

TASAS DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA Y MÉTODOS APLICADOS PARA SU EVALUACIÓN EN ACUÍFEROS CARBONÁTICOS DE LA CORDILLERA BÉTICA (SUR DE ESPAÑA)

Sergio Martos Rosillo¹, Antonio González Ramón¹, Pablo Jiménez Gavilán², Juan José Durán Valsero¹, Bartolomé Andreo Navarro² y Elena Mancera Navarro²
¹ Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. ² Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología, Universidad de Málaga. Premio V Simposio Internacional sobre el Karst 2014

RESUMEN

En este artículo se presenta una síntesis de los resultados obtenidos de la evaluación de la recarga en 51 acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética. Las tasas anuales de recarga están comprendidas entre 7 y 720 mm/año, con un valor medio y una desviación estándar asociada de 262 ± 146 mm/año. Destaca la alta correlación existente entre la lluvia y la tasa de recarga anuales ($R^2 = 0,83$). Además, se ha podido comprobar que los acuíferos que reciben precipitaciones medias anuales inferiores a 300 mm/año presentan tasas de recarga prácticamente despreciables. El coeficiente de recarga medio del agua de lluvia es del 38%, con una desviación estándar de $\pm 12\%$. Los mayores valores del coeficiente de recarga no suelen superar el 60%. En lo que se refiere a los métodos aplicados para la evaluación de la recarga, el más utilizado es, con diferencia, el del balance de agua en el suelo. Otros métodos utilizados ampliamente han sido el balance de agua en el acuífero, el balance de masas de cloruros y métodos empíricos como APLIS. Con todo, en la zona oriental de la Cordillera, donde se dan condiciones climáticas semiáridas, se han usado modelos distribuidos para evaluar la recarga y calibrarla con series temporales de datos piezométricos. Se considera que los datos presentados en este trabajo pueden contribuir a una correcta evaluación de los recursos renovables asociados a los acuíferos carbonáticos de la región. La alta capacidad de recarga y buena calidad del agua para diferentes usos, especialmente para el abastecimiento a la población, hace estos acuíferos esenciales de cara a cubrir la demanda actual y la futura. Por otra parte, los datos presentados tienen

especial interés para futuras comparaciones que implican evaluaciones de recarga ante diferentes escenarios de cambio climático y/o cambios en el uso del suelo.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en el sur de España, donde prevalecen las condiciones climáticas semiáridas, es esencial para el abastecimiento a la población, para mantener los ecosistemas asociados y para abastecer sectores estratégicos como la agricultura y el turismo.

El área investigada en este trabajo –que coincide con los afloramientos carbonáticos de la Cordillera Bética, desde la provincia de Alicante, en el SE de España, hasta la provincia de Cádiz, en el SO– tiene una longitud de 600 km y una anchura media de 130 km. Aunque la superficie total de afloramientos de este tipo de rocas no es muy importante, los acuíferos constituidos por calizas, dolomías y mármoles tienen tasas de recarga significativamente más altas que las de los acuíferos detríticos y las de las rocas duras, poco permeables, de la Cordillera Bética. Este hecho, unido a la buena calidad del agua y a la gran capacidad de almacenamiento de los acuíferos carbonáticos, ha generado una mayor conciencia respecto a la importancia de su protección. Los recursos de agua asociados a los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética, además de satisfacer la demanda actual, resultan esenciales para cubrir las puntas de demanda que son recurrentes en los largos y frecuentes periodos de sequía, inherentes a la región mediterránea. En este sentido, la correcta evaluación de la recarga de estos sistemas es clave para determinar el caudal sostenible y, así, lograr una adecuada gestión del agua subterránea.

La recarga de los acuíferos carbonáticos es más difícil de evaluar que la de los acuíferos detríticos. La alta variabilidad de la porosidad y de la permeabilidad de las rocas carbonáticas tiene influencia en la infiltración (difusa y/o concentrada), en cómo se produce el flujo a lo largo de la zona no saturada (matriz, fracturas y redes de conductos kársticos), y en la descarga difusa y/o concentrada (BAKALOWICZ 2005). Por esas razones, la literatura científica sobre la evaluación de la recarga en materiales carbonáticos es escasa. En la Cordillera Bética, la mayoría de los estudios sobre recarga de acuíferos carbonáticos se han llevado a cabo en las dos últimas décadas y el primer estudio regional se hizo en 2003 (IGME-GHUMA 2003). Sin embargo, diferentes organismos relacionados con la gestión y con la investigación del agua subterránea han realizado un número importante de informes y de artículos, la mayoría de ellos publicados en congresos hidrogeológicos celebrados en España. En este artículo, se presentan los resultados de la revisión de los trabajos más rigurosos, en los que se han realizado evaluaciones de recarga, y se comparan los resultados conseguidos por diversos métodos, a ser posible independientes. Al final del documento (Apéndice I) se adjuntan algunas características de los acuíferos considerados: tasas de recarga

anual, precipitación media anual, coeficiente de infiltración, método aplicado para evaluar la recarga y las correspondientes referencias bibliográficas.

El principal objetivo de este trabajo ha consistido en realizar una síntesis de las tasas de recarga que se producen en los acuíferos carbonáticos del sur de España y de los métodos aplicados para su evaluación. Se considera que esta recopilación es de particular interés porque la evaluación de la recarga del agua subterránea es esencial para llevar a cabo la explotación sostenible de los acuíferos. Además, los datos recopilados deben servir para futuros trabajos comparativos sobre el impacto del cambio climático o del cambio del uso del suelo en los recursos hídricos subterráneos.

ZONA DE ESTUDIO

La Cordillera Bética es una extensa cadena montañosa alpina (Fig. 1) que se subdivide en Zonas Externa e Interna. La primera está integrada por materiales mesozoicos y terciarios, que se depositaron en el margen continental de la Microplaca Ibérica; esos materiales fueron plegados y despegados de su basamento durante el Mioceno inferior y medio. La Zona Interna es un fragmento de una subplaca que originalmente ocupaba una

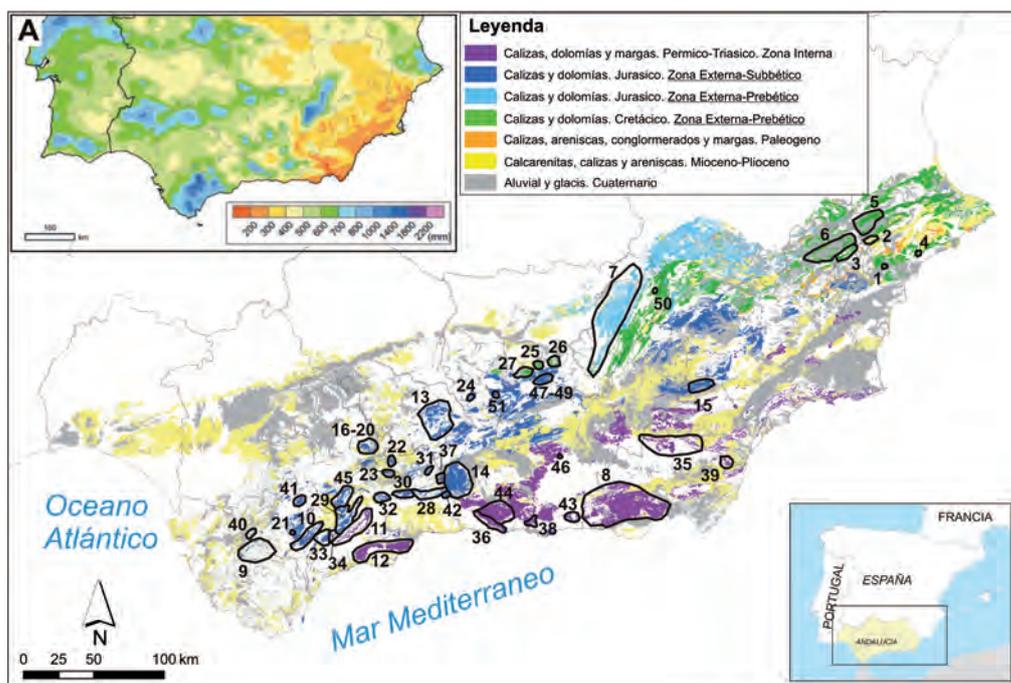


Figura 1. Mapa de acuíferos de la Cordillera Bética. La lista del número de acuíferos se presenta en el apéndice I. (A) precipitación media anual en el sur de la Península Ibérica.

posición dentro del actual Mediterráneo, pero se disgregó durante el Mioceno inferior y expulsó parte de sus materiales hacia el oeste, que colisionaron con la Microplaca Ibérica.

Los materiales más antiguos se encuentran en la Zona Interna. La serie tipo, en las zonas donde se localizan los acuíferos más importantes, consiste en esquistos en la base, filitas, cuarcitas y potentes tramos de dolomías, calizas y/o mármoles dolomíticos, a veces con intercalaciones metapelíticas. Los esquistos podrían ser sedimentos paleozoicos metamorfizados, las filitas proceden de sedimentos del Trías inferior y las rocas carbonáticas han sido datadas como Trías medio-superior (SANZ DE GALDEANO 1997). Estos acuíferos suelen tener gran extensión y muchos de ellos están próximos al litoral mediterráneo, por lo que suelen estar explotados.

La Zona Externa de la Cordillera Bética se subdivide, a su vez, en los dominios Prebético y Subbético. El substrato en ambos dominios está formado por sedimentos lutíticos y evaporíticos de origen triásico. El Jurásico está formado mayoritariamente por materiales carbonáticos y el Cretácico es de carácter margoso en el Subbético y carbonático en el Prebético.

Los acuíferos carbonáticos son, por tanto, mayoritarios en ambos dominios. En el Prebético presentan gran importancia los acuíferos cretácicos, pues ocupan grandes extensiones en la parte nororiental de la Cordillera. Los acuíferos subbéticos, en cambio, suelen presentar gran fragmentación y una amplia distribución espacial, por lo que son ideales para su utilización en pequeños abastecimientos urbanos.

En la Cordillera Bética existe una disminución de la pluviometría de oeste a este, con excepciones como la Sierras de Cazorla y Segura (Fig. 1A). A lo largo del Valle del Guadalquivir, la evapotranspiración aumenta en el mismo sentido, de la misma forma que lo hacen las temperaturas medias anuales. Por otro lado, en la parte oriental de la Cordillera, la temperatura y la evapotranspiración también son elevadas. Las tasas de recarga de los acuíferos están, por tanto, condicionadas por su situación geográfica. Otros factores que condicionan la recarga son la altitud media de las superficies permeables que afloran, el tipo y densidad de la cobertura vegetal y el grado de karstificación superficial, que disminuye de oeste a este (Fig. 2).



Figura 2. El grado de karstificación superficial, la pendiente y la cobertura vegetal son factores que influyen notablemente en la recarga de los acuíferos carbonáticos. (A) Lapiaz de Cagasebo-Sierra de Cazorla. (B) Cerro del Fraile-Campos de dolinas de Sierra Gorda. (C) Conductos kársticos en el Calar del Río Mundo-Cueva de los Chorros. (D) Ladera norte del Maimón-Sierra de María.

DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE RECARGA

En la Cordillera Bética, la recarga en los acuíferos carbonáticos ha sido estimada mediante diferentes aproximaciones. El método de balance de agua en el suelo (BAS) es uno de los más aplicados. En la mayoría de los acuíferos carbonáticos la gestión del agua subterránea está basada en la estimación de la recarga mediante el BAS, a menudo contrastada con el balance de agua en el acuífero (BAA) tras diversos años control de las entradas, de las salidas y de la variación de recursos hídricos almacenados en el sistema. Aunque algunos métodos empíricos, tales como el de Kessler, se han aplicado en diferentes acuíferos (ver Apéndice I), en la mayoría se ha aplicado el método APLIS (ANDREU et al. 2008).

El balance de masas de cloruros (BMC) (ERIKSSON & KHUNAKASEM 1969) también ha sido muy aplicado en España (ALCALÁ & CUSTODIO 2014) y en especial en la Cordillera Bética

(ANDREU et al. 2011; ALCALÁ et al. 2011; MUDARRA 2012; MARTOS-ROSILLO et al. 2013; BARBERÁ 2014; GUARDIOLA et al. 2012). Por otra parte, CONTRERAS et al. (2008) utilizaron un modelo basado en imágenes satélite de la cobertera para estimar la recarga potencial en la Sierra de Gádor. Las técnicas de modelización también han sido aplicadas para estimar la recarga en acuíferos carbonáticos. Los modelos de tipo agregados están más extendidos que los distribuidos y que los modelos de flujo tridimensionales. En consecuencia, cada vez es más habitual encontrar trabajos en los que se aplican modelos agregados, como el código ERAS (MURILLO & DE LA ORDEN 1996), que permiten calibrar la recarga con series de datos temporales de la explotación del acuífero y de la evolución de la piezometría en acuíferos sobreexplotados (AGUILERA & MURILLO 2009; MARTOS-ROSILLO et al. 2009; ANDREU et al. 2001; MARTÍNEZ-SANTOS & ANDREU 2010; MARTOS-ROSILLO et al. 2013). Otros modelos agregados que han sido utilizados en la Cordillera Bética son VISUAL BALAN

Tabla I. Valores estadísticos de la superficie de afloramientos (S), precipitación anual (P), recarga anual (R) y coeficiente de infiltración (R/P) de los 51 acuíferos considerados. Leyenda: D.S. (desviación estándar).

	S (km ²)	P (mm/año)	R (mm/año)	R/P (%)
Media	83	648	262	38,1
D.S.	156	216	146	11,8
Mediana	26	586	237	38,3
Percentil 10	4	414	115	25,6
Percentil 90	196	964	469	54
Máximo	823	1233	720	67,2
Mínimo	1	242	7	2,9

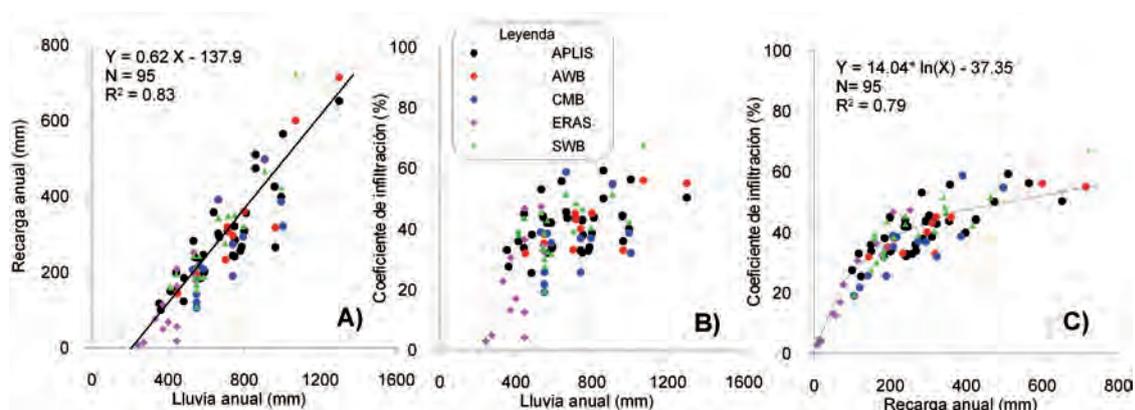


Figura 3. A. Precipitación anual versus recarga anual. B. Coeficiente de infiltración (R/P) versus precipitación anual. C. Coeficiente de infiltración (R/P) versus recarga anual.

(GUARDIOLA et al. 2012), VENTOS (BELLOT et al. (2001) y TRIDEP (PADILLA & PULIDO-BOSCH 2008). Recientemente, PARDO-IGÚZQUIZA et al. (2012) han desarrollado un modelo distribuido de evaluación de la recarga en acuíferos carbonáticos, que ha sido aplicado en la Sierra de las Nieves. En ocasiones se ha utilizado MODFLOW para evaluar la recarga. Así, MARTÍNEZ-SANTOS & ANDREU (2010) compararon los resultados de la recarga calculada mediante los códigos ERAS y MODFLOW en diferentes acuíferos del sector oriental de la Cordillera Bética. Por otra parte, PULIDO-VELÁZQUEZ et al. (2014) han modelizado el flujo y la recarga en el acuífero de Serral-Salinas (SE de España) combinando los códigos VISUAL BALAN y MODFLOW para simular la respuesta de los acuíferos ante diferentes escenarios de cambio climático.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

Los datos bibliográficos considerados en este trabajo reflejan el pequeño tamaño de los acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética con un valor medio de 83 km² y una mediana de 26 km² (Tabla I). Los percentiles 10 y 90 son, respectivamente, de 4 y 196 km².

La media anual de la precipitación que alcanza a los acuíferos carbonáticos y su desviación estándar asociada es de 648 ± 216 mm/año. Por su parte, la media anual de la recarga es de 262 mm/año, con una desviación estándar de 146 mm/año (D.S. en Tabla I). El valor mediano de la recarga y los percentiles 10 y 90, son respectivamente 237, 115 y 469 mm/año. En lo que se refiere al coeficiente de recarga medio, el valor es del 38%, con una desviación estándar cercana al 12%.

El análisis de correlación entre la precipitación, las tasas de recarga y el coeficiente de infiltración se presenta en la Figura 3. La Figura 3A representa la precipitación media anual frente a la recarga deducida a partir de los diferentes métodos utilizados. Este diagrama muestra un elevado coeficiente de correlación ($R^2 = 0,83$) entre la precipitación anual y la recarga en los acuíferos carbonáticos, aspecto que evidencia que el principal proceso de recarga está claramente asociado a la infiltración directa del agua de lluvia. Por otro lado, se comprueba que la recarga es prácticamente nula cuando la precipitación media anual es inferior a 300 mm/año. Independientemente

del método utilizado, la Figura 3B revela importantes diferencias en el coeficiente de infiltración (R/P) con la misma precipitación anual. Estas diferencias pueden superar el 40%.

La Figura 3C permite comprobar que en la mayoría de los acuíferos de la Cordillera Bética, el coeficiente de infiltración está comprendido entre el 30% y el 60% de la precipitación anual. Por otra parte, se observa que la relación entre el coeficiente de infiltración y la tasa de recarga anual no es lineal, de forma que, cuando la recarga anual aumenta por encima de 200 mm aproximadamente, el coeficiente de infiltración tiende a estabilizarse, hacia un coeficiente máximo del 60%.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los resultados y los métodos utilizados para la evaluación de la recarga en 51 acuíferos carbonáticos de la Cordillera Bética. Los acuíferos seleccionados son representativos de un extenso rango de condiciones meteorológicas y geológicas de esta región. Estos resultados indican una tasa media anual de recarga y un coeficiente medio de infiltración de 262 mm/año y 38%, respectivamente.

Se ha obtenido una alta correlación entre la precipitación anual y la recarga anual en todos los acuíferos, lo que pone de manifiesto que la principal fuente de recarga es la infiltración del agua de lluvia. Por su parte, se puede comprobar que, incluso con una misma precipitación anual, el coeficiente de infiltración puede ser muy diferente. Esto refleja diferencias significativas en el grado de karstificación superficial y en el grado de desarrollo de la cobertura vegetal-suelo-epikarst en la Cordillera Bética.

Se ha comprobado que los acuíferos que reciben precipitaciones anuales inferiores a 300 mm/año tienen tasas de recarga insignificantes. En otras regiones semiáridas del planeta este tipo de observaciones han generado una intensa preocupación, ante el actual escenario de cambio climático. Un mínimo descenso en la precipitación media anual en el sur de España, especialmente en la mitad este de la Cordillera Bética, provocará una notable disminución de la tasa de recarga actual.

Aunque el esfuerzo realizado hasta la fecha ha sido importante, es necesario seguir avanzando en mejorar el conocimiento

respecto a la variabilidad espacial y temporal de la recarga. En este sentido, las futuras investigaciones requerirán de equipos de trabajo multidisciplinares que apoyen sus investigaciones en las necesarias series temporales de datos meteorológicos, piezométricos, foronómicos, así como un mejor conocimiento de la explotación de los acuíferos. Este tipo de información debería ser almacenada por las instituciones encargadas de la gestión del agua, en bases de datos accesibles. Por otro lado, se debe hacer un mayor esfuerzo en aplicar modelos matemáticos que permitan simular diferentes escenarios de cambio climático y/o cambios en el uso del suelo, para poder hacer políticas de adaptación ante esta nueva situación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido realizada en el marco de la Unidad Asociada "Estudios Hidrogeológicos Avanzados" entre el IGME y el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Es una contribución al proyecto CGL-2010-15498, CGL-2012-32590 de la DGICYT e IGCP 598 de la UNESCO, y de los Grupos de Investigación RNM-126 y 308 de la Junta de Andalucía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA H. & MURILLO J.M. 2009. The effect of possible climate change on natural groundwater recharge based on a simple model: a study of four karstic aquifers in SE Spain. *Environmental Geology* 57: 963-974.
- ALCALÁ F.J. & CUSTODIO E. 2014. Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Process* 28 (2): 218-236.
- ALCALÁ F.J., CANTÓN Y., CONTRERAS S., WERE A., SERRANO-ORTIZ P., PUIGDEFÁBREGAS J., SOLÉ-BENET A., CUSTODIO E. & DOMINGO F. 2011. Diffuse and concentrated recharge evaluation using physical and tracer techniques: results from a semiarid carbonate massif aquifer in southeastern Spain. *Environmental Earth Sciences* 62(3): 541-557.
- ANDREU B., VÍAS J., DURÁN J.J., JIMÉNEZ P., LÓPEZ-GETA J.A. & CARRASCO F. 2008. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal* 16: 911-925.
- ANDREU J.M., ALCALÁ F.J., VALLEJOS A. & PULIDO-BOSCH A. 2011. Recharge to mountainous carbonated aquifers in SE Spain: different approaches and new challenges. *Journal of Arid Environmental* 75(12): 1262-1270.
- ANDREU J.M., DELGADO J., GARCÍA-SÁNCHEZ E., PULIDO-BOSCH A., BELLOT J., CHIRINO E. & ORTIZ DE URBINA J.M. 2001. Caracterización del funcionamiento y la recarga del acuífero del Ventós-Castellar (Alicante). *Revista Sociedad Geológica de España* 14(3-4): 247-254.
- BAKALOWICZ M. 2005. Karst groundwater: a challenge for a new resources. *Hydrogeology Journal* 13: 148-160.
- BARBERÁ J.A. 2014. *Investigaciones hidrogeológicas en los acuíferos carbonáticos de la Serranía de Ronda Oriental*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, España.
- BELLOT J., BONET A., SÁNCHEZ J.R. & CHIRINO E. 2001. Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape and Urban Planning* 55: 41-53.
- BENAVENTE J., HIDALGO M.C., IZQUIERDO A., MABROUKI K. & RUBIO J.C. 2004. Contenido en cloruros y en isótopos estable (^{18}O y D) de las precipitaciones en un área montañosa (Alto Guadalquivir, Jaén). *Geogaceta* 36: 111-114.
- CEHIUMA 2010. *Trabajos de mejora del conocimiento y protección contra la contaminación y deterioro del estado de las masas de agua subterránea de las Demarcaciones Hidrográficas Andaluzas de carácter intra-comunitario, conforme a lo establecido en las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE*. Unpublished report.
- CONTRERAS S., BOER M., ALCALÁ F.J., DOMINGO F., GARCÍA M., PULIDO-BOSCH A. & PUIGDEFÁBREGAS J. 2008. An ecohydrological modelling approach for assessing long-term recharge rates in semiarid karstic landscapes. *Journal of Hydrology* 351: 42-57.

- CORRAL M.M., MURILLO J.M. & RODRIGUEZ L. 2004. *Caracterización del funcionamiento de la unidad hidrogeológica de Serral-Salinas (Alicante)*. VIII Simposio de Hidrogeología 26: 53–62, Zaragoza.
- DE MINGO B. 2013. *Evaluación de la recarga del acuífero carbonático de Ahílo (Jaén)*. Tesis de Licenciatura. Pablo de Olavide University, Sevilla.
- ERIKSSON E. & KHUNAKASEM V. 1969. Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. *Journal of Hydrology* 7:178–179.
- GOLLONET J., GONZÁLEZ-RAMÓN A. & RUBIO J.C. 2002. Nuevas aportaciones sobre el funcionamiento hidráulico del sistema kárstico de Sierra Mágina. En F. Carrasco, J.J. Durán & B. Andreo (eds.), *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Málaga, pp. 211–217.
- GONZÁLEZ-RAMÓN A. 2007. *Hidrogeología de los acuíferos kársticos de las Sierras de Pegalajar y Mojón Blanco (Jaén)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- GONZÁLEZ-RAMÓN A., DELGADO A. & MUDARRA M. 2011. Análisis de la respuesta a la recarga en carbonatos alpujarrides mediante el estudio hidrodinámico, hidroquímico e isotópico del manantial del Carcabal (La Peza, Granada). *Boletín Geológico y Minero*, 122 (1): 93–108.
- GONZÁLEZ RAMÓN A., PEINADO PARRA T., DELGADO HUERTAS A. & CIFUENTES SÁNCHEZ V.J. 2013. Características hidrológicas, hidroquímicas e isotópicas del acuífero Orce-María (Almería). Aportaciones al modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico. X Simposio de Hidrogeología. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos* 30: 91–102.
- GUARDIOLA-ALBERT C., MARTOS-ROSILLO S., JIMÉNEZ-GAVILÁN P., LIÑÁN BAENA C., PARDO-IGÚZQUIZA E., CEREZUELA R., PULIDO D., LUQUE-ESPINAR J.A., DURÁN VALSERO J.J. & ROBLEDO-ARDILA P.A. 2012. Comparación de distintos métodos de evaluación de la recarga en el Sector Occidental del acuífero kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga). En: J.A. López-Geta et al. (eds.), *El Agua en Andalucía. Retos y avances en el inicio del milenio*. IGME, Madrid.
- IGME-IARA 1990. *Investigación hidrogeológica de los acuíferos de Sierra de Orce y Cúllar Baza*. Informe inédito.
- IGME-GHUMA 2003. *Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonáticos: aplicación a la Cordillera Bética*. Informe inédito.
- ITGE-COPTJA 1996. *Reconocimiento hidrogeológico y ejecución de sondeos de investigación en el sector Quiebrajano-Víboras (Jaén)*. Informe inédito.
- ITGE-COPTJA 1998. *Plan de Integración de los recursos hídricos subterráneos en los sistemas de abastecimiento público de Andalucía. Sector de Acuíferos de Padul-La Peza y Albuñuelas*. Informe inédito.
- MANCERA E. 2013. *Evaluación de la recarga en un acuífero carbonático sometido a explotación intensiva. El acuífero de Bedmar-Jodar (Jaén)*. Tesis de Master, 78 pp.
- MARTÍNEZ-SANTOS P. & ANDREU J.M. 2010. Lumped and distributed approaches to model natural recharge in semiarid karst aquifers. *Journal of Hydrology* 388: 389–398.
- MARTOS-ROSILLO S., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ M., PEDRERA A., CRUZ-SANJULIÁN J. & RUBIO J.C. 2013. Groundwater recharge in semi-arid carbonate aquifers under intensive use: the Estepa Range aquifers (Seville, southern Spain). *Environmental Earth Sciences* 70: 2453–2468.
- MARTOS-ROSILLO S., RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ M., MORAL F., CRUZ-SANJULIÁN J.J. & RUBIO J.C. 2009. Analysis of groundwater mining in two carbonate aquifers in Sierra de Estepa (SE Spain) based on hydrodynamic and hydrochemical data. *Hydrogeology Journal* 17:1617–1627.
- MORAL F. 2005. *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral. Univ. Pablo de Olavide. Dpto. de Ciencias Ambientales, Sevilla.
- MUDARRA M. 2012. *Importancia relativa de la zona no saturada y zona saturada en el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos carbonáticos. Caso de la Alta Cadena, sierra de Enmedio y área de Los Tajos (provincia de Málaga)*. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga, Malaga, Spain.

- MURILLO J.M. & DE LA ORDEN J.A. 1996. *Sobreexplotación, alternativas de gestión y evaluación del efecto del cambio climático en la recarga natural del acuífero Kimmeridgiense de Cabezón de Oro (Alicante)*. Recursos Hídricos en Regiones Kársticas, Vitoria: 73-88.
- MURILLO J.M., DE LA ORDEN J.A & RONCERO F.J. 2004. *El modelo ERAS una herramienta sencilla para estimar la recarga a los acuíferos que tienen una respuesta rápida*. Congreso XXXIII IAH- 7º ALHSUD. Groundwater flow understanding: from local to regional scales. Zacatecas City, México. <http://www.igeograf.unam.mx/aih>
- MURILLO J.M & RONCERO F.J. 2005. Natural recharge and simulation of the management using the model ERAS. Application to Peñarubia aquifer (Alicante). *Boletín Geológico y Minero* 116: 97-112.
- PADILLA A., & PULIDO-BOSCH A. 2008. A simple procedure to simulate karstic aquifers. *Hydrological Processes* 22: 1876-1884.
- PARDO-IGÚZQUIZA E., DURÁN-VALSERO J.J, DOWD P.A., GUARDIOLA-ALBERT C, LIÑÁN-BAENA C. & ROBLEDO-ARDILA P.A. 2012. Estimation of spatio-temporal recharge of aquifers in mountainous karst terrains: Application to Sierra de las Nieves (Spain). *Journal of Hydrology* 470/471: 124-137.
- PULIDO-BOSH A., PULIDO-LEBOUF P., MOLINA L., VALLEJOS A. & MARTÍN-ROSALES W. 2000. Intensive agricultura, wetlands, quarries and water management. A case study (Campo de Dalías, SE Spain). *Environmental Geology* 40 (1-2): 163-168.
- PULIDO-VELÁZQUEZ D., GARCÍA-ARÓSTEGUI J.L., MOLINA J.L. & PULIDO-VELÁZQUEZ M. 2014. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrological Process.* DOI: 10.1002/hyp.10191.
- RUIZ-GONZÁLEZ P. 2012. *Evaluación de la recarga de los acuíferos carbonáticos de las Sierras de Mollina-La Camorra y Humilladero (Málaga)*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Pablo Olavide, Sevilla.
- SANZ DE GALDEANO C. 1997. *La Zona Interna Bético-Rifeña*. Monografías Tierras del Sur, Universidad de Granada. 316 pp.

APÉNDICE I

N	Acuífero	S (km ²)	Método	P (mm/año)	R (mm/año)	R/P (%)	REFERENCIA
1	Ventós-Castellar	7	ERAS	242	7	3,0	ANDREU ET AL. (2001)
			ERAS	272	13	5,0	MARTÍNEZ-SANTOS & ANDREU (2010)
2	Peñarrubia	41,5	ERAS	372	114	31,0	MURILLO & RONCERO (2005)
			ERAS	446	163	37,0	AGUILERA & MURILLO (2009)
3	Serral-Salinas	198	ERAS	372	49	13,0	CORRAL ET AL. (2004)
			ERAS	446	18	4,0	AGUILERA & MURILLO (2009)
4	Cabeçó d'Or	15	ERAS	400	68	17,0	MURILLO & DE LA ORDEN (1996)
5	Solana	118	ERAS	333	76	23,0	MURILLO ET AL. (2004)
			ERAS	446	208	47,0	AGUILERA & MURILLO (2009)
6	Jumilla-Villena	320	ERAS	446	56	13,0	AGUILERA & MURILLO (2009)
7	Sierra de Cazorla	823	BAA	740	297	40,0	MORAL (2005)
			BMC	740	190	26,0	BENAVENTE ET AL. (2004)
			APLIS	740	244	33,0	ANDREO ET AL. (2008)
			BMC	740	274	37,0	ALCALÁ & CUSTODIO (2014)
8	Sierra de Gadór	670	BAS	550	150	27,0	PULIDO-BOSCH ET AL. (2000)
			BMC	550	120	22,0	ALCALÁ ET AL. (2011)
			BAS	550	164	30,0	CONTRERAS ET AL. (2008)
			BAS, BMC	550	105	19,0	ALCALÁ ET AL. (2011)
9	Sierra de las Cabras	34	BAA	964	318	33,0	IGME-GHUMA (2003)
			APLIS	964	347	36,0	ANDREO ET AL. (2008)
10	Sierra de Libar	89	BAA	1299	714	55,0	IGME-GHUMA (2003)
11	Sierra de las Nieves	129	APLIS	1299	652	50,2	MARÍN (2009)
			BAA	1004	552	55,0	IGME-GHUMA (2003)
12	Sierras Blanca y Sierra de Mijas	173	APLIS	1004	564	56,2	MARÍN (2009)
			BAA	712	320	45,0	IGME-GHUMA (2003)
13	Sierra de Cabra y Rute-Horconera	196	APLIS	712	309	43,4	MARÍN (2009)
			BAA	800	360	45,0	IGME-GHUMA (2003)
14	Sierra Gorda de Loja	334	APLIS	800	310	38,7	ANDREO ET AL. (2008)
			BAS, Kessler	861	474	50,0	IGME-GHUMA (2003)
15	Sector Sierra de María Sector Sierra de María	33	APLIS	861	510	59,2	MARÍN (2009)
			BAA	450	144	32,0	GONZÁLEZ-RAMÓN (2013); IGME-IARA (1990)
16	Becerrero	26,2	APLIS	484	185	38,2	ANDREO ET AL. (2008)
			BAA	586	185	31,6	
			BMC	586	208	35,5	
17	Mingo	0,6	BAS	534	240	44,9	
			APLIS	534	283	53,0	
			ERAS	534	252	47,2	
18	Hacho	1,6	BAS	543	183	33,7	
			APLIS	543	239	44,0	
			ERAS	543	188	34,6	MARTOS-ROSILLO ET AL. (2013)
19	Águilas	4,4	BAS	564	240	42,6	
			APLIS	564	237	42,0	
20	Pleites	2,9	BMC	564	217	38,5	
			BAS	571	183	32,0	
21	Sierra de la Silla	10	APLIS	571	183	32,0	
			BMC	995	386	38,8	
22	Sierra de Molina-La Camorra	11,8	BAS	995	418	42,0	
			APLIS	995	398	40,0	
23	Sierra de Humilladero	4,9	BAS	443	192	43,2	
			APLIS	443	199	44,9	RUIZ-GONZÁLEZ (2012)
24	Ahillo	8,1	ERAS	443	192	43,2	
			ERAS	544	178	32,7	DE MINGO (2013)

APÉNDICE I (cont.)

N	Acuífero	S (km ²)	Método	P (mm/año)	R (mm/año)	R/P (%)	REFERENCIA	
25	Torres-Jimena (Jimena)		BAS	413	161	39,0	EN ELABORACIÓN (IGME-DPJ)	
			APLIS	413	149	36,0		
26	Bedmar-Jódar	17	BAS	415	156	37,6	MANCERA (2013)	
			APLIS	415	150	36,0		
27	Mancha Real-Pegalajar	22,9	BMC	795	294	37,0	GONZÁLEZ-RAMÓN (2007)	
			BAS	795	318	40,0		
28	La Alta Cadena	76	APLIS	665	303	45,5	MUDARRA (2012)	
			BAS	665	339	51,0		
			BMC	665	390	58,7		
29	Serranía de Ronda Oriental	104	APLIS	908	497	54,7	BARBERÁ (2014)	
			BAS	908	463	51,0		
			BMC	908	498	54,8		
30	Torcal de Antequera	28,7	APLIS	641	357	55,7		
31	Sierra de Archidona	7,6	APLIS	590	199	33,8		
32	Sierra del valle de Abdalajís	40,5	APLIS	591	203	34,3		
33	Sierra de Jarastepar	45,2	APLIS	960	425	44,3		
34	Dolomías de Ronda	18,2	APLIS	810	355	43,8		
35	Sierra de los Filabres	130,4	APLIS	362	100	27,6		
36	Sierra de las Alberquillas	117,1	APLIS	750	242	32,2		
37	Sierra de Gibalto-Arroyo Marín	7,7	APLIS	787	268	34,0	CEHUMA (2010)	
38	Sierra de Escalate	20,7	APLIS	442	150	33,9		
39	Bédar-Alcornia	20,1	APLIS	354	117	33,1		
40	Sierra Valleja	5,9	APLIS	780	257	32,9		
41	Sierra de Lijar	24,2	APLIS	670	293	43,7		
42	Sierra de En medio-Los Tajos	27,8	APLIS	752	286	38,0		
43	Albuñol	26,1	APLIS	482	123	25,5		
44	Sierra Almijara	70,6	APLIS	750	322	42,9		
45	Sierra de Cañete Sur	40,7	APLIS	588	201	34,1		
46	Carcabal	1,9	BMC	530	207	39,1		GONZÁLEZ-RAMÓN (2011)
			BAS	751	346	46,1	ITGE-COPTJA (1998)	
47	Mágina NE-1	6,5	BAA	548	210	38,3	GOLLONET ET AL. (2002)	
			BAS	548	181	33,0		
48	Mágina SW-1	17	BAA	717	310	43,2		
			BAS	717	344	48,0		
49	Mágina SW-2	13,4	BAA	548	193	35,3		
			BAS	548	210	38,3		
50	Sierra del Espino	2	BAA	1071	600	56,0		MORAL (2005)
			BAS	1071	720	67,2		
51	Montesinos	7,3	BAA	702	233	33,2		ITGE-COPTJA (1996)
			BAS	702	274	39,0		

N: número de acuífero (ver Fig. 1); S: superficie de afloramiento; P: Precipitación media anual; R: recarga anual; R/P: coeficiente de infiltración calculado. Métodos: BMC, Balance de Masas de Cloruros; BAS, Balance de Agua en el Suelo; BAA, Balance de Agua en el Acuífero.