaciones de baja permeabilidad. Existen, además, acuíferos detríticos en varias depresiones tectónicas rellenas de sedimentos neógenos-cuaternarios (Mejías *et al.*, 2006).

En cuanto al modelado kárstico, cabe señalar que está poco desarrollado en superficie; hay algunas dolinas aisladas y, localmente, zonas donde se desarrolla el lapiaz. No obstante, existe cierto número de cavidades kársticas, la mayoría de reducidas dimensiones.

Los suelos presentan una relativa variabilidad. Así, la mitad oriental del acuífero presenta suelos pocos desarrollados, como leptosoles y regosoles, mientras que el sector occidental está cubierto por suelos del tipo kastanozem y phaeozem. En ambos casos, los fondos de valle y zonas planas presentan suelos más evolucionados.

Los recursos del acuífero jurásico de El Maestrazgo se generan, principalmente, por la infiltración de agua de lluvia sobre los afloramientos permeables. Además, hay que tener en cuenta la recarga procedente del drenaje de las formaciones acuíferas cretácicas y de los materiales de baja permeabilidad, cuyas aguas se infiltran cuando circulan por los cauces sobre afloramientos de

materiales permeables jurásicos. Los sedimentos neógenos-cuaternarios contactan con las rocas carbonatadas jurásicas, por lo que también puede existir alimentación subterránea desde los acuíferos detríticos al carbonatado. Como consecuencia de todo ello, la mayor parte del agua que no se evapotranspira, termina recargando el acuífero carbonatado jurásico de El Maestrazgo. Los principales manantiales son costeros y se localizan en el borde costero de la Sierra de Irta: Prat de Peñíscola, Badum y Fuentes de Alcocebre, aunque existen otros de menor importancia (COPUT, 1990; ITGE, 1989).

3. MÉTODO APLIS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RECARGA

El método APLIS (Andreo *et al.*, 2004) permite estimar la tasa media de recarga, expresada como porcentaje de la precipitación, y la distribución espacial de la misma en acuíferos carbonatados. La superposición de las capas de información de cada una de las variables del método (Altitud, Pendiente, Litología, formas de Infiltración y Suelo), mediante Sistemas de Información Geográfica, hacen posible estos objetivos. Para cada variable hay una serie de categorías o intervalos (Tabla 1), a las que se otorgan valores comprendidos entre 1 (mínima influencia en la recarga) y 10 (máxima influencia). Los valores de tasa de recarga, expresada como porcentaje de la precipitación, se calculan mediante expresión adjunta y se agrupan en cinco intervalos regulares, como se indica en la tabla 1.

$$R = (A + P + 3L + 2I + S) / 0.9$$

Altitud (m)	P	Pendiente (%)	P	Litología	P
≤ 300	1	≤ 3	10	Calizas y dolomías karstificadas	10, 9
(300-600]	2	(3-8]	9	Calizas y dolomías fracturadas, algo karstificadas	8, 7
(600-900]	3	(8-16]	8	Calizas y dolomías fisuradas	6, 5
(900-1200]	4	(16-21]	7	Arenas y gravas, coluviones	4
(1200-1500]	5	(21-31]	5	Brechas y conglomerados	3
(1500-1800]	6	(31-46]	4	Rocas plutónicas y metamórficas	2
(1800-2100]	7	(46-76]	3	Esquistos, pizarras, limos, arcillas	1
(2100-2400]	8	(76-100]	2		
(2400-2700]	9	> 100	1		
> 2700	10				

Puntuación del parámetro Altitud

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

Puntuación de las formas de Infiltración preferencial

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

Intervalos y clases de recarga según el método APLIS

Suelo	P
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

Puntuación del parámetro Suelo

Tabla 1. Categorías e intervalos de cada variable y de la recarga obtenida por el método APLIS

La información correspondiente a cada una de las variables que influyen en la recarga, normalmente, se encuentra en las bases de datos de las administraciones públicas. Así, tanto la altitud como la pendiente se derivan del modelo digital de elevaciones (MDE), a partir del cual se ha generado el mapa de pendientes. El mapa litológico, se ha extraído del informe elaborado por Antón-Pacheco et al (2005), el cual está basado en los mapas geológicos a escala 1/50.000 de la serie Magna

del IGME. Los resultados hidrogeológicos del informe antes citado, junto con los reconocimientos de campo y la información sobre las cavidades kársticas de la zona, han permitido estimar el grado de karstificación interno de las litologías carbonatadas que afloran en el área de estudio. Por lo que respecta a la variable I, no se disponía de antecedentes bibliográficos o cartográficos y se han considerado como formas de infiltración preferencial los barrancos sobre calizas, donde la pendiente topográfica es baja; en estas zonas se han observado indicios de absorción preferencial. Finalmente, el mapa de suelos se obtuvo a partir de una cartografía edafológica de la provincia de Castellón.

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO *APLIS* EN EL ÁREA DE ESTUDIO

La Altitud (variable A) del área presenta un gradiente desde el interior hacia la costa, aunque esta tendencia no se observa en algunos sectores donde hay valles. De las 10 categorías posibles (Tabla 1), únicamente 5 están presentes (Fig. 1B). Las altitudes comprendidas entre 0 y 1200 m ocupan el 99% de la superficie total.

El mapa de Pendientes (P) muestra que las zonas de menor pendiente coinciden con las llanuras aluviales y la llanura litoral (Fig. 1C), especialmente en el sector de la plana de Oropesa-Torreblanca, además de la franjas paralelas a la línea de costa. La pendiente varía entre 0 y 76% (valores del parámetro P entre 3 y 10, según la tabla 1), aunque aproximadamente en la mitad de la zona de estudio son inferiores al 16% (valores de P superiores o iguales a 8).

Con respecto a la Litología (L), las puntuaciones más elevadas (valores 5, 6 y 7) corresponden a las sierras carbonatadas (Fig. 1D), que representan algo más de la tercera parte del área de estudio. Las calizas del acuífero jurásico, como las que afloran en las Sierras del Turmell, Irta y Valdancha, son los materiales carbonatados en los que el desarrollo de la karstificación es relativamente mayor, aunque no es especialmente elevado como se indicó anteriormente; por ello se han calificado con una puntuación de 7. El 15% de la superficie posee una puntuación de 4, relacionada con los afloramientos de materiales detríticos. Sin embargo, lo más relevante es que más del 45% de la superficie posee puntuaciones inferiores a 3, correspondientes a materiales margosos de baja permeabilidad.

Prácticamente el 100% del área carece de formas de Infiltración preferencial (I), es decir, formas del modelado típicamente kársticas que favorezcan la recarga del acuífero (Fig. 1E). Únicamente el 0,2% de la superficie está formada por tramos de cauces fluviales con baja pendiente que circulan sobre calizas, consideradas en este estudio como áreas de absorción preferencial.

El mapa de suelos (S) muestra que en las Sierras de Irta y de Valdancha y parte occidental de la del Turmell (Fig. 1F) la puntuación de esta variable es 10, porque predominan los leptosoles, suelos poco desarrollados que favorecen, en mayor medida, la recarga.

La superposición de los mapas anteriores, correspondientes a las variables del método *APLIS*, permite obtener el mapa de recarga (Fig. 2). En la mayor parte del área de estudio (casi tres cuartas partes de su superficie) la recarga es de clase Baja, pues predominan valores de recarga entre el 20% y el 40%. El resto de la superficie presenta valores de recarga de tipo Moderado y Muy Bajo y solamente un pequeño porcentaje de superficie tiene una recarga de grado Alto. En los afloramientos del acuífero carbonado jurásico de El Maestrazgo (Sierras del Turmell, Irta o Valdancha) la recarga es de clase Moderada. No se han detectado sectores con un porcentaje de recarga de tipo Muy Alto.

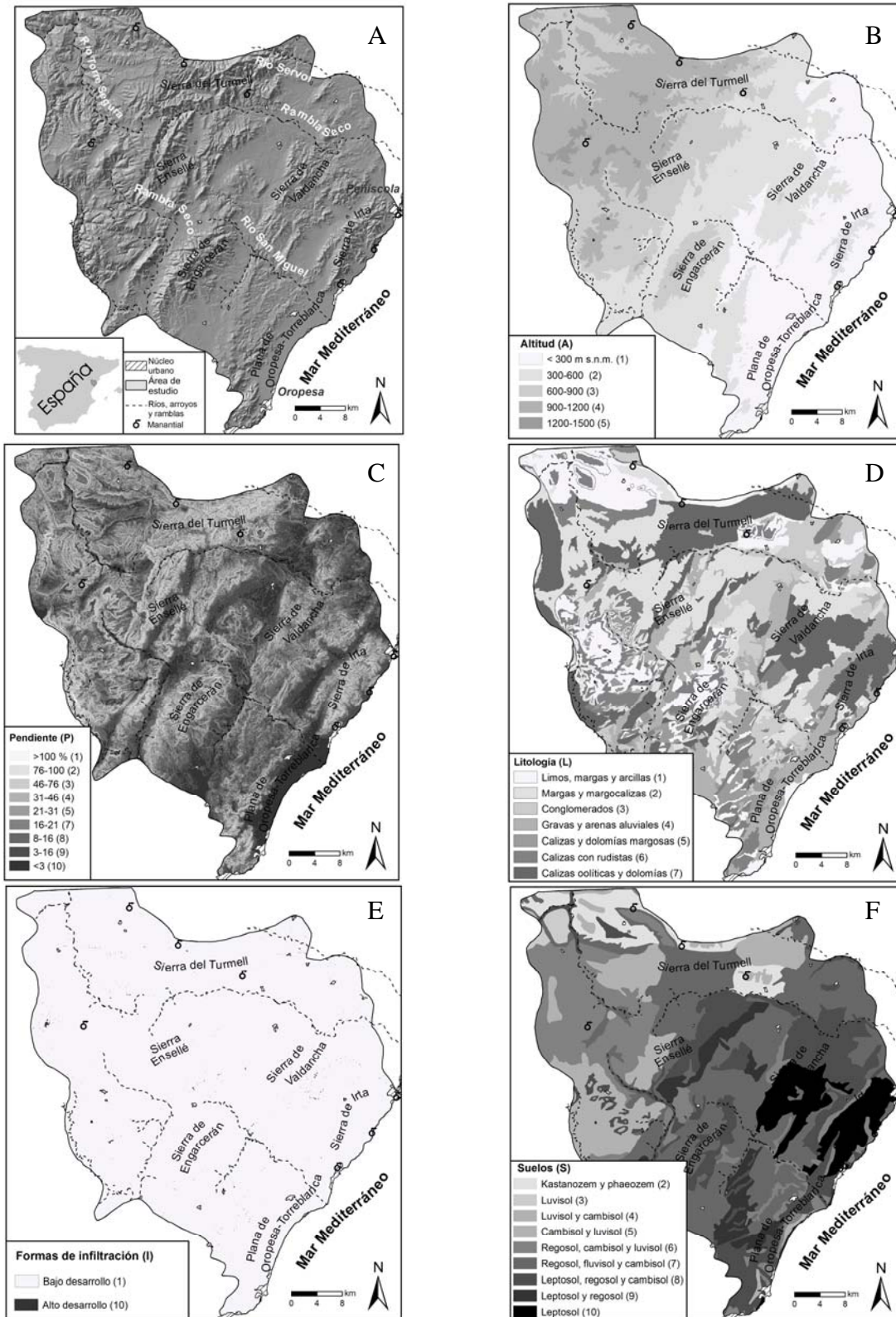


Figura 1. Mapas de situación del área de estudio y de los parámetros del método APLIS

El valor medio de la tasa de recarga anual obtenido para el conjunto del área considerada en este estudio es del 32%. Como ya se ha comentado, las características de los materiales (gran abundancia de afloramientos de baja permeabilidad y baja karstificación de los carbonatados) no favorecen excesivamente la infiltración, de ahí que la tasa media de recarga anual del conjunto sea Baja. Los afloramientos del acuífero jurásico de El Maestrazgo presentan una tasa media de recarga

del 45% de la precipitación y en el resto de acuíferos carbonatados (los cretácicos) es del 38%, con un valor medio del 42% para el conjunto de materiales carbonatados. En los acuíferos detríticos la infiltración eficaz resulta ser del 32%, mientras que en los materiales de baja permeabilidad se estima una tasa de recarga del 24%. Este último dato es claramente excesivo, dada la composición margosa de los materiales.

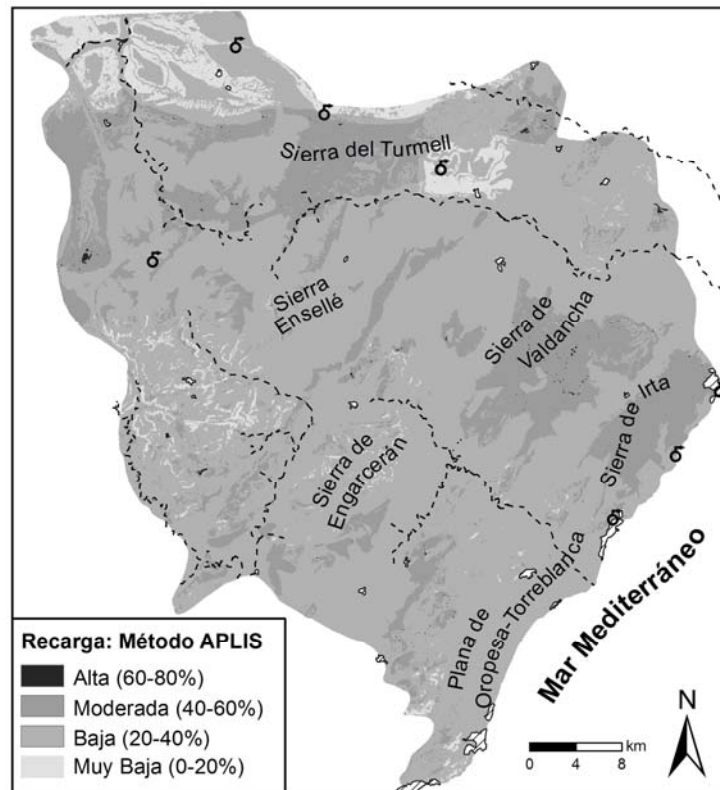


Figura 2. Mapa de la distribución espacial de la recarga obtenido por el método APLIS

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MÉTODO APLIS Y DE OTROS MÉTODOS

Se ha calculado la tasa de recarga mediante otras técnicas convencionales como el balance de Thornthwaite y el balance de cloruros. Para el balance de Thornthwaite se han utilizado los datos de lluvia y temperatura de 12 estaciones meteorológicas con un periodo de registro de 35 años. La mayoría de las estaciones se localizan en los bordes o fuera del área de estudio, a cotas bajas y en el sector costero, por lo que su representatividad presenta ciertas limitaciones.

El valor medio del coeficiente de lluvia útil (infiltración + escorrentía) deducido por el método de Thornthwaite (con una capacidad de campo de 50 mm), para toda la zona de estudio, es del 25% de la precipitación, claramente inferior al 32% de infiltración (recarga) estimado por el método APLIS. Con una capacidad de campo de 25 mm, adecuada para las formaciones carbonatadas, la lluvia útil es del 30%, mientras que con una capacidad de campo de 75 mm, propia de las formaciones margosas, la lluvia útil obtenida es del 20%. Para la estación meteorológica situada a cota más elevada y alejada del mar, más representativa del conjunto del área estudiada, se han calculado coeficientes de lluvia útil del 38% con una capacidad de campo de 50 mm y 43% para una capacidad de campo de 25 mm, datos éstos que se aproximan al valor medio estimado por el método APLIS para el conjunto de los acuíferos carbonatados (42%).

La validación de los resultados del método APLIS mediante el balance de cloruros se ha llevado a cabo con los datos de dos manantiales representativos, ambos relacionados con el drenaje del

acuífero jurásico. Los datos de contenidos en cloruros del agua de lluvia proceden de la tesis doctoral de Alcalá (2005). Aún con las limitaciones propias de la información disponible, se deducen valores de la tasa de recarga del 47 y 53% para el acuífero carbonatado jurásico, relativamente coherentes con los resultados de APLIS (45%).

6. ESTIMACIÓN DE RECURSOS

Con los datos de precipitaciones medias anuales correspondientes a las estaciones pluviométricas se ha hecho un mapa de isoyetas y se ha calculado la precipitación media anual, mediante planimetría de isoyetas, que ha resultado ser próxima a 620 mm. Por tanto, el volumen medio anual de precipitación sobre el área de estudio (unos 2400 km²) es del orden de 1500 hm³.

La combinación del mapa de isoyetas y del de los porcentajes de recarga obtenido mediante el método APLIS, permiten estimar el volumen medio anual de recarga -recursos medios- por infiltración de las precipitaciones en cada tipo de materiales y en el conjunto del área de estudio (Tabla 2).

	Superficie	Precipitación (P)		Índice APLIS	Recursos
	km ²	mm	hm ³ /año	% P	hm ³ /año
Acuífero carbonatado jurásico	502	627	315	45	142
Acuíferos carbonatados cretácicos	395	600	237	38	91
Acuíferos detríticos neógeno-cuater.	381	580	221	32	71
Materiales de baja permeabilidad	1136	630	716	24	172
Total área de estudio	2414	617	1489	32	476

Tabla 2. Recursos medios anuales del área de estudio calculados por el método APLIS

Los recursos medios anuales del área considerada, estimados mediante el método APLIS, son de 476 hm³/año. De esta cantidad, 142 hm³/año procederían de la infiltración directa de las precipitaciones sobre el acuífero jurásico, 91 hm³/año se infiltrarían en los otros acuíferos carbonatados (cretácicos), 71 hm³/año en los detríticos y 172 hm³/año corresponderían a los materiales de baja permeabilidad.

La descarga natural de los acuíferos carbonatados cretácicos termina infiltrándose en el acuífero carbonatado jurásico y los recursos de los acuíferos detríticos también pueden considerarse como parte de los del acuífero carbonatado jurásico (Mejías *et al.*, 2007). Los recursos medios obtenidos en los materiales de baja permeabilidad son claramente excesivos y se debe a que el método APLIS está diseñado para obtener el coeficiente de infiltración en acuíferos carbonatados, con escasa o nula presencia de afloramientos de formaciones de baja permeabilidad. Cuando hay una superficie importante de este tipo de materiales, como ocurre en el área de estudio, se pueden llegar a obtener cifras de recarga elevadas, incoherentes con la baja permeabilidad que presentan. En los afloramientos margosos que hay en El Maestrazgo, la parte de agua de lluvia que no sufre evapotranspiración (la lluvia útil) debe generar, fundamentalmente, escorrentía superficial que después se filtra en el acuífero carbonatado jurásico. Esta componente podría ser del orden de un tercio de las precipitaciones caídas sobre las margas, si se tienen en cuenta los resultados del balance de Thornthwaite (con una capacidad de campo de 75 mm) efectuado para la estación termopluviométrica representativa del área; concretamente, un valor medio representativo de la escorrentía sobre las margas podría ser 191 hm³/año. Por otra parte, según datos de la Confederación Hidrográfica del Júcar, existen salidas por escorrentía, vertidas al mar o drenadas hacia otras cuencas fuera del área de estudio, inferiores al 5% de la precipitación (75 hm³/año). Así, la infiltración de la escorrentía procedente de los materiales de baja permeabilidad es de 116 hm³/año.

En definitiva, las entradas medias anuales del área de estudio, después de las correcciones efectuadas a los resultados del método APLIS, son las siguientes: infiltración en acuíferos carbonatados (233 hm³/año), infiltración en acuíferos detríticos (71 hm³/año) e infiltración de la escorrentía generada sobre materiales de baja permeabilidad (116 hm³/año). Por tanto, los recursos medios anuales son del orden de 420 hm³/año.

7. CONCLUSIONES

Se ha aplicado el método APLIS para estimación de la recarga en un área de 2.400 km² situada en el NE de España, concretamente en la región de El Maestrazgo, en la provincia de Castellón. El acuífero principal está formado por las calizas del Jurásico, aunque existen acuíferos carbonatados cretácicos y otros de naturaleza detrítica, de menor entidad.

La tasa media de recarga anual, para el conjunto del área, ha resultado ser del 32%, con variaciones espaciales derivadas de las características intrínsecas de cada sector (altitud, pendiente, litología, zonas de infiltración preferencial y suelos). Así, en el acuífero carbonatado jurásico la tasa de recarga es del 45% mientras que en el resto del acuíferos carbonatados es del 38%, en los detríticos del 32% y en los materiales de baja permeabilidad del 24%. Este último valor no corresponde con la realidad y demuestra que el método APLIS, en su versión actual, no es aplicable en áreas donde hay grandes extensiones de materiales de baja permeabilidad. Los valores de la tasa de recarga obtenidos con APLIS son relativamente coherentes con los estimados por el método de Thornthwaite y por el balance de cloruros.

Las entradas medias o recursos medios anuales en el área de estudio son 420 hm³/año: 233 hm³/año por infiltración en acuíferos carbonatados (142 hm³/año en el acuífero jurásico), 71 hm³/año por infiltración en acuíferos detríticos y 116 hm³/año por infiltración de la escorrentía generada sobre materiales de baja permeabilidad.

Agradecimientos

Se agradece la ayuda prestada por el Prof. Juan Sánchez Díaz (Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Universidad de Valencia-Generalidad Valenciana) para obtener el mapa de suelos y al Espeleo Club Castellón la aportación de la base de datos de las cuevas. Este trabajo es una contribución a los proyectos CGL 2005-05427 de la DGICYT e IGCP 513 de la UNESCO y a los Grupos de Investigación RNM 308 y HUM 778 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS

- Alcalá, F.J. (2005): *Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeológico*. Tesis Doctoral Univ. Politécnica de Cataluña, 346 p.
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P. (2004): Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero* 115, 2.
- Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J.C., López-Gutiérrez, J., Mejías, M., Plata, J.L., Samsó, J.M., Jiménez, I., Marina, M., Mediato, J. y Núñez, I. (2005): *Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la unidad hidrogeológica de El Maestrazgo*. Centro de documentación del IGME: H1-002-05, 535 pp
- COPUT (1990): Estudio de identificación de las descargas al mar del acuífero del Maestrazgo en la zona litoral entre Alcocebre y Peñíscola. Informe inédito.
- Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. -Eds.- (1997): Evaluating recharge in aquifers, under hydrologic planning. IAH Spanish Chapter and ITGE, Madrid.
- ITGE (1989): Estudio hidrogeológico del Maestrazgo. Informe inédito.
- Mejías, M., Plata, J.L., Ballesteros, B., López, J., Marina, M. (2006): Metodología de caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. Aplicación al acuífero regional del Maestrazgo. *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos*. Publicaciones del Instituto geológico y Minero de España. Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 17: 47-56.
- Mejías, M., García-Orellana, J., Plata, J.L., Marina, M., García-Solsona, E., Ballesteros, B., Masqué, López, J. and Fernández-Arrojo C. (2007): Methodology of hydrogeological characterization of deep carbonate aquifers as potencial reservoirs of groundwater. Case of study: the Jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). *Env. Geology*. DOI 10.1007/s00254-007-0845-0.
- Lerner, DN., Issar, A.S., Simmers, I. (1990): Groundwater Recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. *International Contributions to Hydrogeology* 8. Heinz IESE.