

Una aproximación a la evaluación de los servicios de las aguas subterráneas al ser humano en España

Marisol Manzano Arellano

Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena

Luis Javier Lambán Jiménez

Instituto Geológico y Minero de España, Oficina de Zaragoza

Los acuíferos constituyen valiosos ecosistemas acuáticos en sí mismos, los cuales están formados por el sustrato geológico, el agua que ocupa los poros y grietas de ese sustrato (agua subterránea) y los organismos que viven en el agua. Los elementos mejor conocidos de estos ecosistemas son el sustrato geológico y el agua, mientras que el conocimiento existente sobre la ecología de las aguas subterráneas es aún muy escaso. Sin embargo, una buena parte de los servicios más relevantes que las aguas subterráneas proporcionan al ser humano se debe en gran medida a la existencia y características de la biota presente en ellas.

Los acuíferos proporcionan multitud de servicios básicos para el bienestar humano. Los servicios más obvios e identificables son los de provisión de bienes básicos para la vida tales como agua de buena calidad y la posibilidad de generar alimentos mediante riego; o los de regulación hídrica, singularmente el de proporcionar agua para beber y cultivar en época seca o en caso de cambio climático. Entre los servicios menos evidentes están el abastecimiento de madera, fibras y turba,

sales y minerales, principios activos y medicinas; la regulación de la calidad de las aguas de ríos, manantiales y humedales, así como de los efectos de inundaciones y del cambio climático; o la generación de oportunidades para la educación ambiental, la recreación, el turismo, la identidad cultural y las relaciones sociales y el disfrute espiritual.

Adicionalmente a las funciones que tienen lugar en el propio acuífero, las aguas subterráneas son el soporte de otros ecosistemas acuáticos de superficie muy valiosos (ríos, riberas, humedales, manantiales, bosques freatófiticos, praderas), muchos de cuyos servicios dependen del aporte de agua subterránea, o bien deben parte de su valor al aporte de agua subterránea en cantidad y calidad adecuadas.

Este es el primer trabajo realizado en España que aborda las aguas subterráneas de un país en su conjunto desde el punto de vista de los ecosistemas. Con anterioridad a este trabajo había algunos estudios centrados en caracterizar parte de la ecología de acuíferos concretos



En muchas zonas la disponibilidad de agua subterránea solo es posible ya mediante extracción en pozos cada vez más profundos, lo que en bastantes casos hace inaccesible el agua por motivos económicos. Foto: Carlos Valdecantos. CENEAM. MAGRAMA

de nuestro país. El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de la Fundación Biodiversidad *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en España*, y ha consistido en identificar, de forma sistemática, los servicios que ofrecen las aguas subterráneas al ser humano en nuestro país y en realizar una primera evaluación del estado de dichos servicios.

ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ACUÍFEROS Y DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUS SERVICIOS Y DE SU ESTADO DE FUNCIONALIDAD

Aunque los estudios de caracterización ecológica de las aguas subterráneas son aún escasos

incluso en el ámbito internacional, es de suponer que los ecosistemas de las aguas subterráneas sean ambientes muy heterogéneos, en función de las siguientes variables principales: la *velocidad del flujo de agua* (energía), cercana a la de los flujos superficiales en acuíferos karstificados, pero extremadamente pequeña (entre décimas de milímetro a algunos milímetros por día, lo que favorece la interacción de muchos organismos con los solutos y gases que transporta el agua) en acuíferos porosos; la *cantidad de materia orgánica* (aportada por el flujo de agua o por los sedimentos); el *oxígeno disponible* (atmosférico, procedente de solutos oxidados o de la molécula del agua); la *cantidad de solutos disueltos* (materia) y la *mineralogía del medio sólido* (reacciones biogeoquímicas de interacción con el medio sólido). Adicionalmente, a la

Los acuíferos proporcionan multitud de servicios básicos para el bienestar humano. Entre los servicios menos evidentes están el abastecimiento de madera, fibras y turba, sales y minerales, principios activos y medicinas; la regulación de la calidad de las aguas de ríos, manantiales y humedales, así como de los efectos de inundaciones y del cambio climático; o la generación de oportunidades para la educación ambiental, la recreación, el turismo, la identidad cultural y las relaciones sociales y el disfrute espiritual. Además, las aguas subterráneas son el soporte de otros ecosistemas acuáticos de superficie muy valiosos (ríos, riberas, humedales, manantiales, bosques freatófiticos, praderas), muchos de cuyos servicios dependen del aporte de agua subterránea, o bien deben parte de su valor al aporte de agua subterránea en cantidad y calidad adecuadas

complejidad natural de estos ecosistemas hay que sumar la *variabilidad natural* y la que *induce el ser humano* sobre las *condiciones de la recarga y la descarga* y sobre las *características físico-químicas* del agua de recarga.

Una característica muy relevante de las aguas subterráneas que es necesario conocer y te-

ner en cuenta a la hora de caracterizarlas y de evaluar sus servicios, es que, debido a la habitualmente pequeña magnitud de su velocidad, los cambios naturales (climáticos, eustáticos, geológicos) o antrópicos (deforestación, manipulación de los flujos superficiales o subterráneos) cuyos efectos negativos sobre la recarga a los acuíferos y el funcionamiento de los ecosistemas de las aguas subterráneas (y de otros ecosistemas que dependen de las aguas subterráneas) se están observando en la actualidad, pueden haber ocurrido hace décadas o siglos e, incluso, milenios, en el caso de cambios geológicos. Del mismo modo, hay que tener en cuenta que algunos impactos negativos sobre el funcionamiento de los acuíferos que producirán los cambios de usos del suelo y del agua, las modificaciones de los flujos hídricos, el cambio climático o el cambio global que se están produciendo en la actualidad, serán observables en las próximas décadas y probablemente en los próximos siglos.

Otro aspecto importante a considerar es que conocer la cantidad de agua subterránea que se puede utilizar en un acuífero dado no es fácil. En primer lugar hay que cuantificar la recarga y la descarga, y evaluar la cantidad de agua que se renueva cada año; luego hay que establecer unos objetivos respecto a los servicios de ese acuífero que se desean potenciar, mantener o recuperar, en su caso. Respecto al primer paso, un ejemplo de la incertidumbre asociada a las cuantificaciones a realizar son los valores oficiales que se manejan acerca de la recarga total en España, unos 30 000 Mm³ (MMA, 2000). Esta cifra está subestimada por varias razones, la más relevante porque se evaluó considerando que los acuíferos no estaban explotados, cuando en la realidad la mayoría de los acuíferos de nuestro país están explotados y en muchos de ellos el balance entre entradas y salidas no está en equilibrio. Además, aun teniendo en cuenta esta incertidumbre en las estimaciones, en la realidad la cantidad de agua que se podría usar de un acuífero dado es menor que la renovable, debido a limitaciones medioambientales, a situa-

ciones de salinización en acuíferos costeros e islas, a interferencias con aguas superficiales que ya están contabilizadas, etc. (Custodio *et al.*, 2009). Por tanto, es necesario disponer de buenas estimaciones tanto de los volúmenes almacenados como de los renovables, lo cual requiere realizar estudios detallados e individualizados. Asimismo, para conocer con el necesario nivel de detalle y confianza los efectos de la extracción de aguas subterráneas en una zona y poder decidir qué grado de explotación se está dispuesto a aceptar, es imprescindible realizar observaciones sistemáticas bien orientadas y en redes de observación adecuadamente construidas (Manzano *et al.*, 2009), generar un buen conocimiento del funcionamiento del acuífero y realizar cálculos y simulaciones apoyados en herramientas confiables.

Pero también es importante transmitir que, aunque desde el punto de vista técnico no es fácil evaluar con el detalle –muchas veces necesario para la gestión– cuáles son o van a ser los efectos sobre los servicios de una u otra actuación sobre las aguas subterráneas, la incertidumbre no es un obstáculo para la gestión. Algunos de los más reputados especialistas en el tema sostienen que las actuaciones que se han de realizar en el marco de la gestión integrada tendrían que ser específicas para cada acuífero o masa de agua subterránea, deberían integrar la incertidumbre como parte integral de la gestión y deberían obedecer a compromisos consensuados entre todos los actores sociales que son usuarios de los servicios del agua subterránea. También propugnan que la gestión debería ser adaptable y debería poderse cambiar a lo largo del tiempo en función de las condiciones hidrológicas, meteorológicas, ecológicas y socioeconómicas de la zona de trabajo en cada momento.

Por último, dado que los tiempos necesarios para observar el efecto de una determinada acción sobre la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas son largos, las actuaciones de gestión que se decidan deberían ponerse en marcha lo antes posible.

LOS ACUÍFEROS Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA: DEL ENFOQUE BASADO EN EL SUSTRATO FÍSICO AL ENFOQUE ECOSISTÉMICO

En 2007, el entonces Ministerio de Medio Ambiente identificó un total de 740 masas de agua subterránea, si bien en textos posteriores aparecen cifras algo distintas (Figura 1). Las masas de agua subterránea son la unidad de aplicación de las Directivas Europeas Marco de Aguas y Para la Protección de la Aguas Subterráneas; aunque su definición no coincide estrictamente con la de *acuífero*, a efectos de este texto, los matices no son relevantes. Esas 740 masas de agua cubren unos 350 000 km², alrededor del 70% del territorio nacional. Para definir las se usaron los límites físicos significativos tales como bordes impermeables o cauces de ríos efuentes y, en algunos casos, se consideraron los límites de influencia de la actividad humana. El tamaño de las masas de agua subterránea en España varía entre menos de 2,5 km² y más de 20 000 km².



Figura 1. Masas de agua subterránea definidas en España (MMA, 2007).

Una definición genérica de los acuíferos con perspectiva ecológica se podría basar en los siguientes rasgos distintivos:

- Son ecosistemas subterráneos cuya existencia genera servicios incluso allí donde no hay agua superficial.

En 2007, el entonces Ministerio de Medio Ambiente identificó un total de 740 masas de agua. Esas 740 masas de agua cubren unos 350 000 km², alrededor del 70% del territorio nacional. Para definir las se usaron los límites físicos significativos tales como bordes impermeables o cauces de ríos efluentes y, en algunos casos, se consideraron los límites de influencia de la actividad humana. El tamaño de las masas de agua subterránea en España varía entre menos de 2,5 km² y más de 20 000 km²

- Se originan debido a la infiltración del agua (lluvia, escorrentía, excedentes de riego) por la superficie del terreno; transportan agua, materia y energía, por debajo de la superficie del terreno, desde zonas altas de las cuencas a zonas más bajas; de forma natural descargan a la superficie tanto en forma líquida (a través de manantiales, arroyos, ríos, humedales o al mar) como en forma gaseosa (a través de evaporación y evapotranspiración), lo

que genera condiciones para la existencia de muchos ecosistemas superficiales; también salen a la superficie al ser extraídas por el ser humano a través de pozos, sondeos, galerías y drenes.

- La delimitación cartográfica de los acuíferos con perspectiva ecológica se realizaría combinando límites geológicos, hidráulicos y ecológicos: límites de formaciones geológicas porosas o fracturadas cuya permeabilidad permite el paso del agua de forma adecuada para su explotación por el ser humano, o bien para abastecer a otros ecosistemas (ríos, bosques, prados, humedales, manantiales) de manera eficiente para los mismos; cauces y humedales efluentes (zonas de descarga) o líneas de costa que son áreas de descarga.
- En régimen natural (es decir, no perturbado por la acción humana o por procesos geológicos o climáticos que supongan cambios en las entradas de agua) las condiciones de cantidad (flujo circulante por los acuíferos) y calidad (condiciones favorables para la vida que se derivan de las características físico-químicas) son muy regulares, hecho que está en la base de muchos de los servicios que generan.
- Por último, suelen estar intensamente utilizados por el ser humano, principalmente para agricultura de regadío y para abastecimiento doméstico, y este uso intensivo ha modificado el funcionamiento natural de sus ecosistemas y de los servicios que generan.



Figura 2. Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos y tiempos tránsito del agua subterránea (orientativo) (IGME, 2001).

Para clasificar los acuíferos desde el punto de vista tradicional se usan criterios texturales, hidráulicos y litológicos. Algunos de estos criterios tienen connotaciones importantes para la ecología de las aguas subterráneas, lo cual facilita el estudio y caracterización de las aguas subterráneas desde este punto de vista. Por ejemplo:

- Según el tipo de porosidad los acuíferos pueden ser *granulares*, *fracturados* o por *disolución*. El agua suele circular más lentamente por poros entre granos que por fracturas y conductos de disolución, y las velocidades pequeñas aumentan el tiempo de contacto de los organismos con los nutrientes, solutos, gases y con la matriz mineral, lo que genera oportunidades para la ocurrencia de muchas reacciones.
- Si los materiales que constituyen el acuífero están expuestos directamente a la atmósfera, el acuífero se denomina *libre*; si están separados de la atmósfera por otras formaciones geológicas de menor permeabilidad, se denomina *confinado* (Figura 2). Los acuíferos libres reciben la recarga directa de la lluvia y contienen la zona no saturada del terreno; por ello están expuestos a la entrada directa de contaminantes, pero también de aire, lo que propicia la ocurrencia de ciertas reacciones (muchas de ellas en la zona no saturada) cuyo resultado práctico es la mejora de la calidad del agua. Los acuíferos confinados reciben agua por transferencia vertical o lateral (generalmente lenta) a través de otras formaciones, por lo que los contaminantes de origen antrópico y la materia orgánica que se incorporan con la recarga suelen quedar retenidos antes de que el agua llegue a ellos; el agua que contienen está a presión mayor que la atmosférica y no tienen una zona no saturada, razón por la cual con frecuencia el ambiente es anóxico. Este favorece las condiciones de vida de organismos que para vivir pueden usar el oxígeno de especies químicas tales como sulfatos, nitratos, fosfatos o materia orgánica, lo que da como resultado una mejora de la calidad del agua.

También el origen geológico de los materiales que forman la matriz sólida y la mineralogía pueden tener connotaciones ecológicas.

LOS SERVICIOS QUE PROPORCIONAN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS AL SER HUMANO EN ESPAÑA Y SU ESTADO

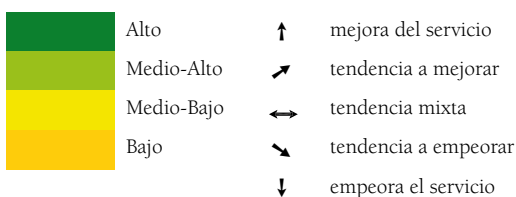
En este estudio se han aplicado a las aguas subterráneas los mismos criterios que se han aplicado a los otros ecosistemas identificados. Obviamente, se trata de una primera aproximación que debe ser revisada, completada y mejorada, ya que, entre otras cosas, se ha realizado en base a la información disponible en publicaciones científicas y en informes y sitios web de organismos públicos, organizaciones profesionales, ayuntamientos, ONG, diarios, agrupaciones culturales y otros. La información que ha resultado útil no es abundante, a veces no está fácilmente localizable, o resulta incompleta por ser su enfoque muy ajeno al de este contexto. En muchos aspectos la carencia de información de apoyo para evaluar el estado de un servicio concreto se ha suplido con el conocimiento y la experiencia personal de los autores, que obviamente tienen carencias.

Los servicios evaluados para el conjunto de los ecosistemas de España se agrupan en tres tipos: *servicios de abastecimiento*, *servicios de regulación* y *servicios culturales*. No todos los ecosistemas ofrecen todos los posibles servicios identificados dentro de cada grupo. Para las aguas subterráneas, los servicios que se han identificado y una valoración preliminar del estado cualitativo de funcionamiento de los mismos en nuestro país, elaborados con la información ya mencionada, se muestran en la Tabla 1.

A modo de síntesis se puede decir que muchos de los servicios básicos para el bienestar humano están deteriorados o se están deteriorando en amplias zonas de nuestro país como consecuencia de las múltiples presiones que afectan a la cantidad y la calidad del agua subterránea, aunque otros están mejorando. Por ejemplo:

Tabla 1. Evaluación global del estado de los servicios de las aguas subterráneas en España y tendencias de evolución

Tipo de servicio	Servicio		Situación
ABASTECIMIENTO	Alimentos	Agricultura	↔
		Acuicultura	↔
		Recolección de plantas y frutos silvestres	↘
	Agua de buena calidad	Agua para todo uso	↘
	Materias primas de origen biológico	Turba/madera/leña	↓
	Materias primas de origen mineral	Sales y carbonatos	↘
		Agua mineral	↗
		Metales	↔
	Energías renovables	Energía hidráulica	↓
		Energía geotérmica	↑
Medicinas naturales y principios activos			↑
REGULACIÓN	Regulación climática local y regional	Mantenimiento de vegetación	↘
		Almacenamiento de CO ₂	↗
	Regulación hídrica	Aumento de la disponibilidad	↓
		Mejora de la calidad	↘
	Regulación morfosedimentaria		↘
	Formación y fertilidad del suelo		↘
	Regulación de las perturbaciones naturales		↘
CULTURALES	Conocimiento científico		↑
	Conocimiento ecológico local		↓
	Identidad cultural y sentido de pertenencia		↗
	Disfrute espiritual y religioso		↗
	Paisaje-Servicio estético		↗
	Actividades recreativas y ecoturismo		↑
	Educación ambiental		↑



- Los *servicios de abastecimiento* se han visto alterados significativamente en los últimos años. Entre las décadas de 1960 y 1990 el servicio de *proporcionar agua para la agricultura* aumentó extraordinariamente, y se multiplicó por más de 600 la extracción de aguas subterráneas para regadío. Y aunque en estos últimos años

la superficie de cultivo de riego en España ha disminuido en cifras globales (entre 1987 y 2006 han desaparecido 36 355 ha), en algunas zonas del país aún se ha producido un aumento significativo de la superficie agrícola regada con aguas subterráneas: entre 1987 y 2006 han aparecido 67 444 ha de olivar de regadío,

la mayor parte (97,5%) en Andalucía, habiendo convertido terrenos de secano en regadío mediante la explotación de aguas subterráneas antiguas (OSE, 2010).

- Los *servicios de regulación* también han empeorado de manera global. Las causas son principalmente dos: el manejo de los flujos del ciclo hídrico y los cambios de los usos del suelo, singularmente la conversión de terreno natural (agrícola o forestal) en terreno antropizado. El manejo de los flujos superficiales (encauzamientos, impermeabilizaciones, extracciones para usos agrícolas, industriales y urbanos, almacenamiento de grandes volúmenes en zonas puntuales, detrayendo caudales de otras zonas, drenaje de zonas encharcables y humedales, etc.) y subterráneos (extracciones) ha inducido la reducción de las descargas naturales de agua subterránea en muchos lugares, lo que disminuye la disponibilidad hídrica para la vegetación y la biota, incluido el ser humano. En muchas zonas, la disponibilidad de agua subterránea solo es posible ya mediante extracción en pozos cada vez más profundos, lo que en bastantes casos hace inaccesible el agua por motivos económicos.
- Los *servicios culturales* en general están mejorando, tal es el caso del conocimiento científico y la generación de oportunidades para la educación ambiental o para las actividades recreativas.

En el trabajo también se ha intentado identificar cuáles son los principales *impulsores directos de cambios* en los servicios de las aguas subterráneas en nuestro país. Ordenados de mayor a menor relevancia de su impacto, estos factores son los siguientes:

1. La **explotación intensiva**. Con frecuencia concentrada espacialmente, induce cambios en la red de flujo las aguas subterráneas que tienen impactos directos sobre los servicios de abastecimiento y regulación principalmente: disminución de la magnitud de los flujos de descarga natural, descenso de la cota de los niveles piezométricos, aumento de los gradientes hidráulicos verticales descendentes, movilización de aguas subterráneas salinas, etc.
2. La **contaminación**, singularmente la *difusa*, que puede afectar a grandes volúmenes de agua subterránea y es más difícil de atenuar que la puntual. Induce impactos directos principalmente sobre los servicios de abastecimiento: provisión de agua de buena calidad, aporte de materias primas de origen biológico, provisión de medicinas naturales y de principios activos. Además, en muchos casos la contaminación influye sobre la regulación de la fertilidad del suelo, pues muchos contaminantes inducen cambios de condiciones oxidantes a reductoras en partes del terreno que deberían ser oxidantes.
3. Los **cambios de usos del suelo**. Los cambios que producen modificaciones en la red de flujo y en la hidroquímica de las aguas subterráneas que, a su vez, inducen impactos directos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales, suelen estar localizados en las zonas de recarga de los acuíferos. Las actividades con mayor impacto son la deforestación, la sustitución de vegetación natural por cultivos de regadío, la sustitución del riego en lámina libre por riego localizado, la sustitución de la vegetación natural por otra con distintos requerimientos de agua y de nutrientes, la pavimentación y la urbanización. En España hay algo más de 1 Mha artificiales, la mayor parte concentrada a lo largo de la costa mediterránea, donde el clima es semiárido, lo que supone una disminución considerable de la superficie disponible para infiltración del agua de lluvia y de escorrentía y la recarga a los acuíferos.
4. La **manipulación de los flujos del ciclo hídrico** por el ser humano tiene efectos directos sobre las aguas subterráneas e induce impactos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales de forma más o menos directa, en función del tipo de acción y de su ubicación respecto a la red de

flujo de agua subterránea. Los cambios de servicios más frecuentes afectan al balance y al régimen hídrico y a la calidad de las aguas subterráneas, y se derivan de actuaciones tales como la extracción intensiva y sostenida de aguas subterráneas, la recarga artificial de acuíferos, la modificación del trazado de la red de flujo superficial y el almacenamiento de agua superficial en embalses y presas.

5. El **cambio climático**. A pesar de la incertidumbre que aún existe sobre las previsiones de sus efectos en el área mediterránea, es necesario tener en cuenta algunas posibles situaciones que tendrían un efecto notable sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales de las aguas subterráneas. El principal impacto previsible en nuestra latitud es el descenso de los niveles piezométricos como consecuencia de la disminución de la recarga, que ocasionaría la reducción de la descarga a muchos manantiales y de las descargas difusas a ríos, arroyos, humedales y costas, y haría desaparecer esos ecosistemas y también bosques de vegetación freatofítica; también provocaría subsidencia e intrusión salina en muchos acuíferos. Además, el aumento de la aridez induciría un incremento de la concentración en solutos de las aguas de lluvia, superficiales (antes de infiltrarse) y subterráneas (durante la infiltración), lo que originaría aguas subterráneas más salinas. Adicionalmente, el cambio previsto en la regularidad e intensidad de los eventos lluviosos induciría cambios en la magnitud de los procesos de recarga y descarga y también en la entrada de materia orgánica y contaminantes en los acuíferos.

6. **Cambios en los ciclos biogeoquímicos** como consecuencia de la entrada en el agua subterránea de muchos productos (derivados de la actividad agrícola, urbana e industrial) por encima de la capacidad natural de la biota para degradarlos, fijarlos y reciclarlos. El servicio más afectado es el de provisión de agua de buena calidad para los distintos usos.

ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LAS NECESIDADES DE GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS SERVICIOS QUE PROPORCIONAN AL SER HUMANO

Un gran número de masas de agua subterránea en España tiene ecosistemas superficiales asociados que dependen de ellas, y su inventario, estudio y protección están incluidos en la legislación hídrica vigente. Según MMA (2007), habría que considerar las necesidades hídricas de estos ecosistemas como una limitación a la cantidad de agua disponible para extracción directa de agua subterránea. Pero, además, están los ecosistemas subterráneos presentes en las propias masas de agua y/o acuíferos, poco o nada conocidos en nuestro país. Los ecosistemas subterráneos son responsables de buena parte de los servicios de abastecimiento y regulación de las aguas subterráneas, por lo que las necesidades hídricas de estos deberían ser incluidas en las restricciones de extracción.

Cualquier actuación de gestión de las aguas subterráneas debería tener en cuenta la estrecha relación existente entre cantidad y calidad. Debería ser imprescindible considerar una calidad insuficiente o un riesgo de deterioro de la misma como un límite a la cantidad disponible para extracción o para recarga. La aprobación del RD 1514/2009 ha supuesto un avance muy significativo en materia de protección de la calidad de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, sin embargo, esta norma no contempla el relevante papel de la biota de las zonas no saturada y saturada de los acuíferos en la calidad del agua subterránea y del agua superficial que se genera en las zonas de descarga.

La provisión de servicios por parte de las aguas subterráneas requiere mantener un cierto umbral de funcionalidad en los flujos hídricos y en su calidad. Estas condiciones son propias de cada acuífero e, incluso, pueden variar a lo largo del tiempo, por lo que es necesario realizar estudios de caracterización y revisarlos periódicamente. No obstante, una situación muy generalizada, tanto en nuestro país como en el resto del mun-

Cualquier actuación de gestión de las aguas subterráneas debería tener en cuenta la estrecha relación existente entre cantidad y calidad. Debería ser imprescindible considerar una calidad insuficiente o un riesgo de deterioro de la misma como un límite a la cantidad disponible para extracción o para recarga. La aprobación del RD 1514/2009 ha supuesto un avance muy significativo en materia de protección de la calidad de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, sin embargo, esta norma no contempla el relevante papel de la biota de las zonas no saturada y saturada de los acuíferos en la calidad del agua subterránea y del agua superficial que se genera en las zonas de descarga

do, es la de acuíferos cuyo régimen está significativamente alterado principalmente por explotación intensiva y por manipulación de los flujos del ciclo hídrico, y cuya calidad, al menos en sectores relevantes de los acuíferos, se está deteriorando por contaminación directa o inducida. La combinación de ambas situaciones supone el deterioro de muchos de los servicios de las aguas subterráneas, así como de los servicios de otros ecosistemas que dependen de aguas subterráneas, incluso aunque los flujos circulantes sean suficientes desde el punto de vista cuantitativo.

En opinión de los autores, para tomar decisiones acerca de los flujos circulantes por los acuíferos

sería necesario conocer la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas de las aguas subterráneas y valorar los servicios que estos proporcionan. La valoración de todos los servicios, tanto los más directos como los menos evidentes, debería ser realizada en términos económicos y tendría que ser la base para el establecimiento de los objetivos de gestión y las prioridades de actuación, ya sea para proteger, remediar o fomentar determinados servicios de cada acuífero o masa de agua subterránea frente a otros. La valoración de los costes de los servicios del agua subterránea no es una tarea trivial, pero es necesaria. La creciente consciencia acerca de los servicios del agua subterránea debería inducir que las instituciones europeas y nacionales evaluaran cuáles son los medios necesarios para asegurar el mantenimiento de esos servicios, incluyendo los mecanismos de valoración económica.

Identificar y evaluar los servicios de los ecosistemas del planeta supone avanzar hacia una gestión integrada de los mismos. La aplicación de este enfoque a las aguas subterráneas es una oportunidad única para racionalizar la gestión de todos los ecosistemas relacionados con el ciclo hídrico, los cuales se encuentran entre los más relevantes del planeta por los servicios que proporcionan al ser humano. ❀

REFERENCIAS

- Custodio, E.; Llamas, R.; Hernández-Mora, N.; Martínez, L. y Martínez, P., 2009. "Issues related to intensive groundwater use". En Garrido, A., R. Llamas (eds.), *Water Policy in Spain*. CRC Press, pp. 143-162.
- IGME, 2001. *Las aguas subterráneas un recurso natural del subsuelo*. Fundación Marcelino Botín e Instituto Geológico y Minero de España.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Montes, C. y Mediavilla, C., 2009. "Groundwater quality and quantity assessment through a dedicated monitoring network. The Doñana aquifer experience (SW Spain)". En Fouillac, A. M.; Grath, J. y Ward, R. (eds), *Groundwater quality assessment and monitoring*. Philippe Quevauviller. John Wiley and Sons, Ltd., pp. 273-287.
- MMA, 2000. *Libro blanco del agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid, pp. 1-637.
- MMA, 2007. *Síntesis de los estudios generales de las Demarcaciones Hidrográficas en España*. Programa A.G.U.A. Dirección General del Agua. Subdirección General de Planificación y Uso Sostenible del Agua.
- OSE, 2010. *Sostenibilidad en España 2010*. Observatorio de la Sostenibilidad en España.