

Sección III

Evaluación de los tipos operativos de ecosistemas

Capítulo 12

Acuíferos



Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de
Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica

Instituto Geológico y Minero de España



Autores: Marisol Manzano Arellano y Luís Javier Lambán
Jiménez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS ESPAÑOLES	15
2.1. ALGUNAS DEFINICIONES BÁSICAS	15
2.2. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ESPAÑA	15
2.3. UNA CLASIFICACIÓN PRÁCTICA DE LOS ACUÍFEROS ESPAÑOLES	20
2.4. RASGOS BÁSICOS Y LÍMITES CARTOGRAFICOS QUE DEFINEN A LOS ECOSISTEMAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
3. ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS ACUÍFEROS ESPAÑOLES.....	24
3.1. ESTADO CUANTITATIVO EN 2009	29
3.2. ESTADO CUALITATIVO O QUÍMICO EN 2009.....	32
4. SERVICIOS QUE SUMINISTRAN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA.....	35
5. CONDICIONES Y TENDENCIAS DE LOS SERVICIOS EVALUADOS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	41
5.1. SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO	41
5.1.1. Alimentos	41
5.1.2. Agua de buena calidad.....	42
5.1.3. Materias primas de origen biológico	43
5.1.4. Materias primas de origen mineral	44
5.1.5. Energías renovables	44
5.1.6. Medicinas y principios activos naturales.....	44
5.2. SERVICIOS DE REGULACIÓN	44
5.2.1. Regulación del clima	44
5.2.2. Regulación hídrica.....	45
5.2.3. Regulación morfosedimentaria.....	46
5.2.4. Formación y fertilización de suelos.....	46
5.2.5. Regulación de las perturbaciones naturales	46
5.3. SERVICIOS CULTURALES	47
5.3.1. Conocimiento científico.....	47
5.3.2. Conocimiento ecológico local.....	47
5.3.3. Identidad cultural y sentido de pertenencia, , disfrute espiritual y religioso y paisaje-servicio estético	47
5.3.4. Actividades recreativas y ecoturismo	47
5.3.5. Educación ambiental	47

6. IMPULSORES DEL CAMBIO DE LOS ECOSISTEMAS VINCULADOS A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	52
7. ANÁLISIS DE COMPROMISOS (<i>TRADE-OFFS</i>)Y SINERGIAS	56
8. RESPUESTAS E INTERVENCIONES DE GESTIÓN	58
9. LA CONSERVACIÓN DE LOS ACUÍFEROS Y EL BIENESTAR HUMANO	62
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 12.1. Número de masas de agua subterránea por demarcación hidrográfica (MMA, 2007).	17
Tabla 12.2. Rasgos esenciales y límites para la cartografía de los Acuíferos.	23
Tabla 12.3. Redes de seguimiento del estado cuantitativo de las masas de agua subterránea (MARM, 2009).25	
Tabla 12.4. Redes de seguimiento del estado químico de las masas de agua subterránea designadas en cumplimiento del art. 8 de la Directiva 2000/60/CE y 91/676/CEE (MARM; 2009).	26
Tabla 12.5. Masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo para 2015 (MARM, 2009).	29
Tabla 12.6. Masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado químico en 2015 según datos de 2009 (MARM, 2009). En la Demarcación del Ebro la mayoría de los problemas se deben a contaminación difusa; en las islas Baleares la contaminación difusa, puntual y la salinización costera afectan de manera bastante similar a la calidad de las aguas.	33
Tabla 12.7. Tipos de servicios de las aguas subterráneas en España. Los colores indican la relevancia relativa de cada uno.	35
Tabla 12.8. Evaluación global del estado de los servicios de las aguas subterráneas en España y tendencias de evolución.	48
Tabla 12.9. Indicadores usados para la evaluación del estado de los servicios de las aguas subterráneas en España y de las tendencias de evolución.	49
Tabla 12.10. Principales impulsores de cambios en los servicios de los acuíferos.	55
Tabla 12.11. Ejemplos de los efectos que sobre varios servicios de las aguas subterráneas tendrían determinadas actuaciones realizadas para potenciar un servicio concreto.	57
Tabla 12.12. Algunos servicios esenciales de las aguas subterráneas que contribuyen al bienestar humano.62	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 12.1. Masas de agua subterránea y demarcaciones hidrográficas (MMA, 2007).	16
Figura 12.2. Mapa de afloramientos permeables en España (MMA, 2000).	18
Figura 12.3. Recarga natural (mm/año) en las unidades hidrogeológicas de España (MMA, 2000). Estas cifras incorporan una incertidumbre que puede ser considerable en algunos casos, ya que se estimaron mediante modelación del flujo en régimen natural, lo cual no es aplicable a muchos acuíferos.	18
Figura 12.4. Mapa de zonas regadas con aguas de origen subterráneo y mixto en el año 2000 (MMA, 2000).19	
Figura 12.5. Tipos de acuíferos en función de sus características litológicas e hidrogeológicas (Modificado de IGME; 2009).	21
Figura 12.6. Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos (IGME; 2009).	22
Figura 12.7. Presión global sobre las masas de agua subterránea en España (MARM, 2008).	24
Figura 12.8.. Situación de las estaciones del programa de seguimiento del estado cuantitativo de las masas de agua subterránea (MARM, 2009).	25
Figura 12.9. Situación de las redes de vigilancia del estado químico de las aguas subterráneas designadas en cumplimiento del art. 8 de la Directiva (MARM, 2009).	27
Figura 12.10. Masas de agua subterránea con y sin impactos en el año 2007 (MARM, 2008). La suma de las masas con impacto comprobado más las que tienen impacto probable supone casi el 50% de las masas definidas. Cuando se disponga de información sobre las masas no evaluadas es muy probable que las masas afectadas superen claramente la mitad.	28

Figura 12.11. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 según la evaluación realizada hasta 2006 (MMA, 2007; MARM, 2008).	29
Figura 12.12. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cuantitativos en 2015 por las extracciones según datos de 2009 (MARM, 2009).	30
Figura 12.13. Unidades Hidrogeológicas con problemas de sobreexplotación hasta el año 2001 según el Plan Nacional de Regadíos (modificado de MAPA, 2002).	31
Figura 12.14. Áreas con predominio de riego con aguas subterráneas procedentes de acuíferos sobreexplotados en el año 2001 según el Plan Nacional de Regadíos (modificado de MAPA, 2002).	31
Figura 12.15. Contaminación de agua subterránea por intrusión marina en sondeos próximos a la costa (IGME, 2009).	32
Figura 12.16. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por contaminación puntual (MARM, 2009).	33
Figura 12.17. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por contaminación difusa (MARM, 2009).	34
Figura 12.18. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por intrusión marina con datos de 2009 (MARM, 2009).	34

MENSAJES CLAVE

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 y los organismos que viven en ambos. Las componentes mejor conocidas de estos ecosistemas son el sustrato geológico y el agua. El conocimiento de la ecología de las aguas subterráneas es aún escaso, casi inexistente por comparación con la de los ecosistemas acuáticos superficiales. No obstante, se trata de una línea de trabajo en plena fase de desarrollo. (*Muy cierto*).

Aunque los estudios de caracterización a escala internacional son aún pocos, es de prever que los ecosistemas de las aguas subterráneas sean ambientes muy heterogéneos en función de la velocidad del flujo de agua (energía), 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) y la cantidad de solutos disueltos (materia), así como de la mineralogía del medio sólido (reacciones bio-geo-químicas de interacción con el medio sólido). (*Certeza alta*).

En acuíferos carstificados los flujos son rápidos, a veces cercanos al régimen torrencial, y con frecuencia el agua recorre distancias hectométricas y kilométricas en unos días circulando por grandes conductos de disolución. En acuíferos porosos las velocidades de los flujos son mucho menores, habitualmente de orden de 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. (*Muy cierto*).

A la complejidad de estos ecosistemas hay que sumar la variabilidad natural, más la inducida por el ser humano, en las condiciones de recarga y descarga y en las características físico-químicas del agua de recarga, sea ésta por infiltración desde la superficie o por transferencia lateral (flujo subterráneo) desde otras formaciones geológicas. (*Muy cierto*).

Además, las aguas subterráneas son el soporte de otros ecosistemas acuáticos de superficie muy valiosos (ríos, riberas, humedales, bosques freatofíticos, 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. (*Muy cierto*).

La provisión de servicios por parte de las aguas subterráneas requiere mantener un cierto umbral de funcionalidad los regímenes hídricos y su calidad (*certeza alta*). 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 a lo largo del tiempo. No obstante, una situación muy generalizada, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, 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 (*certeza alta*). La combinación de ambas situaciones supone el deterioro de muchos de los servicios de las aguas subterráneas y de los servicios de otros ecosistemas que dependen de aguas subterráneas, incluso aunque los flujos circulantes sean suficientes desde el punto de vista cuantitativo. (*Certeza alta*).

Debido a la habitualmente pequeña magnitud de la velocidad del agua subterránea, los cambios cuyos efectos negativos sobre el funcionamiento de los ecosistemas de los acuíferos y de otros ecosistemas vinculados se están observando en la actualidad pueden haber ocurrido hace décadas o siglos, e incluso milenios en el caso de cambios climáticos y geológicos. Del mismo modo, algunos impactos negativos sobre el funcionamiento de los acuíferos que producirán los cambios de uso del suelo y el agua, las modificaciones de los flujos hídricos y el cambio climático y global que se están produciendo en la actualidad serán observables en las próximas décadas y probablemente siglos. (*Muy cierto*).

En 2007 el MMA identificó un total de 740 masas de agua subterránea, si bien en textos posteriores se puede encontrar referencias a cifras algo mayores. 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, como son los bordes impermeables o los cauces de ríos efluentes, y en algunos casos se han considerado los

límites de influencia de la actividad humana. En un reducido número de casos, se han delimitado masas, o partes de masas, superpuestas en la vertical. El tamaño de las masas de agua subterránea varía entre menos de 2,5 km² y más de 20.000 km², y el tamaño medio está en torno a 500 km². (*Certeza alta*).

Según datos oficiales (MMA, 2007; MARM, 2008) en 2006 un 36,89% de las masas de agua subterránea del país tiene impactos comprobados sobre la cantidad y/o la calidad; el 12,43% tiene impactos probables; el 27,24% no tiene impactos y del 23,24% no se tenían datos en el momento de la evaluación. Esto supone que al menos un 49,32% de masas, casi la mitad de las definidas, estarían probablemente afectadas. (*Certeza media*).

Según datos oficiales (MMA, 2007; MARM, 2008) en 2006 un 38,65% de las masas de agua subterránea del país está en riesgo seguro de incumplir los objetivos medioambientales de la DMA para 2015; un 18,24% tiene un riesgo nulo; de un 34,59% no se tenían datos suficientes y de un 8,51% aún no se había evaluado el riesgo. (*Certeza media*).

Los datos de 2009 (MARM, 2009) establecen que el 36,62% de las masas de agua subterránea (271 de 740) están en riesgo de no alcanzar el buen estado químico para el año 2015 (en 2009 España fue el segundo país de la UE con mayor número de masas de agua con más de 50 mg/L de NO₃). 86 masas están afectadas por contaminación puntual, 238 masas por contaminación difusa y 83 masas por intrusión marina. (*Certeza media*).

Los datos de 2009 (MARM, 2009) establecen que el 29,6% de las masas de agua subterránea (219 de 740) están en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo para 2015 (127 masas intercomunitarias y 92 intracomunitarias). El mayor número de estas masas corresponden a las demarcaciones hidrográficas del Júcar, Segura y Baleares. (*Certeza media*).

El Libro Blanco del agua (MMA, 2000) establecía la recarga media anual a los acuíferos españoles en unos 30.000 Mm³, pero esa cifra está subestimada, principalmente porque se obtuvo mediante simulación numérica del flujo de agua en régimen natural y porque no incluye las formaciones de mediana permeabilidad ahora consideradas acuíferos y en la época de elaboración del Libro Blanco no. Sin considerar las incertidumbres, representaría los recursos o cantidad de agua subterránea renovable del país. No obstante, en la realidad la cantidad de agua que se puede usar es menos que la renovable debido a limitaciones medioambientales, a situaciones de salinización en acuíferos costeros e islas y a interferencias con aguas superficiales ya contabilizadas. Para una gestión eficaz es necesario disponer de buenas estimaciones tanto de los volúmenes almacenados como de los renovables, lo cual requiere realizar estudios detallados e individualizados. (*Certeza alta*).

Asimismo, para conocer con el necesario nivel de detalle y confianza los efectos de la extracción de aguas subterráneas en una zona es imprescindible realizar observaciones sistemáticas bien orientadas y en redes de observación adecuadamente construidas, generar un buen conocimiento del funcionamiento del acuífero y realizar cálculos y simulaciones apoyados en herramientas confiables. Además, la gestión debe ser adaptable y debe poder cambiar a lo largo del tiempo en función de las condiciones hidrológicas, meteorológicas, ecológicas y socioeconómicas de la zona en cada momento. (*Certeza alta*).

El 48% de los servicios de las aguas subterráneas evaluados (11 de 25) se están degradando de forma relevante (16%) o tienen una clara tendencia a degradarse (32%). Los servicios más afectados son los de regulación (hídrica *muy cierto*; de contribución a la regulación climática *-certeza media*; morfosedimentaria, o contribución a la estabilización del terreno *-certeza alta* y de la contribución a mitigar los efectos de las perturbaciones naturales *-certeza alta*). Le siguen los de abastecimiento (de agua de buena calidad para todo uso *-certeza alta*; de energía hidráulica *-muy cierto*; de madera, fibra vegetal y turba *-certeza media*; de sales, carbonatos y metales *-certeza baja*) y los culturales (conocimiento ecológico local *-certeza media*).

Un 40% de los servicios de las aguas subterráneas (10 de 25) mejoran (20%) o tienen tendencia a mejorar (20%). Los servicios más afectados son los culturales (conocimiento científico *-muy cierto*;

actividades recreativas y ecoturismo –*certeza alta*; educación ambiental –*certeza alta*; paisaje-servicio estético –*certeza media*). Le siguen los de abastecimiento (energía geotérmica – *certeza alta*; agua mineral –*muy cierto*; medicinas y principios activos – *certeza alta*) y, por último, los de regulación (regulación climática a través del almacenamiento artificial de CO₂ –*certeza alta*).

Los principales impulsores directos de cambios en los servicios de las aguas subterráneas son la explotación intensiva, la contaminación difusa y los cambios de usos del suelo; le siguen la manipulación del ciclo hídrico, el cambio climático y el cambio en los ciclos biogeoquímicos. (*Muy cierto*).

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. (*Muy cierto*).

Los cambios de usos del suelo que producen cambios en la red de flujo y la hidroquímica de las aguas subterránea los cuales inducen impactos directos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales, se producen sobre las zonas de recarga de los acuíferos, aunque algunos también influyen en la disminución de los flujos de aporte natural en las zonas de descarga. 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. (*Muy cierto*).

La contaminación, singularmente la difusa, que puede afectar a grandes volúmenes de agua subterránea y es más difícil de atenuar con medidas de remediación, induce impactos directos sobre los servicios de abastecimiento principalmente. Los servicios más afectados son: la provisión de agua de buena calidad, el aporte de materias primas de origen biológico, la provisión de medicinas naturales y principios activos. Adicionalmente, en muchos casos la contaminación influye sobre la regulación de la fertilidad del suelo, pues muchos contaminantes inducen un cambio de condiciones oxidantes a reductoras en partes del terreno someras y que deberían ser oxidantes. (*Muy cierto*).

La manipulación de los flujos del ciclo hídrico por ser humano tiene efectos directos sobre las aguas subterráneas e inducen impactos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales de forma más o menos directa, en función del tipo de manipulación y de la ubicación de esa manipulación 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 las siguientes: 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. (*Muy cierto*).

A pesar de la incertidumbre existente sobre las previsiones de los efectos del cambio climático en el área mediterránea, es importante tener en cuenta algunas posibles situaciones que tendrían un efecto relevante 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 disminución de la descarga a muchos manantiales y las descargas difusas a ríos, arroyos, humedales y costas, haciendo desaparecer esos ecosistemas y también bosques de vegetación freatófita; también ocasionaría 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), originando 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. *(Certeza alta)*.

Los ciclos biogeoquímicos naturales son responsables de que el ser humano disponga de agua de buena calidad para los diversos usos. La modificación de estos ciclos se produce principalmente por dos causas: la incorporación a las aguas y al terreno de más sustancias de las que pueden ser degradadas, fijadas o recicladas de forma natural (como consecuencia de la actividad agrícola, urbana e industrial) y el cambio global. *(Certeza alta)*.

Los acuíferos pueden contribuir a regular la mayor torrencialidad prevista para nuestra latitud por los trabajos del Panel Internacional del Cambio Climático, pero para ello las cuencas deben estar bien conservadas y gestionadas de manera que en las zonas de recarga de los acuíferos (valles fluviales, piedemontes, interfluvios, llanuras costeras) haya espacio disponible para la inundación y la infiltración. *(Certeza alta)*.

Actuaciones tales como el Plan Nacional de Restauración Hidrológico-Forestal y de Lucha contra la Erosión y otras similares son muy relevantes para invertir la tendencia de deterioro de la capacidad de regulación morfosedimentaria de las aguas subterráneas. No obstante, dada la multiplicidad de factores involucrados en el deterioro de este servicio, es previsible que los efectos positivos sean escasos y localizados, ya que si no se actúa también sobre el manejo de los flujos subterráneos y no se introduce la gestión del agua subterránea en los planes de ordenación del territorio, procurando reservar superficies no pavimentadas y bien vegetadas para favorecer la infiltración frente a la escorrentía y la erosión, es poco previsible que se pueda obtener cambios notables y en superficies extensas. *(Certeza alta)*.

Las aguas subterráneas y los acuíferos proporcionan multitud de servicios básicos para el bienestar humano, si bien algunos de ellos son más evidentes que otros. Los servicios más obvios e identificables son los de abastecimiento 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, pero también básicos para el bienestar humano, 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. *(Muy cierto)*.

Muchos de los servicios básicos para el bienestar humano están deteriorados en amplias zonas de nuestro país como consecuencia de las múltiples presiones (la mayoría antrópicas) que afectan a la cantidad y la calidad del agua subterránea. *(Certeza alta)*.

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 supone 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. *(Muy cierto)*.

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 debería 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. *(Muy cierto)*.

No obstante, la valoración de los costes de los servicios del agua subterránea no es una tarea trivial, y la parte de la ciencia que se dedica a este tema está aún en fase muy preliminar. Pero dada la creciente consciencia acerca de los servicios del agua subterránea, las instituciones europeas y nacionales deberían

evaluar cuáles son los medios necesarios para asegurar el mantenimiento de esos servicios, incluyendo mecanismos de valoración económica. (*Certeza alta*).

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 ambientales de una u otra actuación sobre las aguas subterráneas. Las actuaciones a 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. (*Muy cierto*).

Dado que habitualmente 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. (*Muy cierto*).

Cualquier actuación de gestión de las aguas subterráneas debe tener en cuenta la estrecha relación existente entre cantidad y calidad. Aunque desde el punto de vista técnico la administración establezca diferencias entre la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas, use indicadores de presión y de impacto sobre ambos aspectos por separado y evalúe el estado de ambos aspectos también por separado, es imprescindible no perder de vista que una calidad insuficiente o un riesgo de deterioro de la misma debe suponer un límite a la cantidad disponible para extracción o para recarga. (*Muy cierto*).

La calidad del agua subterránea se puede mejorar en origen, mejorando la calidad de las aguas de lluvia y superficiales que recargan acuíferos. Esto se consigue con medidas tales como: controlar mejor las emisiones gaseosas, líquidas y sólidas a la atmósfera, controlar mejor la calidad del agua superficial y proteger las zonas de infiltración en cauces; evitar las obras y las actividades en cauces y llanuras de inundación que disminuyen la calidad del agua subterránea; reducir los volúmenes de aguas residuales vertidas a ríos o mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales. (*Muy cierto*).

Para disminuir la contaminación de origen doméstico, agrario e industrial de las aguas subterráneas son muy eficaces las siguientes actuaciones: educar a la población para reducir los volúmenes de aguas residuales y de residuos sólidos, reducir la cantidad de fertilizantes, plaguicidas y otras sustancias potencialmente contaminantes, no usar aguas residuales ganaderas como fertilizante ni para regar, no deshacerse de residuos sólidos o líquidos inyectándolos en pozos abandonados, hoyos de extracción de áridos, o enterrándolos, asegurarse de mantener en buen estado operativo las redes de evacuación de residuos, los filtros, sistemas de depuración de aguas, etc. (*Muy cierto*).

Para disminuir las extracciones de agua subterránea son útiles las siguientes actuaciones: realizar un control más exhaustivo de los pozos existentes y de los caudales adjudicados y efectivamente extraídos; reducir el consumo de agua de buena calidad para ciertos usos y aumentar la reutilización; mejorar los sistemas de riego; definir las zonas de protección de los acuíferos de forma integrada en los planes de gestión de las cuencas; reducir la presión del turismo en zonas vulnerables a la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas; valorar económicamente de forma realista el agua subterránea extraída y aplicar una política de precios acorde. (*Muy cierto*).

Para aumentar la cantidad de agua subterránea disponible son útiles las siguientes actuaciones: inducir la recarga natural, evitando posibles procesos de deterioro; inducir la infiltración de retornos de riego cuando éste se realiza con agua de procedencia externa al lugar del riego (y controlando la calidad de los mismos); realizar recarga artificial (controlando la calidad del agua inyectada y los posibles procesos hidrogeoquímicos que puedan producir un deterioro). (*Certeza alta*).

1. Introducción

Las aguas subterráneas constituyen la mayor parte de los recursos hídricos dulces del planeta (97%) y, por tanto, son un recurso básico para el ser humano, tanto para beber y los usos domésticos como para la agricultura y la industria. En el conjunto de Europa alrededor de un 75% de la población depende del agua subterránea para beber (www.eea.org), mientras que en nuestro país lo hace alrededor de un 20% de media, si bien la proporción es muy variable de unas regiones a otras. Como en la mayoría de países de clima árido y semiárido, el principal uso del agua subterránea en España es para agricultura (alrededor de un 75 a 80%, según las distintas fuentes) (EASAC, 2010; Llamas y Garrido, 2007; Custodio *et al.*, 2009).

Pero la creciente consideración de los servicios de los ecosistemas como elementos fundamentales del desarrollo sostenible y el bienestar humano, que se extiende más allá del ámbito científico e impregna la legislación y las políticas de gestión más avanzadas del planeta en estos primeros años del siglo XXI, ha llegado también a las aguas subterráneas. En este sentido, todos los componentes del ciclo hídrico prestan servicios muy importantes como ecosistemas, pero mientras que para la mayoría de la población es clara la vinculación entre las partes atmosférica y superficial del ciclo hídrico, los ecosistemas y sus servicios, no ocurre lo mismo con la parte subterránea de dicho ciclo. Sin embargo, las aguas subterráneas prestan servicios muy importantes al ser humano, la mayoría de los cuales son aún poco conocidos o, como mucho, se conocen únicamente a nivel cualitativo, lo cual no favorece su inclusión en los planes de gestión de las aguas subterráneas. Los servicios más conocidos, y ya presentes en la gestión hídrica como consecuencia de los requerimientos de la Directiva Marco de Aguas (Directiva 60/2000) y de la Directiva de Aguas Subterráneas (Directiva 118/2006), son los de abastecimiento, relacionados con la propia existencia de agua subterránea en un lugar concreto del territorio, y los relacionados con la calidad y la capacidad de purificación del agua. Pero las aguas subterráneas realizan muchos y muy variados servicios al ser humano (ver apartado 9).

Los primeros trabajos que hablan de aguas subterráneas y ecosistemas en el ámbito internacional tienen casi 30 años (Hynes, 1983; Wilson *et al.*, 1983; Malard *et al.*, 1996; Winter, 1999; Gibert *et al.*, 1994), y en nuestro país hay una buena representación de ellos (González-Bernáldez, 1992; González-Bernáldez *et al.*, 1987, 1988, 1989, 1992a y 1992b; Herrera, 1987; Rey Benayas 1989 y 1981; Rey Benayas *et al.*, 1989 y 1990; Llamas, 1982, 1988, 1992; Custodio, 2000a), pero el término “servicios” aparece en la literatura sobre aguas subterráneas hace alrededor de una década. Muchos de los primeros trabajos estaban enfocados a la identificación y/o evaluación de los servicios de los ecosistemas superficiales dependientes de las aguas subterráneas, es decir, aquellos ecosistemas que precisan tener acceso al agua subterránea para mantener su estructura ecológica y funcionalidad (Fornés y Llamas, 2001; Groom *et al.*, 2000, 2001; Sophocleous, 2002; Murray *et al.*, 2003, 2006; Eamus *et al.*, 2006), pero entre ellos aparecen ya trabajos centrados en la ecología de las propias aguas subterráneas (Chapelle, 2000; Gibert, 2001; Gibert y Culvert, 2009; Culver *et al.*, 2009; Gibert *et al.*, 2009; Wilkens *et al.*, 2000; Griebler, 2001; Hahn, 2006; Malard *et al.*, 1996a, 1996b, 2007; Boulton *et al.*, 2008; Bork *et al.*, 2009; Deharveng *et al.*, 2009; Velasco *et al.*, 2009a, 2009b).

Pero la necesidad de dar respuesta a leyes nacionales y supranacionales de gestión del ciclo hídrico centradas en la conservación de los ecosistemas, como es el caso de la Directiva Marco de Aguas (DMA, 2000) y la Directiva para la Protección de las Aguas Subterráneas de Europa (DAS, 2006), están obligando a desarrollar nuevos paradigmas sobre la relación entre aguas subterráneas, ecosistemas y servicios. Muchos ecosistemas y sus servicios dependen de la descarga de aguas subterráneas, pero otros muchos dependen de la recarga, el almacenamiento y el flujo de agua por debajo de la superficie del terreno. Esto obliga a dar un salto adelante en el terreno conceptual y a considerar las masas de agua subterránea y los acuíferos (ver definición en el apartado 2) como ecosistemas en sí mismos, formados por el sustrato geológico, el agua que ocupa los poros y grietas de ese sustrato y los organismos que viven en ambos (Danielopol *et al.*, 2004).

Las aguas subterráneas constituyen ecosistemas complejos, con estructura, dimensiones y conectividad variables y que contienen gran cantidad de fauna casi totalmente desconocida (Danielopol *et al.*, 2003). El sustrato geológico es el medio que permite el almacenamiento y movimiento del agua, más o menos lentamente. El agua subterránea transporta energía y materia desde la superficie del terreno hacia el interior de la tierra, y desde aquí de nuevo a la superficie (Danielopol *et al.*, 2003, 2004, 2006). Durante el desplazamiento del agua subterránea sus características físico-químicas van cambiando debido a procesos bio-geo-químicos. Tanto el sustrato geológico como las características físico-químicas del agua que contiene y las reacciones que tienen lugar a lo largo del flujo en un acuífero dado son relativamente fáciles de conocer, al menos hasta cierta profundidad (que hoy en día supera ampliamente los 1000 m). Pero no ocurre lo mismo con los organismos que viven en el medio subterráneo vinculados al agua. Solo recientemente se ha empezado a tener un de la biodiversidad de las aguas subterráneas (Danielopol *et al.*, 2006; Gibert y Culver, 2009; Gibert *et al.*, 2009), la cual en ciertos tipos de acuíferos, como los cársticos, puede ser comparable a la de los ecosistemas superficiales. Se sabe que estos organismos tienen tamaños muy variados entre >5 mm (macro organismos) y <0,02 mm (micro organismos) (Wilkins *et al.*, 2000; Chapelle, 2001), y sus principales funciones son reciclar materia orgánica y redistribuir materia y energía (Herman *et al.*, 2001, Boulton *et al.*, 2002; Humphreys, 2006).

Desde el punto de vista humano, el servicio quizás más relevante de la existencia y variedad de esa fauna es que ella realiza una buena parte de las funciones de depuración del conjunto del ciclo hídrico (degradación de contaminantes orgánicos y reciclado de carbono, precipitación de metales, reducción de sulfatos y nitratos, etc.). Además de estas funciones, la biota de las aguas subterráneas es un indicador de la calidad de esas aguas, y algunos estudios ilustran la aplicabilidad de dicha fauna para observar variaciones relacionadas con el efecto de impactos tales como la contaminación y la sequía (Dumas *et al.*, 2001; Hahn, 2006; Malard *et al.*, 2007; Bork *et al.*, 2009).

El buen estado tanto de los ecosistemas de las aguas subterráneas como de los ecosistemas superficiales vinculados a la presencia de agua subterránea, depende de que exista un flujo de agua con cantidad y calidad suficientes como para mantener la estructura y el funcionamiento de esos ecosistemas. Por tanto, la provisión de servicios por parte de las aguas subterráneas requiere mantener un cierto umbral de funcionalidad de los regímenes hídricos y su calidad (Evans y Clifton, 2001; Froend y Loomes, 2004; Eamus *et al.*, 2006). Estas condiciones son propias de cada acuífero e incluso pueden variar con el tiempo. No obstante, una situación muy generalizada, tanto en nuestro país como en el resto del mundo, 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 del acuífero, está deteriorándose por contaminación. La combinación de ambas situaciones supone el deterioro de muchos de los servicios de las aguas subterráneas y de los servicios de otros ecosistemas que dependen de aguas subterráneas, incluso aunque los flujos circulantes sean suficientes desde el punto de vista cuantitativo.

Identificar y evaluar los servicios de los ecosistemas del planeta supone avanzar hacia una gestión integrada de los mismos (Murray *et al.*, 2006). La aplicación de este enfoque tanto a los servicios de los ecosistemas superficiales vinculados a las aguas subterráneas, como a los ecosistemas constituidos por las propias masas de agua subterránea, supone 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.

En comparación con otros ecosistemas, para las aguas subterráneas aún es necesario realizar un trabajo importante de conceptualización y de desarrollo de métodos de valoración, además del propio trabajo de evaluación de los servicios. En este capítulo se realiza un inventario de los servicios de las aguas subterráneas como ecosistemas y una primera aproximación a la valoración del estado de esos ecosistemas y sus servicios en España. La única aproximación similar a ésta que se conoce es la realizada por Ribeiro (2010) para la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en Portugal.

No obstante, en nuestro país existen ya bastantes trabajos que están generando conocimiento básico necesario para la conceptualización y la caracterización. Los trabajos conocidos por los autores se

relacionan con el papel ambiental de las aguas subterráneas en España (Llamas, 2005; Velázquez, 2006 y 2007; De Miguel, 2007; Dietzenbacher y Velázquez, 2007; Madrid y Velázquez, 2008; Novo et al., 2008; Rodríguez-Casado *et al.*, 2008; Aldaya y Llamas, 2008; Aldaya *et al.*, 2010a y 2010b; Garrido *et al.*, 2010), con los procesos bio-geo-químicos que tienen lugar en los acuíferos como ecosistemas (Fernández Escalante, 2005) y con la biota de las aguas subterráneas (Velasco *et al.*, 2009a, 2009b). En relación con este último aspecto, una iniciativa muy relevante y pionera en España, aún en fase de proyecto, es la del Instituto Madrileño de Estudios del Agua (IMDEA) de usar las comunidades de crustáceos de la zona hiporreica en la cuenca del Jarama como indicadores de impactos antropogénicos.

2. Características de las aguas subterráneas y los acuíferos españoles

2.1. Algunas definiciones básicas

Dado que en lo que sigue se van a utilizar de forma alternativa los términos “aguas subterráneas”, “acuíferos” y “masas de agua subterránea”, es conveniente dar una definición de los mismos.

La definición más habitual del término “acuífero” tiene connotaciones prácticas, ya que se refiere a “una formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitirla de manera que puede ser aprovechada como recurso. Las características fundamentales de un acuífero son la baja velocidad en el movimiento del agua, los grandes volúmenes de reservas y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema” (FCIHS, 2009). Desde este punto de vista España, que es uno de los países más áridos de la Unión Europea, al mismo tiempo tiene un gran potencial hidrogeológico debido a la presencia de acuíferos distribuidos por todo el país (Molinero et. al., 2007). Pero aunque una formación geológica no sea un buen acuífero desde el punto de vista de su explotación por el ser humano, desde el punto de vista ambiental puede (y suele) jugar un papel fundamental para muchos ecosistemas.

La expresión “masa de agua subterránea” procede de una traducción al Español, más o menos acertada, de la expresión inglesa “groundwater body” que aparece en la DMA (DMA, 2000). El concepto “*masa de agua subterránea*” se define como “*un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas de un acuífero o acuíferos*”. Adicionalmente, la DMA define el término “acuífero” como “*una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir ya sea un flujo significativo de aguas subterráneas o la extracción de cantidades significativas de aguas subterráneas*” (MMA, 2005).

Por último, la expresión “aguas subterráneas” se puede usar y entender con dos significados distintos: 1) según el Libro Digital del Agua del MARM (<http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/lda>) se puede definir como “*todas las aguas que se encuentran bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo*”; 2) desde el punto de vista estrictamente científico aguas subterráneas son todas aquellas que están bajo la superficie del terreno, ya sea en la zona de saturación o en la zona no saturada. En este texto la expresión aguas subterráneas se utiliza con esta segunda acepción.

En este capítulo se usan indistintamente las tres expresiones definidas, dependiendo del contexto.

2.2. Masas de agua subterránea en España

Antes de la entrada en vigor de la DMA en España sólo se consideraban como acuíferos las formaciones geológicas de alta permeabilidad (arenas y areniscas fisuradas, gravas y conglomerados, rocas carbonatadas carstificadas, etc.). Sin embargo, los trabajos de caracterización hidrogeológica realizados por requerimiento de la DMA reconocen como tales muchas formaciones geológicas de permeabilidad mediana o moderada pero que son estratégicas para la población rural. Se han considerado acuíferos aquellas formaciones que abastecen a más de 50 personas o proporcionan más de 10 m³/día (Custodio

et al., 2009). Estos estudios han identificado un total de 740 masas de agua subterránea (MMA, 2007), que cubren unos 350.000 km², alrededor del 70% del territorio nacional (Figura 12.1 y Tabla 12.1).

La delimitación de las masas de agua subterráneas se ha realizado partiendo de las unidades hidrogeológicas, que son las antiguas unidades de gestión de las aguas subterráneas, anteriores a la DMA. En determinados casos se han reagrupado algunas de las unidades hidrogeológicas; en otros casos, en las zonas en que no habían sido definidas unidades hidrogeológicas y estudios posteriores han demostrado que existen acuíferos significativos, se han delimitado las masas de agua subterráneas correspondientes. También se han tenido en cuenta las zonas con acuíferos locales pero de baja permeabilidad general en las que existen pequeñas captaciones para abastecimientos a núcleos urbanos, así como los casos en que existen ecosistemas de agua superficial o terrestres asociados a flujos subterráneos.

Para definir los límites de las masas se han empleado los límites físicos significativos, como son los bordes impermeables o los cauces de ríos efluentes, y en algunos casos se han considerado los límites de influencia de la actividad humana. Se ha tratado de que las masas de agua no se encuentren compartidas por más de una demarcación hidrográfica y, en un reducido número de casos, se han delimitado masas, o partes de masas, superpuestas en la vertical. El tamaño de las masas de agua subterránea varía mucho, entre menos de 2,5 km² y más de 20.000 km², y el tamaño medio está en torno a 500 km² (Custodio *et al.*, 2009).

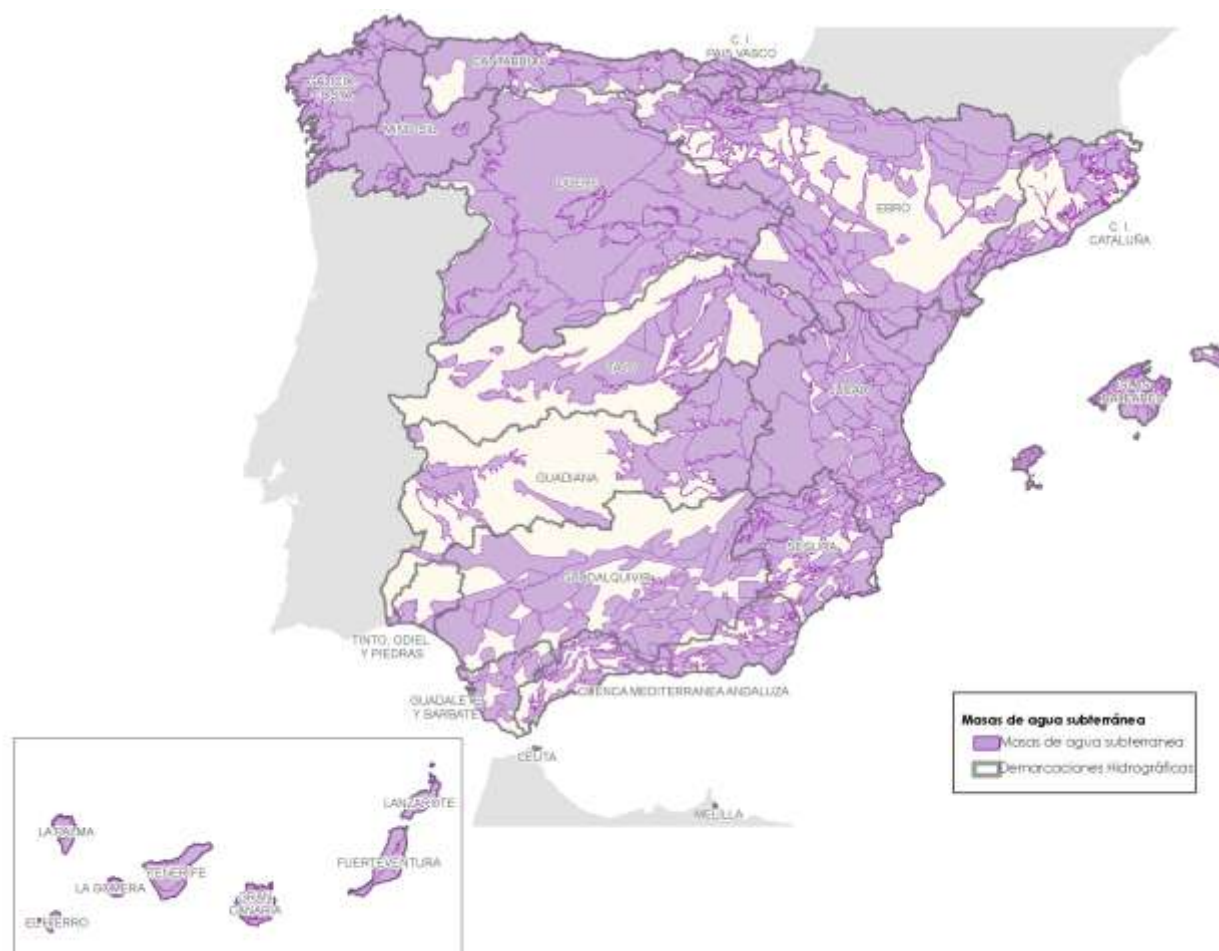


Figura 12.1. Masas de agua subterránea y demarcaciones hidrográficas (MMA, 2007).

Tabla 12.1. Número de masas de agua subterránea por demarcación hidrográfica (MMA, 2007).

Demarcación hidrográfica	Nº de masas	% territorio
Cuencas internas del País Vasco	14	99
Norte	36	83
Galicia Costa	18	99
Miño-Limia	6	100
Duero	31	95
Tajo	24	39
Guadiana	20	40
Cuenca Atlántica Andaluza	17	50
Guadalquivir	58	64
Cuenca Mediterránea Andaluza	67	58
Segura	63	80
Júcar	79	94
Ebro	105	63
Cuencas Internas de Cataluña	80	69
Baleares	90	64
La Palma	5	100
Hierro	3	100
La Gomera	5	100
Tenerife	4	100
Gran Canaria	10	100
Fuerteventura	4	100
Lanzarote	1	100

Según datos anteriores a la DMA (Libro Blanco del Agua, MMA, 2000) la recarga media anual a los acuíferos españoles es de unos 30.000 Mm³. Pero según Custodio *et al.* (2009) esta cifra está subestimada por varias razones, principalmente porque se obtuvo mediante simulación numérica del flujo de agua en régimen natural, que no se corresponde con la realidad, y porque no incluye las formaciones de mediana permeabilidad ahora consideradas acuíferos y en la época de elaboración del Libro Blanco no. En teoría esa cifra, con todas sus incertidumbres, representaría los recursos o cantidad de agua subterránea renovable, los cuales constituirían aproximadamente un 30% del total de los recursos hídricos del país (MMA, 2000). No obstante, y aún sin considerar la incertidumbre en la estimación de la recarga, en la realidad la cantidad de agua que se puede usar es menos que la renovable debido a limitaciones medioambientales, a situaciones de salinización en acuíferos costeros e islas y a interferencias con aguas superficiales ya comprometidas (Custodio *et al.*, 2009).

También es importante destacar la diferencia entre los recursos subterráneos renovables anualmente y la cantidad total de agua almacenada en los acuíferos, o reservas subterráneas, que según Sahuquillo *et al.* (2007) es como mínimo dos órdenes de magnitud superior a los recursos anuales. Este dato es de importancia capital en países, como España, que sufren habitualmente periodos de sequía intensos, puesto que las reservas de aguas subterráneas se convierten en un recurso estratégico que permite mantener las actividades consumidoras de agua (fundamentalmente el regadío) durante dichos periodos secos (Custodio *et al.*, 2009).

Desde el punto de vista de la gestión es necesario disponer de buenas estimaciones tanto de los volúmenes almacenados como de los renovables, lo cual requiere realizar estudios detallados e individualizados. En teoría estos estudios se han debido realizar para la elaboración de los planes hidrológicos de cuenca que han salido a información pública entre 2009 y 2010.

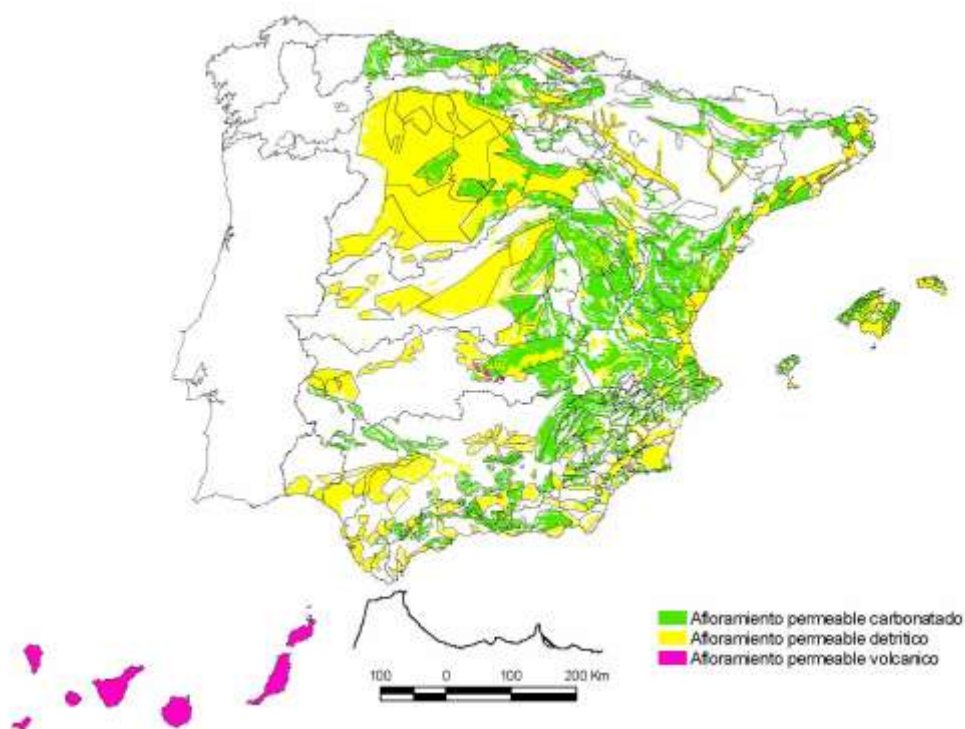


Figura 12.2. Mapa de afloramientos permeables en España (MMA, 2000).

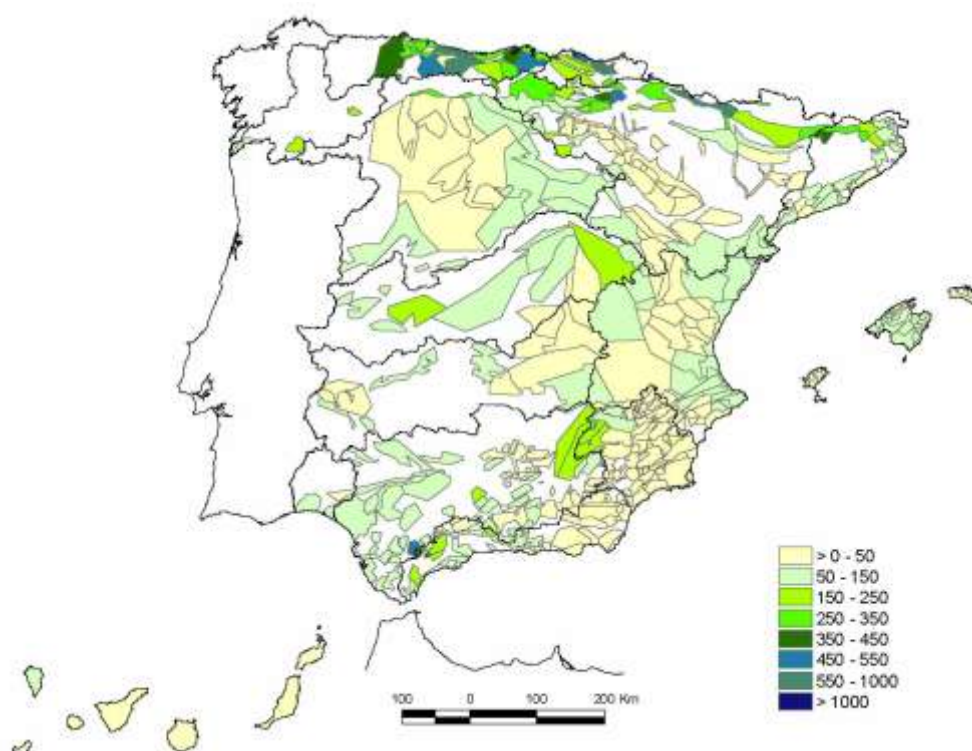


Figura 12.3. Recarga natural (mm/año) en las unidades hidrogeológicas de España (MMA, 2000). Estas cifras incorporan una incertidumbre que puede ser considerable en algunos casos, ya que se estimaron mediante modelación del flujo en régimen natural, lo cual no es aplicable a muchos acuíferos.

Los datos oficiales (MMA, 2000) estiman que el uso de aguas subterráneas en España se ha incrementado desde 2.000 Mm³/año en 1960 hasta 6.500 Mm³/año en la actualidad. Los usos del agua subterránea varían muchísimo de unas regiones a otras. El agua subterránea es la principal fuente disponible en las islas (Canarias y Baleares), en el sur del Mediterráneo (Júcar y Segura) y en algunas regiones continentales del centro (La Mancha). Entre el 70 y el 85% del agua subterránea que se bombea en España es usada para regadío (Molinero *et al.*, 2007; Llamas y Garrido, 2007; Custodio *et al.*, 2009). Las aguas subterráneas bombeadas sirven para regar aproximadamente un millón de hectáreas (Figura 12.4). Según Llamas *et al.* (2001) y Hernández-Mora *et al.* (2007) las aguas subterráneas dedicadas a la agricultura representan el 20% del total del agua usada en dicho sector. Sin embargo, ese 20% del agua da servicio al 30% de la superficie total de regadío de España, lo que significa que los regadíos basados en aguas subterráneas son más eficientes que los regadíos basados en aguas superficiales. Las razones para explicar esta mayor eficiencia de las aguas subterráneas son analizadas con rigor y detalle en Hernández-Mora *et al.* (2007).

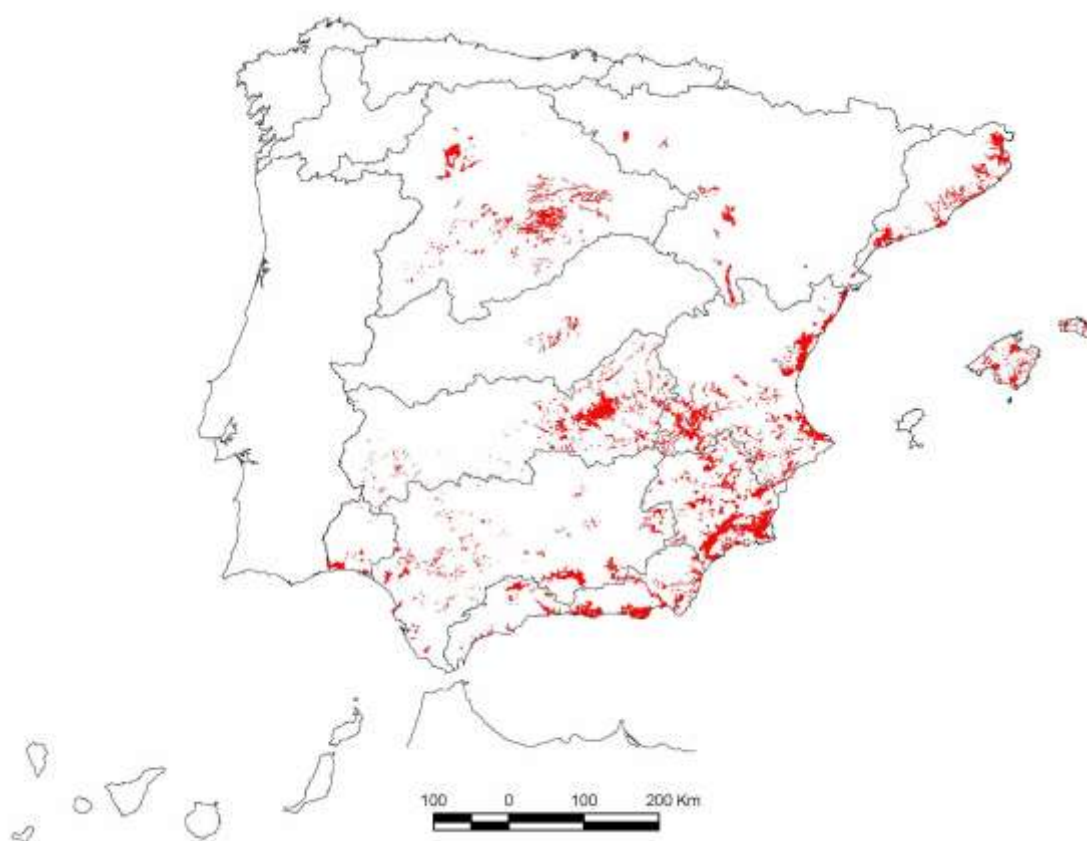


Figura 12.4. Mapa de zonas regadas con aguas de origen subterráneo y mixto en el año 2000 (MMA, 2000).

Por otra parte, las aguas subterráneas son la fuente de abastecimiento del 35% de la población española. Según MMA (2007), con datos de 1999, con la excepción de Noruega, cuyo potencial hidrogeológico es muy limitado, España presenta el menor porcentaje de uso de agua subterránea para el abastecimiento de grandes ciudades (19%). Sin embargo, la cantidad de agua subterránea usada para abastecer pequeñas ciudades y núcleos rurales es muy superior: el 70% de los abastecimientos de núcleos de población menores a 20.000 habitantes se alimentan de aguas subterráneas (MMA, 2000). Más allá de las cifras medias globales, el uso doméstico de las aguas subterráneas es crucial en algunas regiones (51% en las cuencas mediterráneas de Andalucía, 49% en las islas Canarias y 43% en la cuenca del Júcar). Por otra parte, los abastecimientos de la población rural dispersa, sobre todo en el noroeste húmedo (Galicia, León, Asturias, Cantabria y País Vasco) dependen casi en exclusiva de las aguas subterráneas (Molinero *et al.*, 2008; Llamas y Garrido, 2007).

2.3. Una clasificación práctica de los acuíferos españoles

En función de las características litológicas e hidrológicas del territorio peninsular e insular, los acuíferos se pueden agrupar en general en tres tipos principales (Figura 12.5) (IGME, 2009):

- a) Acuíferos detríticos: compuestos fundamentalmente por materiales sueltos o semiconsolidados, tales como gravas, arenas y limos, que tapizan los fondos de valle de los principales ríos, como el Ebro y Guadalquivir, y los depósitos de similar naturaleza que se extienden por las grandes mesetas del Duero y Tajo, y por las zonas litorales tales como los deltas del Llobregat o del Ebro, o las planas de Castellón o Valencia, entre otras. Por lo general son de edades geológicamente recientes. Debido a sus buenas condiciones de porosidad y permeabilidad, si se explotan convenientemente suministran notables caudales sin comprometer el balance hídrico. Estos acuíferos son usados por el ser humano para abastecimiento a las poblaciones e industrias y especialmente en la agricultura de regadío.

En régimen natural es frecuente que en la zona de recarga de estos acuíferos el nivel freático esté muy somero y sea aprovechado por grandes masas de vegetación freatofítica. También es frecuente que en las zonas de descarga natural de los mismos se encuentren manantiales, arroyos, humedales, bosques de vegetación freatofítica, así como poblaciones permanentes de fauna que aprovecha el aporte continuado de agua y de nutrientes. Pero en la realidad buena parte de estas formaciones tiene un régimen perturbado debido a una explotación intensa, cuando no a una sobreexplotación, lo que supone una modificación del balance hídrico que afecta a volúmenes variables de acuífero. Son los casos, entre otros, del acuífero terciario detrítico de Madrid o de la zona de marismas del acuífero Almonte-Marismas (Huelva y Sevilla), en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana.

- b) Acuíferos carbonatados: se trata de materiales calizos y dolomíticos más o menos carstificados y afloran en el sector oriental y meridional de la península e Islas Baleares. Varían mucho en densidad, porosidad y permeabilidad, según haya sido el ambiente sedimentario existente en su formación y el desarrollo posterior de zonas permeables producidas por disolución del carbonato. Hay que tener en cuenta que si estas rocas no están carstificadas, son poco permeables.

En España existen muchos acuíferos de este tipo, siendo algunos de los más conocidos el acuífero del Campo de Montiel (donde se ubican las Lagunas de Ruidera), el acuífero de La Mancha Occidental (donde se encuentran las Tablas de Daimiel), o el acuífero carbonatado de la Sierra de Cazorla, al igual que gran parte de los acuíferos del área Mediterránea Peninsular y de las Islas Baleares; todos ellos formados por calizas carstificadas y dolomías.

Por último, en el sector occidental de la Península aparecen materiales catalogados genéricamente como *impermeables* o de muy baja permeabilidad, pero que contienen acuíferos de interés local. En su gran mayoría, se trata de terrenos con rocas ígneas (granitos y rocas afines) y metamórficas (pizarras y similares). Hay decenas de miles de manantiales y pozos en esas zonas, que abastecen a pequeños núcleos de población e industrias agropecuarias y de otro tipo; tienen por ello, una gran importancia para las poblaciones locales.

- c) Las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y consolidación de un magma. Pueden ser extrusivas (volcánicas) o intrusivas (plutónicas) según se consoliden en la superficie o en el interior de la corteza terrestre respectivamente (ej: granitos, gabros, etc.). Las rocas metamórficas son las que han experimentado profundas transformaciones físicas y químicas, dando lugar a cambios en la propia estructura de la roca, ajustándose a las nuevas condiciones de presión, temperatura y posibles aportes químicos (ej: pizarras, esquistos, etc.). Las posibilidades de formar acuíferos en estas rocas quedan reducidas a la zona alterada superficial o a las fracturadas por fallas y diaclasas, que permiten una apreciable circulación de agua. Este tipo de acuíferos es frecuente en el NO de la Península Ibérica y en el Sistema Central. Tienen notable importancia para abastecimiento a pequeños núcleos de población y ámbito rural.

Es difícil definir el comportamiento hidrogeológico de las rocas volcánicas, que pueden constituir o no importantes acuíferos; su comportamiento está entre el de las rocas consolidadas porosas y el de las rocas fracturadas. Los niveles de escorias, piroclastos y grietas de retracción juegan un gran papel. Los factores principales que van a condicionar el flujo del agua subterránea son la composición, edad y, sobre todo, el grado de alteración. En las Islas Canarias los acuíferos están vinculados a rocas de naturaleza volcánica. Una gran parte del agua que se utiliza en estas islas es de origen subterráneo. En el interior de la Península también aparecen formaciones volcánicas acuíferas, aunque de menor entidad, en Olot y en el Campo de Calatrava.



Figura 12.5. Tipos de acuíferos en función de sus características litológicas e hidrogeológicas (Modificado de IGME; 2009).

Por otro lado y en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos los acuíferos se pueden clasificar en (Figura 12.6) (IGME; 2009):

- **Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** se definen como aquéllos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire de la zona no saturada y, por lo tanto, a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuíferos se realiza principalmente por infiltración de la precipitación a través del suelo, o por infiltración de agua de ríos o lagos.
- **Acuíferos confinados, cautivos o a presión:** son aquéllos que en su límite superior o techo, el agua está a una presión superior a la atmosférica. Se comportan así los materiales permeables que están cubiertos por una capa confinante mucho menos permeable denominada acuitardo (por ejemplo, una capa arenosa bajo otra arcillosa). Durante la perforación de los pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo de los mismos se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. A este fenómeno se le solía llamar *artesianismo*, aunque el vocablo va cayendo en desuso. El pozo será surgente cuando el nivel piezométrico esté situado a cota superior a la de la boca del pozo. La recarga de un acuífero confinado procede principalmente de la lluvia que se infiltra directamente a través de la zona en la que aflora la formación acuífera, es decir, donde el acuífero se comporta como libre, o bien donde se puede considerar como semiconfinado y las condiciones sean favorables.
- **Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos en los que el muro, el techo o ambos, no son totalmente impermeables sino que permiten la circulación vertical del agua. Este paso vertical de agua puede hacerse desde o hacia el acuitardo, e incluso variar con el tiempo, según sean los valores relativos de los niveles piezométricos.



Figura 12.6. Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos (IGME; 2009).

Un gran número de masas de agua subterránea en España tienen ecosistemas superficiales asociados que dependen de ellas, como es el caso de ríos, lagos, humedales, manantiales o bosques de vegetación freatofítica. Pero, además, están los ecosistemas subterráneos presentes en las propias masas de agua y/o acuíferos, poco o nada conocidos en nuestro país. Según MMA (2007), habría que considerar las necesidades hídricas del primer tipo de ecosistemas (los superficiales asociados) como una limitación a la cantidad de agua disponible para extracción directa de agua subterránea. No obstante, 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.

Aunque los estudios de caracterización a escala internacional son aún pocos, es de prever que los ecosistemas de las aguas subterráneas sean ambientes muy heterogéneos en función de la velocidad del flujo de agua (energía), 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) y la cantidad de solutos disueltos (materia), así como de la mineralogía del medio sólido (reacciones bio-geo-químicas de interacción con el medio sólido). En acuíferos carstificados los flujos son rápidos, a veces cercanos al régimen torrencial, y con frecuencia el agua recorre distancias hectométricas y kilométricas en unos días circulando por grandes conductos de disolución. En acuíferos porosos las velocidades de los flujos son mucho menores, habitualmente de orden de 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.

2.4. Rasgos básicos y límites cartográficos que definen a los ecosistemas de las aguas subterráneas

Los rasgos básicos que definen los ecosistemas de las aguas subterráneas son (Tabla 12.2):

- Son ecosistemas subterráneos cuya existencia genera servicios incluso allí donde no hay agua superficial.
- Se generan debido a la infiltración del agua (de lluvia, de escorrentía, 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 hidrológicas a zonas más bajas; descargan tanto en forma líquida (a través de

manantiales, arroyos, ríos, humedales o al mar) como en forma gaseosa (a través de evaporación y evapotranspiración), y son extraídas por el ser humano mediante pozos, sondeos, galerías y drenes.

- En régimen natural (es decir, no perturbado por la acción humana o por procesos geológicos o climáticos que suponen cambios) 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, lo cual está en la base de muchos de los servicios que generan.
- Suelen estar intensamente utilizados por el ser humano, principalmente para agricultura de regadío y para abastecimiento doméstico.

La delimitación cartográfica de estos ecosistemas se realiza combinando límites geológicos e hidráulicos: límites de formaciones geológicas porosas o muy fracturadas cuya permeabilidad permite el flujo de agua a velocidad suficiente como para ser explotados por el ser humano, o bien 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 zonas de descarga.

Tabla 12.2. Rasgos esenciales y límites para la cartografía de los Acuíferos.

Ecosistema	Rasgos esenciales que lo definen	Límites para la cartografía
Aguas subterráneas	- Ecosistemas subterráneos. Generan servicios incluso allí donde no hay agua superficial. - Se generan debido a la infiltración del agua por la superficie del terreno; transportan agua, materia y energía desde las zonas altas hasta las zonas bajas de las cuencas. - Descargan en forma líquida y gaseosa, o son extraídas por el ser humano. - En régimen natural las condiciones de cantidad y calidad son muy regulares, lo cual genera muchos servicios. - Intensamente utilizados por el ser humano, principalmente para regadío y para beber	Combinación de características geológicas e hidráulicas: límites de formaciones geológicas porosas o muy fracturadas; cauces y humedales efluentes; líneas de costa que son zonas de descarga.

3. Estado de conservación de los acuíferos españoles

En el momento actual no es posible conocer cuál es el estado real de conservación de la generalidad de los acuíferos o masas de agua subterránea del país, dado que no se dispone de ningún documento oficial en el que se establezca cuál es el estado de las masas de agua subterránea. Dicho estado se conocerá cuando se presenten los diferentes Planes de Gestión de las demarcaciones hidrográficas. Por tanto y por el momento, sólo se puede conocer cual es el riesgo que presentan las masas de agua subterránea de no cumplir con los objetivos medioambientales de la DMA establecidos para el 2015. Dicho riesgo se determina a partir de la evaluación de las presiones a las que están sometidas las masas de agua subterránea y de los impactos se producen como consecuencia de estas presiones (MMA, 2007).

Según los informes oficiales (MMA, 2007) las presiones más significativas que afectan a las aguas subterráneas son las siguientes: a) contaminación de fuente puntual, b) contaminación de fuente difusa, c) extracciones de agua, d) intrusión marina y e) recarga artificial. Los estudios ponen de manifiesto que la presión dominante es la debida a la contaminación por fuente difusa, seguida por las extracciones (Figura 12.7).

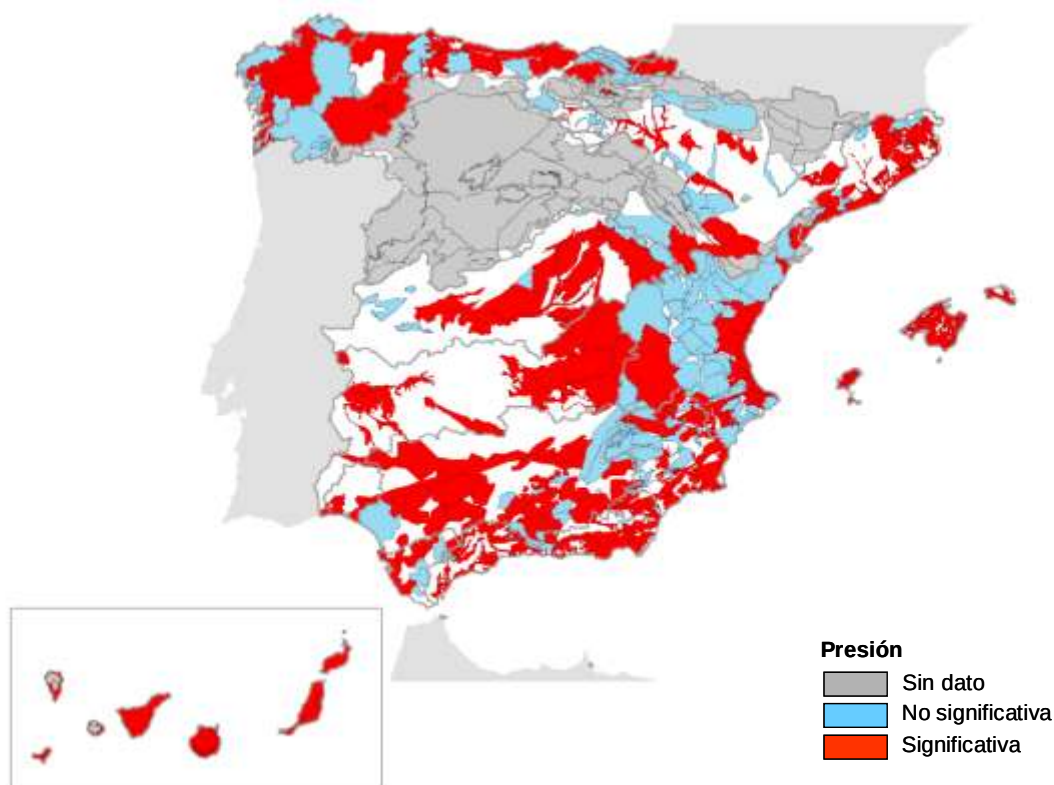


Figura 12.7. Presión global sobre las masas de agua subterránea en España (MARM, 2008).

Las presiones que afectan a las aguas subterráneas pueden afectar al estado cuantitativo o al estado químico de las masas de agua subterránea.

El estado cuantitativo es una expresión del grado en que una masa de agua está afectada por las extracciones. Se alcanza el buen estado cuando la tasa anual media de extracción a largo plazo no rebasa los recursos disponibles de aguas subterráneas (MMA, 2007). El seguimiento del estado cuantitativo contempla un único elemento de control, que es el nivel piezométrico en las masas de agua subterránea. Para ello, en cumplimiento del Anexo V en su apartado 2.2 de la Directiva Marco del Agua, se ha definido una red de estaciones, cuya distribución por demarcaciones hidrográficas se muestra en la Tabla 12.3 y Figura 12.8 (MARM, 2009). La distribución de estas estaciones de control piezométrico está concebida de modo que proporcione una apreciación fiable del estado cuantitativo de todas las masas de agua subterránea.

Tabla 12.3. Redes de seguimiento del estado cuantitativo de las masas de agua subterránea (MARM, 2009).

Demarcaciones Hidrográficas	Nº de estaciones	Superficie de masas de agua (km²)	Densidad (n/100 km²)
MIÑO-SIL	19	17.605	0,11
CANTÁBRICO	87	17.273	0,5
DUERO	376	76.503	0,49
TAJO	203	22.311	0,91
GUADIANA	321	22.113	1,45
GUADALQUIVIR	180	34.754	0,52
SEGURA	222	15.025	1,48
JUCAR	336	40.573	0,83
EBRO	275	54.858	0,5
TOTAL INTERCOMUNITARIAS	2.019	301.015	0,67
GALICIA COSTA	51	13.133	0,39
C.I. PAIS VASCO	14	2.268	0,62
C.M. ANDALUZA	156	10.254	1,52
C.A. ANDALUZA		4.974	
C.I. CATALUÑA	446	9.551	4,67
BALEARES	121	4.196	2,88
CANARIAS		7.437	0
TOTAL INTRACOMUNITARIAS	788	51.813	1,52
TOTAL INTER e INTRACOMUNITARIAS	2.807	352.828	0,8

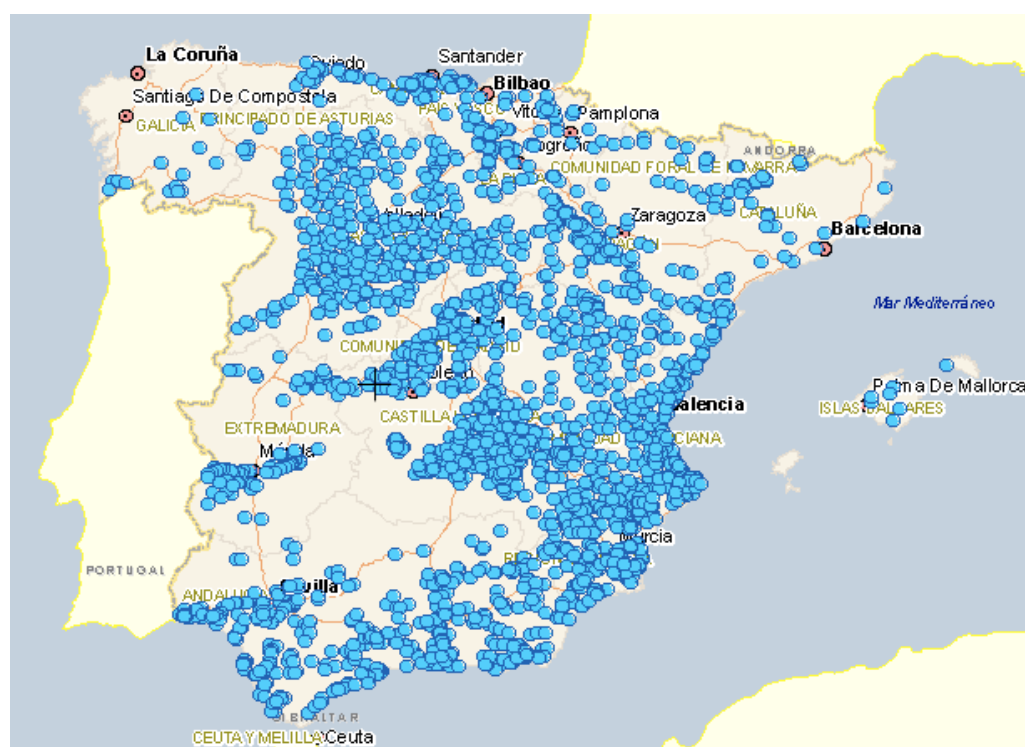


Figura 12.8.. Situación de las estaciones del programa de seguimiento del estado cuantitativo de las masas de agua subterránea (MARM, 2009).

El estado cualitativo o químico depende de la conductividad eléctrica y de las concentraciones de contaminantes. Se alcanza el buen estado químico si la masa de agua subterránea tiene una composición química tal que las concentraciones de contaminantes: a) no presenten efectos de salinización u otras intrusiones, b) no rebasen las normas de calidad aplicables en virtud de otras normas comunitarias pertinentes y c) no sean de tal naturaleza que den lugar a que la masa no alcance los objetivos medioambientales especificados para las aguas superficiales asociadas, ni originen disminuciones significativas de la calidad ecológica o química de dichas masas, ni daños significativos a

los ecosistemas terrestres asociados que dependan directamente de la masa de agua subterránea (MMA, 2007). El seguimiento del estado químico de las aguas subterráneas (Tabla 12.4 y Figura 12.9) utiliza los siguientes programas: control de vigilancia y control operativo.

El control de vigilancia se efectúa en todas las masas de agua subterránea, con objeto de complementar y validar el procedimiento de evaluación del impacto, así como facilitar información para la evaluación de las tendencias prolongadas como consecuencia de modificaciones de las condiciones naturales y de la actividad antropogénica. En las redes de control de vigilancia se analizan los parámetros exigidos en el Anexo V 2.4.2 de la Directiva Marco del Agua: contenido de oxígeno, pH, conductividad, nitrato y nitrito. Para las masas de agua en riesgo se controlan también los parámetros indicativos de los factores que han provocado que se clasifique a esa masa como en riesgo. Además de estos parámetros exigidos por la Directiva Marco del Agua, se analizan otros que ya se venían controlando en la red inicial de control de la calidad de las aguas subterráneas.

El control operativo debe efectuarse para masas de agua subterránea identificadas en riesgo de no alcanzar el buen estado químico, y debe llevarse a cabo en los períodos comprendidos entre los programas de control de vigilancia, con una frecuencia suficiente para detectar las repercusiones de los factores de presión pertinentes. El objetivo del control operativo es determinar el estado químico de todas las masas o grupos de masas de agua subterráneas respecto a las cuales se haya establecido riesgo, y determinar la presencia de cualquier tendencia prolongada al aumento de la concentración de cualquier contaminante inducida antropogénicamente. Los parámetros a analizar en este control operativo serán en la mayoría de los casos los mismos que en el control de vigilancia, prestando especial atención a los parámetros que han hecho que la masa de agua se haya declarada en riesgo. Asimismo, habrá que tener en cuenta el resto de parámetros necesarios para realizar la evaluación del estado químico de la masa de agua subterránea, conforme a lo establecido en el Anexo V 2.3.2 de la Directiva 2000/60/CE y a los artículos 3 y 4 de la Directiva 2006/118/CE.

Tabla 12.4. Redes de seguimiento del estado químico de las masas de agua subterránea designadas en cumplimiento del art. 8 de la Directiva 2000/60/CE y 91/676/CEE (MARM; 2009).

Demarcaciones Hidrográficas	Nº de estaciones (2006)	Control de Vigilancia	Control Operativo	Control de Zonas protegidas	Nº de estaciones (2009)	Superficie de masas de agua (km²)	Densidad (n/100 km²) (2006)	Densidad (n/100 km²) (2009)
MIÑO-SIL	15	15	0	0	15	17.605	0,09	0,09
CANTÁBRICO	78	78	0	28	78	17.273	0,45	0,45
DUERO	433	343	84	0	437	76.503	0,57	0,57
TAJO	126	126	6	40	163	22.311	0,56	0,73
GUADIANA	120	120	25	55	120	22.113	0,54	0,54
GUADALQUIVIR	171	133	62	64	171	34.754	0,49	0,49
SEGURA	145	119	4	26	257	15.025	0,97	1,71
JÚCAR	219	219	62	113	214	40.573	0,54	0,53
EBRO	616	616	188	147	1.272	54.858	1,12	2,32
C.M. ANDALUZA	49	49	30	36	121	10.254	0,48	1,18
C.A. ANDALUZA	15	15	7	0	41	4.974	0,3	0,82
C.I. CATALUÑA	904	500	705	0	889	9.551	9,47	9,31
GALICIA COSTA	41	41	0	0	41	13.133	0,31	0,31
C.I. PAÍS VASCO	17	15	4	10	15	2.268	0,75	0,66
BALEARES	113	113	67	63	312	4.196	2,69	7,44
CANARIAS	204	135	69	0	85	7.437	2,74	1,14
TOTAL	3.266	2.637	1313	582	4.231	352.828	0,93	1,2



Figura 12.9. Situación de las redes de vigilancia del estado químico de las aguas subterráneas designadas en cumplimiento del art. 8 de la Directiva (MARM, 2009).

Los datos de las redes de medida de cantidad y calidad han sido usados por la administración para determinar qué masas de agua tienen impactos ya contrastados. Los impactos se han clasificado en comprobados y probables. Los primeros se producen cuando se incumple la legislación vigente; se considera que se produce un impacto probable cuando posiblemente no se van a alcanzar los objetivos medioambientales fijados para el año 2015. Para conocer los impactos probables es necesario evaluar si las masas de agua alcanzan el buen estado general, que, en el caso de las aguas subterráneas, se equivale a que los estados cuantitativo y químico sean buenos.

Según los informes oficiales existentes hasta 2006 el porcentaje de masas en el que se han encontrado impactos comprobados es el 36,89%, en un 12,43% de masas se han encontrado impactos probables, un 27,43% no presentan ningún tipo de impacto y en un 23,24% de las masas no se dispone de dato de impacto (Figura 12.10; MMA, 2007, MARM, 2008).

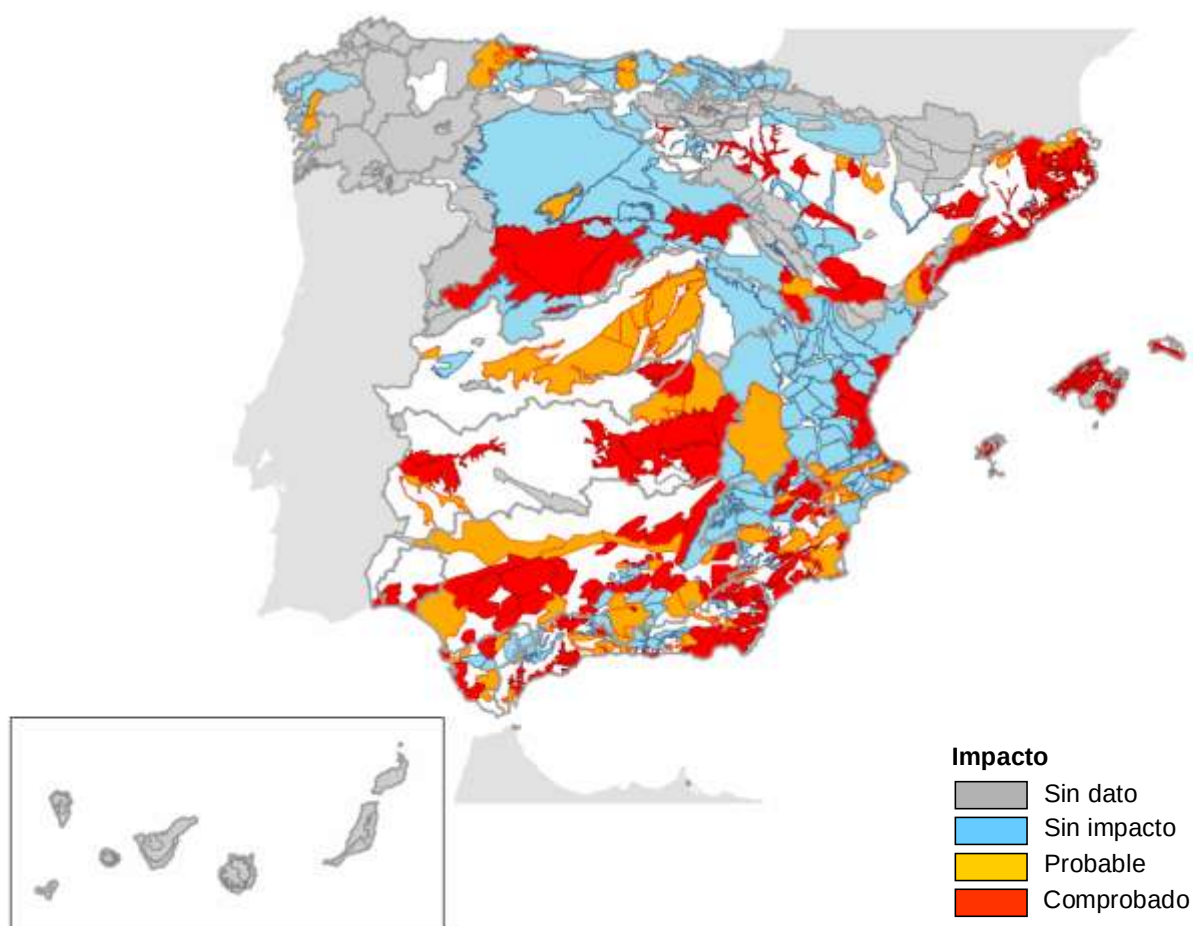


Figura 12.10. Masas de agua subterránea con y sin impactos en el año 2007 (MARM, 2008). La suma de las masas con impacto comprobado más las que tienen impacto probable supone casi el 50% de las masas definidas. Cuando se disponga de información sobre las masas no evaluadas es muy probable que las masas afectadas superen claramente la mitad.

A partir de los análisis efectuados de presiones e impactos usando los datos existentes hasta 2006, el MARM evaluó el riesgo de que las masas de agua subterráneas no alcancen los objetivos medioambientales fijados para 2015 (Figura 12.11).

El 38,65% de las masas de agua subterránea ha sido designado como en riesgo seguro de incumplir los objetivos medioambientales, el 18,24% se considera en riesgo nulo y en el 34,59% no se dispone de datos suficientes para realizar la evaluación del riesgo por lo que se clasifican como en estudio. En un 8,51% aún no se había evaluado el riesgo (MMA, 2007). Según la información oficial, las presiones más importantes responsables del riesgo en las masas subterráneas en España son la contaminación difusa (nitratos y biocidas) y las extracciones, destacando la zona sureste de la Península como la de mayor concentración de masas en riesgo. En las zonas de costa también cobra gran importancia la intrusión salina. Los mayores problemas están en el Sureste de la Península, donde se produce el mayor estrés hídrico.

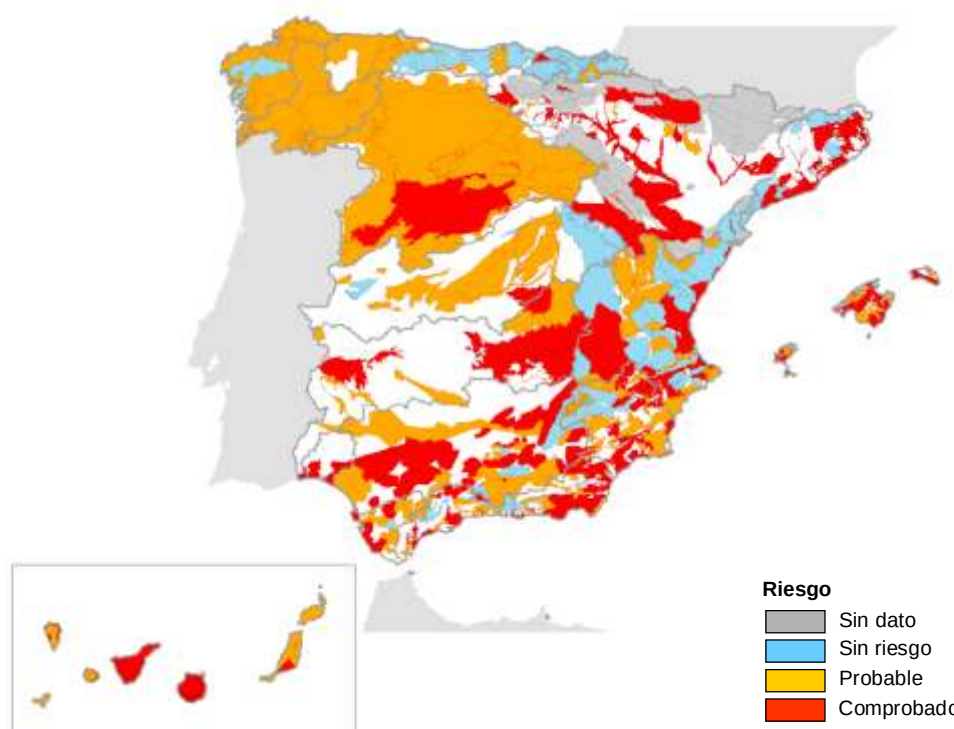


Figura 12.11. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 según la evaluación realizada hasta 2006 (MMA, 2007; MARM, 2008).

3.1. Estado cuantitativo en 2009

Según los últimos datos oficiales disponibles (MARM, 2009), 219 masas de agua subterránea están en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo (127 masas intercomunitarias y 92 intracomunitarias). El mayor número de estas masas corresponden a las demarcaciones hidrográficas del Júcar, Segura y Baleares (Tabla 12.5 y Figura 12.12). La cifra supone alrededor del 29,6% de las 740 masas subterráneas definidas.

Tabla 12.5. Masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado cuantitativo para 2015 (MARM, 2009).

Demarcaciones Hidrográficas	Nº de masas de agua subterránea
MIÑO-SIL	0
CANTÁBRICO	0
Duero	6
Tajo	7
Guadiana	6
Guadalquivir	21
Segura	41
Júcar	45
Ebro	1
TOTAL INTERCOMUNITARIAS	127
C.I. País Vasco	0
Galicia Costa	0
C.M. Andaluza	23
C.A. Andaluza	3
C.I. Cataluña	10
Baleares	41
Canarias	15
TOTAL INTRACOMUNITARIAS	92
TOTAL INTER e INTRACOMUNITARIAS	219

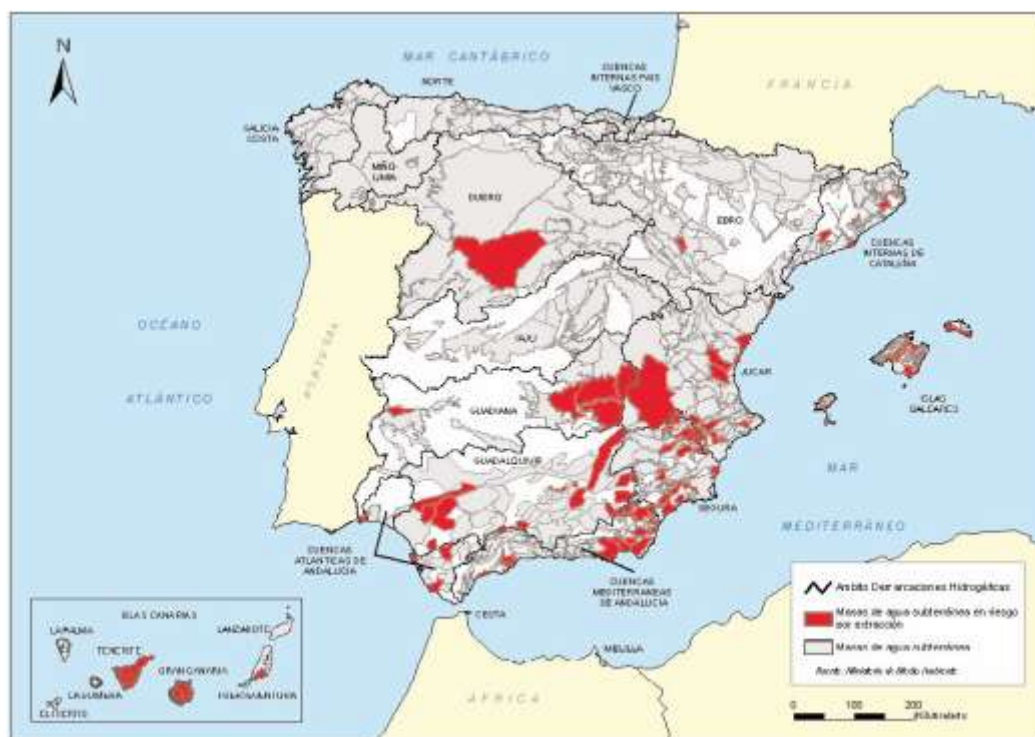


Figura 12.12. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cuantitativos en 2015 por las extracciones según datos de 2009 (MARM, 2009).

La expresión “sobreexplotación acuíferos” se refiere a un concepto que se está convirtiendo en término de uso común en gestión hídrica, existiendo una demanda creciente de informes, opiniones e investigaciones relacionadas con este tema. Pero el concepto de sobreexplotación no es simple, ni tiene un significado universal, ni es aplicable sin grandes incertidumbres (Custodio, 2000b; Llamas y Garrido, 2007). La sobreexplotación se puede definir como una situación en la que durante varios años la extracción media de agua subterránea en un determinado acuífero supera o se aproxima a su recarga media.

Sin embargo, frecuentemente el escaso conocimiento de los acuíferos supuestamente afectados y la aplicación de métodos demasiado simplistas, puede llevar a conclusiones precipitadas y poco fundamentadas o contrastadas, influyendo o apoyando una inadecuada gestión de los recursos hídricos subterráneos. Por ejemplo, los valores medios de recarga y de extracciones de un acuífero suelen ser cifras variables y cuya estimación incorpora, además, una incertidumbre notable, por tanto su comparación directa puede proporcionar resultados completamente aleatorios (Custodio, 1989, 1993, 2000b y 2002). Además, en la práctica se suele considerar que hay sobreexplotación cuando se observan ciertos efectos negativos de la explotación tales como descenso continuado de niveles, deterioro de la calidad del agua, encarecimiento del agua extraída o daños ecológicos y ambientales. Sin embargo, estos efectos no están necesariamente relacionados con el hecho de que la extracción sea mayor que la recarga, siendo la mayor parte de ellos inherentes a la propia naturaleza de los acuíferos y, por tanto, pudiendo conocerse y evaluarse previamente así como afinarse a medida que avanza la explotación. Otra situación frecuente (y frecuentemente desconocida) es que los efectos negativos que se observan en la actualidad respondan a cambios naturales (climáticos, eustáticos) o antrópicos (deforestación, forestación, manipulación de los flujos superficiales,...) en la magnitud de la recarga de hace algunos siglos o incluso milenios (Custodio; 1989, 1993, 2000b y 2002).

Para conocer con cierto detalle y confianza los efectos de la extracción de aguas subterráneas en una zona, sea ésta intensiva o no, y decidir cuál es el grado de explotación que es admisible o bien que 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.

Además, la gestión debe ser adaptable y debe poder cambiar a lo largo del tiempo en función de las condiciones hidrológicas, meteorológicas, ecológicas y socioeconómicas de la zona en cada momento de su historia. Esto implica la identificación y el establecimiento de unos objetivos que se deben establecer conjuntamente entre gestores y usuarios, de acuerdo con la legislación existente en cada momento y teniendo en cuenta las limitaciones relevantes impuestas por la condiciones antes mencionadas (Custodio *et al.*, 2009).

En la Figura 12.13 se presentan los datos oficiales disponibles sobre las Unidades Hidrogeológicas con problemas de sobreexplotación. En la Figura 12.14 se presentan las áreas con predominio de riego con aguas subterráneas procedentes de acuíferos sobreexplotados (Plan Nacional de Regadíos; MAPA, 2002).

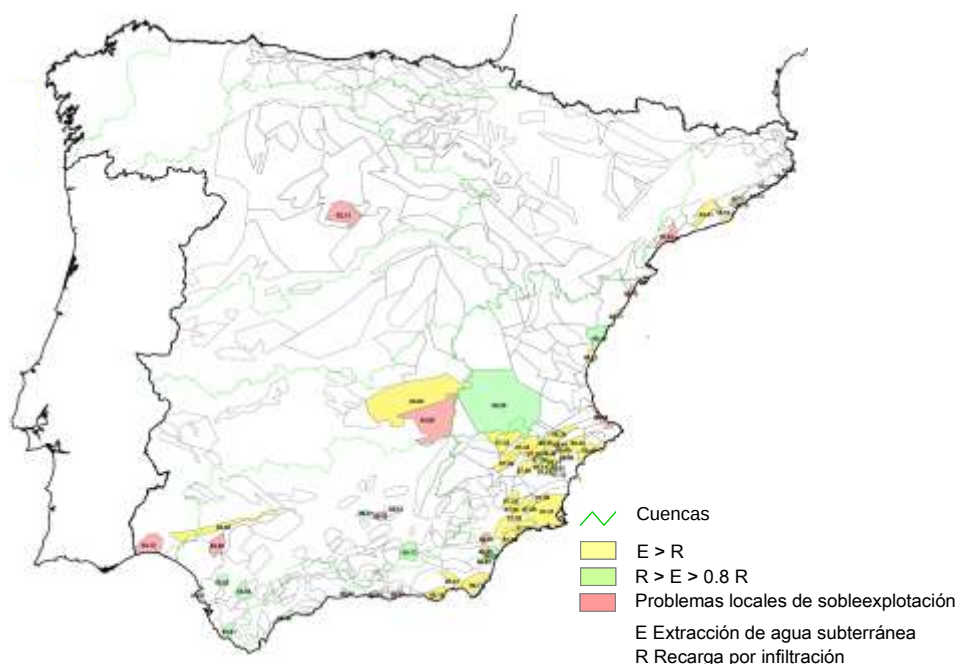


Figura 12.13. Unidades Hidrogeológicas con problemas de sobreexplotación hasta el año 2001 según el Plan Nacional de Regadíos (modificado de MAPA, 2002).



Figura 12.14. Áreas con predominio de riego con aguas subterráneas procedentes de acuíferos sobreexplotados en el año 2001 según el Plan Nacional de Regadíos (modificado de MAPA, 2002).

3.2. Estado cualitativo o químico en 2009

Según los informes oficiales, los problemas de calidad más importantes en las aguas subterráneas en España derivan de las elevadas concentraciones de compuestos nitrogenados en áreas de desarrollo agrícola (contaminación por fuente difusa) y de la presencia de cloruro y sodio en acuíferos costeros (intrusión marina) (MMA, 2008).

La contaminación por nitratos es debida principalmente a la aplicación inadecuada de fertilizantes, a la infiltración en explotaciones ganaderas y en menor medida a vertidos líquidos urbanos. La contaminación por actividades agrícolas se produce por la infiltración de agua de lluvia o riego que disuelve y arrastra abonos y plaguicidas. La explotación del acuífero conlleva el riesgo de utilización de aguas contaminadas si se realiza sin las debidas precauciones.

La progresión de la intrusión salina por alteración del régimen de flujo como consecuencia del bombeo inadecuado en acuíferos costeros, o la ubicación inadecuada de las captaciones de bombeo en este tipo de acuíferos, provoca el avance de la cuña de agua salada tierra adentro al disminuir el flujo de agua dulce hacia el mar (Figura 12.15). No obstante, la progresión tierra adentro de la cuña de agua marina en acuíferos costeros no es la única fuente de salinización de aguas subterráneas. En muchos casos, y tanto en zonas costeras como continentales, las extracciones de agua subterránea movilizan otras masas de agua subterránea salina cuyo origen puede ser muy variado (agua marina relictas, agua en contacto con formaciones de sales evaporíticas, paleoaguas que han adquirido su salinidad por elevado tiempo de permanencia en el terreno). En todos los casos el efecto es el mismo: salinización de masas de agua que antes eran dulces. Sin embargo los métodos para remediar la situación pueden ser distintos en función del proceso de salinización. Los estudios realizados por la administración en acuíferos costeros no discriminan el origen de la salinización y la atribuyen únicamente a progresión de la cuña marina; según estos, la contaminación por intrusión marina afecta a la mayoría de los acuíferos costeros mediterráneos de España.



Figura 12.15. Contaminación de agua subterránea por intrusión marina en sondeos próximos a la costa (IGME, 2009).

Según los datos de 2009, 271 masas de agua subterránea están en riesgo de no alcanzar el buen estado químico (86 masas debido a contaminación puntual, 238 masas por contaminación difusa y 83 masas por intrusión marina). Esto supone el 36,62% de las 740 masas de agua definidas. El mayor número de masas con contaminación corresponde a las demarcaciones hidrográficas del Ebro y Baleares (Tabla 12.6 y Figuras 12.16, 12.17 y 12.18, MARM, 2009).

Tabla 12.6. Masas de agua subterránea en riesgo de no alcanzar el buen estado químico en 2015 según datos de 2009 (MARM, 2009). En la Demarcación del Ebro la mayoría de los problemas se deben a contaminación difusa; en las islas Baleares la contaminación difusa, puntual y la salinización costera afectan de manera bastante similar a la calidad de las aguas.

Demarcaciones Hidrográficas	Total*	Contaminación puntual	Contaminación difusa	Intrusión
MIÑO-SIL	2	0	2	0
CANTÁBRICO	0	0	0	0
DUERO	23	4	22	0
TAJO	14	0	14	0
GUADIANA	17	0	17	1
GUADALQUIVIR	24	1	24	0
SEGURA	23	2	14	8
JÚCAR	21	0	17	13
EBRO	42	11	36	0
C.I. PAÍS VASCO	2	2	0	0
GALICIA COSTA	0	0	0	0
C.M. ANDALUZA	21	1	20	11
C.A. ANDALUZA	5	0	5	2
C. I. CATALUÑA	23	23	23	10
BALEARES	42	42	36	30
CANARIAS	12	0	8	8
TOTAL	271	86	238	83

* Nota: Número total de masas de agua en riesgo de no alcanzar el buen estado químico. Una masa de agua puede estar declarada en riesgo por varias causas



Figura 12.16. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por contaminación puntual (MARM, 2009).

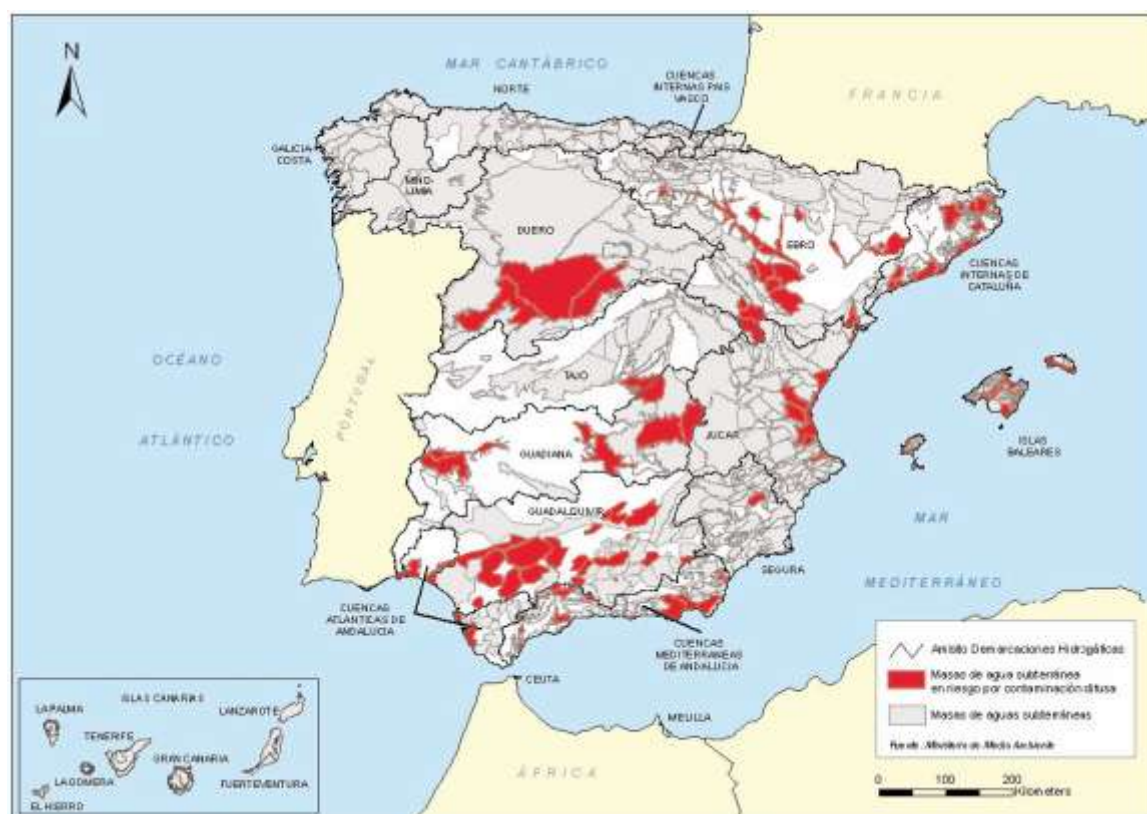


Figura 12.17. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por contaminación difusa (MARM, 2009).



Figura 12.18. Riesgo en las masas de agua subterránea de España de no cumplir los objetivos cualitativos en 2015 por intrusión marina con datos de 2009 (MARM, 2009).

4. Servicios que suministran las aguas subterráneas en España

Como se ha dicho en el apartado 1, no existe ningún trabajo en España que considere las aguas subterráneas como un ecosistema e identifique de forma sistemática los servicios del mismo. Por tanto, esta es una primera aproximación que sin duda tendrá que ser revisada, completada y mejorada en el futuro. El contenido de la Tabla 12.7 es el consensuado para todos los ecosistemas evaluados. Dado que dicho contenido es muy explícito, no se realiza aquí ningún comentario adicional.

Tabla 12.7. Tipos de servicios de las aguas subterráneas en España. Los colores indican la relevancia relativa de cada uno.

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
Abastecimiento	Alimentos	Agricultura	Productos derivados del uso de agua subterránea para regadío.	Todo tipo de productos agrícolas. Peces, crustáceos, etc. de piscifactorías que usan agua subterránea dulce y salina. Plantas, arbustos y árboles frutales silvestres comestibles que crecen en zonas de descarga de agua subterránea.
		Acuicultura	Productos derivados de la existencia de descarga natural a ríos, humedales, costa o mediante evapotranspiración.	
		Recolección de plantas y frutos	La descarga de agua y de nutrientes genera condiciones físico-químicas favorables para vida de especies animales y vegetales comestibles.	
	Agua de buena calidad	Captación y explotación	Agua dulce de calidad adecuada para cualquier uso (doméstico, agrícola e industrial), suministrada a través de pozos, manantiales y descargas a ríos.	Agua para beber, para la agricultura y para la industria (uso primario en manufacturas y uso en procesos industriales).
	Materias primas de origen biológico	Recolección y/o explotación	Materiales generados por los organismos que viven en las zonas hiporreica, no saturada y saturada de los acuíferos, los cuales se transforman (natural o antrópicamente) y generan bienes de consumo.	Turba. Madera, leña y fibra vegetal procedente de especies freatofíticas.
	Materias primas de origen litológico	Recolección y/o explotación	Materiales de origen mineral disueltos en el agua.	Agua mineral para beber. Sales evaporíticas (sal común, yeso); carbonato de calcio. Sulfuros metálicos; óxidos de hierro y manganeso; etc.
		Recolección y/o explotación	Materiales de origen mineral que se forman por precipitación química de solutos disueltos en aguas subterráneas allí donde estas descargan a la superficie del terreno, los cuales se transforman (natural o antrópicamente) y generan bienes de consumo.	
	Energías renovables	Energía hidráulica	Materiales de origen biótico o geótico que sirven como fuente de energía: el agua y su poder mecánico y calorífico.	La descarga de un flujo importante y concentrado de agua subterránea por manantiales se usa para mover molinos o norias.

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
		Energía geotérmica		El agua subterránea bombeada en pozos se usa para climatización de edificios (calentamiento y enfriamiento, especialmente de instalaciones industriales).
	Acervo genético			
	Medicinas naturales y principios activos		Las aguas subterráneas regulan la adquisición, almacenamiento, reciclado, transformación y transferencia a la vegetación, la fauna y la fase sólida de muchos elementos químicos que tienen principios activos beneficiosos para la salud.	Plantas y hongos silvestres de zonas de descarga de aguas subterráneas; uso de aguas termales; lodos orgánicos y minerales beneficiosos para la salud (sulfurados, clorurados ..).
Regulación	Regulación climática	Global	El agua subterránea contribuye a disminuir el impacto de la variabilidad climática a distintas escalas de dos formas: a través del mantenimiento de vegetación freatófítica y a través del almacenamiento natural de C en los acuíferos en fase líquida (especies disueltas, principalmente CO ₂ , HCO ₃ y CO ₃), gaseosa (CO ₂ gas) y sólida (rocas carbonatadas, principalmente CaCO ₃). Ciertos procesos químicos y biogeoquímicos ocasionan la transferencia de C entre esas tres fases. Parte de este C descarga a cauces, humedales y el mar y parte vuelve a la atmósfera en fase gaseosa.	Las masas de vegetación freatófítica regulan la amplitud térmica local y contribuyen a mantener el balance hídrico. La precipitación de rocas carbonatadas en la zona edáfica y en el subsuelo mantiene a una buena parte del C del planeta en fase sólida. Control del impacto del CO ₂ antropogénico en el calentamiento global mediante inyección a través de pozos profundos y su mantenimiento aislado de la atmósfera.
		Regional y local	La inyección controlada de CO ₂ en acuíferos es una de las actividades con mayor potencial actual y futuro para almacenar ("secuestrar") CO ₂ generado antrópicamente.	
	Regulación de la calidad del aire			

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
	Regulación hídrica	Regulación de la disponibilidad hídrica	Las cuencas bien conservadas tienen gran capacidad de regulación del ciclo hídrico mediante la infiltración y almacenamiento de agua en el terreno en ciertas zonas de la cuenca y épocas cortas del año, y la descarga sostenida a la superficie en otras zonas durante periodos largos o todo el año, manteniendo flujos hídricos superficiales incluso en periodos de sequía. La recarga inducida (fomento de la recarga natural mediante actuaciones tales como escarificación e ríos, o embalsamiento del agua en llanuras de inundación) y la recarga artificial de acuíferos (través de sondeos) son actividades antrópicas que aprovechan la capacidad de regulación natural de los acuíferos.	Almacenamiento de agua de lluvia y de inundaciones en el terreno y liberación lenta y sostenida de la misma a ríos, manantiales, lagos, humedales, costas y vegetación freatófica. Tanto la recarga inducida como la recarga artificial de acuíferos se realizan en varios lugares del país; constituye una forma de regulación usada desde antiguo a escala local y que previsiblemente tendrá un mayor impacto en el futuro inmediato y a medio-largo plazo.
		Mejora de la calidad del agua y degradación de contaminantes	Muchos microorganismos de las zonas hiporreica, no saturada y saturada, degradan contaminantes incorporados al agua, especialmente nutrientes no orgánicos, compuestos orgánicos y otras sustancias potencialmente patógenas.	Reducción de sulfatos, nitratos y fosfatos; precipitación de metales potencialmente tóxicos (Al, Cr, As, ..); adsorción de nutrientes y metales en la fase sólida del terreno; degradación, en distintos grados, de plaguicidas, disolventes, aceites, hidrocarburos, sustancias farmacéuticas...).
	Regulación morfosedimentaria		En cuencas bien conservadas el buen uso de la superficie del terreno (existencia de vegetación y de suficiente terreno no asfaltado) y del ciclo hídrico favorece la capacidad de infiltración durante crecidas e inundaciones, contribuyendo a disminuir la erosión. El aporte de agua subterránea a la vegetación, especialmente en época seca, también contribuye a disminuir la erosión.	Control de la erosión, de la pérdida de suelo edáfico, del relleno de cauces, barrancos, embalses y pequeñas depresiones del terreno, que mantienen la capacidad para almacenar agua. Mantenimiento de la cubierta vegetal natural.
	Formación y fertilidad del suelo		El agua subterránea interviene en la mayoría de los procesos bio-geo-químicos que originan los suelos, los cuales tienen lugar principalmente en la zona no saturada del terreno y en la franja de oscilación del nivel freático. El agua subterránea también juega un papel esencial en la fertilidad de los suelos a través del almacenamiento, reciclado, procesamiento y adquisición de nutrientes.	Suelos fértiles desarrollados en zonas de recarga donde el nivel freático es somero y en zonas de descarga de agua subterránea (vegas aluviales, alamedas, fresnedas, humedales,...).

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
	Regulación de las perturbaciones naturales	Regulación de oscilaciones climáticas e hídricas extremas	Los acuíferos tienen gran capacidad para amortiguar el impacto de inundaciones y sequías sobre el ser humano y sobre otros ecosistemas, mediante su capacidad para infiltrar y almacenar agua en época de inundaciones, y para liberarla lentamente en época de sequía.	Capacidad de las llanuras de inundación, los abanicos aluviales, etc. para infiltrar agua en avenidas. Disponibilidad de agua almacenada en el subsuelo durante épocas secas, accesible a través de descargas naturales (manantiales, flujo de base a ríos) o artificiales (bombeos). Disponibilidad de agua para la vegetación y todo tipo de organismos mediante descarga natural a ríos, humedales, costas o evapotranspiración.
	Control biológico			
Culturales	Conocimiento científico		Incremento del conocimiento acerca del funcionamiento de los acuíferos, de su relación con los otros elementos del ciclo hídrico, de los servicios que proporcionan las aguas subterráneas y del impacto de actuaciones antrópicas y de cambios naturales sobre el funcionamiento de los acuíferos y sobre los servicios que proporcionan.	Proyectos de investigación. Publicaciones científicas. Interés de organismos internacionales tales como Naciones Unidas, a través del Programa Hidrológico Internacional, por desarrollar conocimiento y capacitación acerca del funcionamiento de las aguas subterráneas y de los servicios que proporcionan. Incipiente desarrollo de un marco conceptual para el estudio, valoración, legislación y gestión de las aguas subterráneas en desde el punto de vista de los servicios que proporcionan.
	Conocimiento ecológico local		Saber tradicional popular acerca del papel de la infiltración en el terreno en la formación de manantiales; en la disponibilidad de agua almacenada a poca profundidad; en la existencia de grandes masas de vegetación, de manantiales, arroyos y humedales; en el aporte de agua dulce para la fauna; en el mantenimiento de plantas y animales durante épocas secas; en la capacidad del terreno para depurar el agua; etc.	Modos tradicionales de gestión del agua para favorecer la recarga de la escorrentía de lluvia o de deshielo, tales como los careos del agua de Alpujarra (Sierra Nevada) o los escarificados de las llanuras de inundación en muchos lugares del E peninsular e islas. Recolección controlada de plantas y frutos silvestres, de fibras vegetales, madera, etc.

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
	Identidad cultural y sentido de pertenencia		Muchas tradiciones locales y regionales que emanan de la existencia de manifestaciones de descargas de agua subterránea tales como manantiales, arroyos, lagos, humedales, masas frondosas de vegetación arbórea (alamedas, sotos), etc., han contribuido a vincular a las poblaciones locales con su entorno a lo largo de los siglos y a darles un sentido de pertenencia.	Folclore y fiestas vinculadas a manantiales, arroyos y lagunas locales. Usos tradicionales medicinales del agua de manantiales, arroyos y lagunas, para beber o bañarse; uso de los sedimentos que se depositan a la salida de manantiales y en lagunas. Vocablos relacionados con los manantiales, fuentes, arroyos, lagunas (riqueza lingüística). Organizaciones jurídico-sociales relacionadas con la gestión del agua subterránea.
	Disfrute espiritual y religioso		Muchos ritos, creencias y cultos religiosos que forman parte del acervo cultural de las poblaciones están vinculados a manifestaciones de la existencia de agua subterránea.	Lugares de culto (ermitas, iglesias, monasterios) vinculados a fuentes, ríos y arroyos, lagunas o grandes pozos ancestrales con agua poco profunda. Romerías.
	Paisaje-Servicio estético		Los paisajes vinculados a manantiales, arroyos, ríos, lagos y lagunas alimentados por aguas subterráneas, así como las grandes masas de vegetación freatófita (bosques y arbustos), producen placer estético y generan tranquilidad y bienestar.	Entorno de fuentes, manantiales, lagos, arroyos, etc., protegidos o no, que tienen un buen estado de conservación, especialmente los múltiples localizados en las zonas de clima menos húmedo (tercio SE de la Península, islas Baleares y Canarias). Visitas preferentes a zonas protegidas que incluyen manifestaciones de aguas subterráneas.
	Actividades recreativas y ecoturismo		El turismo de naturaleza y las actividades recreativas en entornos naturales son actividades con una demanda intensa y creciente. Los entornos naturales vinculados a la descarga de agua subterránea (manantiales, ríos y arroyos, lagos, lagunas) generan condiciones adecuadas para muchas de estas actividades.	Deportes de agua; balneario recreativo y terapéutico.

Tipo	Servicios	Categoría	Definición	Ejemplos e importancia
	Educación Ambiental		Los medios naturales con manifestaciones claras de la existencia de agua subterránea (morfologías de disolución de rocas carbonatadas y yesos en zonas de recarga; cuevas y conductos cársticos visitables; manantiales, arroyos y humedales permanentes en zona de descarga) tienen magníficas condiciones para la educación sobre el funcionamiento del ciclo hídrico, de los ecosistemas vinculados y de muchos de los servicios de esos ecosistemas.	Programas de educación ambiental dedicados al agua. Parajes declarados de interés geológico / hidrológico.

	Alto
	Medio-Alto
	Medio-Bajo
	Bajo

5. Condiciones y tendencias de los servicios evaluados en las aguas subterráneas

La información de base que se ha usado para valorar el estado y las tendencias de los servicios de las aguas subterráneas en aproximadamente la última década es variable en cuanto a su procedencia, grado de confianza (dependiente de su origen, objetividad y sistematización) y completitud. Algunos de los servicios están ya siendo evaluados, aunque con otro nombre, como parte de los trabajos que la administración realiza para cumplir los requerimientos de las directivas Marco de Aguas y de Aguas Subterráneas, y se encuentran fácilmente consultables en la web del MARM (www.marm.es), bien a través de visores de consulta de datos o bien en forma de informes anuales sobre el estado ambiental de las aguas en España. Parte de la información está también disponible en las webs del Instituto Nacional de Estadística, las Confederaciones Hidrográficas del país o el Observatorio de la Sostenibilidad en España (www.sostenibilidad-org.es).

Pero mucha de la información relativa a las aguas subterráneas, singularmente las relacionadas con el estado cualitativo, el uso de las mismas, los aprovechamientos industriales (aguas minerales, sales, balneoterapia, geotermismo, inyección de CO₂, etc.) se encuentra dispersa en webs profesionales, de turismo, negocios, de investigación, etc. Por último, otro grupo de servicios, tanto de abastecimiento como de regulación y culturales, han sido evaluados con base en el conocimiento y la experiencia personal de los autores, por lo que, en algún caso, pueden tener un sesgo derivado de los ámbitos y áreas de trabajo personales. La valoración de los servicios y de sus tendencias en aproximadamente la última década se muestra en la Tabla 12.8; en la Tabla 12.9 se recogen los indicadores utilizados para la evaluación.

Una valoración global de los tres tipos de servicios indica que la mayoría de los servicios de abastecimiento y regulación disminuye, mientras que los servicios culturales aumentan (Tabla 12.6). Esto se interpreta como un indicador del aumento de la formación y la consciencia medioambiental de la población en general en los últimos 15-20 años, en paralelo al aumento de estudios e informes sobre los acuíferos más utilizados del país y la constatación de que buena parte de ellos tienen niveles variables de deterioro de la cantidad y la calidad de sus aguas.

5.1. Servicios de abastecimiento

5.1.1. Alimentos

El servicio de abastecimiento de alimentos no se ha modificado significativamente en los últimos años. Entre las décadas de 1960 a 1990 el servicio de proporcionar agua para la *agricultura* aumentó extraordinariamente: la extracción de aguas subterráneas para abastecer el regadío se multiplicó por más 600 en los últimos 50 años (MMA, 2000; Llamas *et al.*, 2001; Custodio *et al.*, 2009; OSE, 2010; INE, 2010). Sin embargo, en estos últimos años la superficie de cultivo de regadío en España no solo no ha aumentado sino que globalmente ha disminuido (entre 1987 y 2006 han desaparecido 36.355 ha, según OSE, 2010), a pesar de los planes de transformación de áreas como Monegros II (RD 31/1985 y RD 1676/1986). Las causas son varias y entre ellas destacan la actual política agraria de la Unión Europea, que favorece el apoyo a la agricultura de los nuevos países de la Unión frente a los más antiguos, o incluso el apoyo a la agricultura de países externos tales como Maruecos y Túnez; el aumento de las competencias respecto al agua de las comunidades autónomas frente al gobierno central, o el encarecimiento del acceso al agua subterránea en cantidad y calidad suficientes para la agricultura en muchas zonas como consecuencia del descenso de niveles piezométricos tras décadas de explotación y del deterioro de la calidad (generalmente por salinización). Pero a pesar de este balance global, en algunas zonas del país sí se ha producido un aumento significativo de la superficie agrícola de regadío con aguas subterráneas: entre 1987 y 2006 han aparecido 67.444 ha de olivar de regadío en todo el país, la mayor parte (97,5%) en Andalucía, convirtiendo terrenos de secano en regadío a costa de explotar aguas subterráneas muy antiguas (varias decenas de miles de años; Rodríguez Arévalo *et al.*,

2007) extraídas mediante pozos de varios centenares de profundidad en el acuífero de la Loma de Úbeda.

Uso de agua subterránea para *acuicultura* no se ha llegado a desarrollar según las expectativas generadas en las décadas de 1980 y 1990, en buena parte debido al auge de la acuicultura en medio marino y costero. Está restringido, desde hace unos años, al uso de agua subterránea salina para la cría de crustáceos en ciertas zonas de la costa donde el pequeño gradiente topográfico e hidráulico favorece la existencia de masas de agua de mar, generalmente antigua (al menos unos miles de años, emplazada durante el ascenso del nivel del mar tras el último periodo glacial del Cuaternario) en acuíferos costeros tales como el delta del Ebro y el del Guadalquivir.

La *recolección de plantas y frutos silvestres* derivados de la presencia de agua subterránea somera, a poca profundidad, ha disminuido por varias razones, entre ellas la disminución del agua disponible en el terreno como consecuencia del descenso sostenido de la cota del nivel freático de muchos acuíferos debido a la extracción continuada de agua subterránea durante décadas.

5.1.2. Agua de buena calidad

Provisión de agua de buena calidad para todo tipo de usos tiende a empeorar en los últimos años, y cada vez es más infrecuente que el agua subterránea que se usa en una zona concreta desde antiguo mantenga hoy en día sus condiciones prístinas.

En los acuíferos libres sobre cuya zona de recarga se realizan *actividades agrícolas*, la situación más habitual es que el agua de al menos los primeros metros de la zona saturada tenga nutrientes, plaguicidas, materia orgánica, metales pesados que acompañan a muchos fertilizantes, etc., procedentes de los tratamientos agrícolas (Porrás *et al.*, 1985; Fernández-Ruiz, 2007; MARM, 2010).

Según OSE (2007 y 2010) y MARM (2008), el consumo de fitosanitarios en España aumentó entre 1995 y 2002, disminuyó entre este año y 2006 y ha aumentado ligeramente entre 2006 y 2008 (último año analizado). Los productos más usados en 2008 fueron herbicidas y fungicidas. Las zonas del país donde más se usan en relación con su superficie agrícola son (datos de 2006) Islas Canarias (99,8 kg/ha), Cantabria (23,5 kg/ha) y Región de Murcia (21,5 kg/ha); las zonas donde menos se usan son Castilla y León (2,1 kg/ha), Castilla-La Mancha (2,4 kg/ha) y Aragón (3,1 kg/ha). En cualquier caso, es importante recordar los productos acumulados en el terreno tras décadas de aplicación son una fuente de contaminación difusa que perdurará durante décadas y quizá siglos, deteriorando las condiciones de los ecosistemas del suelo y las aguas subterráneas y generando también riesgos para la salud humana a largo plazo.

El *indicador de deterioro de la calidad* del agua subterránea más extendido es el contenido en nitrato. Con respecto al contenido en NO_3 de las aguas subterráneas en España, según OSE (2010) e INE (2010) en el año 2009 España fue el segundo país de la Unión Europea con mayor concentración de nitratos, destacando las Cuencas Internas de Cataluña con un 36,5% de contenidos de nitrato >50 mg/L, la Cuenca Atlántica Andaluza con un 32,6% y la Demarcación del Guadalquivir con un 30,3%. Según OSE (2010) el consumo total de fertilizantes por hectárea aplicada disminuyó un 30% en 2008 respecto a 2007 (de 133 a 92 kg/ha), revertiéndose de esta forma la tendencia alcista iniciada en 2005. El consumo de fertilizantes fosfatados es el que más disminuyó, un 49%, seguido del de fertilizantes potásicos (25%) y el de fertilizantes nitrogenados (22%). Canarias, Región de Murcia y Comunidad Valenciana fueron las comunidades autónomas que consumieron mayor cantidad de fertilizantes en relación con la superficie agrícola en 2006: 334,3, 320,0 y 262,8 kg/ha respectivamente, según los últimos datos disponibles (MARM, 2008). Illes Balears (27,5 kg/ha), Cantabria (34,7 kg/ha) y Principado de Asturias (55,0 kg/ha) presentaron los menores consumos de este tipo de productos. Tampoco es previsible que esta situación mejore en los próximos años: según OSE (2010), aunque se ha producido una tendencia descendente en el consumo de fertilizantes por unidad de superficie en los últimos años la agricultura española se orienta hacia un uso más intensivo del agua y hacia pautas de transformación de

superficies de secano a regadío, con el consecuente aumento en el uso de fertilizantes. Según datos en red del MAPA (<http://www.mapa.es/>) hay un claro dominio del uso de fertilizantes nitrogenados frente a los fosfatados y potásicos (casi diez veces más nitrogenados simples que fosfatados, y casi veinte veces más que potásicos simples, sólo en noviembre de 2010. Por otro lado, los fertilizantes acumulados en el terreno tras décadas de aplicación en exceso respecto a los usos de la vegetación son también una fuente de contaminación que perdurará durante décadas y quizá siglos.

Si el riego se hace con aguas residuales urbanas y/o de origen ganadero, esto supone la incorporación al terreno, además, de grandes cantidades de productos antimicrobianos que pueden hacer que las poblaciones de microorganismos del acuífero se vuelvan resistentes y sea imposible eliminarlos del agua en las plantas potabilizadoras, si el acuífero se utiliza también para abastecimiento humano.

También es frecuente la *salinización por concentración progresiva de los excedentes de riego* allí donde el agua subterránea se reutiliza (o se ha reutilizado en el pasado) intensamente, como es el caso de muchas zonas del levante peninsular (Aragüés *et al.*, 1996). Si en esas zonas la actividad es principalmente *industrial*, es frecuente encontrar en el agua subterránea metales pesados, hidrocarburos, disolventes, aceites minerales, sales y cualquier otro producto habitual en los efluentes líquidos, sólidos y gaseosos de la actividad que se lleva a cabo ahí. Si esas zonas están ocupadas por *núcleos urbanos*, es altamente improbable que el agua subterránea esté libre de cloruro, sodio, gran cantidad de nutrientes, virus y otros organismos patógenos, detergentes, aceites orgánicos y minerales, disolventes, antibióticos, esteroides y otros medicamentos, productos de aseo personal, etc. (Teijón *et al.*, 2010). Estas sustancias pasan al agua subterránea bajo las ciudades a través de las pérdidas de las redes de saneamiento, y aguas abajo de las ciudades a través de la infiltración en cauces y campos de cultivo que se riegan con los efluentes de las plantas depuradoras, ya que muchos de estos productos no son eliminados.

Otra causa frecuente de deterioro de la calidad del agua subterránea contenida en las capas más someras de los acuíferos libres es la inversión de la relación acuífero-río como consecuencia de las extracciones y la conversión de esos cauces, que con frecuencia llevan afluentes urbanos, industriales y agrícolas, en zonas de recarga.

En el caso de los acuíferos confinados, con cierta frecuencia la calidad del agua se ha deteriorado como consecuencia de la movilización de masas de agua salina, ubicadas en el propio acuífero o en formaciones adyacentes, las cuales estaban en equilibrio con el agua dulce y dejan de estarlo a consecuencia de las extracciones. Es una situación no infrecuente en el levante peninsular, donde existen formaciones salinas evaporíticas del Triásico en contacto con otras formaciones detríticas o carbonatadas que se han explotado tradicionalmente por su buena calidad para abastecimiento de núcleos de población, regadío e industria.

En acuíferos costeros, ya sean libres o confinados, también es frecuente que algún sector de los mismos se haya salinizado por intrusión marina, por conos de ascenso salino, por movilización de masas de agua subterránea salina antigua emplazadas en zonas de pequeño gradiente hidráulico natural o en formaciones de baja permeabilidad, que han sido movilizadas por las extracciones de agua dulce. Según MMA (2005), en 2003 casi el 9% de la superficie de acuíferos españoles estaba salinizada, y entre los acuíferos costeros más del 60% mostraban algún grado de salinización. Como caso extremo se menciona la cuenca del Segura, donde cerca del 30% de la superficie de acuíferos estaba salinizada en esa fecha.

5.1.3. Materias primas de origen biológico

El servicio de abastecimiento de turba, madera y leña ha empeorado significativamente como consecuencia del descenso de la cota del nivel freático de muchos acuíferos y de la deforestación en las zonas de nivel somero. Descensos de algunas decenas de metros son habituales en todo el país, y de algunos centenares de metros en el sureste y levante peninsular. Pero basta con un descenso sostenido de entre algunos decímetros y unos pocos metros para que el agua subterránea quede fuera del alcance de las raíces de la vegetación propia de una zona concreta, lo que lleva a la desaparición progresiva de

esa vegetación y con ella de los recursos de *madera, leña y fibra vegetal* que de forma natural se producían en ese lugar. El proceso de formación de *turba* cesa también con el descenso sostenido del nivel freático, y los depósitos de turba ya formada quedan expuestos a la entrada de oxígeno atmosférico y a su desaparición por combustión espontánea (Llamas *et al.*, 2001; García Rodríguez y Llamas, 1992).

5.1.4. Materias primas de origen mineral

El abastecimiento de materias primas de origen mineral tales como *metales* (óxidos e hidróxidos de Fe y Mn) y *sales* de precipitación química (carbonato cálcico, yeso) en las zonas de descarga de aguas subterráneas ha disminuido al descender la cota de los niveles freáticos y piezométricos de muchos acuíferos. En cambio la explotación de *agua mineral* (Baeza *et al.*, 2001) ha aumentado extraordinariamente en los últimos diez años (casi un 150% entre 2000 y 2007, según <http://www.agua-mineral.net>).

5.1.5. Energías renovables

Visto en conjunto el abastecimiento de energías renovables se podría decir que tiene cierta tendencia a mejorar, sin embargo, separadamente los dos modos principales de abastecimiento han tenido una evolución opuesta.

El uso de la *energía hidráulica* del agua subterránea para mover molinos y norias ha disminuido en todo el país, aunque aún se encuentran algunos usos en Cataluña y Llano de Palma (Mallorca). Las causas son varias, pero la principal es el descenso de la cota de los niveles freáticos y piezométricos en muchos acuíferos) como consecuencia de las extracciones continuadas en el tiempo, y en segundo lugar la mayor facilidad para extraer agua a través de pozos profundos equipados con bombas eléctricas sumergidas).

El servicio de provisión de *energía geotérmica*, en cambio, es el único de los evaluados que ha experimentado una significativa mejora, con aplicaciones en la cuenca del Ebro, costa catalana, Murcia, Almería y Galicia, y previsiblemente va a ser uno de los más utilizados por el ser humano en las próximas décadas (<http://www.igme.es/internet/Geotermia/inicio.htm>).

5.1.6. Medicinas y principios activos naturales

La provisión de medicinas y principios activos naturales ha mejorado notablemente a través de dos tipos de usos: los baños en *aguas termales, minero-medicinales y lodos orgánicos*, que han experimentado un gran auge en los últimos diez-quince años, y la creciente tendencia a usar principios activos de origen natural en medicinas y cosméticos ha llevado a crear plantaciones que en muchos lugares se riegan con agua subterránea.

5.2. Servicios de regulación

5.2.1. Regulación del clima

El servicio de regulación climática se realiza de dos formas: manteniendo grandes *masas de vegetación* sobre los acuíferos de cuencas bien conservadas, donde el nivel freático -en las zonas de recarga- y los niveles piezométricos -en las zonas de descarga- están cerca de la superficie del terreno, y regulando el *ciclo del carbono*.

El primer proceso ha experimentado un serio deterioro como consecuencia del intenso manejo que se realiza de los flujos superficiales y subterráneos del ciclo hídrico en algunos sectores de la mayoría de las cuencas del país, el cual ha inducido un descenso sostenido de los niveles freáticos en ciertas zonas y la

desaparición de muchas masas de vegetación natural freatofítica que mantenían la humedad ambiente y producían sombra, regulando la temperatura del aire y generando brisa.

El segundo proceso, en cambio, está experimentado una notable mejoría y previsiblemente aún mejorará más debido a las actuaciones en marcha de *inyección de CO₂* en formaciones geológicas profundas con agua salina impulsadas por el organismo estatal Fundación Ciudad de la Energía (<http://www.ciuden.es>) de acuerdo con la Directiva Europea de almacenamiento geológico de CO₂ (Directiva 2009/31/CE). Tras la evaluación de los lugares geológicamente favorables está ya en funcionamiento la Planta de Desarrollo Tecnológico de Hontomín, en Burgos (Auqué *et al.*, 2009; Vilarasa *et al.*, 2009; De Gaspari *et al.*, 2011).

Por otro lado, la capacidad de regulación de los acuíferos se están utilizando también para almacenar otro tipo de sustancias, algunas de las cuales se disponen de forma definitiva (por ejemplo, salmueras de rechazo de plantas desalinizadoras) y otros de forma temporal (por ejemplo, gas natural). Aunque a priori no influyen en la regulación climática, es importante tenerlos en cuenta ya que se desconocen qué efectos puedan tener en el funcionamiento futuro de los ecosistemas de las aguas subterráneas.

5.2.2. Regulación hídrica

El servicio de regulación hídrica también ha empeorado de manera global. Las causas son principalmente dos: manejo de los usos del suelo, singularmente la conversión de terreno natural (agrícola o forestal) en terreno artificial, y manejo de los flujos del ciclo hídrico.

Según OSE (2010), entre 1987 y 2006 la superficie artificial en España aumentó 347.500 ha, a un ritmo de 18.300 ha/año. El 62% de esa superficie era antes terreno agrícola y aproximadamente el 25% era zona de bosques, matorrales y praderas. Además, un 27% de la superficie artificial se dedicó a construcción, es decir está asfaltada. La superficie artificial se ha concentrado espacialmente en torno a ciertas ciudades (Madrid, Barcelona, Valencia, Alicante, Las Palmas de Gran Canaria), a lo largo de la costa de Valencia, Alicante y Murcia y a lo largo de las grandes infraestructuras viarias. El resultado es que en España hay algo más de 1 Mha artificiales y que una buena proporción de la superficie del terreno en las áreas de clima semiárido del país está asfaltada, lo que supone una disminución considerable de la superficie disponible para infiltración del agua de lluvia y de escorrentía y de recarga a los acuíferos.

Por otro lado, el manejo de los flujos hídricos 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 una disminución de las descargas naturales de agua subterránea en muchos lugares, disminuyendo así la *disponibilidad* de agua para la vegetación y la biota, incluyendo el ser humano. En muchos casos la disponibilidad de agua subterránea solo es posible ya mediante extracción en pozos cada vez más profundos, lo que en muchos casos hace inaccesible el agua por motivos económicos.

La capacidad para regular la *calidad del agua* ha disminuido también debido a varias causas, entre las cuales la principal es el incremento de la carga de nutrientes, metales y otras sustancias contaminantes que reciben los acuíferos, muy por encima de la capacidad natural de degradación que poseen los organismos que viven en las zonas no saturada y saturada del terreno. Aunque el MARM no ha elaborado aún el informe sobre el estado cualitativo de las masas de agua subterránea en España, la evaluación preliminar realizada en 2005 del riesgo de no alcanzar los objetivos de buen estado para el año 2015 (MMA, 2006), así como los datos e informes anuales de la red de observación de la presencia de nitratos (MMA, 2000, 2006; MARM, 2009), permiten deducir esa pérdida de capacidad de regulación de la calidad del agua.

5.2.3. Regulación morfosedimentaria

El servicio de regulación morfosedimentaria de las aguas subterráneas tiene tendencia a empeorar, si bien algunas actuaciones recientes localizadas pueden frenar esta tendencia. El manejo de los flujos superficiales (encauzamientos, modificaciones del trazado de los cauces, almacenamiento en lugares no adecuados para la recarga) ha ocasionado una disminución de la infiltración de agua a los acuíferos desde cauces en muchas zonas; el manejo de los flujos subterráneos (extracciones) ha hecho descender los niveles freáticos y piezométricos; el manejo de la vegetación (sustitución de la vegetación natural por especies con mayor demanda hídrica, como los eucaliptos) y los cambios de uso del terreno (deforestación y urbanización, pavimentación, etc.) han causado una disminución de la capacidad de infiltración del agua de lluvia, favoreciendo la escorrentía superficial y la erosión; han rellenado y nivelado la superficie del terreno, obliterado las pequeñas depresiones en las cuales se acumulaba el agua de lluvia y escorrentía y se producía infiltración; han disminuido la cantidad de agua disponible en el terreno para la vegetación, desapareciendo ésta de las partes altas e intermedias de las cuencas y favoreciendo también la erosión del suelo, especialmente en época seca (OSE, 2010).

Las actividades del Plan Nacional de Restauración Hidrológico-Forestal y de Lucha contra la Erosión (www.marm.es) y otras similares son muy relevantes para invertir la tendencia de deterioro de la capacidad de regulación morfosedimentaria de las aguas subterráneas. No obstante, dada la multiplicidad de factores involucrados en el deterioro de este servicio, es previsible que los efectos positivos sean escasos y localizados, ya que si no se actúa también sobre el manejo de los flujos subterráneos y no se introduce la gestión del agua subterránea en los planes de ordenación del territorio, procurando reservar superficies no pavimentadas y bien vegetadas para favorecer la infiltración frente a la escorrentía y la erosión, es poco previsible que se pueda obtener cambios notables y en superficies extensas.

5.2.4. Formación y fertilización de suelos

El servicio de formación y fertilización de suelos tiene tendencia a empeorar debido a varias causas. El aumento de la erosión debido a la deforestación, los incendios y el descenso de los niveles freáticos y piezométricos (MARM, 2010; OSE, 2007, 2010) ocasiona pérdida de fertilidad. El uso intensivo del terreno agrícola ocasiona la sobrecarga de materia orgánica, metales pesados, plaguicidas, herbicidas y otros componentes difícilmente degradables, así como de partículas finas, todo lo cual se acumula en la zona no saturada y en los niveles superiores de la zona saturada disminuyendo la porosidad, la cantidad de oxígeno presente y la biodiversidad, ya que muchos organismos que necesitan moverse libremente no tienen espacio para hacerlo.

5.2.5. Regulación de las perturbaciones naturales

La capacidad para regular las perturbaciones naturales tiene tendencia a empeorar. Respecto a la *regulación de la inundaciones*, aunque el aumento de espesor de la zona no saturada del terreno en áreas de recarga como consecuencia del descenso de niveles freáticos debería favorecer la infiltración frente a la escorrentía, en realidad la deforestación y el manejo que se hace de la vegetación sustitutiva en llanuras de inundación, abanicos aluviales, etc. favorecen la escorrentía, la erosión y la ocurrencia de inundaciones en esas zonas y aguas abajo en la cuenca (OSE, 2010).

Respecto a la *regulación de los efectos de las sequías*, el descenso de los niveles freáticos y piezométricos en muchas zonas del país ha provocado una disminución de las descargas naturales concentradas (manantiales) y difusas (flujo de base a ríos y humedales, evapotranspiración) y, por tanto, del aporte de agua a la vegetación y la biota en épocas de sequía (MARM, 2009). El ser humano también se ve afectado, y para disponer de agua en esas épocas se ve obligado a perforar pozos cada vez más profundos (siempre que disponga de los recursos económicos para ello), generando un riesgo de deterioro de la calidad del agua como consecuencia de la movilización de masas de agua subterránea salinas y antiguas que hasta ese momento estaban en equilibrio.

5.3. Servicios culturales

5.3.1. Conocimiento científico

El servicio de conocimiento científico ha experimentado una notable mejoría en las últimas décadas, especialmente en las de 1990 y 2000. En buena parte se debe a la necesidad de conocer el funcionamiento de los acuíferos del país para poder poner en marcha los programas de control y gestión impulsados por la Ley de Aguas española y el Texto refundido de la misma (Ley 25/85; RD 1/2001, RD 4/2007), la Directiva Marco de Aguas de Europa (Directiva 2000/60/CE) y la Directiva para la Protección de las Aguas Subterráneas de Europa (Directiva 2006/118/CE). Por otro lado, el conocimiento científico general sobre las aguas subterráneas, los acuíferos y su papel medioambiental ha experimentado un crecimiento en todo el mundo en las últimas dos décadas y nuestro país no ha sido ajeno a este movimiento, aunque algunos aspectos, como los ecológicos, estén solamente empezando a ser estudiados ahora (Portillo *et al.*, 2008; Velasco *et al.*, 2009a, 2009b, Velasco, 2010; Martínez-Pascual *et al.*, 2010).

5.3.2. Conocimiento ecológico local

El servicio de conocimiento ecológico local ha experimentado un deterioro en las últimas décadas. Probablemente la principal causa del mismo sea la pérdida de contacto directo con la naturaleza de buena parte de la población española, y no solo por el éxodo hacia las ciudades de la mayor parte de la población rural desde la década de 1960, sino también por el cambio de vida experimentado en las propias zonas rurales, que ha evolucionado hacia una imitación de la vida en las ciudades. Esto ha supuesto la progresiva desconexión y desconocimiento de los ritmos de los procesos naturales, incluidos los vinculados a la recarga y descarga de aguas subterráneas, a la relación entre la composición química de las aguas subterráneas y el tipo de vegetación que existe en una u otra zona, etc. (González-Bernáldez, 1992; Rey Benayas, 1991; Muñoz-Reinoso, 2001).

5.3.3. Identidad cultural y sentido de pertenencia, disfrute espiritual y religioso y paisaje-servicio estético

Los servicios de generación de identidad cultural y sentido de pertenencia, disfrute espiritual y religioso y paisaje-servicio estético tienen tendencia a mejorar como consecuencia, principalmente, del crecimiento de la consciencia medioambiental y del papel que el agua subterránea juega en el mantenimiento de ecosistemas y paisajes de gran valor ecológico, estético y espiritual. No obstante, estos servicios son más percibidos por la población urbana, que es la que tiene menor más información pero menos acceso a los mismos, que por la población rural.

5.3.4. Actividades recreativas y ecoturismo

La capacidad de proporcionar oportunidades para realizar actividades recreativas y ecoturismo muestra una notable mejora. Cada vez hay un mayor uso de los manantiales y arroyos de origen subterráneo, así como de las orillas de estos lugares, para realizar actividades deportivas tales como piragüismo, descenso de barrancos, senderismo, baño, picnic, acampada, etc., especialmente en lugares de descarga permanente y en época seca.

5.3.5. Educación ambiental

El aprovechamiento de las oportunidades de los paisajes generados por las aguas subterráneas para actividades de educación ambiental también han mejorado notablemente en los últimos años como consecuencia del aumento de la consciencia medioambiental en general y del papel que el agua subterránea en particular en el mantenimiento de ecosistemas y paisajes de gran valor. A escala nacional

cabe destacar los programas del Instituto Geológico y Minero de España (http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/conoce.htm) y de la Fundación Botín (<http://www.fundacionbotin.org>); a escala autonómica y municipal hay numerosos programas de divulgación y educación ambiental relacionados con las aguas que incluyen la componente subterránea.

Tabla 12.8. Evaluación global del estado de los servicios de las aguas subterráneas en España y tendencias de evolución.

Tipo	Servicio	Ejemplos	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		↑

	Alto
	Medio-Alto
	Medio-Bajo
	Bajo

↑
↗
↔
↘
↓

Tabla 12.9. Indicadores usados para la evaluación del estado de los servicios de las aguas subterráneas en España y de las tendencias de evolución.

Tipo	Servicio	Indicadores y fuentes	
Abastecimiento	Alimentos	Agricultura	Evolución de la superficie dedicada a agricultura en la última década. Fuente: OSE (2007; 2008; 2009; 2010); MMA (2006); http://www.mapa.es
		Acuicultura	Estadísticas del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación sobre la instalaciones de acuicultura de agua dulce en España (http://www.mapa.es/eu/estadistica/pags/anuario/2009/indice.asp) Contactos personales con empresas en Isla Mayor (Sevilla) y Sant Carles de la Rápita (delta del Ebro)
		Recolección de plantas y frutos silvestres	Valoración personal con base en la experiencia propia.
	Agua de buena calidad	Agua para todo uso	Explotación de aguas subterráneas y sus usos. Fuente: MARM (2009); Custodio <i>et al.</i> 2009. Nitratos en aguas subterráneas. Fuente: Porras <i>et al.</i> , 1985; Fernández-Ruiz, 2007; MMA (2000, 2006, 2007); MARM (2009, 2010); OSE (2007; 2009, 2010). Plaguicidas y sus metabolitos en aguas subterráneas. Fuente: OSE (2007, 2010); MARM (2008; 2010); INE (2010); http://www.mapa.es . Contaminantes emergentes en aguas subterráneas. Fuente: Teijón <i>et al.</i> (2010). Acuíferos salinizados. Fuente: MMA (2000, 2005, 2006, 2007); MARM (2009, 2010); Aragués <i>et al.</i> (1996).
	Materias primas de origen biológico	Turba/madera/leña	Disminución de la superficie de bosque, matorral y pastizal como consecuencia de la conversión de terreno forestal en terreno agrícola y urbano y como consecuencia de incendios. Fuente: OSE (2010).
	Materias primas de origen mineral	Sales y carbonatos	Evolución de la producción de sales evaporíticas en salinas que se explotan mediante extracción y evaporación de agua subterránea. Fuente: Instituto de la Sal (ISAL); Estadística Minera de España (2007).
		Agua mineral	Evolución del nº de empresas y de la producción de botellas de aguas mineral en España, que ha aumentado extraordinariamente en los últimos diez años. Fuente: OSE (2010); http://www.agua-mineral.net ; Baeza <i>et al.</i> (2001); www.igme.es/internet/AguasMinerales/default.htm ; Asociación Nacional de Empresas de Aguas de Bebida Envasadas (ANEABE) (http://www.aneabe.com)
		Metales	Estadística Minera de España (2007) y valoración personal con base en la experiencia propia.
	Energías renovables	Energía hidráulica	Disminución como consecuencia del descenso generalizado de niveles freáticos y piezométricos y la disminución de flujos circulantes. Fuente: Díaz Rodríguez (1988); Conesa (1990); Martín <i>et al.</i> (1999)..
		Energía geotérmica	Aumento considerable debido al auge del uso de la temperatura del agua subterránea para climatización (media y baja entalpía). Fuente: http://www.igme.es/internet/Geotermia/inicio.htm ; Ortuño <i>et al.</i> (2006)
Regulación	Regulación climática local y regional	Mantenimiento de vegetación	Aumento significativo, singularmente los usos termales y medicinales en balnearios. Fuente: http://www.turismotermal.org .
			Deterioro debido a la disminución de la superficie de bosque y pastizal natural y a la exposición del terreno a la erosión como consecuencia del descenso de los niveles freáticos y piezométricos tanto en zonas de recarga como en zonas de descarga de amplios sectores de algunos acuíferos. Fuente: www.mapa.es , OSE (2010); Sistema de Indicadores del Agua del MARM y valoración personal con base en estudios científicos sobre el funcionamiento de acuíferos relevantes del país. Evolución de la humedad de suelo. Fuente: Sistema de Indicadores del Agua del MARM.

Tipo	Servicio	Indicadores y fuentes	
		Almacenamiento de CO ₂	Aumento significativo, previsiblemente mayor en el futuro a medio y largo plazo. Fuente: www.ciuden.es; Directiva 2009/31/CE; Auqué et., 2009; Villarrasa <i>et al.</i> , 2009; De Gaspari <i>et al.</i> , 2011.
	Regulación hídrica	Aumento de la disponibilidad	Evolución de niveles piezométricos. Fuente: www.marm.es; webs Confederaciones Hidrográficas; Comisión Europea (2005); Sistema de Indicadores del Agua del MARM. Acuíferos declarados sobreexplotados. Fuente: MMA (2000, 2006, 2009). Acuíferos salinizados. Fuente: MMA (1998; 2000, 2005, 2006, 2007); MARM (2009, 2010). Disminución de la superficie disponible para infiltración debido a la conversión de terreno agrícola y forestal en terreno artificial (347.500 ha entre 1987 y 2006), buena parte del mismo construido (pavimentado). Fuente: OSE (2010). Índice de llenado. Fuente: Pernía J y Corral M (2001) Indicadores sobre el estado cuantitativo de las aguas subterráneas. Fuente: GIWG (2004); IGME (2004); Pernía J y Lambán L.J (2007); Vrba J, Lipponen A (2007); Lambán et. al (2011) Conocimiento personal de algunos ecosistemas superficiales singulares (Daimiel, Doñana, Arenales del Duero) muy afectados por la disminución de las descargas de agua subterránea. Fuente: Muñoz-Reinoso, 2001; Manzano <i>et al.</i> (2005); Llamas (1988).
		Mejora de la calidad	Indicadores sobre el estado cualitativo de las aguas subterráneas. Fuente: GIWG (2004); IGME (2004); Lambán, J.L y Pernía J (2004); Pernía J y Lambán L.J (2007); Vrba J, Lipponen A (2007); Lambán et. al (2011). Evolución de los contenidos de nitratos en aguas subterráneas. Fuente: MMA (2000, 2006, 2007); MARM (2009, 2010); OSE (2007; 2009, 2010), Sistema de Indicadores del Agua del MARM. Evolución de los contenidos en plaguicidas, metales y contaminantes emergentes en aguas subterráneas. Fuente: a falta de datos oficiales en respuesta a la Directiva 2006/118/CE y el RD 1514/2009, valoración personal con base en estudios científicos en marcha sobre la presencia de plaguicidas, metales y contaminantes emergentes en varios acuíferos del país. Consumo de fertilizantes. Fuente: MARM (2009); datos en red del MAPA.
	Regulación morfosedimentaria		Disminución como consecuencia de: la deforestación en zonas altas de las cuencas y el descenso de niveles freáticos en zonas de recarga, lo cual favorece la erosión frente a la infiltración; la pavimentación del terreno, que disminuye la infiltración; el desvío y encauzamiento de cursos fluviales, así como la construcción de puentes y otras obras viarias, que disminuyen la superficie disponible para inundación e infiltración y aumentan la velocidad de flujo, la capacidad de erosión en cauces y la cantidad de sedimento disponible para ser transportado incluso en zonas bajas de las cuencas. Fuente: Inventario Nacional de Erosión de Suelos (2002-2012). (http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/inventarios/ines/modulos/ines.htm); valoración personal con base en estudios científicos sobre hidráulica fluvial; OSE (2010).
	Formación y fertilidad del suelo		Aumento de la erosión debido a deforestación, incendios, descenso de niveles freáticos. Fuente: MARM (2010); OSE (2007, 2010).
	Regulación de las perturbaciones naturales		Disminución como consecuencia de los cambios de uso del terreno (conversión de terreno forestal en artificial) y del manejo de los flujos hídricos (MARM, 2009; OSE, 2010).

Tipo	Servicio	Indicadores y fuentes
Culturales	Conocimiento científico	Valoración personal con base en el nº de publicaciones sobre hidrogeología en revistas internacionales; el nº de congresos, jornadas, etc. organizadas anualmente en España sobre aguas subterráneas (http://www.aih-ge.org ; http://www.aehs.es ; http://www.igme.es ; http://www.hispagua.cedex.es); el nº de comunicaciones presentadas en congresos nacionales e internacionales; el nº de proyectos de hidrogeología financiados por el Plan Español de Ciencia y Tecnología de la última década y el nº de proyectos del V, VI y VII Programa Marco de la Unión Europea en los que participan investigadores hidrogeólogos españoles; n1 de tesis doctorales leídas (DIALNET); google-scholar.
	Conocimiento ecológico local	Valoración personal con base en la experiencia propia.
	Identidad cultural y sentido de pertenencia	Consejo de Hombres Buenos. Fuente: http://www.consejodehombresbuenos.es/web/tribunales.php Tribunal de las Aguas. Fuente: http://www.tribunalde lasaguas.com/el%20tribunal3.html Valoración personal con base en la observación de la información que aparece en webs de municipios, ONGs, asociaciones vecinales, etc.
	Disfrute espiritual y religioso Conocimiento Tradicional	Lugares de culto vinculados a manantiales y arroyos de origen subterráneo (http://www.lasromerias.com) Valoración personal con base en la observación de la información que aparece en webs de municipios, ONGs, asociaciones vecinales, etc.
	Paisaje-Servicio estético	Número de visitantes a Parques Nacionales que tienen paisajes generados por la descarga de agua subterránea. Fuente: http://www.ini.es Valoración personal con base en la observación de la información que aparece en webs de municipios, ONGs, asociaciones vecinales, empresas de turismo, etc.
	Actividades recreativas	Número de balnearios de agua subterránea y usuarios. Fuente: http://hispagua.cedex.es/datos.php?c=result_busqueda&pg=0&localizacion=Balnearios%20espa%F1oles ; http://aguas.igme.es/AguasMinerales/balnearios.asp?Comu=0 Deportes de agua en ríos y arroyos alimentados por agua subterránea. Fuente: http://www.lasprovincias.es/ocio/escapadas/aventura.html Valoración personal con base en la observación de la información que aparece en webs de municipios, ONGs, empresas de turismo, etc
	Educación ambiental	Valoración personal con base en el conocimiento de la actividad de organismos tales como el MARM, la Fundación Botín (http://www.fundacionmbotin.org), el IGME (http://aguas.igme.es/igme/educacion_ambiental/conoce.htm), así como de la revisión de páginas webs de municipios, ONGs, Confederaciones Hidrográficas y empresas públicas y privadas de gestión del ciclo hídrico (www.agbar.net ; www.cyii.es)

6. Impulsores del cambio de los ecosistemas vinculados a las aguas subterráneas

Como se ha expuesto en el apartado 3, los informes de la administración española identificando presiones sobre las aguas subterráneas desde el punto de vista del riesgo de que las mismas no alcancen el buen estado cuantitativo y cualitativo para el año 2015 concluyen que las principales presiones sobre la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas en España son la explotación y la contaminación difusa, seguidos de la intrusión salina en las zonas costeras (MMA, 2007; OSE, 2007). Sin embargo, un análisis de presiones, impactos y riesgos realizado desde el punto de vista de los servicios que las aguas subterráneas proveen lleva necesariamente a ampliar la lista de factores que ocasionan, de forma directa, cambios significativos en muchos de los servicios básicos de abastecimiento y regulación de las aguas subterráneas, y de forma más indirecta también en varios servicios culturales. Esos factores son los que se han considerado aquí impulsores directos de cambios en los servicios de las aguas subterráneas.

Los principales impulsores directos de cambios en los servicios de las aguas subterráneas son la explotación intensiva, la contaminación difusa y los cambios de usos del suelo; le siguen la manipulación del ciclo hídrico, el cambio climático y los cambios en los ciclos biogeoquímicos (Tabla 12.10).

La explotación intensiva, con frecuencia, además, concentrada espacialmente, induce los siguientes efectos directos sobre las aguas subterráneas, los cuales tienen impacto directo sobre los servicios de abastecimiento y regulación principalmente:

- provoca una disminución de la magnitud de los flujos de descarga natural, modificando los hidroperiodos de muchos ecosistemas acuáticos dependientes de esas descargas. Un ejemplo paradigmático, de entre los muchos que salpican la geografía española, es el de las Tablas de Daimiel (Llamas *et al.*, 2001);
- hace descender la cota de los niveles piezométricos, alejando las raíces de la vegetación natural del agua y haciéndola desaparecer al disminuir su resiliencia a la sequía, y provocando la subsidencia del terreno como consecuencia del drenado de acuitardos, como es el caso de la ciudad de Murcia (Mulas *et al.*, 2010);
- aumenta los gradientes hidráulicos verticales descendentes, potenciando los flujos del agua hacia niveles más profundos del terreno en vez de hacia las depresiones de la superficie del terreno y favoreciendo la infiltración del agua de lluvia frente a la escorrentía superficial, lo que ocasiona la disminución de caudales de ríos y arroyos en época húmeda;
- induce la movilización de aguas subterráneas salinas que antes estaban en equilibrio dinámico, salinizando volúmenes de acuífero antes ocupados por agua dulce. A pesar de que sus efectos negativos se conocen en nuestro país desde hace más de 30 años (Custodio *et al.*, 1976), la insuficiencia de los flujos superficiales para abastecer la creciente demanda (MMA, 2006; OSE, 2007) de agua para agricultura, ciudades y complejos turísticos continúa, y la explotación de aguas subterráneas sigue aumentando a pesar del creciente número de acuíferos con problemas de cantidad y calidad (MARM, 2009).

Los principales cambios de usos del suelo que tienen efectos directos sobre las aguas subterránea e inducen impactos también directos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales, se producen sobre las zonas de recarga de los acuíferos, aunque algunos también influyen en la disminución de los flujos de aporte natural en las zonas de descarga. Las actividades con mayor impacto son:

- la deforestación, que, de forma global, favorece la escorrentía superficial frente a la infiltración y la recarga, disminuye la transpiración vegetal y la formación de nubes, disminuye la humedad ambiental y aumenta el rango de las oscilaciones térmicas locales, favorece la erosión y la pérdida de suelo edáfico y provoca el relleno de las pequeñas depresiones del terreno, obliterando pequeños cauces y humedales;
- la sustitución de vegetación natural por cultivos de regadío, que modifica la magnitud de los flujos de recarga, evapotranspiración y escorrentía superficial (con ocasión de lluvias), así como las características químicas del agua de recarga y de escorrentía superficial (ésta disuelve parte de los agroquímicos aplicados al terreno y los exporta a otras zonas, contaminando cauces, sectores de acuífero sobre los cuales no se realizan actividades contaminantes y aguas costeras). Con los métodos de riego localizado que ya se usan en buen parte del territorio agrícola español, y singularmente en el levante y sureste, la salinidad el suelo va a aumentar como consecuencia de la acumulación de nutrientes adicionados y no usados por la vegetación ni lixiviados por el agua de lluvia;
- la sustitución de la vegetación natural por otra de tipo silvestre pero con distintos requerimientos de agua y de nutrientes, lo cual suele modificar los flujos y el balance hídrico (como mínimo, localmente) y las características químicas, como consecuencia del aumento de la concentración en sales del agua de la zona no saturada y freática al aumentar la evapotranspiración;
- la pavimentación y urbanización, que disminuyen la infiltración y la recarga de acuíferos, favoreciendo también la escorrentía superficial, las inundaciones, la erosión y pérdida de suelo y la obliteración de la red de drenaje y, además, dispersa gran cantidad de contaminantes que se originan en las actividades domésticas, industriales, de locomoción, agrícolas y agropecuarias, etc., causando la contaminación de aguas superficiales y subterráneas con plaguicidas, hidrocarburos, disolventes, sustancias orgánicas de origen humano y animal, detergentes, metales pesados, sustancias farmacéuticas y cosméticas.

Adicionalmente, las pérdidas de las redes de saneamiento generan contaminación salina, por metales, detergentes, productos farmacéuticos, aceites vegetales y minerales, etc. Por otro lado, un efecto secundario poco evaluado hasta ahora es el papel de las pérdidas de las redes en la generación de riesgos geológicos tales como deslizamientos de laderas debido a la pérdida de estabilidad de taludes. Al ocurrir estos deslizamientos en áreas urbanas, suelen tener consecuencias catastróficas.

La progresiva concentración de la población española en las ciudades durante los últimos 40 años, singularmente en los entornos de Madrid y Barcelona y en la franja costera (OSE, 2010), ha causado la deforestación y pavimentación de grandes superficies para transformarlas en zonas urbanizables y dedicarlas a viviendas, zonas comerciales y polígonos industriales. Debido a la habitualmente pequeña magnitud de la velocidad del agua subterránea y del transporte de solutos, muchos de los efectos mencionados de la conversión de terreno rural en urbano se manifiestan a medio-largo plazo, por lo que aún es de esperar que en los próximos años sigan apareciendo efectos negativos del cambio de uso agrario a uso urbano.

La contaminación, singularmente la difusa, que afecta a grandes volúmenes de agua subterránea y es más difícil de atenuar con medidas de remediación, induce impactos directos sobre los servicios de abastecimiento principalmente. Los servicios más afectados son:

- la provisión de agua de buena calidad para cualquier uso, que disminuye drásticamente;
- el aporte de materias primas de origen biológico, ya que la incorporación de contaminantes a la vegetación convierte a ésta en fuente de contaminación también, lo que la hace inadecuada para muchos usos;
- la provisión de medicinas naturales y principios activos, pues las aguas pierden sus efectos beneficiosos y adquieren propiedades perjudiciales;
- adicionalmente, en muchos casos la contaminación influye sobre la regulación de la fertilidad del suelo, pues muchos contaminantes inducen un cambio de condiciones oxidantes a reductoras en partes del terreno someras y que deberían ser oxidantes, facilitando la disolución de minerales metálicos que forman parte del suelo y habitualmente no son reactivos, incorporando al agua metales y acidez y facilitando la movilidad de metales en forma de especies químicas tóxicas (Cr^{6+} , Al^{3+}) para muchos organismos.

La manipulación de los flujos del ciclo hídrico por ser humano tiene efectos directos sobre las aguas subterráneas e inducen impactos sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales de forma más o menos directa, en función del tipo de manipulación y de la ubicación de esa manipulación 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 las siguientes:

- la extracción intensiva y sostenida de aguas subterráneas, que disminuye la descarga natural (aunque a veces tarde años en observarse), modifica la red de flujo y la relación entre distintos cuerpos de agua subterránea y entre cuerpos de agua subterránea y superficial, induce cambios en las características físico-químicas y en la calidad del agua;
- la recarga artificial de acuíferos, que modifica la red de flujo de agua subterránea y también sus características físico-químicas, introduciendo en los acuíferos todos los contaminantes ya mencionados asociados a las aguas residuales y, además, induciendo nuevos procesos hidro-bio-geo-químicos en el acuífero como consecuencia de la mezcla entre el agua recargada y el agua residente;
- la modificación del trazado de la red de flujo superficial por actividades de regulación, de explotación de recursos hídricos y minerales, de ordenación del territorio, etc., que induce cambios en la distribución espacial de las zonas de la cuenca donde se produce recarga o descarga de aguas subterráneas, lo cual a su vez puede modificar las tasas de sedimentación y erosión de la cuenca y los lugares donde tienen lugar de forma preferente esos procesos (el encauzamiento de ríos y arroyos aumenta la velocidad del flujo superficial y disminuye la tasa de infiltración, además de favorecer la erosión localizada; la construcción de motas, levés y diques de contención contribuyen a aislar el agua del cauce del acuífero infrayacente; etc.);
- el almacenamiento de agua superficial en embalses y presas, que induce un aumento de la recarga local, el ascenso de los niveles piezométricos aguas abajo del embalse, la formación de nuevas zonas de descarga antes inexistentes, el aumento de la sismicidad por incremento de la presión bajo el embalse y en los poros y grietas del terreno ocupados ahora con agua, la contaminación de los acuíferos por favorecimiento de la infiltración de aguas superficiales contaminadas.

El cambio climático tiene un impacto creciente y predecible, a grandes rasgos, sobre los servicios de abastecimiento, regulación y culturales de las aguas subterráneas. Sin embargo, la resolución espacial de los modelos de simulación y la incertidumbre aún existente en los escenarios plausibles y en las series de observaciones hacen que esos cambios no sean muy confiables a escala de cuenca, y menos aún para los países del ámbito mediterráneo, donde las precipitaciones se suelen concentrar espacial y temporalmente incluso a escala horaria (MMA, 2005). En cualquier caso, el principal impacto previsible del cambio climático sobre las aguas subterráneas en nuestra latitud es el descenso de los niveles piezométricos como consecuencia de la disminución de la recarga por lluvia y del también previsible aumento de las extracciones. Esto llevaría a la disminución e incluso desaparición de muchos manantiales y descargas difusas a ríos, arroyos, humedales y costas, haciendo desaparecer esos ecosistemas y también bosques de vegetación freatófítica; también ocasionaría subsidencia e intrusión salina en muchos acuíferos (EEA, 2010). 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), originando aguas subterráneas más salinas. Adicionalmente, el cambio previsto en la regularidad e intensidad de los eventos de lluvias 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.

Los acuíferos pueden contribuir a regular la mayor torrencialidad prevista para nuestra latitud por los trabajos del Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC, 2010; MMA, 2005), pero para ello las cuencas deben estar bien conservadas y gestionadas de manera que en las zonas de recarga de los acuíferos (valles fluviales, piedemontes, interfluvios, llanuras costeras) haya espacio disponible para la inundación y la infiltración.

Los ciclos biogeoquímicos naturales son responsables de que el ser humano disponga de agua de buena calidad para los diversos usos. La modificación de estos ciclos se produce principalmente por dos causas: la incorporación a las aguas y al terreno de más sustancias de las que pueden ser degradadas, fijadas o recicladas de forma natural (como consecuencia de la actividad agrícola, urbana e industrial) y el cambio global.

Tabla 12.10. Principales impulsores de cambios en los servicios de los acuíferos.

ECOSISTEMA	Cambios de usos de suelo	Cambio climático	Explotación intensiva	Contaminación	Manipulación del ciclo hídrico	Cambio en los ciclos biogeoquímicos
Acuíferos	↑	↗	↑	↑	↑	↗

Intensidad de los impulsores directos del cambio

Bajo	
Moderado	
Alto	
Muy alto	

Tendencias actuales de los impulsores directos del cambio

Disminuye el impacto	
Continúa el impacto	
Aumenta el impacto	
Aumenta muy rápido el impacto	
Disminuye muy rápido el impacto	

7. Análisis de compromisos (*trade-offs*) y sinergias

Un análisis detallado de los compromisos y sinergias entre los distintos tipos de servicios que proporcionan las aguas subterráneas es difícil en el momento actual, ya que, como se ha dicho repetidamente, en la literatura mundial hay muy pocos trabajos (y en la literatura científica española ninguno, hasta donde conocen los autores) que analicen con detalle el papel de las aguas subterráneas desde el punto de vista de los servicios que proveen al ser humano.

Para realizar este análisis de forma rigurosa sería necesario disponer de un marco conceptual aún no existente. Por ello, y como ya se ha hecho en otros apartados, se realiza aquí un ensayo tentativo de analizar, en términos muy generales, cuáles son las principales sinergias e intercambios entre algunos de los principales servicios de las aguas subterráneas. Para realizar este análisis de sinergias e intercambios se ha optado por la siguiente aproximación, consensuada para todos los ecosistemas revisados: cuáles serían los efectos que producirían determinadas actuaciones de gestión directa de un servicio sobre otros servicios (Tabla 12.11).

Las actuaciones seleccionadas son representativas de acciones que se están llevando a cabo en varios lugares de la geografía española:

- recarga artificial de un acuífero costero con aguas residuales depuradas (en el delta del río Llobregat, Barcelona, se está realizando una de las experiencias que más oportunidades de investigación está generando);
- abastecimiento de un humedal con agua de distinto origen a la original (el caso de las Tablas de Daimiel, abastecidas con agua del trasvase Tajo-Segura desde 2009, es un magnífico ejemplo);
- eliminación de vegetación foránea con alta demanda de agua de la zona de recarga de un acuífero y su sustitución por vegetación nativa y con menos necesidades hídricas (es el caso de amplias zonas de la geografía española en las cuales durante los últimos diez-quince años se han eliminado los eucaliptos introducidos durante las décadas de 1950 y 1960).

Hasta donde los autores conocen, y con la excepción de los trabajos de recarga artificial que se realizan en el delta del río Llobregat, en ninguno de los casos reales mencionados ni en los muchos no mencionados se están realizando estudios de seguimiento que permitan evaluar la influencia de las acciones llevadas a cabo sobre los servicios de las aguas subterráneas o de otros ecosistemas vinculados a ellas.

La información contenida en la Tabla 12.11 es suficientemente explicativa y exhaustiva, por lo que no se añaden aquí más comentarios.

Tabla 12.11. Ejemplos de los efectos que sobre varios servicios de las aguas subterráneas tendrían determinadas actuaciones realizadas para potenciar un servicio concreto.

DECISIÓN	OBJETIVO	GANADOR/ES	ECOSERVICIO QUE DECECE	PERDEDORES
Recargar artificialmente un acuífero costero con aguas residuales depuradas	Mejorar la calidad del agua disponible en zonas de captación para abastecimiento, estabilizando la posición del frente salino	Usuarios (usos domésticos, industriales, agrícolas)	Regulación natural de la calidad del agua subterránea (la composición de la mezcla entre el agua inyectada y el agua salina dominará). Regulación de perturbaciones hídricas naturales (al elevar los niveles piezométricos disminuirá la capacidad natural de infiltración)	Usuarios: en algunos sectores del acuífero el agua se puede volver blanda o dura, ocasionando problemas en las conducciones. Población local: mayor riesgo de inundaciones al disminuir la capacidad de infiltración
Abastecer artificialmente, con aguas de origen no local, humedales que en estado natural dependían de las aguas subterráneas locales	Aumentar la recarga al acuífero. Mantener la funcionalidad de los humedales y sus servicios, principalmente los culturales, pero también otros	La población local (la infiltración supondrá un incremento de la cantidad de agua subterránea). Ecosistemas locales y otros ubicados aguas abajo y que dependen de las descargas de este acuífero.	Regulación natural de la cantidad y de la calidad del agua subterránea (es probable que los humedales sean foco de contaminación puntual). Quizás regulación del flujo de base de arroyos, manantiales y otros humedales dependientes del acuífero ubicados aguas abajo en la cuenca. Capacidad de regulación de la escorrentía local, pues la elevación de niveles bajo los humedales disminuirá la capacidad de infiltración del terreno	Población local: en caso de inundaciones y de pérdida de suelo fértil en tramos bajos de la cuenca por saturación del terreno al aumentar la descarga o aparecer zonas de descarga antes no existentes. Seres humanos y otros usuarios, en caso de contaminación del agua subterránea.
Eliminar vegetación foránea con alta demanda de agua de la zona de recarga de un acuífero, y sustituirla por vegetación nativa y con menos necesidades hídricas	Aumentar la recarga natural y la disponibilidad de agua almacenada	Usuarios del acuífero aguas abajo, tanto seres humanos como otros ecosistemas dependientes de las descargas naturales del acuífero	Regulación natural de la cantidad y la calidad: se verá modificada durante un tiempo que puede oscilar entre décadas y algún centenar de años, hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Regulación del clima local: al disminuir la transpiración lo hará también la humedad ambiente y la regularidad térmica del aire.	Población local, como consecuencia de las modificaciones climáticas (mayores oscilaciones térmicas y menor humedad ambiente). Otros ecosistemas valiosos vinculados o incluso dependientes de la vegetación eliminada

8. Respuestas e intervenciones de gestión

Para evitar la degradación de los servicios de las aguas subterráneas, las cuales son el ecosistema responsable de múltiples servicios de abastecimiento y de regulación y, además, dan soporte a otros ecosistemas (y sus servicios) tales como ríos, arroyos, riberas, humedales y vegetación freatofítica, es necesario en primer lugar asegurar los flujos circulantes por los acuíferos tanto en cantidad como en calidad. Esto supone evaluar los balances hídricos de los acuíferos (lo cual no siempre es fácil y suele tener una incertidumbre asociada grande) y, lo más relevante, establecer unos objetivos consensuados respecto al flujo que debe circular por esos medios para que se mantengan los servicios de abastecimiento, regulación y culturales que proporciona al ser humano, contribuyendo con ello en buena medida a su bienestar.

Para establecer esos objetivos 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, sobre todo, valorar los servicios que estos proporcionan. Considerando los servicios de abastecimiento, que son los más inmediatamente visibles, es claro que el agua subterránea tiene un valor directo: incrementa la productividad económica en zonas semiáridas del país y, como consecuencia de ello, en los últimos 30 años la superficie de cultivo en regadío ha crecido extraordinariamente. Sin embargo, aún así el valor de la contribución del agua subterránea a la productividad no se refleja en el precio de la misma. Tampoco se han incorporado al precio del agua subterránea los llamados costes externos, tales como los impactos en ecosistemas superficiales debidos al uso del agua subterránea (EASAC, 2010; Llamas y Garrido, 2007). Mucho menos, por ser un tema de consideración más reciente, se han reflejado en el precio del agua subterránea los servicios de mejora de la calidad o de aseguramiento del abastecimiento en épocas secas, los cuales siempre se han considerado un “bien gratuito de la naturaleza”. La valoración de todos los servicios, tanto los más directos como los menos evidentes, debería ser realizada en términos económicos y debería 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. Y dada la interrelación existente entre los distintos servicios de las aguas subterráneas (ver apartado 7), antes de realizar una actuación determinada también sería necesario analizar los posibles efectos de dicha actuación sobre todos los servicios del acuífero.

No obstante, la valoración de los costes de los servicios del agua subterránea no es una tarea trivial, y la parte de la ciencia que se dedica a este tema está aún en fase muy preliminar. Pero dada la creciente consciencia acerca de los servicios del agua subterránea, las instituciones europeas y nacionales deberían evaluar cuáles son los medios necesarios para asegurar el mantenimiento de esos servicios, incluyendo mecanismos de valoración económica (EASAC, 2010).

Por otro lado, es también importante comunicar claramente que, desde un 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 ambientales de una u otra actuación sobre las aguas subterráneas. Por ejemplo, según Custodio *et al.* (2009) se tiende a asegurar que la extracción de aguas subterráneas causa siempre un deterioro del servicio de abastecimiento a ecosistemas acuáticos de superficie, pero ello no siempre es cierto. Las pequeñas velocidades naturales del flujo de agua subterránea en el terreno, los grandes volúmenes de terreno y de agua almacenada involucrados en muchos acuíferos en explotación, y el hecho de que muchas formaciones sean acuíferos confinados, permiten la extracción de grandes volúmenes de agua subterránea e incluso deprimir los niveles piezométricos varias decenas o algún centenar de metros sin que ello afecte a las descargas en superficie. Al final, las actuaciones a 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 de ese acuífero (Custodio *et al.*, 2009).

Además, muchos de los mejores especialistas del país dicen que hay que ser consciente de que los alcanzar los requerimientos ecológicos de la DMA producirá impactos socioeconómicos, institucionales y políticos distintos en los países templados y húmedos del centro y norte de Europa que en los países semiáridos del sur, y que una aplicación estricta de los principios de la DMA llevaría a la desaparición de buena parte de las actividades que sostienen económicamente a casi toda la población de la franja mediterránea del país, incluyendo las islas Baleares (Llamas y Custodio, 2003; Hernández-Mora *et al.*, 2007; Molinero *et al.*, 2008; Custodio *et al.*, 2009). Por otro lado, estos autores dicen que realizar ciertas actuaciones de remediación en acuíferos del sur de Europa tales como la restauración de la calidad o la recuperación del régimen hídrico natural será una tarea muy costosa, que llevará muchos años y que incluso puede no ser viable técnicamente. Por todo ello, sostienen que el reto para las organizaciones políticas y sociales y para la comunidad científico-técnica de estos países será encontrar formas efectivas de implementar los principios de la DMA de forma compatible con las características hidroclimatológicas y socioeconómicas específicas del sur de Europa.

Sahuquillo *et al.* (2007) sostienen que para realizar una implementación correcta de la DMA será necesario realizar, por un lado, actuaciones de tipo tecnológico, por un lado, y por otro, actuaciones de gestión y de carácter legal. Entre las primeras están los estudios ya en marcha por el MARM para establecer el estado de las masas de agua subterránea del país (aún no elaborado, o al menos no publicado) y los planes de actuación dentro de cada demarcación hidrográfica. Entre las segundas están los procesos de participación pública en la elaboración de los planes hidrológicos de cuenca y en otras actividades.

Los especialistas abogan por la participación de los usuarios en la gestión de las aguas subterráneas (Llamas *et al.*, 2001; Hernández-Mora y Llamas, 2001; Garrido y Llamas, 2006; Llamas y Garrido, 2007; Rico y Olcina, 2001; Sánchez, 2003; Molinero *et al.*, 2008; Ragone *et al.*, 2007; Custodio *et al.*, 2009). Ello implica que tanto los objetivos de gestión como las actuaciones a realizar se deben establecer de forma consensuada con los usuarios. En España la gestión del agua la realiza la administración pública: el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino es responsable de proponer el Plan Hidrológico Nacional, y las Confederaciones Hidrográficas (cuencas intercomunitarias) y Agencias del Agua (cuencas intracomunitarias) son responsables de elaborar y ejecutar los planes hidrológicos de cuenca. Sin embargo, la Ley de Aguas de 1985 y sus modificaciones posteriores reconoce el derecho a los usuarios de aguas subterráneas (públicos y privados) de participar en la gestión de las mismas a través de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas (CUAS), incluso obliga a la creación de CUAS en el caso de acuíferos declarados legalmente sobreexplotados (de hecho, hay 16 acuíferos declarados oficialmente sobreexplotados pero solo 5 tienen CUAS).

Aunque con un ritmo de creación lento y desigual a lo largo de estos años, hoy existen en España una veintena de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas, agrupadas en una Asociación Nacional de CUAS que este año (2011) cumple diez años de existencia y que es muy activa en su interacción con la administración y en la difusión de esa interacción al público a través de la organización de jornadas técnicas sobre temas específicos, así como mediante la publicación en su web (www.aeuas.org) de todos los documentos presentados en las mismas. El germen de la creación de buena parte de las CUAS de nuestro país es la Comunidad de Usuarios de Aguas Subterráneas del Delta del río Llobregat (CUADLL), cuya creación data de 1975 (diez años antes de la promulgación de la Ley de Aguas). La CUADLL está integrada por industrias, compañías públicas y privadas de abastecimiento de agua y regantes, tiene su propio departamento técnico, integrado por técnicos hidrogeólogos y abogados, y colabora con la administración catalana del agua y con el Ministerio de Medio Ambiente en tareas de control piezométrico y de calidad y en experiencias piloto de recarga artificial en el valle bajo del río Llobregat y en el delta. Se trata de un ejemplo muy exitoso que muestra que la participación es posible, aunque es cierto que dicha colaboración no nació por imperativo legal sino por la iniciativa de unos usuarios muy conscientes de los servicios que el agua subterránea les proporcionaba y del deterioro de los mismos como consecuencia de la explotación intensa realizada durante más de 50 años, que condujo a la salinización de buena parte del acuífero del delta del Llobregat por intrusión marina.

Por otro lado, para una gestión progresivamente más eficaz, participativa y racional, la administración debe velar por la coherencia de los planes de gestión de las aguas subterráneas con los planes de gestión de otros ecosistemas que interaccionan con ellas. De poco servirían los estudios de caracterización y valoración de servicios, de participación ciudadana en la gestión y de priorización consensuada de actuaciones si la gestión del ciclo hídrico se hace de forma sectorial, generando intereses opuestos, como podría suceder con el Plan Nacional de Regadíos-Horizonte 2008 (MAPA; 2002) y el Plan de Choque de Modernización de Regadíos (RD 287/2006, de 10 de marzo).

Otro aspecto importante a tener en cuenta en cualquier actuación de gestión de las aguas subterráneas es la estrecha relación existente entre cantidad y calidad. Así, aunque desde el punto de vista técnico en los documentos de la administración se establezca una diferencia entre la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas (MMA, 2006; MARM, 2010), se establezcan unos indicadores de presión y de impacto sobre ambos aspectos por separado y se evalúe el estado de ambos aspectos también por separado (OSE, 2007), es imprescindible no perder de vista que una calidad insuficiente o un riesgo de deterioro de la misma debe suponer un límite a la cantidad disponible para extracción o para recarga (en actuaciones de recarga inducida o recarga artificial).

Recientemente se ha producido un avance muy significativo en nuestro país, con respecto a la situación histórica, en materia de protección de la calidad de las aguas subterráneas: en octubre del año 2009 se aprobó el RD 1514/2009, que regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Este decreto es la Transposición de la Directiva 2006/118/CE para la Protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. Además, el decreto incorpora los apartados 2.3, 2.4 y 2.5 del anexo V de la Directiva 2000/60/CE, relativos al estado químico de las aguas subterráneas. El RD 1514/2009 establece criterios y medidas específicas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas subterráneas. Aunque la relación entre calidad y cantidad no siempre queda clara en este decreto, la información que contiene es suficiente como para desarrollar normativa específica para zonas concretas que integren las limitaciones recíprocas de ambos aspectos.

Por último, se relatan algunas actividades que se pueden realizar a escala de cuenca para mejorar la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas y de los servicios que éstas proporcionan. La mayoría de ellas son pilares básicos para la gestión de las aguas subterráneas, y por tanto aparecen tanto en los manuales académicos como en los planes hidrológicos de las cuencas españolas, recién terminados en su mayoría y en fase de exposición pública. A pesar de esto, muchas de estas actuaciones básicas apenas se han desarrollado en nuestro país, y otras lo han hecho de forma irregular tanto en el espacio como en el tiempo.

- Actuaciones para mejorar la calidad de las aguas de lluvia y superficiales que recargan acuíferos:
 - Controlar mejor las emisiones gaseosas, líquidas y sólidas a la atmósfera, con el fin de disminuir la cantidad de contaminantes en el aire y depositados sobre la superficie de la vegetación, los edificios y el terreno, disponibles para ser disueltos por el agua de lluvia e incorporados a los ríos y acuíferos.
 - Controlar mejor la calidad del agua superficial y proteger las zonas de infiltración en cauces.
 - Evitar las obras y las actividades en cauces y llanuras de inundación que disminuyen la calidad del agua subterránea.
 - Reducir los volúmenes de aguas residuales vertidas a ríos.
 - Mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en lo relativo a los llamados contaminantes emergentes.

- Para disminuir la contaminación de origen doméstico, agrario e industrial:
 - Educar a la población para reducir los volúmenes de aguas residuales y de residuos sólidos.
 - Reducir la cantidad de fertilizantes, plaguicidas y otras sustancias potencialmente contaminantes.
 - No usar aguas residuales ganaderas como fertilizante ni para regar.
 - No deshacerse de residuos sólidos o líquidos inyectándolos en pozos abandonados, hoyos de extracción de áridos, o enterrándolos.
 - Asegurarse de mantener en buen estado operativo las redes de evacuación de residuos, los filtros, sistemas de depuración de aguas, etc.
- Para disminuir las extracciones:
 - Realizar un control más exhaustivo de los pozos existentes y de los caudales adjudicados y efectivamente extraídos (este sigue siendo uno de los aspectos más novedosos de la Ley de Aguas de 1985 y también uno de los mayores fracasos).
 - Reducir el consumo de agua de buena calidad para ciertos usos y aumentar la reutilización.
 - Mejorar los sistemas de riego para evitar encharcamientos y salinización por incremento de la evapotranspiración.
 - Definir las zonas de protección de los acuíferos de forma integrada en los planes de gestión de las cuencas.
 - Reducir la presión del turismo en zonas vulnerables a la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas.
 - Valorar económicamente de forma realista el agua subterránea extraída y aplicar una política de precios acorde. Introducir en la gestión del agua subterránea el concepto de “huella hídrica” (Aldaya *et al.*, 2010) sería de gran ayuda a la valoración económica.
- Para aumentar la cantidad de agua subterránea disponible:
 - Inducir la recarga natural (realizar operaciones que la fomentan) mediante escarificado de cauces, disminución de la velocidad de flujo en balsas de infiltración en la llanura de inundación de ríos; inversión controlada de la relación río-acuífero mediante bombeos estratégicamente ubicados; etc. Es necesario prestar mucha atención al posible deterioro de la calidad del agua debido a la infiltración de contaminantes y a la inducción de reacciones bio-geo-químicas que den como resultado un deterioro de la calidad natural del agua subterránea.
 - Inducir la infiltración de retornos de riego cuando éste se realiza con agua de procedencia externa al lugar del riego. También es importante prevenir deterioro de la calidad del agua subterránea.
 - Realizar recarga artificial, controlando la calidad del agua inyectada y los posibles procesos hidrogeoquímicos que se puedan producir en el acuífero y den lugar a un deterioro.

9. La conservación de los acuíferos y el bienestar humano

Las aguas subterráneas y los acuíferos proporcionan multitud de servicios básicos para el bienestar humano, si bien algunos de ellos son más evidentes que otros. Por ejemplo, los servicios más obvios e identificables por la población en general, incluso la menos educada en términos técnico-científicos, 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 incluso los de regulación hídrica, singularmente el de proporcionar agua para beber y cultivar en época seca (o en caso de cambio climático).

Pero hay otros servicios menos evidentes a simple vista, incluso para muchos responsables de la gestión, que contribuyen notablemente al bienestar humano. Un listado de los más comunes puede verse en la Tabla 12.12.

Tabla 12.12. Algunos servicios esenciales de las aguas subterráneas que contribuyen al bienestar humano.

Tipo de servicio	OBJETIVO
Abastecimiento	Agua de calidad para beber.
	Alimentos agrícolas cultivados gracias al riego con agua subterránea.
	Materias primas de origen biológico tales como madera, fibras y turba.
	Principios activos y medicinas.
Regulación	Seguridad ante sequías y ante el cambio climático de que habrá agua disponible.
	Control de inundaciones, si la cuenca está bien conservada y se mantiene la capacidad de infiltración.
	De la calidad del agua de lluvia y escorrentía en lugares de infiltración, reteniendo y degradando contaminantes en las zonas no saturada y saturada del terreno.
	Regulación de los gases de efecto invernadero, reteniendo carbono y nitrógeno en forma de especies químicas no volátiles.
Culturales	Identidad cultural y relaciones sociales: hay poblaciones que se mantienen a lo largo de los siglos en zonas beneficiadas por la existencia de manantiales, humedales, ríos generados por la descarga de aguas subterráneas,... o por la existencia de agua subterránea a poca profundidad, lo cual ofrece la oportunidad de mantener asentamientos estables.
	Posibilidades de recreación (mayores cuanto mejor conservados estén los ecosistemas vinculados a zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas: bosques de vegetación freatófita; manantiales; ríos, arroyos y humedales de origen subterráneo,...).
	Oportunidades para turismo de calidad (también mayores cuanto mejor conservados estén los ecosistemas).
	Espirituales (el valor estético también es directamente proporcional al estado de conservación de los ecosistemas).
	Oportunidades para la educación ambiental (los ecosistemas mejor conservados tienen muchas posibilidades didácticas).

En la actualidad muchos de los servicios de la Tabla 12.12 están deteriorados como consecuencia de las múltiples presiones (la mayoría antrópicas) que afectan a la cantidad y la calidad del agua subterránea en todo el mundo, y también en amplias zonas de nuestro país (OSE, 2007; MMA, 2006; MARM, 2009).

Aunque los últimos datos oficiales (MARM, 2010) indican que el consumo doméstico de agua está disminuyendo en nuestro país y que la contribución del agua desalada ha ralentizado el aumento de las extracciones de agua subterránea en los acuíferos costeros españoles, las previsiones indican que al menos durante los próximos diez años las principales presiones seguirán aumentando debido al incremento de la extracción de aguas subterráneas para abastecer a los crecientes núcleos de población urbana continental, así como del aporte de contaminantes a las zonas no saturada y saturada de los acuíferos directamente desde la lluvia (que disuelve contaminantes en la atmósfera y también la

deposición seca), los cauces (que cada vez reciben más efluentes de aguas residuales incompletamente depurados) y los productos acumulados durante décadas en los suelos agrícolas e industriales.

Como se ha dicho en el apartado 8, el RD 1514/2009 establece criterios y medidas específicas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas subterráneas y supone un avance muy significativo con respecto a la situación histórica en materia de protección de las aguas subterráneas. Sin embargo, muchos de los servicios de las aguas subterráneas vinculados al bienestar humano, y singularmente los relacionados con la calidad del agua, se deben a la existencia de ecosistemas aún poco conocidos en el componente subterráneo del ciclo hídrico, pero el RD 1514/2009 no hace relación a la ecología de las aguas subterráneas.

Según algunos de los mayores especialistas en ecología del agua subterránea (Danielopol *et al.*, 2003, 2004; 2006) estos ecosistemas son sensibles a las actividades socioeconómicas, y dado que el agua de buena calidad es un servicio valioso para el ser humano y seguirá siéndolo en el futuro, la gestión de las aguas subterráneas debería exigir el conocimiento del funcionamiento de dichos ecosistemas e integrarlo en la gestión hídrica junto con las actividades socioeconómicas, singularmente en los programas de protección de las zonas de recarga de los acuíferos. Estos autores proponen, además, utilizar el conocimiento que se adquiera sobre la biota de las aguas subterráneas como indicador rápido de la pérdida de funcionalidad de los ecosistemas de esas aguas y de su capacidad para mejorar la calidad del agua, así como para desarrollar las posibilidades de la ingeniería ecológica del subsuelo. Por último, recomiendan poner en marcha esta integración cuanto antes, dado que habitualmente los tiempos necesarios para observar el efecto de una determinada acción sobre la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas son largos.

Dado que asegurar la provisión futura de los servicios de la Tabla 12.12 por parte de las aguas subterráneas requiere identificar la biota de estas aguas, conocer su relación con las condiciones ambientales y con la actividad humana, evaluar su estado como consecuencia de las presiones sobre las aguas subterráneas e integrar los aspectos ecológicos en los programas de gestión de las aguas subterráneas, y puesto que el conocimiento de los ecosistemas de las aguas subterráneas es muy escaso en comparación con los ecosistemas de las aguas superficiales, sería necesario destinar fondos específicos para investigar la ecología de las aguas subterráneas.

Al mismo tiempo, sería necesario potenciar los programas de educación de la población en general, y de los legisladores y gestores en particular, con respecto a los múltiples servicios con los que las aguas subterráneas contribuyen al bienestar humano. Como afirman Danielopol *et al.* (2003), es importante tener en cuenta que la población educada está en mejor posición para adoptar y/o aceptar decisiones medioambientalmente sensibles en relación con la cantidad, la calidad y los ecosistemas de las aguas subterráneas, los cuales constituyen un capital natural intergeneracional.

10. Referencias bibliográficas

- Aldaya, M.M. y Llamas, M.R. 2008. Water footprint analysis for the Guadiana river basin. *Papeles de Agua Virtual* n.º 3, Fundación Marcelino Botín, Santander, ISBN 978-84-96655-26-3, 112 pp.
- Aldaya, M.M., García-Novo, F. y Llamas, M.R. 2010a. Incorporating the water footprint and environmental water requirements into policy: Reflections from the Doñana Region (Spain), *Papeles de Agua Virtual* n.º 5, Fundación Marcelino Botín, Santander.
- Aldaya, M.M., Garrido, A., Llamas, M.R., Varelo-Ortega, C., Novo, P., y Casado, R.R. 2010b Water footprint and virtual water trade in Spain, In: A. Garrido and M.R. Llamas (eds.), *Water policy in Spain*, CRC Press, Leiden, The Netherlands, pp. 49-59.
- Anderson, R.T.; Lovley, D.R. 1997. Ecology and biogeochemistry of in situ groundwater remediation. En: J. Gwynfryn Jones (ed), *Advances in microbial biology*, 15: 289-350.
- Aragüés, R.; Quilez, D. y Ramirez, D. 1996. Riego, calidad del agua y calidad del suelo: la cuenca del Ebro como caso de estudio. En: *Jornadas sobre las aguas subterráneas en las cuencas del Ebro, Júcar e Internas de Cataluña y su papel en la planificación hidrológica*. 361-367. AIH-GE. Lleida.
- Auqué, L. F.; Acero, P.; Gimeno, M. J.; Gómez, J. B.; Asta, M. P. 2009. Hydrogeochemical modeling of a thermal system and lessons learned for CO2 geological storage. *Chemical Geology*. 268, 324-336. ISSN: 0009-2541.
- Bork, J., Berkhoff, S.E., Bork, S., Hahn J.H. 2009. Using subsurface metazoan fauna to indicate groundwater-surface water interactions in the Nakdong River floodplain, South Korea, *Hydrogeology Journal*, 17 (1): 61-75.
- Boulton, A.J., Fenwick, G.D., Hancock, P.J., Harvey, M.S. 2008. Biodiversity, functional roles and ecosystem services of groundwater invertebrates. *Invertebrate Systematics*, 22: 103-116.
- Chapelle, F.H. 2000. *Ground-water microbiology and geochemistry*. 2ª edición. John Wiley and Sons, Nueva York.
- Conesa, C. 1990. *El Campo de Cartagena: clima e hidrología de un medio semiárido*. Universidad de Murcia, Ayuntamiento de Cartagena y Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena. Cuadernos, 13. 450 pp.
- Culver, D.C., Pipan, T., Schneider, K. 2009. Vicariance, dispersal and scale in the aquatic subterranean fauna of karst regions. *Freshwater Biology*, 54, 918-929.
- Custodio, E. 1989. Strict aquifer control rules versus unrestricted groundwater exploitation: comments on economic consequences. In: *Groundwater economics. Developments in water science*, Elsevier, 39: 381-395.
- Custodio, E. 1993. Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. En: *Aquifer overexploitation. Int Assoc Hydrogeol, Selected Papers* 3: 3-28.
- Custodio, E. 2000a. Groundwater-dependent wetlands. *Acta. Geológica Hungarica*, 43(2): 173-202.
- Custodio, E. 2000b. The complex concept of overexploited aquifer. *Papeles de la Fundación Emilio Botín, Madrid* 2: 1-45.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean?. *Hydrogeology Journal*, 10: 254-277.
- Custodio, E.; Cacho, F.; Peláez, M.D., García, I.L. 1976. *Problemática de la intrusión marina en los acuíferos del delta del Llobregat*. II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, Barcelona, Dic. 1976. Instituto Geofísico y Catastral, Madrid: 2069-2101.

- Custodio, E., Llamas, R.; Hernández-Mora, N.; Martínez, L., Martínez, P. 2009. Issues related to intensive groundwater use. 143-162 pp. En: Garrido, A., R. Llamas (eds.). Water Policy in Spain. CRC Press. 246.
- Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A., Notenboom, J. 2003. Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation*, 30: 104-130.
- Danielopol, D.L., Gibert, J.; Griebler, C.; Gunatilaka, A.; Hahn, H.J.; Messana, G.; Notenboom, J., Sket, B. 2004. Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. *Environ. Conserv.* 31(3):1-5.
- Danielopol D.L., Gunatilaka, A., Notenboom, J., Griebler, C., Gibert, J., Sket, B., Hahn, H.J., Messana, G., Lüders, T., Griffioen, J., Liebich, J., Albrechtsen H.J. 2006. Groundwater ecology as a necessary link to the EU Water Framework Directive. In Umweltbundesamt (Ed.) European Groundwater Conference, 2006, Proceedings, 94-99, Umweltbundesamt, Vienna.
- DAS. 2006. Directiva 2000/118/EC del Parlamento Europeo y del Consejo. Directiva de Aguas Subterráneas. Bruselas.
- De Gaspari, F.; Carrera, J.; Saaltink, M.; Silva, O. 2011. Investigation of geochemical processes during CO₂ injection using “push-pull” reactive tracer tests. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-7512.
- Deharveng, L., Stoch, F., Gubert, J., Bedos, A., Galassi, D., Zgamaister, M., Branncelj, A., Camacho, A., Fiers, F., Martin, P., Giani, N., Magniez, G., Marmonier, P. 2009. Groundwater biodiversity in Europe. *Freshwater Biology*, 54: 709-726.
- De Miguel García, A. 2007. Estimación del flujo de agua virtual entre las comunidades de Castilla-La Mancha y Murcia, MSc thesis, Universidad de Alcalá - Universidad Rey Juan Carlos.
- Díaz Rodríguez, J.M. 1988.: Molinos de agua en Gran Canaria. Ed. La Caja de Canarias, 649 pp.
- Dietzenbacher, E. y Velázquez, E. 2007. Analysing Andalusian Virtual Water Trade in an Input-Output Framework. *Regional Studies* 41(2): 185-196.
- DMA. 2000. Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Directiva Marco de Aguas Subterráneas. Bruselas.
- EASAC, 2010. Groundwater in the Southern Member States of the European Union. European Academies Science Advisory Council. EASAC policy report 12. 34 pp.
- Eamus, D., Froend, R., Loomes, R., Hose, GC., Murray, BR. 2006. A functional methodology for determining the groundwater regime needed to maintain health of groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany* 54: 97-114.
- EEA, 2010. 10 messages for 2010. Cultural landscapes and biodiversity heritage. European Environmental Agency. 16 pp.
- Evans, R., Clifton, C. 2001. Environmental water requirements to maintain groundwater dependent ecosystems. Environmental flows initiative technical report number 2. Commonwealth of Australia, Canberra.
- Eydal, H.; Jägevall, S.; Hermansson, M., Pedersen, K. 2009. Bacteriophage lytic to *Desulfovibrio aesopoeensis* isolated from deep groundwater. *The ISME Journal*, 3: 1139-1147.
- FCIHS, 2009. Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea , 768 pp. Barcelona.
- Fernández Escalante, E. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). *Ecosistemas* 14 (3): 140-147.
- Fernández-Ruiz, L. 2007. Los nitratos y las aguas subterráneas en España. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2007. (15.3) 257-265.

- Froend, R.H., Loomes, R. 2004. Approach to determine interim ecological water requirements of groundwater dependent ecosystems in Western Australia. A report to the Water and Rivers Commission. Centre for Ecosystem Management, Edith Cowan University, Perth.
- García Rodríguez, M., Llamas, M.R. 1992: Aspectos hidrogeológicos en relación con la génesis y combustión espontánea de las turbas en los “ojos” del Guadiana. Actas del III Congreso Geológico de España; 2: 285-289. Salamanca.
- García Ruiz, J.M., F. López Bermúdez. 2009. La erosión del suelo en España. Sociedad española de Geomorfología. 441 pp.
- Garrido, A., Martínez-Santos, P., Llamas, M.R. 2006. Groundwater irrigation and its implications for water policy in semiarid countries: the Spanish experience. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 340–349.
- Garrido, A., Llamas, M.R., Varela-Ortega, C., Novo, P., Rodríguez-Casado, R., Aldaya, M.M. 2010. Water Footprint and Virtual Water Trade in Spain: Policy Implications. Springer, Nueva York.
- Gibert, J. 2001. Protocols for the assessment and conservation of aquatic life in the subsurface (PASCALIS): a European project (EVK2-CT-2001-00121). <http://www.pascalis-project.com/>.
- Gibert, J., Danielopol, D.L., Stanford, J.A., eds. 1994. *Groundwater Ecology*. San Diego, USA, Academic Press.
- Gibert, J., Culver, D.C. 2009. Assessing and conserving groundwater biodiversity: an introduction. *Freshwater Biology*, 54: 639–648.
- Gibert, J., Culver, D.C., Dole-Olivier, M.J., Malard, F., Christman, M.C., Deharveng, L. 2009. Assessing and conserving groundwater biodiversity: synthesis and perspectives, *Freshwater Biology*, 54 (4): 930 – 941.
- GIWG, 2004. Development of groundwater indicators for second edition of the World Water Resources. Groundwater Indicators Working Group. UNESCO, Paris
- González Bernáldez, F. 1992. Ecological aspects of wetland/groundwater relationships in Spain. *Limnética*. Madrid. 8: 11-26.
- González-Bernáldez, F., Herrera, P.; Sastre, A.; Rey, J.M. y Vicente, R. 1987. Comparación preliminar de los ecosistemas de descarga de aguas subterráneas en las cuencas del Duero y del Tajo. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 11: 19-39.
- González-Bernáldez, F., Montes, C.; Herrera, P. y Sastre, A. 1988. Genetical typology of the Madrid aquifer wetlands. *Proc. Intern. Sympos. on the Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions*:
- González-Bernáldez, F., Rey, J.m.; Levassor, C. y Peco, B. 1989. Landscape ecology of uncultivated lowlands in central Spain. *Landscape Ecology*, 3(1): 3-18.
- González-Bernáldez, F. y Rey Benayas, J.M. 1992a. Geochemical relationships between groundwater and wetland soils and vegetation in central Spain. *Geoderma* (In press).
- González-Bernáldez, F. y Rey Benayas, J.M. y Martínez, A. 1992b. Typology of impacts produced by groundwater extraction. *Journal of Hydrology* (In press).
- Griebler, C. 2001. Microbial ecology of the subsurface. En: Griebler, C.; Danielopol, D.L.; Gibert, J.; Nachtnebel, H.P. y Notenboom, J. (eds), *Groundwater ecology: a tool for management of water resources*. Documento EUR 19877. Oficina para Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo, pp. 81-108.
- Groom, P.K., Froend, R.H., Mattiske, E.M., Koch, B. 2000. Myrtaceous shrub species respond to long-term decreasing groundwater levels on the Gnangara Groundwater Mound, northern Swan Coastal Plain. *Journal of the Royal Society of Western Australia* 83, 75–82.

- Groom, P.K., Froend, R.H., Mattiske, E.M., Gurner, R.P. 2001. Long-term changes in vigour and distribution of *Banksia* and *Melaleuca* overstorey species on the Swan Coastal Plain. *Journal of the Royal Society of Western Australia* 84, 63–69.
- Hahn H.J. 2006. The GW-Fauna-Index: a first approach to a quantitative ecological assessment of groundwater habitats. *Limnologica* 36(2): 119–137
- Hatton T, Evans R (1998) Dependence of ecosystems on groundwater and its significance to Australia. Occasional paper no. 12/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation, Canberra.
- Haveman, S.H., Pedersen, K., Routsalainen, P. 1999. Distribution and metabolic diversity of microorganisms in deep igneous rock aquifers of Finland. *Geomicrobiology Journal* 16: 277-294.
- Herman, J.S., Culver, D.C., Salzman, J. 2001. Groundwater ecosystems and the service of water purification. *Stanford Environmental Law Journal* 20, 479–495.
- Hernández-Mora, N. y Llamas, M.R. (eds.) 2001. La economía del agua subterránea y su gestión colectiva. Fundación Marcelino Botín/Mundi-Prensa. Madrid: 1–550.
- Hernández-Mora, N., Martínez Cortina, L., Llamas, M.R. y Custodio, E. 2007. Groundwater issues in southwestern EU member states: Spain country report. European Academies of Sciences Advisory Council (EASAC). Fundación Areces. Madrid.
- Herrera, P. 1987. Aspectos ecológicos de las aguas subterráneas en la facies arcósica de la cuenca de Madrid. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- Hynes, H.B.N. 1983. Groundwater and stream ecology. *Hidrobiología*, 100: 93–99.
- Humphreys, W.F. 2006. Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany* 54: 115–132.
- IPCC, 2010. IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. Meeting Report. Thomas Stocker, Qin Dahe, Gian-Kasper Plattner,
- Melinda Tignor, Pauline Midgley (eds). 127 pp.
- IGME, 2004. Indicadores sobre el estado cuantitativo y cualitativo de las aguas subterráneas. Aplicación al acuífero carbonatado de la Sierra de Estepa. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- IGME, 2009. Las aguas subterráneas un recurso natural del subsuelo. Fundación Marcelino Botín e Instituto Geológico y Minero de España, 90 pp.
- INE, 2010. Instituto Nacional de Estadística. www.ine.es.
- Jägevall, S.; Rabe, L.; Pedersen, K. 2010. Abundance and Diversity of Biofilms in Natural and Artificial Aquifers of the Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden. *Microbial Ecology*, 13 pp.
- Kennedy, C. B.; Gault, A. G.; Fortin, D., Clark, I.D.; Pedersen, K.; Scott, S.D.; Ferris, F.G. 2010. Carbon isotope fractionation by circumneutral iron-oxidizing bacteria. *Geology*, 28: 1087-1090.
- Llamas, M.R. 1982. Notas sobre peculiaridades de los sistemas hídricos de las zonas húmedas. En: *Las Zonas Húmedas de Andalucía*. Dirección General de Medio Ambiente, MOPU, Madrid: 77-85.
- Lambán, L.J, Martos, S., Rodríguez-Rodríguez, M., Rubio, J.C. 2011. Application of groundwater sustainability indicators to the carbonate aquifer of the Sierra de Becerrero (Southern Spain). *Environ Earth Sci*. DOI 10.1007/s12665-011-1016-x.
- Llamas, M.R. 1988. Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geol. Water Sci.*, 1(3): 241-25 1.
- Llamas, M.R. 1992. Wetlands: an important issue in hydrogeology. En: *Simmers et al.* (eds.), *Selected Papers on Aquifer Overexploitation*, Vol 3. Heise, Hannover, pp 69-86.

- Llamas, M.R. 2005. Los Colores del Agua, El Agua Virtual y los Conflictos Hídricos, Discurso inaugural, curso 2005-2006, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid, 30 pp.
- Llamas, M.R, Fornés, J.M., Hernández-Mora, N. y Martínez Cortina. L. 2001. Aguas subterráneas: retos y oportunidades. MundiPrensa y Fundación Marcelino Botín, Madrid.
- Llamas, M.R. y Custodio, E. 2003. Intensive use of groundwater: a new situation that demands proactive action. En: Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities (Llamas & Custodio, Eds.). Chapter 1, 13-31. Balkema Publishers. 478 pp.
- Llamas, M.R. y Garrido, A. 2007. Lessons from intensive use in Spain: economic and social benefits and conflicts. The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development, Giordano and Villholth (edits), 2007, CAB International, Wallingford, UK pp. 266-295.
- Madrid, C. y Velázquez, E. 2008. El metabolismo hídrico y los flujos de agua virtual. Una aplicación al sector hortofrutícola de Andalucía (España) Revista Iberoamericana de Economía Ecológica 8: 29-47.
- Malard, F., Plenet, S., Gibert, J. 1996a. The use of invertebrates in groundwater monitoring: a rising research field. Ground Water Monitoring and Remediation, 16: 103–116.
- Malard F., Mathieu J., Reygrobellet J.L, Lafont M. 1996b. Biomonitoring groundwater contamination. Application to a karst area in Southern France. Aquatic Science 58 (2): 159–187.
- Malard F., Plenet S., Gibert J. 2007. The use of invertebrates in ground water monitoring: A rising research field. Ground Water Monitoring and Remediation, 16: 103–113.
- 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: Groundwater quality assessment and monitoring. Philippe Quevauviller, Anne-Marie Fouillac, Johannes Grath & Rob Ward (eds). John Wiley and Sons, Ltd., pp. 273-287.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Mediavilla, C. y Montes, C. 2005. Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain). En: Groundwater intensive use. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina y X. Sánchez Vila. (eds); International Association of Hydrogeologists, Selected Papers on Hydrogeology, 7. Balkema, pp 209 - 219.
- Martín Lou, M.A.; Muscar, E.; De Temiño, C.R. 1999. Agua y medio ambiente en España. En torno al uso de información ambiental española: bancos documentales sobre el agua como recurso total. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, 9: 365-379.
- MAPA. 2002. Plan Nacional de Regadíos: horizonte 2008. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 360 pp.
- MARM. 2008. El medio ambiente y el medio rural y marino en España 2008. <http://www.mapa.es/>.
- MARM, 2009. El medio ambiente y el medio rural y marino en España 2009. <http://www.mapa.es/>.
- MARM, 2010. Perfil Ambiental de España 2009. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. <http://www.mapa.es/>.
- Martínez-Pascual, E.; Jiménez, N.; Vidal, G.; Viñas, M.; Solanas, A.M. (2010). Chemical and microbial community analysis during aerobic biostimulation assays of non-sulfonated alkylbenzene contaminated groundwater. Applied Microbiology and Biotechnology 88(4): 985-995.
- MMA, 2000. Libro blanco del agua en España. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Direc. Gen. Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Madrid, pp. 1–637.
- MMA, 2005. Resumen nacional de los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Dirección General del Agua. Secretaría General de la Biodiversidad y del Territorio, 64 pp.

- MMA, 2006. Síntesis de la información remitida por España para dar cumplimiento a los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua, en materia de aguas subterráneas: Memoria. Dirección General del Agua, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 85 pp.
- 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, 76 pp.
- Molinero, J., Custodio, E., Sahuquillo, A. y Llamas, M.R. 2008. DMA y la gestión del agua subterránea en España En: 6º Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua: Los Nuevos Planes de Gestión de Cuencas, Una Oportunidad para la Recuperación de los Ciclos del Agua. Fundación Nueva Cultura del Agua, Madrid-Zaragoza. Sesión Paralela V: 9 pp.
- Mulas, J., Aragón, R., Clemente, A.A., (eds). 2010. La subsidencia del terreno en la ciudad y area metropolitana de Murcia: modelización, seguimiento y control. Instituto Geológico y Minero de España y Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
- Muñoz-Reinoso, J.C. 2001. Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. *Journal of Hydrology*, 242(3-4): 197-209.
- Murray, B.R.; Hose, G.C.; Eamus, D.; Licari, D. 2006. Valuation of groundwater-dependent ecosystems: a functional methodology incorporating ecosystem services. *Australian Journal of Botany*, 54: 221-229.
- Murray, B.R., Zeppel, M.J.B., Hose, G.C., Eamus D. 2003. Groundwater-dependent ecosystems in Australia: it's more than just water for rivers. *Ecological Management and Restoration* 4, 110–113.
- NCC. 1999. Desktop methodology to identify groundwater dependent ecosystems. Nature Conservation Council of NSW: Sydney.
- Novo, P., Garrido, A., Llamas, M.R. y Varela-Ortega, C. 2008. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity? *Papeles de Agua Virtual* n.º 1, Fundación Marcelino Botín, Santander, ISBN 978-84-96655-24-9, 37 pp.
- Ortuño, F, Guimerá, J., Ruiz, E. 2006. Climatización de edificios utilizando agua subterránea: aplicación a un caso real. *Las aguas subterráneas en los países mediterráneos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas Subterráneas. Nº 17: 661-669. Madrid.
- Pernía, J., Lambán, L.J. 2007. Groundwater indicators in Sierra de Estepa (Seville, Spain). In: Lipponen A (ed) *Groundwater resources sustainability indicators*. IHP Groundwater series, 14. UNESCO, Paris, pp 44–51
- Pernía, J., Corral, M. 2001. Análisis del llenado de los acuíferos en función de diferentes periodos históricos de referencia. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIII: 3-12. IV Simposio de Hidrogeología (Murcia).
- OSE, 2007. Informe Agua y Sostenibilidad 2007. Observatorio de la Sostenibilidad en España, 191 pp.
- OSE, 2010. Sostenibilidad en España 2010. Observatorio de la Sostenibilidad en España, 479 pp.
- Porras, J.; Nieto, P.; Alvarez-Fernández, C.; Fernández Uría, A.; Gimeno, M.V.. 1985. Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. IGME, Madrid.
- Portillo, M.C., Reina, M., Serrano, L.; Saíz-jiménez, C.; González, J.M. 2008. Role of specific microbial communities in the bioavailability of iron in Doñana National Park . *Environmental Geochemistry and Health*, 30(2):165-170.
- Ragone, S., Hernández-Mora, N., de la Hera, A., Bergkamp, G. y McKay, J. (eds.) 2007. The global importance of groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability. National Groundwater Association Press, Ohio, USA, 382 pp.

- RD 1/2001. Texto refundido de la Ley de Aguas española.
- RD /2007. Modificación del Texto refundido de la Ley de Aguas española.
- Rey Benayas, J.M. 1989. Ecosistemas de descarga de acuíferos de la cuenca del Duero. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma. Madrid.
- Rey Benayas, J.M. 1991. Aguas Subterráneas y Ecología. Ecosistemas de descarga de Acuíferos en Los Arenales. ICONA.-CSIC. Colección Técnica ICONA.- MAPA.
- Rey Benayas, J.M., Pérez, C.; Bernáldez F.G. y Zabaleta, M. 1989. Tipología y cartografía de los humedales de las cuencas del Duero y Tajo. *Mediterranea.Sec. Biol.* 12: 5-26.
- Rey Benayas, J.M., Bernáldez, F.G.; Levasor, C. y Peco, B. 1990. Vegetation of groundwater in small drainage basins discharge sites in the Douro basin, central Spain. *J. Vegetation Science*, 1:461-466.
- Rico, A.M. y Olcina, J. 2001. La gestión colectiva de las aguas subterráneas en tierras alicantinas: algunos ejemplos. En: *La Economía del Agua Subterránea y su Gestión Colectiva* (Hernández-Mora, N. and Llamas, M.R. eds.). Mundi-Prensa/Fundación Marcelino Botín, Madrid: 475–533.
- Rodríguez Casado, R., Garrido, A., Llamas, M.R. y Varela-Ortega, C. 2008. La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual* n.º 2, Fundación Marcelino Botín, Santander, 38 pp.
- Sahuquillo, A., Custodio, E. y Llamas, M.R. 2007. La gestión de las aguas subterráneas. Fundación Nueva Cultura del Agua. Panel científico-técnico de seguimiento de las políticas del agua.
- Sánchez, A. 2003. Major challenges to future groundwater policy in Spain. *Water International*, 28(3): 321–325.
- Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10: 52–67.
- Teijon, G., Candela, L., Tamoh, K., Molina-Díaz, A., Fernández-Alba, A.R. 2010. Occurrence of emerging contaminants, priority substances (2008/105/CE) and heavy metals in treated wastewater and groundwater at Depurbaix facility (Barcelona, Spain). *Sci. Total Environ.*, 408(17): 3584-95.
- Vrba, J., Lipponen, A. 2007. Groundwater resources sustainability indicators. UNESCO, Paris.
- Velasco, S. 2010. Microbial activities in a coastal, Sandy aquifer system (Doñana Natural Protected Area, SW Spain) *Geomicrobiology Journal*, 27:409-423
- Velasco, S., Acebes, P., López-Archilla, A.C., Montes, C.; Guerrero, M.C. 2009a. Environmental factors controlling the spatio-temporal distribution of a microbial community in a coastal sandy aquifer system (Doñana, SW Spain). *Hydrogeology Journal* 17:767-780.
- Velasco, S., Acebes, P., López-Archilla, A.C, Montes, C.; Guerrero, M.C. 2009b. Spatio-temporal distribution of a microbial community in a coastal sandy aquifer system (Doñana, SW Spain). *Geobiology* 7: 66-81.
- Velázquez, E. 2006. An input–output model of water consumption: Analysing intersectoral water relationships in Andalusia. *Ecological Economics* 56(2): 226–240.
- Velázquez, E. 2007. Water trade in Andalusia. *Virtual water: An alternative way to manage water use*. *Ecological Economics* 63(1): 201-208.
- Vilarrasa, V.; Bolster, D.; Dentz, M.; Olivella, S.; Carrera, J. 2009. Effects of CO2 compressibility on CO2 storage in deep saline aquifers. *Enviado a Transport in Porous Media*
- Wilkens, H., Culver, D.C., Humphreys, W.F., eds. 2000. *Subterranean Ecosystems, Ecosystems of the World* 30. Amsterdam, the Netherlands, Elsevier.

- Wilson, J.; McNabb, J.; Balkwill, D.; y Giorse, W. 1983. Enumeration and characterization of bacteria indigenous to a shallow water-table aquifer. *Groundwater*, 21: 134-142.
- Winter, T.C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7: 28–45.