

UTILIZACIÓN DEL BALANCE DE CLORUROS EN LA ZONA NO SATURADA EN LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA NATURAL A UN ACUÍFERO DETRÍTICO

J. M. Ruiz

Dirección de Hidrogeología y Aguas Subterráneas. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. jm.ruiz@igme.es

RESUMEN. Este artículo se centra en la utilización de los métodos químicos ambientales para la estimación de la recarga basados en el balance de masa de cloruro en la zona no saturada (técnica de los perfiles de solutos) en acuíferos detríticos en clima semiárido (precipitación ≤ 700 mm/año). Se describen la metodología de campo y de laboratorio del método junto con un análisis de las ventajas e incertidumbres de la utilización del mismo. Se ha realizado una revisión bibliográfica de la aplicación de esta metodología de estimación de la recarga tanto para aspectos relacionados con la gestión y planificación hídrica como los relacionados con aspectos más específicos sobre el conocimiento de los fenómenos y procesos que la afectan.

ABSTRACT. This article focuses on using environmental tracers methods to estimate natural groundwater recharge based on chloride mass balance in unsaturated zone (chloride profile technique) refers to detritic aquifers in semiarid conditions (precipitation ≤ 700 mm/year). Field and laboratory methodologies are described along with an advantages and uncertainties approach in using the method. A bibliographic revision has been carried out of the practical methodology application in estimating groundwater recharge as sustainable groundwater resource management aspects and as specific aspects related to phenomenon and processes affecting the natural recharge.

1. Introducción

El conocimiento preciso de la recarga a los acuíferos ha sido y es uno de los principales retos hidrogeológicos sobre todo en zonas áridas y semiáridas (donde la precipitación es ≤ 700 mm/año). Para la estimación de la recarga en zonas áridas y semiáridas se han utilizado tanto métodos físicos como químicos, aunque los métodos indirectos basados en aproximaciones físicas, como el balance de agua y las medidas del flujo de Darcy, dan resultados menos satisfactorios, mientras que los métodos que usan trazadores ambientales como el cloruro y el tritio ofrecen resultados más satisfactorios como señalan Allison et al. (1994). Las técnicas de perfiles de solutos (en nuestro caso cloruro) proporcionan una herramienta interesante para la

investigación de la zns (zona no saturada) y para estimar la recarga en litologías porosas en regiones semiáridas, y aunque existen algunas incertidumbres asociadas con la estimación de las entradas de trazador y las suposiciones sobre los procesos de transporte, éstas son generalmente menores que las asociadas con los métodos de balance de agua o con los que utilizan datos físicos de la zns como la conductividad hidráulica (Scanlon et al. 2002).

1.1. Concepto de recarga natural

Se denomina recarga a un acuífero al volumen de agua que se infiltra o flujo descendente en un intervalo de tiempo que alcanza el nivel freático formando o aumentando las reservas de agua. Las formas de recarga natural a los acuíferos son por agua de lluvia, por aguas superficiales y por transferencias entre acuíferos, siendo la recarga por agua de lluvia la principal, y de la que nos ocuparemos de aquí en adelante.

Se distinguen dos tipos de recarga natural: la directa (local o difusa) y la indirecta (localizada o preferencial). La recarga directa se define como el agua que se une a la reserva de agua subterránea por percolación vertical directa de la precipitación a través de la zona no saturada (zns) procedente de los excedentes de humedad en el suelo y de la evapotranspiración. La recarga indirecta es el resultado de la percolación hasta la superficie freática de la escorrentía superficial y de la localizada en depresiones topográficas como zonas estancadas, lagunas etc. De Vries & Simmers (2002) emplean esta terminología para referirse a la: recarga directa (como percolación difusa con flujo tipo pistón), indirecta (como flujo por macroporos a través de canales de raíces, grietas de desecación y fisuras) y localizada (como flujo preferencial causado por frentes húmedos inestables y por características físicas diferenciadas en el mismo perfil de suelo). La interacción del clima, geología, morfología, condiciones del suelo y vegetación determinan los procesos de recarga, siendo ésta en áreas semiáridas, mucho más susceptible a las condiciones próximas a la superficie que en las zonas húmedas.

Cabe destacar que la recarga suscita diferentes grados de interés: por ejemplo para un agrónomo el agua que se

mueve por debajo de la zona de raíces representa una pérdida económica para la cosecha y debe minimizarse, mientras que un técnico en planificación de la explotación de recursos hídricos sólo requiere establecer una entrada total de agua sobre todo un acuífero sin pretender estudiar ni determinar su variabilidad en el espacio ni en el tiempo.

2. Comparación de métodos de estimación de la recarga

Stephens et al. (1996) llevan a cabo una recopilación de los distintos métodos para la elección de una técnica apropiada para la estimación de la recarga comparando los datos necesarios, las características óptimas del lugar donde se aplica cada uno, la fiabilidad relativa y los costos aproximados para cada uno de los métodos evaluados. En este trabajo concluyen que los métodos de perfiles de cloruro y tritio en la zona no saturada obtenidos de muestras inalteradas de suelos son los únicos que ofrecen una fiabilidad relativa alta y un coste relativo bajo.

Petheram et al. (2000) evaluaron las técnicas de estimación de la recarga empleadas en más de 60 estudios realizados en Australia de 1970 a 2000. Destacan que las más utilizadas son las que utilizan el cloruro como trazador ambiental en la zona no saturada (un 60 % de los estudios).

En general, la mayoría de las técnicas basadas en datos de la zns proporcionan estimaciones puntuales, no obstante, tales estimaciones pueden representar áreas mucho mayores por comparación de muchas estimaciones puntuales en diversas cuencas o relacionando los datos puntuales con factores geomorfológicos. (Scanlon et al. 2002).

Por otra parte varios autores apuntan que las técnicas basadas en los métodos convencionales de balance de agua utilizados en modelos numéricos conllevan probablemente gran cantidad de errores e incertidumbres. Esto se debe a que la mayoría de las aproximaciones confían en estimaciones de la evapotranspiración, cuyos errores normalmente exceden la magnitud del flujo de la recarga que se quiere estimar. Por ello y a partir de los años 80-90 la mayor parte de los estudios de estimación de la recarga en climas semiáridos se han centrado en el uso de métodos con trazadores ambientales (Walker et al. 1991).

2.1. El método del balance de cloruro en la ZNS. Técnica de los perfiles de solutos

Como señalan Allison et al. (1994), de todas las técnicas de trazadores disponibles, la del balance de cloruros pasa por ser la más simple, más barata y de uso más universal para la estimación de la recarga. El ion cloruro ha sido el trazador ambiental más comúnmente utilizado porque es altamente soluble, no se absorbe, es químicamente conservativo y fácilmente medible y ha sido utilizado para la estimación de la recarga en zonas áridas y semiáridas durante las últimas décadas.

Allison y Hughes (1978) modificaron las ecuaciones generales del balance de masa de cloruro en el agua subterránea de Eriksson y Khunakasem (1969) para utilizar

el método en la zona no saturada. En lugar de medir directamente los flujos de agua los métodos de trazadores como el cloruro pueden usarse para realizar una estimación fiable de las tasas de recarga invirtiendo los perfiles de solutos obtenidos en el campo. Lo que se pretende es obtener un valor representativo para un determinado uso del suelo o para un tipo de suelo.

2.2. Fundamento teórico

El flujo de agua por debajo de la zona de raíces q_w (LT^{-1}) se puede estimar en base al grado de enriquecimiento de cloruro en el agua de los poros en relación con su concentración en la precipitación de acuerdo con la ecuación del balance de masa del cloruro. La condición del método establece que el único cloruro existente en el sistema proviene de la precipitación directa sobre el terreno. La interpretación cuantitativa de las concentraciones de cloruro se basa por tanto en la aplicación de la ecuación de continuidad al transporte de cloruro a través de la zns (Scanlon et al., 1999; Scanlon, 2000). Se puede entonces aplicar:

$$q_w = J_{Cl} / C_{Clzns} = P \cdot C_{Clp} / C_{Clzns} \quad (1)$$

donde: J_{Cl} es el flujo de la deposición de cloruro en la superficie (entradas $ML^{-2}T^{-1}$); C_{Clzns} es la concentración del Cl en el agua de los poros (salidas ML^{-3}); P es la precipitación (LT^{-1}) y C_{Clp} es la concentración del cloruro en el agua de lluvia y la deposición seca (ML^{-3})

La concentración media de cloruro en el agua del suelo del perfil C_{Clzns} puede establecerse según (Campbell et al., 1993):

$$C_{Clzns} = \frac{\sum_i \rho_B M_i d_i}{\sum_i d_i \theta_i} \quad (2)$$

Donde: ρ_B es la densidad seca aparente del suelo o "bulk density" en kg/m^3 ; M_i es el contenido de cloruro en mg/kg del suelo seco; d_i es el intervalo de profundidad en metros y θ_i es el contenido volumétrico de agua.

El tiempo de residencia t (o la edad del agua del suelo que es equivalente al tiempo que necesita el agua para percolar hasta esa profundidad) representado por el Cl a una profundidad z se puede evaluar dividiendo la masa total acumulada de Cl desde la superficie hasta esa profundidad por el flujo anual de deposición de cloruro (Scanlon et al., 1999; Scanlon, 2000) según:

$$t = \sum \theta_i \cdot C_{Clzns} \cdot d_i / P \cdot C_{Clp} = \sum \rho_B \cdot M_i \cdot d_i / P \cdot C_{Clp} \quad \text{ó bien} \quad (3)$$

$$t = \frac{1}{J_{Cl}} \int_0^{z_i} \theta(z) C_{Clzns}(z) dz = \frac{1}{J_{Cl}} \int_0^{z_i} \rho_B(z) M_{Clzns}(z) dz$$

Las principales suposiciones del método de balance de masa de cloruro son según Scanlon et al. (1999): Flujo de pistón vertical descendente unidimensional y flujo de

deposición de cloruro constante en el periodo considerado. Como se observa en la figura 1, en el caso más simple de flujo tipo pistón, la concentración de cloruro en el agua del suelo frente a la profundidad debería incrementarse a través de la zona de raíces hasta un valor constante. Sin embargo, la mayoría de los perfiles profundos muestran una forma más compleja. Existen varias interpretaciones de las formas de los perfiles. Los abultamientos en los perfiles de cloruros han sido atribuidos a flujo preferencial, a la difusión del cloruro de la superficie freática o inducidos por cambios paleoclimáticos en la recarga.

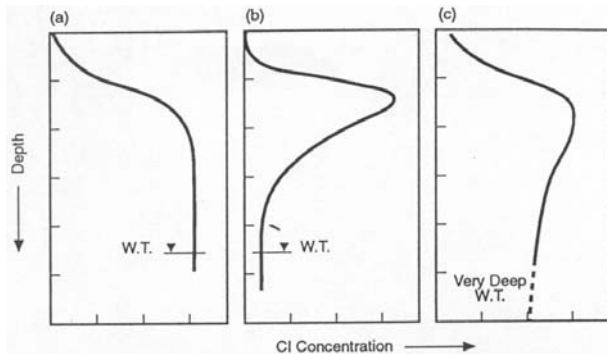


Fig. 1. Perfiles esquemáticos de la concentración de cloruro del agua del suelo con la profundidad: (a) flujo de pistón con extracción de agua por las raíces (b) extracción de agua por las raíces y posible flujo preferencial o efectos de difusión de cloruro (c) reflejo de cambios en las condiciones de paleorecarga. (Allison et al.1994). W.T.: nivel freático.

Existen básicamente tres técnicas que se utilizan para estimar la tasa de recarga de los perfiles de trazador en la zona no saturada, y son (Allison et al. 1994): por la posición del pico de trazador, por la forma del perfil de trazador y por la cantidad total de trazador almacenado en el perfil.

El método más común para presentar los datos obtenidos en los perfiles y determinar la concentración media (C_{Clzns}) es dibujar el contenido de agua acumulada frente al cloruro acumulado. El agua acumulada representa un parámetro estrechamente relacionado con la cantidad total de recarga (a una cierta profundidad) y proporciona una manera de comparar los perfiles con diferente composición estructural. El cloruro acumulado se puede interpretar como una aproximación de tiempo si se asume un flujo constante de cloruro en la precipitación a lo largo del tiempo.

Un cambio en la pendiente de la línea de tendencia puede sugerir cambios históricos en las condiciones de recarga debido a variaciones climáticas o a cambios en la entrada de cloruro al sistema. Las pendientes muy pronunciadas en este tipo de gráficos son indicativas de alta recarga mientras que pendientes bajas representan periodos en los que las tasas de recarga fueron bajas (Leaney y Herczeg, 1999).

En la mayoría de los estudios que aplican el balance de masa de cloruro se asume que los flujos de agua y de cloruros son constantes a lo largo de extensos periodos de tiempo, sin embargo, esto es difícil de verificar sobre todo

en climas áridos, por lo que también se han desarrollado técnicas que no asumen las condiciones de un estado estacionario. Los métodos transitorios se centran en la observación del cambio en el almacenamiento de cloruro en un perfil del suelo para inferir las tasas de recarga. Los enfoques transitorios son más apropiados a situaciones donde las modificaciones en los usos del suelo han conducido a cambios en el almacenamiento de sales en el perfil del suelo, como por ejemplo, los terrenos en los que se ha sustituido la vegetación autóctona por cultivos o que han sido puestos en regadío por primera vez. En estos casos pueden aplicarse dos técnicas según Walker (1998): el modelo SODICS, desarrollado principalmente para estimar la recarga en zonas agrícolas, y el método del desplazamiento generalizado del frente de cloruro (Generalised chloride front displacement) desarrollado por Ginn y Murphy (1996, 1997).

3. Material y métodos

3.1. Metodología de campo

La aplicación del método requiere la medida de la precipitación, de la concentración del cloruro en la precipitación en periodos suficientemente largos (no inferiores a dos años) y el establecimiento de perfiles de variación de concentración del mismo con la profundidad en el agua intersticial de la zona no saturada en muestras obtenidas mediante perforaciones en seco realizadas al efecto.

La acumulación de cloruro en el suelo procede de la deposición húmeda y la seca, y el término concentración de cloruro en la atmósfera por la precipitación se combina a menudo y se expresa como q_{Cl} , tasa de acumulación de cloruro ($mg\ m^{-2}\ año^{-1}$). Los valores de q_{Cl} pueden medirse, calcularse u obtenerse de la literatura. La precisión de la técnica del balance de masa del cloruro depende de la exactitud de la medida de la tasa de acumulación de cloruro a largo plazo. Según Custodio (1997) la caracterización del cloruro atmosférico puede ser adecuado para utilizarlo como un valor característico de un periodo de tiempo mucho más largo puesto que es un valor característico de un lugar y cartografiable, por lo que los resultados de la estimación de la recarga serían regionales o fácilmente regionalizables.

Aunque existe una red española de vigilancia de la contaminación atmosférica residual o de fondo a escala regional gestionada por el Ministerio de Medio Ambiente, lo normal es que no se disponga de datos cercanos de la deposición de cloruro y es por ello que en muchos estudios se recomienda y propone la obtención de los mismos mediante la instalación de una red de colectores de precipitación durante un periodo de unos 2 ó 3 años.

3.2. Metodología de laboratorio

Los principios básicos de la técnica de obtención y manejo

de las muestras se describe generalmente en la mayoría de los estudios realizados que han sido consultados, y aunque la metodología es ligeramente distinta, el procedimiento en todos los casos es similar. Básicamente se toman las muestras de testigo y se almacenan herméticamente. En laboratorio se calcula el contenido gravimétrico de agua, posteriormente se añade agua destilada, se agita y se centrifuga para obtener el supernatant o sobrenadante. Esta fase líquida se analiza y se calcula la concentración de cloruro en el agua de los poros del suelo. Normalmente la densidad seca y el contenido gravimétrico de agua se determinan en todas las muestras previamente a la extracción del cloruro. La determinación de cloruro se realiza generalmente mediante espectrofotometría de absorción o cromatografía iónica. La concentración de cloruro en las muestras de agua de lluvia puede determinarse con mayor detalle mediante cromatografía HPLC (High Performance Liquid Chromatography).

Pueden existir ciertos errores experimentales en esta técnica relativamente sencilla asociados a las proporciones de agua de lavado de las muestras. Un incompleto lavado del cloruro atmosférico conducirá a unas tasas de recarga medias mayores. Según Murphy et al. (1996) en el caso de los materiales limosos, dos lavados en proporción 1:1 consecutivos ofrecen valores de cloruro semejantes a los producidos por un lavado simple en proporción 2:1. Por otro lado, en el caso de materiales formados principalmente por arenas de grano fino-medio una disolución en proporción 1:1 es suficiente.

4. Aplicaciones del método citadas en la bibliografía

La técnica de los perfiles de solutos es empleada de forma única o junto con otros métodos en diversas aplicaciones complementarias y aspectos relacionados con el estudio de los procesos y mecanismos que afectan al flujo en la zns. De entre las citadas en la bibliografía destacan las llevadas a cabo en estudios de factores geomorfológicos, de la topografía, de la textura de los sedimentos y de los usos del suelo. Es difícil de determinar cual de ellos controla el flujo, porque en un sistema natural, se refleja un delicado balance entre los distintos parámetros. Se muestran algunos ejemplos de aplicación de la técnica recogidos de la bibliografía consultada.

4.1. Estudio de factores geomorfológicos asociados a la recarga

Las variaciones en la geomorfología se reflejan en diferencias en la topografía, tipo de suelo y vegetación, factores estos que afectan a la recarga. La variabilidad espacial de los parámetros de flujo en la zns está relacionada con los factores geomorfológicos dando lugar a distintos grupos de gráficos de cloruro versus contenido de agua. Según Scanlon et al. (1999), la identificación de estas relaciones incrementará nuestra capacidad de caracterizar el flujo a escala regional porque la geomorfología puede cartografiarse y porque, la variabilidad en los parámetros

físicos y químicos en cada entorno geomorfológico son generalmente mucho menores que la variabilidad entre entornos distintos.

Delin y Landon (2002) llevan a cabo un estudio geoquímico para investigar los efectos de la topografía y de la recarga localizada en el transporte de compuestos químicos de origen agrícola a través de los suelos arenosos hacia las aguas subterráneas. Con los datos obtenidos de la zns, el promedio anual de flujo del cloruro fue de cinco veces mayor en las zonas de depresiones topográficas que en las zonas elevadas. Como conclusión apuntan que reduciendo la aplicación de compuestos químicos en las depresiones, donde la recarga se acentúa por la escorrentía superficial, mejorará la calidad del agua subterránea.

4.2. Estudio de factores texturales

La textura de los sedimentos superficiales juega un importante papel en el control de flujo en la zns. Los sedimentos superficiales de grano fino proporcionan una capacidad de almacenamiento mayor para retener el agua infiltrada cerca de la superficie, la cual está disponible para la evapotranspiración. Varios autores como Scanlon et al. (1999) y Leaney y Herczeg (1999) apuntan una aparente correlación negativa entre el contenido de arcilla del suelo y la tasa de recarga. Estos últimos autores muestran que en Australia, la tasa de recarga “*post-clearing*” (la producida posteriormente a la eliminación de la vegetación autóctona) está controlada principalmente por el contenido en arcilla de los dos metros superiores de la zona de suelo, estableciendo una relación empírica utilizando el método de desplazamiento del pico de cloruro.

4.3. Estudio de factores paleoclimáticos y de paleorecarga

Como señalan Edmunds y Tyler (2002) y Cook et al. (1992), la zona no saturada constituye un verdadero archivo paleoclimático y de la historia de la recarga. Los trazadores químicos e isotópicos naturales existentes en los perfiles de la zns se están desarrollando como nuevos archivos potenciales que permiten reconstruir la historia de la recarga. El balance de masa de cloruro y la edad derivada del cloruro acumulado en los perfiles de la zns son las principales técnicas utilizadas en la mayoría de los estudios de reconstrucción paleoclimática o paleohidrológica realizados en las dos últimas décadas.

Cook et al. (1992) realizan un modelo en el que se determina el tiempo de persistencia en el que los cambios de concentración en un perfil del suelo, debidos a cambios climáticos, son apreciables. Por ejemplo, si los eventos climáticos tienen una duración de 5 años, entonces pueden preservarse en una zns con un contenido de humedad del 5 % durante más de 50 años si la tasa de recarga es mayor de 20 mm/año y por más de 100 años si la tasa de recarga es mayor de 40 mm/año.

4.4. Estudios de los usos del suelo

Existe una gran cantidad de estudios de la utilización de la técnica de los perfiles de cloruro para cuantificar y evaluar la recarga debida a las alteraciones producidas por el cambio en los usos del suelo. Los más significativos se han llevado a cabo en Australia donde la eliminación de la vegetación nativa llevada a cabo en los años 60 en muchas zonas para disponer de suelo agrícola, ha provocado un gran incremento de la recarga (incluso de unos dos órdenes de magnitud) y ha conducido a la salinización de las aguas subterráneas (Leaney et al. 1999)

En Allison et al. (1990, 1994) se comparan varios perfiles de cloruros realizados en la cuenca del río Murray (Australia). El perfil tipo (a) de la figura 2 es típico de zonas bajo vegetación nativa de eucaliptos, en contraste con el perfil tipo (b) realizado en una zona cercana que fue talada hace varios años, y en la que el frente de soluto está unos 5 m por debajo que en el caso de la vegetación nativa. El frente de cloruro representa el límite entre el agua almacenada en el perfil del suelo antes de la eliminación de la vegetación autóctona y el agua que se ha infiltrado desde ese momento.

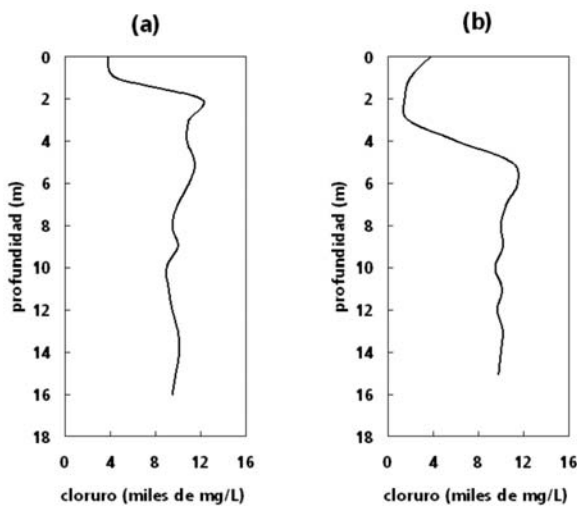


Fig. 2. Perfiles tipo del contenido de cloruro en el agua del suelo obtenidos de muestras de testigos perforados en (a) bajo vegetación de eucaliptos y (b) en una zona en la que se eliminó la vegetación de eucaliptos hace varios años. Modificado de Allison et al. (1994).

5. Ventajas e incertidumbre del método

Las ventajas pueden resumirse en que:

- Se trata de un método cuantitativo que supera la mayoría de las limitaciones y errores de las técnicas convencionales en climas semiáridos.
- El cloruro es el soluto de referencia más adecuado para la estimación de la recarga y puede usarse independientemente sin necesidad de utilizar otras técnicas isotópicas.
- La integración de la información de los perfiles con otras técnicas (teledetección, SIG) pueden proporcionar un medio

para obtener una estimación de la recarga a escala regional (regionalización).

- Las estimaciones pueden reflejar información de la recarga de decenas o cientos de años atrás y pueden ser interpretados como cambios pasados de la tasa de recarga. (Cook et al. 1992).
- Las diferencias a escala local debidas al tipo de suelo, vegetación o pendiente puede ser confirmadas y combinado con métodos físicos (humedad) e isotópicos (tritio) se puede determinar la recarga preferencial en zonas determinadas (Wood et al. 1997).
- El muestreo y los análisis son relativamente sencillos, baratos y simples.
- Se han realizado gran cantidad de estudios utilizando esta técnica con lo que pueden compararse metodologías y aspectos prácticos en los mismos (Lerner et al. 1990; Walker, 1998)

Existen una serie de condicionantes e incertidumbres en su uso que pueden resumirse en tres según Wood (1999): Variaciones espaciales de la recarga (factores geomorfológicos), variaciones temporales de la recarga (efectos por cambios climáticos y por cambios en los usos del suelo) y existencia de recarga preferencial.

Allison et al. (1985; 1994) apuntan que puede haber variaciones considerables en la tasa de recarga en una escala de unos pocos de metros en la mayoría de tipos de suelos. La razón de esta variabilidad todavía no está clara y puede deberse a cambios en la capacidad de almacenamiento del suelo, al flujo preferencial o a las características de la infiltración (escorrentía superficial seguida de recarga localizada). Como contrapartida, la variabilidad a pequeña escala de la recarga no es siempre un problema puesto que en varios estudios se ha estimado la recarga en grandes áreas utilizando la información puntual en varios lugares puesto que los perfiles varían de un tipo de suelo a otro, pero no varían mucho dentro de un mismo tipo de suelo.

6. Conclusiones

Numerosos estudios han mostrado que se pueden obtener valores regionalizados razonables de la recarga sobre amplias áreas utilizando el método del balance de masa de cloruro en la zona no saturada, sin considerar los aspectos más complejos de la variabilidad espacial a pequeña escala o local. Para la estimación de la recarga local (o difusa) en medios semiáridos los métodos de trazadores ambientales químicos basados en el balance de masa de cloruro e isotópicos resultan más prometedores que los métodos físicos, aunque todavía existan incógnitas en relación con las hipótesis utilizadas en la interpretación de los perfiles, en particular sobre la importancia del flujo preferente, los fenómenos de flujo transitorio y la estabilidad de la función de entrada del trazador.

Se pretende llevar a cabo un estudio de estimación de la recarga natural por infiltración de agua de lluvia en el

acuífero terciario detrítico de Madrid. El proyecto se plantea en dos fases paralelas correspondientes a sendos objetivos: Fase de estimación experimental de la tasa de recarga en diferentes enclaves mediante balance de cloruro en la zona y fase de caracterización de las superficies de infiltración en el acuífero mediante teledetección.

Agradecimientos. Se agradece las consideraciones y sugerencias que ha este trabajo han aportado Fermín Villarroya Gil (UCM) y Antonio Fernández Uría (IGME).

Referencias

- Allison, G.B., 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.
- Allison, G.B., Stone, W.J., Hughes, M.W. (1985) Recharge in karst and dune elements of a semi-arid landscape as indicated by natural isotopes and chloride. *Journal of Hydrology*, 76: 1-25
- Allison, G.B., Cook, P.G., Barnett, S.R., Walker, G.R., Jolly, I.D., Hughes, M.W. (1990) Land clearance and river salinisation in the western Murray Basin, Australia. *Journal of Hydrology* 119: 1-20.
- Allison, G.B., Gee, G.W., Tyler, S.W. (1994) Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions. *Soil Science Society of America Journal* 58:6-14.
- Campbell, A., Phillips, F., Shurbaji, A. (1993) Stable isotope study of soil and groundwater WIPP Site, New Mexico: Estimation of recharge to the Rustler aquifers. Technical completion report. New Mexico Water-management Education and Research Consortium (WERC).
- Cook, P.G., Edmunds, W.M., Gaye, C.B (1992) Estimating paleorecharge and paleoclimate from unsaturated zone profiles. *Water Resources Research* 28 (10):2721-2731.
- Custodio, E. (1997) Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. En *La Evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Eds. E. Custodio, M.R. Llamas, J. Samper. Palmas de Gran Canaria. AIH-GE.
- De Vries, J.J., Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10 (1):5-17.
- Delin, G.N., Landon, M.K (2002) Effects of topography on the transport of agricultural chemicals to groundwater in a sand-plain setting. *Hydrogeology Journal* 10: 443-454
- Edmunds, W.M. Tyler, S.W. (2002) Unsaturated zones as archives of past climates: toward a new proxy for continental regions. *Hydrogeology Journal* 10 (1): 216-229
- 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: 178-197.
- Ginn, T.R., Murphy, E.M. (1996) Generalized chloride mass balance: forward and inverse solutions for one-dimensional tracer convection under transient flux. U.S. Department of Energy. PNNL-11074.
- Ginn, T.R., Murphy, E.M. (1997) A transient flux model for convective infiltration: forward and inverse solutions for chloride mass balance studies. *Water Resources Research* 33 (9): 2065-2079.
- Leaney, F.W.J., Herczeg, A.L. (1999) The origin of fresh groundwater in the SW Murray Basin and its potential for salinisation. CSIRO Land and Water. Technical report 7/99.
- Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (1990) Groundwater recharge. Volume 8. IAH. Heise. 345 pp.
- Murphy, E.M., Ginn, T.R., Phillips, J.L. (1996) Geochemical estimates of paleorecharge in the Pasco Basin: evaluation of the chloride mass balance technique. *Water Resources Research* 32 (9): 2853-2868.
- Petheram, C., L. Zhang, G. Walker, Grayson, R. (2000) Towards a framework for predicting impacts of land-use on recharge: a review of recharge studies in Australia. CSIRO Land and Water. T. Report 28/00.
- Scanlon, B.R. (2000) Uncertainties in estimating water fluxes and residence times using environmental tracers in an arid unsaturated zone. *Water Resources Research* 36 (2): 395-409.
- Scanlon, B.R., Langford, R.P., Goldsmith, R.S. (1999) Relationship between geomorphic settings and unsaturated flow in an arid setting. *Water Resources Research* 35 (4):983-999.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G. (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10 (1): 18-39.
- Stephens, D.B., P. Johnson, Havlena, J. (1996). Estimation of infiltration and recharge for environmental site assessment. American Petroleum Institute publication number 4643.
- Walker, G.R., Jolly, I.D., Cook, P.G. (1991) A new chloride leaching approach to the estimation of diffuse recharge following a change in land use. *Journal of Hydrology* 128:49-67.
- Walker, G.R. (1998) Using soil water tracers to estimate recharge. Part 7 of the basics of recharge and discharge. Series Editors Lu Zhang y Glen Walker. CSIRO publishing Australia. 28 pp.
- Wood, W.W., Rainwater, K.A., Thompson, D.B. (1997) Quantifying macropore recharge: examples from a semi-arid area. *Ground Water* 35 (6): 1097-1106
- Wood, W.W. (1999) Use and misuse of the chloride-mass balance method in estimating ground water recharge. *Ground Water* 37 (1): 2-3.