

Recarga natural al acuífero de Alcadozo (España) mediante balance de cloruro atmosférico y balance de agua en el suelo

Jorge Hornero¹, Marisol Manzano², Lucía Ortega² y Emilio Custodio³

¹ Instituto Geológico y Minero de España, Avda. Miguel de Cervantes 45-5ªA, 30009, Murcia. 0034-968245012.

² Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 52, 30203, Cartagena. 0034-968345343

³ Universidad Politécnica de Cataluña, C/Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Edificio D2, 08034, Barcelona.

Mail de contacto: j.hornero@igme.es

RESUMEN

Evaluar la recarga a los acuíferos con precisión es fundamental para proponer planes de gestión realistas y efectivos. En zonas de clima semiárido las variaciones espaciales y temporales de los factores involucrados en la recarga natural generan incertidumbres que se deben cuantificar para conocer la confiabilidad de los valores de recarga. En la Masa de Agua Subterránea Alcadozo (cuenca del Segura, SE España) se ha cuantificado la recarga de forma regionalizada. La recarga media interanual (R) calculada mediante balance de cloruro atmosférico varía entre $21 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ y $151 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, con una incertidumbre en el entorno de 0,25. La relación entre la recarga y la precipitación disminuye de NW a SE, entre 0,28 y 0,06. R también se ha evaluado mediante balance de agua en el suelo con el código VISUAL BALAN, obteniéndose valores entre $26 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ y $39 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$. El uso simultáneo de métodos independientes contribuye a disminuir la incertidumbre. Palabras clave: Recarga, balance de cloruro, balance de agua en el suelo, cuenca del Segura.

ABSTRACT

To perform realistic and effective groundwater management programs accurate recharge values must be used. In semiarid climate areas, the factors involved in groundwater recharge display a natural variability whose uncertainty should be estimated in order to know how reliable are the recharge values calculated. In the Alcadozo Groundwater Body (Segura River basin, SE Spain) the regional distribution of groundwater recharge values has been estimated. Mean interannual recharge values (R) estimated using the atmospheric chloride mass balance method range from $21 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ to $151 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$, and their estimated uncertainty is around 0.25. The recharge/precipitation ratio decreases from NW to SE, from 0.28 to 0.06. The R values have also been estimated by the soil water balance with the code VISUAL BALAN; the values thus obtained vary between $26 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$ and $39 \text{ mm}\cdot\text{y}^{-1}$. The use of several independent methods contributes to lower the uncertainty of R. Keywords: Recharge, chloride mass balance, soil water balance, Segura River Basin

Introducción

La estimación de la recarga natural es esencial en el análisis de un sistema hidrogeológico y debe proporcionar información confiable para el uso sostenible de los recursos hídricos como parte de una adecuada planificación hidrológica. La Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea (DMA, 2000) requiere calcular los balances hídricos de las Masas de Agua Subterránea (MAS, término legal equivalente, a efectos de este trabajo, a sistema acuífero) para cumplir determinados objetivos, entre ellos valorar los recursos

disponibles que permitan establecer cuáles pueden ser los niveles de garantía para los distintos usos del agua y estimar el índice de explotación óptimo para cumplir con el objetivo del buen estado de la masa de agua.

Los métodos de evaluación de la recarga incorporan los efectos de actuaciones locales y regionales (sobreexplotación, perturbación de la calidad natural) que con frecuencia se traducen en una elevada variabilidad espacial y temporal y en una notable imprecisión de las estimaciones. También los procesos atmosféricos y físicos que intervienen varían espacial y temporalmente. Por ello, la

estimación fiable de la magnitud de la recarga natural es de gran dificultad. La incertidumbre de la recarga, medida en términos de error relativo, nunca es inferior a la incertidumbre de los datos y variables utilizados para su evaluación, por lo que dichas incertidumbres deben ser incluidas en las técnicas de estimación (De Vries and Simmers, 2002).

En zonas de clima húmedo las incertidumbres en el cálculo del balance de agua son pequeñas debido a la magnitud relativa de la componente de recarga, pero en zonas semiáridas y áridas las estimaciones regionales de recursos de agua a partir de balances de agua van a menudo acompañadas de una notable incertidumbre. En estas regiones la recarga ha sido estimada mediante una variedad de técnicas físicas, químicas, isotópicas y de modelización que han sido descritas en diversas publicaciones (Lerner et al., 1990; Hendrickx y Walker, 1997; Scanlon et al., 2002; 2006; Custodio et al, 1997; Custodio, 2010). El objetivo de cada estudio y los datos disponibles condicionan el método que se debe utilizar para estimarla y la escala de trabajo. Entre los factores que más influyen en la elección están la escala espacial y temporal, el rango y la fiabilidad de las estimaciones (Sophocleous, 2004).

Para contrastar el rango de valores de la recarga se suelen utilizar varias técnicas simultáneamente. Uno de los métodos más utilizados para calcular la recarga media multianual neta difusa es el balance de masa de cloruro atmosférico (BMC). Se han efectuado numerosas aplicaciones del método en diferentes lugares del mundo (Scanlon et al., 2006; Zagana et al., 2007; Gee et al., 2005; Sami y Hughes, 1996; Alcalá y Custodio, 2008). La principal incertidumbre está asociada al conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de la deposición atmosférica total de cloruro. Con frecuencia se limita a periodos cortos (1 a 3 años), lo que aumenta la incertidumbre de la estimación de los valores medios, pero de manera acotable (Alcalá y Custodio, 2012; Scanlon et al., 2006).

Otro tipo de métodos muy usados consiste en calcular el balance de agua de precipitación infiltrada en el suelo (BAS). Son métodos de carácter regional que permiten cuantificar la recarga media en áreas extensas. Pueden ser calibrados a partir de la evolución de los niveles piezométricos o caudales de descarga del sistema usando modelos sencillos de respuesta.

Aquí se presentan los trabajos de cuantificación de la recarga en una zona de clima semiárido, la MAS Alcadozo (SE España). Se están usando dos métodos alternativos: el método de BMC considerando la incertidumbre asociada a la estimación debido a la variabilidad natural de las variables (Custodio, 2010; Alcalá y Custodio, 2012) y el método de BAS con el código VISUAL BALAN (Samper et al. 1999), como parte del proyecto REDESAC.

Área de estudio

La MAS Alcadozo (500 km²) está localizada en las Cordilleras Béticas, sobre la margen izquierda del río Mundo y en la cuenca del río Segura (Fig. 1). Es un acuífero principalmente carbonatado de edad jurásica. Las formaciones permeables principales son dolomías con niveles de calizas del Dogger, con potencias cercanas a los 300 m, y dolomías y calizas del Lías Inferior, con potencias entre 100 m y 150 m. En ambos casos su elevada permeabilidad es debida a la intensa fracturación. Otras formaciones permeables de menor interés hidrogeológico son los conglomerados, arenas y calizas del Cretácico, y las areniscas y conglomerados del Mioceno; ambos pueden originar pequeños acuíferos colgados de interés local. Todos estos materiales se encuentran sobre arcillas y yesos del Triásico que constituyen la base impermeable regional (IGME-CHS, 2010).

La explotación de agua subterránea es poco significativa y el acuífero funciona en régimen próximo al natural. El flujo regional tiene una dirección preferente desde el NO hacia el E y SE. Las principales descargas naturales se producen en las inmediaciones del río Mundo (borde sur de la MAS) de forma concentrada a través de manantiales (Ayna y Liétor, Fig. 1). Hipotéticamente también podría haber descarga difusa al río (se está estudiando mediante aforos diferenciales y balance de masa de actividad de ²²²Rn; ver Ortega et al., 2013). Asimismo, se sabe que existe una descarga notable al túnel de Talave (NE de la MAS), que es una infraestructura hidráulica construida entre 1969 y 1978 para trasvasar agua desde la cuenca del río Tajo (NE de España) a la del río Segura. El túnel funciona como un gran dren artificial y actualmente se está empezando a evaluar su influencia sobre el flujo regional.

La MAS Alcadozo presenta un relieve accidentado, con sus mayores altitudes en el sector occidental (1400-1600 m s.n.m.) que disminuyen paulatinamente hacia el E y el S (950-1200 m s.n.m.). La MAS está dentro del ámbito climático Mediterráneo, donde el

principal rasgo es la existencia de una acentuada sequía estival, pero en su extremo occidental hay una marcada influencia continental, con una elevada amplitud térmica anual, estacional e incluso diaria motivada por su situación orográfica aislada de la influencia costera. También hay un fuerte gradiente en la

precipitación media anual, entre 350 mm/año en el sector oriental y 700 mm/año en el sector occidental de notable relieve montañoso. En este último sector se producen las lluvias más intensas debido al efecto barrera que produce la elevada orografía sobre la entrada de masas de aire húmedo de origen atlántico.

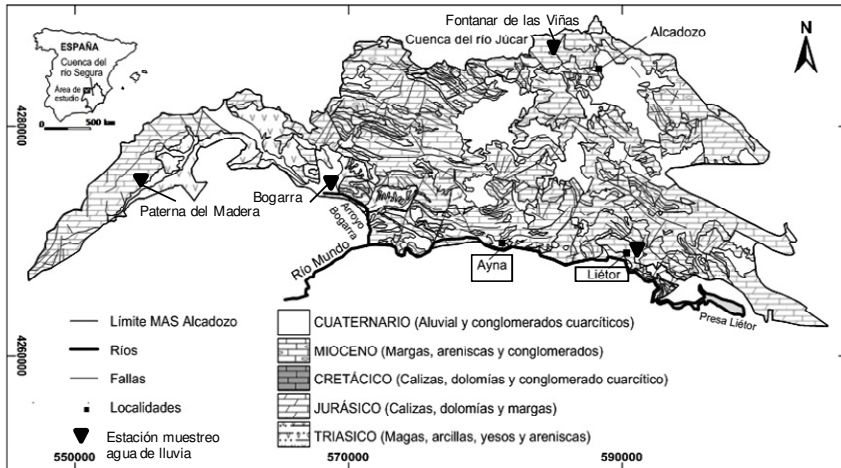


Figura 1. Localización y geología simplificada de la MAS Alcadozo.

Métodos usados para la estimación de la recarga

A) Balance de masa de cloruro atmosférico

El balance de masa de cloruro atmosférico se basa en el balance de la deposición atmosférica total de cloruro para calcular la recarga media multianual en condiciones estacionarias (Allison y Hughes, 1978; Custodio, 2010; Alcalá y Custodio, 2012). Los requerimientos para la aplicabilidad del método son que el contenido de Cl en el agua freática (Cl_f) proceda únicamente de la lluvia y no haya otros aportes por el terreno o de carácter antrópico. A largo plazo, la vegetación asimila Cl a igual tasa que la que lo libera (vegetación muerta). Por tanto, utilizar el Cl para calcular el balance de masas entre el agua de lluvia y el agua freática implica que el valor de la recarga media interanual queda determinada por la siguiente expresión:

$$A_P = A_E + A_R \quad (1)$$

donde A_P es la deposición total de cloruro, A_E es el flujo de salida de cloruro por escorrentía superficial y A_R es el flujo de entrada de cloruro por agua de recarga. Todos los términos se expresan en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ y responden a valores

medios o se corresponden con el periodo controlado. La recarga se puede calcular como:

$$R = (P \cdot Cl_p - E_s \cdot Cl_E) / Cl_r \quad (2)$$

donde R es la infiltración media ($mm \cdot año^{-1}$), P es la precipitación media anual ($mm \cdot año^{-1}$), Cl_p es el contenido medio en cloruro en el agua de lluvia ($mg \cdot L^{-1}$) y Cl_r es el contenido en cloruro en el agua de recarga ($mg \cdot L^{-1}$), E_s es la escorrentía directa ($mm \cdot año^{-1}$) y Cl_E es su contenido medio en cloruro ($mg \cdot L^{-1}$). Si la escorrentía superficial directa E_s es despreciable, la recarga media multianual será:

$$R = P \cdot Cl_p / Cl_r \quad (3)$$

El cociente entre Cl_p y Cl_r determina la tasa de infiltración como fracción de la precipitación.

La evaluación de la recarga con este método conlleva una incertidumbre que procede de la variabilidad de los parámetros que intervienen en el BMC. Para incrementar el nivel de confianza en los cálculos realizados es preciso calcular la incertidumbre natural de cada variable. La incertidumbre en la estimación de la recarga está basado en la propagación lineal del error de cada variable y se puede calcular a partir de la desviación estándar de cada término

que interviene en BMC. La incertidumbre en la estimación de la recarga es (Alcalá y Custodio; 2012):

$$\sigma_R^2 = (\sigma_{Ap}^2 + \sigma_{AE}^2 + R^2 \cdot \sigma_{Clr}^2) / Cl_r^2 \quad (4)$$

donde σ_R , σ_{Ap} , σ_{AE} y σ_{Clr} son las desviaciones estándar del valor medio multianual de las variables R, A_P , A_E y Cl_r .

La incertidumbre en términos relativos se puede expresar por el coeficiente de variación,

$$CV_R = \sigma_R / R \quad (5)$$

Alcalá y Custodio (2008; 2012) han considerado la regionalización de las variables y su incertidumbre a diferentes escalas para la estimación de la recarga.

Adquisición de datos

Los valores de tasa de deposición total atmosférica de cloruro sobre el acuífero (A_P) necesarios para evaluar la recarga mediante BMC se han obtenido a partir de análisis de lluvia recogida en 4 estaciones (Fig. 1): Liétor (L), Bogarra (B), Paterna del Madera (PM) y Fontanar de las Viñas (FV). Se trata de datos mensuales del año hidrológico 2008/2009 para las 4 estaciones y datos semestrales ponderados de los años naturales 2011 y 2012 para las estaciones L, B y FV. Estas estaciones son puntos de observación meteorológica de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) salvo FV, donde se ha instalado un pluviómetro como estación propia del proyecto. Hasta la actualidad se dispone de 3 años con datos semestrales procedentes de la integración mensual de las muestras.

Los valores de cloruro en el agua de recarga (Cl_r) se han obtenido a partir de análisis de 23 manantiales y 21 sondeos distribuidos por toda la zona de estudio (64 muestras en total) muestreados en dos campañas (años 2008/2009 y 2011/2012). Los valores de Cl_r usados proceden de aguas no modificadas ni por aportes litológicos ni antrópicos. Con esos valores se ha elaborado un mapa de distribución de contenidos medios en Cl_r en la MAS que refleja la variabilidad natural ocasionada principalmente por la existencia o no de suelo y su espesor.

B) Balance de agua en el suelo

El balance de agua en el suelo se ha realizado con el código VISUAL BALAN (Samper et al., 1999), que es una mejora del modelo hidrológico agregado BALAN (Samper y García Vera, 1992) para la estimación de la

recarga en acuíferos. El programa resuelve las ecuaciones del balance hidrológico de forma agregada en el suelo edáfico, la zona no saturada y en el acuífero a partir de un determinado número de parámetros. Además permite realizar un análisis de sensibilidad, así como la estimación automática de parámetros mediante la minimización de los errores de ajuste a datos disponibles de niveles piezométricos y caudales. Se requiere que el acuífero se encuentre en régimen natural.

Adquisición de datos

Los datos de precipitación y temperatura necesarios para usar el método BAS han sido obtenidos de la estación 7092 CHS-Liétor (Fig. 1); los datos de caudal proceden de los aforos realizados en los manantiales de Liétor y Ayna (Fig. 1) entre diciembre de 2008 y octubre de 2009. Los valores usados proceden de información propia de campo y gabinete, de datos existentes en áreas de estudio inmediatas (DGOH-MOPU, 1988) o se han obtenido de bibliografía específica. Estos valores han sido revisados y en algún caso posteriormente ajustados en el proceso de calibración.

Resultados

A) Método BMC

Los datos de precipitación media y de deposición total media de cloruro atmosférico en las cuatro estaciones de control se muestran en la Tabla 1. La precipitación media medida en los 3 años de control se ajusta bien al rango histórico de valores definido por las isoyetas medias en este sector de la cuenca hidrográfica (CHS, 1998), el cual varía entre 372 y 570 mm y muestra una tendencia creciente de E a W (Fig. 2).

Tabla 1. Valores medios medidos de P ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) y estimados de A_P ($\text{g m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) y Cl_P ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en las cuatro estaciones de control.

Estación	Altitud (m)	P	Cl_P	A_P
FV	1008	439	1,2	0,53
L	641	372	1,1	0,40
B	880	410	1,4	0,57
PM	1133	570	1,3	0,73

La tasa de deposición media A_P oscila entre 0,4 y 0,8 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, con un gradiente aproximado de 0,008 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. Esta evolución muestra espacialmente un incremento en la tasa de deposición de cloruro de SE (cotas más bajas y

menor pluviometría) a NW (área montañosa con pluviometría más elevada) (Fig. 3).

Fontanar de las Viñas) y entre 20 y 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ en el sector oriental (área situada entre Liétor y los límites norte y este de la MAS), con un gradiente próximo a $0,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ (Fig. 4).

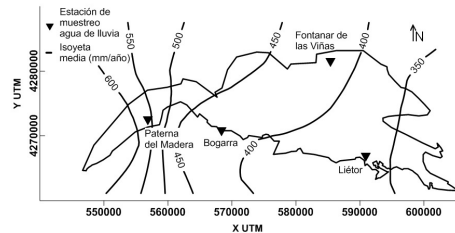


Figura 2. Mapa de isoyetas medias ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) en la MAS Alcadozo.

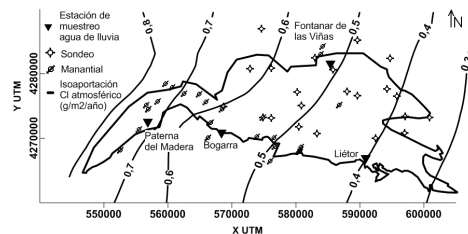


Figura 3. Mapa de isoaportaciones medias de cloruro atmosférico ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) en el área de estudio, con la ubicación de las estaciones de muestreo de aporte atmosférico de Cl y de los manantiales y sondeos usados para caracterizar el Cl del agua de recarga.

Para calcular la tasa de recarga media distribuida en la MAS se han interpolado los valores de P , A_p y Cl_p . La distribución espacial de los valores de cada variable del CMB permite regionalizar la recarga y determinar su variabilidad en términos relativos mediante el CV_R . La metodología aplicada ha consistido en relacionar espacialmente en cada punto de control (sondeo o manantial) el valor de la deposición total de cloruro atmosférico y el valor de cloruro en el agua subterránea con el fin de obtener puntualmente la tasa media anual de recarga según la ecuación (3). Una vez que se han realizado los cálculos se ha generado información cuantitativa que permite regionalizar por sectores la tasa de recarga media anual y su variabilidad.

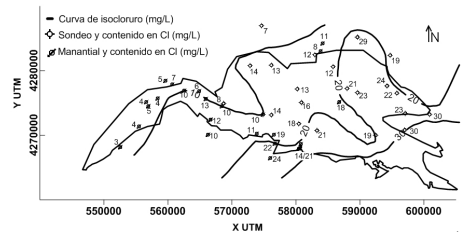


Figura 4. Mapa de isocontenido en Cl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el agua subterránea en el área de estudio.

Recarga estimada y su variabilidad

Los valores de recarga media anual en la MAS (Tabla 2) diferencian tres zonas: sector occidental, sector central y sector oriental, las cuales presentan valores significativamente diferentes de recarga (R) y de tasa media anual de recarga respecto de la precipitación (R/P), pero de incertidumbre (CV) muy similar. Las tres zonas se identifican aproximadamente con las áreas comprendidas por encima de las isoyetas medias mayores de 450 mm (sector occidental), las comprendidas entre 400-450 mm (sector central) y las comprendidas entre 300-400 mm (sector oriental).

0,25. El área está constituida principalmente por materiales carbonatados (Dogger y Lías) muy permeables por fracturación, con una estructura muy compleja debido a una sucesión de pliegues y escamas que no favorecen el almacenamiento y regulación de los recursos de agua, ya que las formaciones permeables son drenadas por manantiales en contacto con el triásico (IGME, 1980).

valores entre 400 y 450 mm frente a los 450-650 mm del sector occidental.

Tabla 2. Valores estimados y sus desviaciones estándar por zonas de la recarga media ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), la fracción de recarga sobre la precipitación R/P (adimensional) e incertidumbre en términos de coeficiente de variación.

Zona	R	R/P	CV
SW	151±38	0,28±0,07	0,25
SC	52±15	0,12±0,03	0,28
SE	21±5	0,06±0,01	0,25

En la Fig. 5 se muestran las diferentes zonas identificadas en base a la distribución espacial de la recarga. También se indican los valores medios obtenidos de R y R/P con su incertidumbre. En estos resultados no se ha considerado el flujo de salida de Cl por

escorrentía directa (A_E) al no disponerse de datos. Aunque esta circunstancia añade incertidumbre al cálculo de la recarga, en zonas semiáridas el hecho de no considerar A_E no disminuye de forma importante la cuantificación realizada, ya que se ha podido estimar una variación media del 10 % sobre el valor medio de recarga calculado (Alcalá y Custodio, 2008).

Hay una significativa correlación entre la magnitud de la recarga y la distancia respecto al flujo regional. Además se observa una sensible diferencia en el gradiente de recarga entre la zona occidental y el resto de la MAS (Fig. 6). Estos valores son coherentes y comparables con otras estimaciones de recarga y su incertidumbre realizadas en acuíferos de distintas características por Alcalá y Custodio (2012).

Una primera estimación de la recarga realizada mediante CMB (Hornero, 2010) indicaba valores medios entre $23 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ y $28 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ y de la relación R/P entre 0,06 y 0,08.

Estos valores difieren en cierta medida de los calculados recientemente; tan solo parecen ajustarse a los valores más bajos de recarga (sector oriental). En esta estimación el nivel de incertidumbre puede estar relacionado con la escasez de información temporal sobre aportación de cloruro atmosférico en agua de lluvia y de cloruro en agua subterránea. En este sentido es importante indicar que uno de los aspectos relevantes a la hora de aplicar el método BMC es disminuir el grado de incertidumbre a partir de una óptima densidad de puntos y estaciones de control. En este caso la densidad espacial de puntos con valores de Clr ha sido $1/8 \text{ km}^2$, y la de puntos con datos de P y A_P de 1 estación/ 125 km^2 . Con esta red de datos la incertidumbre obtenida en el valor de R y R/P en términos de CV es próxima a 0,25.

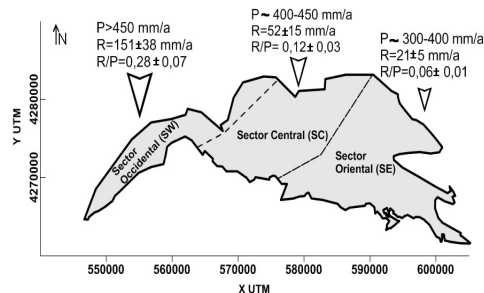


Figura 5. Mapa de distribución de la recarga regionalizada por zonas. Se indican los valores medios anuales de precipitación (P) ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$),

recarga (R) ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) con su incertidumbre y R/P (adimensional).

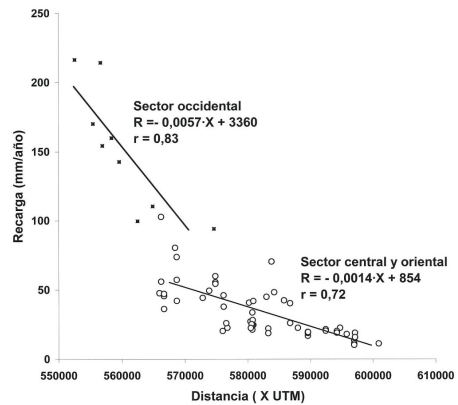


Figura 6. Relación entre la recarga y la distancia a lo largo de una hipotética línea de flujo longitudinal.

El código VISUAL BALAN se ha usado para contrastar los valores cuantificados con CMB. Se han preparado los datos de precipitación (estación 7092 CHS-Liétor) y los caudales de descarga para el periodo controlado (2008-2009). La estimación de la recarga media se ha hecho para 20 años (1989-2009), calibrando los caudales diarios calculados con los caudales de descarga obtenidos en los afloros. La estimación de la recarga se ha aplicado respectivamente a los sectores que se estima que son los drenados por los manantiales de Ayna y Liétor.

B) Método BAS

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. A falta de calcular la incertidumbre asociada a cada estimación, que se abordará más adelante, se considera que las cifras obtenidas son razonablemente comparables con las de BMC. Los valores medios de R/P oscilan entre 0,07 y 0,10, que son coherentes con los estimados en los sectores central y oriental de la MAS según la regionalización realizada mediante BMC y sugieren que la recarga se produce principalmente en estos sectores. Esta hipótesis parece también coherente con la recta altitudinal de recarga establecida a partir de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ obtenidos en los periodos 2008/2009 y 2011/2012 (Hornero, 2010; Hornero et al., 2012), ya que el rango de altitudes de recarga preferente para los manantiales de Ayna y Liétor oscila entre 1150-

1300 m, está dentro del rango de cotas existente en gran parte del sector central. La diferencia en la estimación de la recarga media anual entre los sectores Ayna y Liétor responde a la variabilidad existente en los parámetros utilizados en la calibración y quedaría dentro del margen de incertidumbre.

Tabla 3. Valores medios medidos de P (mm·a⁻¹), y estimados de R (mm·a⁻¹) y R/P (adimensional).

Sector Manantial	P	R	R/P
Ayna	380	39	0,10
Liétor	380	26	0,07

Conclusiones

Los valores de recarga regionalizados obtenidos mediante BMC oscilan entre 21 y 151 mm·a⁻¹ y los valores de R/P entre 0,06 y 0,28. Existe una importante variabilidad espacial entre la recarga media que se produce a cotas altas con respecto a la que ocurre en zonas de menor altitud. La recarga es mayor en el sector occidental debido fundamentalmente a una mayor altitud e intensidad y duración de la precipitación, así como a la alta capacidad de infiltración y baja retención de los materiales. En los sectores central y oriental es razonable que se produzca una disminución de la recarga debido a una mayor tasa de evaporación y una menor superficie de roca aflorante disponible para recibir infiltración debido a la presencia de suelos retentivos de agua, lo que motivaría una menor recarga. La variabilidad natural de la recarga determinada en el área de estudio, expresada como coeficiente de variación, es de aproximadamente 0,25.

Los valores obtenidos de recarga media anual mediante BAS con VISUAL BALAN están entre 26 y 39 mm·a⁻¹. Estos valores son razonablemente similares a los obtenidos en los sectores central y oriental de la MAS.

La aplicación de métodos de cuantificación alternativos a escala regional ha permitido estimar la incertidumbre en la evaluación de los recursos. Debería ser una herramienta fundamental para cuantificar con márgenes de certidumbre los recursos hídricos subterráneos a escala de cuenca hidrográfica.

Para mejorar las estimaciones se está discretizando espacialmente la superficie permeable con el objetivo de estimar el volumen de recarga potencial media necesario para calcular el balance hídrico en la MAS. Asimismo se están controlando de forma continua las descargas principales de Ayna y Liétor y se están recopilando datos de parámetros del

suelo con el fin de mejorar el proceso de calibración con VISUAL BALAN.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto financiado por MICINN CGL2009-12910-C03-01 (REDESAC). Se agradece la colaboración de personas locales y las facilidades que están dando para realizar los trabajos de campo los Ayuntamientos de Liétor, Ayna, Bogarra Alcadozo y Paterna del Madera a través del personal encargado de los abastecimientos.

Referencias

- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2008. Atmospheric chloride deposition in continental Spain. *Hydrological Processes*, 22: 3636–3650.
- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2012. Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in a large varied territory. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.9556.
- Allison, G.B. y Hughes, M.W. 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Aust. J. Soil Res*, 16: 181-195.
- CHS. 1998. Plan hidrológico de la cuenca del Segura. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid
- Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J. 1997. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. IGME/AIH. *Las Palmas de Gran Canaria-Madrid*: 181-208.
- Custodio, E. 2010. Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance. *Contributions to Science* 6(1): 81-97.
- DGOH-MOPU. 1988. Estudio de la Unidad Hidrogeológica de Pliegues Jurásicos entre los embalses de Talave, Cenajo y Camarillas (Albacete). Madrid.
- DMA 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Bol. Of. Com. Europeas*.
- De Vries, J.J. y Simmers, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10: 5-17.
- Gee, G.W., Zhang, Z.F., Tyler, S.W., Albright, W.H. y Singleton, M.J. 2005. Chloride mass balance: Cautions in predicting increased recharge rates. *Vadose Zone Journal*, 4: 72–78.
- Hendrickx, J. y Walker, G. 1997. Recharge from precipitation. In: Simmers I (eds.) *Recharge*

- of phreatic aquifers in semi-arid areas. Balkema, Rotterdam: pp 19–98.
- Hornero, J. 2010. Estudio hidrogeológico de la Masa de Agua Subterránea Alcadozo (cuenca del Segura). Trabajo final de Máster en Ingeniería del Agua y del Terreno. Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Hornero, J., Manzano, M. y Ortega, L. 2012. Caracterización hidrogeológica hidroquímica e isotópica de la Masa de Agua Subterránea Alcadozo (cuenca del Segura). En: 7 AHGP, Asamblea hispano portuguesa de geodesia y geofísica, Donostia–San Sebastián 25–29 de junio de 2012. [CD–ROM]. Donostia: Aranzadi Zientzia Elkarte, 2013 (en prensa).
- IGME.1980. Mapa Geológico de España, hoja 841-2333, Alcaraz (escala 1/50000), 2ª serie, 1ª edición. IGME, Madrid.
- IGME-CHS. 2010. Definición de un plan de extracciones de agua subterránea en la Cuenca Alta del Segura en épocas de sequía. Instituto Geológico y Minero de España.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. y Simmers, I. 1990. Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. Balkema/AIH The Netherlands.
- Ortega, L., Hornero, J. y Manzano, M. 2013. Aplicación del ^{222}Rn para identificar y cuantificar descargas de agua subterránea en el Río Mundo (Albacete, España). VI Seminario Hispano Latino americano sobre temas actuales de la hidrología subterránea, La Plata, Argentina, 2013 (en prensa)
- Sami, K. y Hughes, DA. 1996. A comparison of recharge estimates to a fractured sedimentary aquifer in South Africa from a chloride mass balance and an integrated surface-subsurface model. *Journal of Hydrology* 179: 111–136.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 1992. Manual de usuario del programa BALAN_8. Dpto. de Ingeniería del Terreno. ETS de Ingenieros de Caminos. UPC. Barcelona.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0. Publicación Técnica de ENRESA 05/99. Madrid: 134 pp.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. y Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.
- Scanlon, B. R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M. y Simmers, I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20:3335-3370.
- Sophocleous, M. 2004. Groundwater recharge. En: Luis Silveira, Stefan Wönllich, and Eduardo J. Usunoff (eds.). *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Eolss Publishers Oxford UK [<http://www.eolss.net>].
- Zagana, E., Kuells, Ch., Udluft, P. y Constantinou, C. 2007. Methods of groundwater recharge estimation in eastern Mediterranean water balance model application in Greece, Cyprus and Jordan. *Hydrological Processes*, 21: 2405-2414.