

Estado del conocimiento de las aguas subterráneas en España

J.A. López-Geta⁽¹⁾ y F. López Vera⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid
E-mail: lopez.geta@igme.es.

(2) Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Ctra. de Colmenar Viejo, km. 13. 28049 Madrid
E-mail: fernando.lopez-vera@uam.es

RESUMEN

En España la Ley de Aguas de 1985, que sustituyó a la más que centenaria de 1879, incorpora las aguas subterráneas al dominio público hidráulico; también introduce una serie de instrumentos legales dirigidos a alcanzar el buen estado de las aguas subterráneas y su sostenibilidad en el tiempo. Este uso sostenible ha de ser desarrollado a través de un enfoque integrado, que tenga en cuenta las aguas superficiales, subterráneas, las procedentes de la desalación de agua de mar y las residuales depuradas. Los recursos hídricos subterráneos en España están estimados en 20.000 hm³/año y las reservas superan los 200.000 hm³. Se explotan directamente 5500 hm³/año. Los problemas más importantes que presentan las aguas subterráneas se deben principalmente a la presencia de nitratos y de cloruros en las aguas de los acuíferos costeros. El 70% de los núcleos urbanos se abastece con aguas subterráneas y aproximadamente un millón de hectáreas de regadío. Existen más de 400 masas de aguas subterráneas, que se extienden prácticamente por todo el territorio español.

Palabras clave: calidad y contaminación, España, Ley de Aguas, recursos renovables y reservas hídricas, uso sostenible

State of the art of groundwater in Spain

ABSTRACT

In Spain, the 1985 Water Act, that will replace the more than a hundred-year-old one of 1879, added groundwater to water public domain; just like that were included some legal tools led to achieve the good state of groundwater and its sustainability at long term. This sustainability use has to be developed through an integrated approach, that should take into account surface waters, groundwaters, water coming from seawater desalination and polished waste-waters. Groundwater resources in Spain are assessed about 20 Mm³/year and groundwater storage exceeds 200,000 Mm³. 5,500 Mm³/year are exploited directly. The main problems presented by groundwater are due to the presence of nitrates, chloride in coastal aquifer's water. 70% of urban areas are supplied with groundwater and also a million of irrigated hectares. There are more than 400 groundwater bodies that extends practically by the whole Spanish territory.

Key words: groundwater storage, quality and pollution, renewable resources, Spain, sustainable use, Water Act

Introducción

Las necesidades de agua han cambiado a lo largo de la historia del hombre, acorde con las exigencias de una mejor calidad de vida por parte del hombre. Esto ha ido acompañado de un mayor aprovechamiento de este recurso, aunque esto no siempre ha venido de la mano de medidas ambientales necesarias para protegerlo, lo que se ha traducido, en un uso intensivo y en el deterioro de la calidad del agua de muchos de nuestros ríos y acuíferos.

El marco legal en materia de aguas es muy diferente al que regía hace unas décadas. Los principios que imperan en la actualidad son los de equidad, efi-

ciencia y sostenibilidad del recurso hídrico, que emanan de la Directiva Europea sobre política del agua (en adelante DMA) (Unión Europea, 2000), y que dibujan los retos que se presenta en este siglo XXI, y que se resumen en lograr una adecuada gestión sostenible, que garantice el futuro de las próximas generaciones.

En España, con la Ley de Aguas de 1985, que sustituyó a la más que centenaria de 1879, se incorporaban una serie de instrumentos legales, dirigidos a alcanzar el buen estado de las aguas, y su sostenibilidad en el tiempo. Entre estas figuras hay que destacar los Planes Hidrológicos de cuenca y el Plan Hidrológico Nacional (PHN). Con la aprobación del PHN y

su modificación posterior, se plantea una nueva política hídrica, donde los trasvases entre cuencas no se contemplan como instrumentos principales para subsanar el déficit hídrico existente, sino que las actuaciones se dirigen más a incrementar los recursos hídricos disponibles, especialmente mediante desalación de agua de mar, la reutilización de las aguas residuales urbanas, la mejora de la gestión, medidas de ahorro, o la modernización de las infraestructuras, entre otras actuaciones.

Con el PHN se volvía a repetir una vez más el error histórico de no incorporar las aguas subterráneas y los acuíferos a la planificación hidrológica y por tanto a la gestión hídrica, haciendo caso omiso de la Declaración de La Haya (año 1991), que en su preámbulo recoge que el objetivo del uso sostenible del agua ha de ser desarrollado a través de un enfoque integrado que tenga en cuenta las aguas superficiales y subterráneas, que deben ser gestionadas conjuntamente, prestando análoga atención a los aspectos de cantidad y calidad.

La integración de las aguas subterráneas en la planificación hidrológica es una tarea, en principio, sencilla, sin embargo, por razones difíciles de comprender no se ha llevado a cabo, a pesar de que como se comentaba anteriormente, el marco jurídico, propicia como mejora de la gestión hídrica, el uso integral del agua. En el momento actual no se puede seguir pensando en un aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas, sin que cada una de ellas tenga en cuenta la existencia de la otra. Esto conlleva la integración en un único sistema de explotación de recursos, de todos los elementos que intervienen en él incluidos los acuíferos. En este nuevo planteamiento, el acuífero se contempla en una misión más relevante: la de embalse de regulación, donde su gran capacidad de almacenamiento (*embalse natural*) y el lento movimiento del agua a través del mismo puede jugar un papel importante en la modulación de las aportaciones hídricas.

Marco físico, socioeconómico e institucional

Marco físico

Climatología

La Península Ibérica, dada su situación entre dos grandes masas marinas (Atlántico y Mediterráneo) y dos continentales (Europa y África), presenta un clima cuyo rasgo básico definitorio es la diversidad. La zona norte, que incluye Galicia, Cordillera Cantábrica y Pirineos, se caracteriza por un clima templado,

con una alta humedad relativa y unas temperaturas suaves, templadas en invierno y frescas en verano. En la costa mediterránea y parte de la Andalucía interior (básicamente la cuenca del Guadalquivir), el clima es templado, de veranos e inviernos suaves. En el resto de la Península, el clima predominante se caracteriza por veranos secos e inviernos fríos, rasgos que reflejan su carácter continental (MIMAM, 2000).

La distribución espacial de la temperatura media anual está estrechamente ligada a la orografía. Los mínimos inferiores a 8 °C están localizados en los sistemas montañosos de la mitad norte peninsular, mientras las zonas más cálidas, delimitadas por la isoterma de 18 °C, se localizan en el valle del Guadalquivir, la costa Sur y Sureste, así como el Levante. La precipitación media anual se encuentra también fuertemente influida por la orografía. Los valores de precipitación anual varían mucho, desde los más de 1.600 mm en extensas zonas del territorio, en las que se superan incluso los 2.000 mm, a los 300 mm de amplias áreas del Sureste peninsular y los menos de 200 mm en algunas zonas de las Islas Canarias. El valor medio, para el conjunto de España es de 684 mm/año (MIMAM, 2000).

La evapotranspiración potencial media anual en España es de 862 mm, presentando sus máximos en la mitad meridional de la península, Canarias, y el valle central del Ebro. Por otro lado, la evapotranspiración real, presenta un valor medio global de 464 mm/año, siendo bastante menor que la potencial, al no darse siempre las condiciones óptimas de humedad en el suelo (MIMAM, 2000).

Los parámetros climáticos, condicionan las características del territorio español. Así, se presentan una serie de zonas áridas que se localizan en parte de las Islas Canarias y en el área del desierto de Tabernas (Almería). Las zonas semiáridas afectan principalmente a la Depresión del Ebro, Almería, Murcia, sur de la cuenca del Júcar, cabecera del Guadiana y parte de Canarias. Las zonas subhúmedas se sitúan básicamente en la cuenca del Duero, sur de las Cuencas Internas de Cataluña, Baleares, Guadalquivir y a lo largo de las cordilleras de menor altitud. El resto del territorio, que coincide principalmente con la vertiente cantábrica, responde a zonas húmedas.

Geología: grandes dominios geológicos

En el libro *Geología de España* (Vera, 2004), se establece una división en unidades geológicas (Figura 1) del territorio español, que pueden resumirse en:

- *Macizo Ibérico*, corresponde a los extensos afloramientos de rocas del Precámbrico y especialmente del Paleozoico que ocupan la mitad occidental de la Península, al norte del valle del Guadalquivir. En él, se han establecido seis zonas con características estratigráficas, estructurales, de metamorfismo y de magmatismo diferentes: Cantábrica, Asturoccidental-Leonesa, Centroibérica, Galicia-Tras-Os-Montes, Ossa-Morena y Zona Sudportuguesa.
 - *Cordillera Pirenaica*, se designa a la gran cadena de plegamiento que bordea el norte de España,
- paralela a la frontera Francia-España y al litoral de la cordillera Cantábrica de la Península. Dentro de esta gran unidad geológica se han diferenciado los Pirineos: zona Axial y zona Surpirenaica; y la Cordillera Cantábrica: oriental y central, que coinciden aproximadamente con las unidades geográficas del mismo nombre.
- *Cordillera Bética y las Baleares*, forman parte del conjunto de cordilleras alpinas que rodean el Mediterráneo tanto por el sur de Europa como por el Norte de África y que se llama Orógeno Alpino Perimediterráneo. En la Cordillera Bética se indivi-

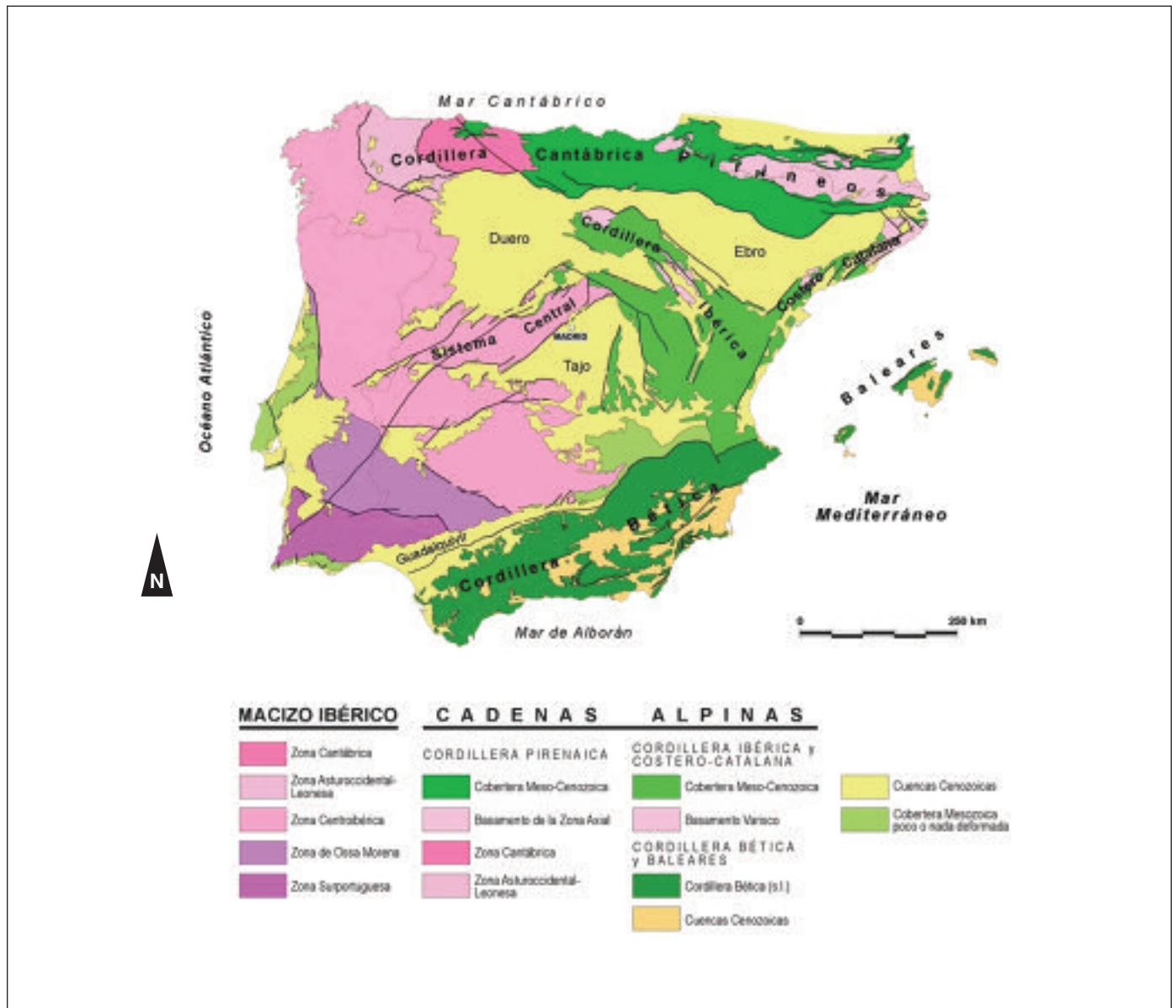


Fig. 1. Principales unidades geológicas de la Península Ibérica y Baleares (Vera, 2004)
 Fig. 1. Main hydrogeological units of Iberian Peninsula and Balearic Islands (Vera, 2004)

dualizan dos grandes unidades: Zonas Externas Béticas y zonas Internas Béticas.

- *Cordilleras Ibérica y Costero Catalana*, son dos cadenas intraplaca de la Península Ibérica con similar edad. En la primera se diferencian varias unidades de acuerdo con la edad de los materiales que afloran y el tipo de formación que los afecta: La Unidad de Cameros-Demanda la más septentrional, la Rama Aragonesa, y la Rama Castellano-Valenciana. El paso de la Cordillera Ibérica a la Cordillera Costero-Catalana se hace a través de un amplio sector, donde interfieren las estructuras ibéricas y las costero-catalanas, cuya expresión en su parte norte es un arco tectónico (Arco de Montalbán). La Cordillera Costero-Catalana separa la Cuenca del Ebro del Mediterráneo y consiste en un conjunto de sierras alineadas paralelas a la costa, en las que en su mitad norte afloran esencialmente granitos paleozoicos del basamento varisco, mientras que en la mitad sur afloran predominantemente sedimentos mesozoicos de la cobertera.
- *Conjunto de cuencas formadas durante el Cenozoico (Cuenclas Cenozoicas)*, rellenas de sedimentos que han sido poco deformados; se incluyen cuencas muy extensas: Duero y Tajo (cuencas localizadas sobre el Macizo Ibérico, separadas entre sí por el Sistema Central) y Guadalquivir y Ebro (igualmente muy extensas, hay una diferencia entre ellas ya que mientras que en la Cuenca del Guadalquivir el relleno sedimentario es casi en su totalidad marino en la Cuenca del Ebro es exclusivamente continental) y otras muchas de menor extensión ubicadas bien sobre el Macizo Ibérico o bien sobre las cadenas alpinas (cuencas postorogénicas).
- *La estructura alpina del Antepaís Ibérico*. Es muy diferente según se trate de Cadenas con cobertera (Cordillera Ibérica y Costero-Catalana), en las que la estructura se forma como consecuencia de una inversión tectónica muy neta, o de Cadenas sin cobertera (entre ellas Sistema Central Español, Montes de Toledo y Sierra Morena), en la que no tuvo lugar inversión.
- *Canarias y el vulcanismo neógeno peninsular*. En las islas Canarias afloran rocas volcánicas subaéreas de al menos los últimos 20 Ma, pero también afloran rocas plutónicas básicas y ultrabásicas. Estas rocas premiocénicas afloran exclusivamente en la isla de Fuerteventura. En todas las islas por debajo de las rocas formadas por vulcanismo subaéreo hay rocas formadas por una importante fase de crecimiento submarino, que

son anteriores al Mioceno en Fuerteventura, del Mioceno inferior-medio en La Gomera (donde afloran) y del Plioceno en La Palma (donde también afloran). En las islas más orientales (Fuerteventura y Lanzarote), se diferencian dos grandes conjuntos de coladas volcánicas subaéreas, uno esencialmente del Mioceno y el otro del Cuaternario. El límite entre ambos, más antiguo en Fuerteventura que en Lanzarote, coincide con un intervalo prolongado sin actividad volcánica en las islas de la zona central del archipiélago (Gran Canaria, Tenerife y La Gomera). Las coladas volcánicas subaéreas más antiguas oscilan entre 14,5 Ma (Gran Canaria) y 11,6 Ma (Tenerife). En las islas más occidentales (El Hierro y La Palma) las coladas volcánicas subaéreas más antiguas son la de 2 Ma (La Palma) y 1,7 Ma (El Hierro). En ambos casos la fisonomía resultante de la construcción de edificios volcánicos ha sido afectada por importantes deslizamientos recientes.

- *El vulcanismo neógeno peninsular*, se distribuye en cuatro sectores: Gerona, Campo de Calatrava (La Mancha), Sureste (Almería-Murcia) y Golfo de Valencia, de los cuales tan sólo en el de Almería-Murcia las rocas volcánicas afloran ampliamente. El vulcanismo ha ocurrido desde el Mioceno inferior hasta nuestros días, por lo que ha de englobarse en el mismo proceso geodinámico que afectó también a las cuencas y cadenas de antepaís (excepto para el SE).

Desde el punto de vista de las características hidrológicas (MIMAM, 2000) de estas unidades geológicas, hay que diferenciar, el núcleo central de la meseta, tierras llanas que con una altitud media de 600 m sobre el nivel del mar, ocupan cerca de la mitad del área peninsular, y está vertebrada en su eje por la Cordillera Central, granítica-pizarraña. La submeseta meridional, algo menos elevada que la septentrional, pierde monotonía en las discontinuas y grises alineaciones pizarro-cuarcíticas de los Montes de Toledo, cuyas modestas elevaciones distribuyen las aguas hacia los grandes colectores de la submeseta: el Tajo y el Guadiana. La construcción mesetaria hay que buscarla en la paradójica existencia de sendas depresiones del basamento básico que fueron rellenadas por centenares de metros de sedimentos procedentes de las cordilleras adyacentes; sedimentos margo-arcillosos y también yesíferos que acusan su endorreísmo, característica común a muchas cuencas sedimentarias continentales.

Las dos depresiones triangulares: Ebro y Guadalquivir. Se corresponden, con dos profundas depresiones rellenas de material terciario que ofrecen escasa

resistencia a los agentes erosivos, y dos importantes sistemas montañosos: Bética y Pirenáica, junto a las Cantábrica e Ibérica, son edificios construidos en su mayor parte por materiales calcáreos, edificios que enlazados dibujan la clásica Z invertida de la España caliza. Estas cuatro estructuras, básicamente permeables, son drenadas por abundantes y caudalosos manantiales que proporcionan un importante flujo base a los cauces colectores a los que vierten. Por el contrario, el zócalo silíceo que conforman el Sistema Central, Macizo Galaico, Sierra Morena y territorio extremeño, muy poco permeables, presentan respuestas de escorrentía muy rápida y flujos base más moderados y continuos.

Hidrografía: cuencas hidrográficas

La España peninsular queda configurada en dos vertientes, definidas por las condiciones topográficas del país. La primera, es la vertiente mediterránea, que abarca un tercio del total de la superficie, y la vertiente atlántica, cuyos dos tercios se extienden por la parte centroccidental y norte.

En la vertiente mediterránea, la cordillera Costera Catalana, la zona oriental de la Ibérica y las cordilleras Béticas, todas ellas próximas al litoral, dan lugar a cuencas relativamente pequeñas, con la excepción de las correspondientes a ríos que presentan una acción remontante muy activa. Este es el caso de los ríos Llobregat, que ha ido capturando cuencas pertenecientes originalmente al Ebro, del Júcar, cuya cabecera se localiza muy próxima al nacimiento del Tajo en los Montes Universales, o del Segura, cuyo nacimiento se adentra en el sistema Bético. El río Ebro es el de mayor cuenca, aproximadamente un 15%, el resto presentan cuencas menores, nacen en montañas próximas al mar, siguiendo la dirección perpendicular a la costa. Es el caso de los ríos Ter, Llobregat (Cataluña), Mijares, Turia o Júcar (Comunidad Valenciana) o Segura, además de todos aquellos que se desarrollan en la vertiente andaluza: Guadalfeo, Velez, Guadalhorce y Guadiaro, entre otros.

En la vertiente atlántica, los ríos presentan una mayor longitud. Los ríos Duero, Tajo y Guadiana se asientan sobre la Meseta, cerrada por las cordilleras Cantábrica e Ibérica y por Sierra Morena, y encuentran su salida hacia el mar en su parte más occidental, en la frontera con Portugal. Además el Guadalquivir sigue dicha pauta de dirección predominante, rodeando a la Meseta. La excepción a los grandes ríos se produce la vertiente cantábrica y el sur peninsular.

Los cauces insulares de Baleares y Canarias se

caracterizan por su carácter intermitente y sus fuertes pendientes. En los primeros, la presencia de abundantes zonas kársticas hace que gran parte de las aguas se infiltre antes de llegar a los cursos bajos y aparezcan posteriormente en las surgencias de manantiales. En los segundos, las fuertes pendientes de los barrancos y la histórica abundancia de captaciones subterráneas, conducen a la práctica ausencia de corrientes superficiales.

Existen numerosas áreas cerradas de carácter endorréico o semiendorréico. Suelen ser áreas de extensión reducida y constituyen depresiones en terrenos de baja permeabilidad, donde se retienen y encharcan las aguas que posteriormente se pierden por infiltración, y en su mayor parte por evaporación. Una de las zonas donde existe mayor número de complejos lagunares es la cuenca alta del Guadiana, la denominada Mancha Húmeda.

Marco socioeconómico

Población

La evolución reciente de la población española, frente al pasado más inmediato, puede caracterizarse por un importante estancamiento y falta de dinamismo con ciertos síntomas de mejora en los últimos años. Las tasas anuales de incremento de población oscilan entre el 0,2 y el 1,1% hasta el año 70, a partir del cual comienza un claro descenso que llega a producir tasas actuales virtualmente nulas, produciéndose un cambio de tendencia en los últimos años. El Censo de Población correspondiente al año 2005, arroja un resultado de 44,1 millones de habitantes en el total nacional, lo que representa una densidad media, de 87 hab/km², frente a los 113 hab/km² de la Unión Europea. Tomando como referencia el año 2000 (40,5 millones de personas) se ha producido un incremento hasta el año 2005 del 9 por ciento, lo que representa un crecimiento medio anual del 1,8.

La mayor parte de la población está concentrada en unos pocos ámbitos geográficos: el litoral mediterráneo y suratlántico (desde Francia a Portugal, incluyendo Baleares), donde ya en 1991 reside más del 20% del total español sólo en los municipios situados a menos de 5 km de la costa y más del 30% si se toma la franja de 25 km; la cornisa cantábrica (con tres centros: concentración del País Vasco y su prolongación hacia Santander, corredor norte-sur gallego y área central asturiano), donde reside casi el 8% y el 13% en ambas franjas respectivamente; la región urbana de Madrid y su área de influencia donde se asienta en torno a otro 14% de la población nacio-

nal; los valles del Ebro (hasta Zaragoza) y del Guadalquivir, y, finalmente, los territorios insulares canarios (MIMAM, 2000).

Sectores económicos

Turismo

El turismo es una actividad económica cada vez más importante en la economía española, no sólo por su aportación al producto total, sino por la sostenida evolución –tras la explosión a comienzos de los 60– registrada en las últimas décadas. El sector turístico juega un papel fundamental a equilibrar la balanza comercial, y previsiblemente seguirá jugando este papel en el futuro. Esta actividad origina, especialmente en las zonas costeras, un desplazamiento estacional y espacial de población, con el subsiguiente incremento de la demanda hídrica (MIMAM, 2000).

En 1996 se registraron unos 41,4 millones de visitantes corresponde estrictamente a turistas, es decir, visitantes que pernoctaron al menos una noche en España. Desde esa fecha el número de visitantes extranjeros ha ido aumentando, alcanzándose en el año 2005 una cifra superior a los 55 millones, un 6% más que en el año 2004.

Regadío

La distribución espacial, que puede apreciarse en la figura 2, obtenida mediante técnicas de teledetección, es el resultado de una larga y compleja serie de actuaciones de transformación, públicas y privadas, distribuidas por casi todo el territorio nacional. La superficie total de regadío es del orden de los 3 millones de hectáreas, de las cuales un millón se riegan con aguas subterráneas.

El enorme desarrollo experimentado por los regadíos desde comienzos de siglo XX, no ha tenido una clara relación con el crecimiento del trabajo agrario, más bien todo lo contrario, ya que a partir de la mitad del siglo pasado se produce una disminución muy acusada de la población dedicada a esta actividad agraria, como puede observarse en la figura 3. Las razones que explican este hecho son múltiples: transformación en regadío que procede de secanos previos, en los que ya existía empleo agrario; la intensificación y especialización, que ha dado lugar con frecuencia a menos empleo por unidad de superficie productiva y por último, la mecanización agraria y mejoras tecnológicas, que aparecen esos años y reducen sensiblemente la mano de obra en el campo. (MIMAM, 2000).



Fig. 2. Superficie de riego (MIMAM, 2000)
Fig. 2. Irrigation surface (MIMAM, 2000)

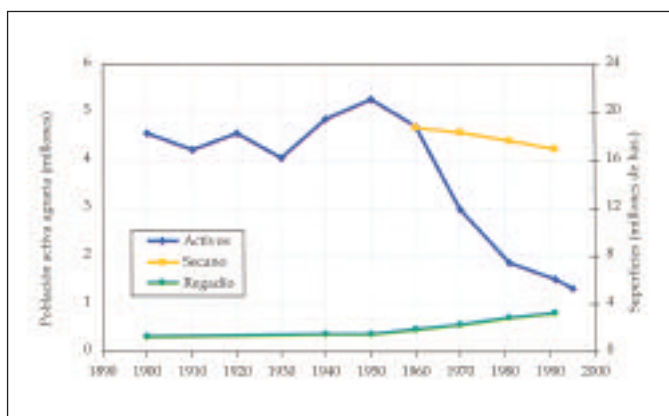


Fig. 3. Evolución de la población agraria y de las superficies de secano y regadío (MIMAM, 2000)
Fig. 3. Evolution of farmer population and irrigated and unirrigated surfaces (MIMAM, 2000)

Industria

Este sector de actividad supone una situación de concentración espacial de demandas de agua, cuyo correcto suministro –en cantidad y calidad– es de fundamental importancia para el mantenimiento de la actividad productiva. De igual modo, y según las actividades concretas que se realicen, puede suponer un importante riesgo de contaminación de las aguas en estas áreas de concentración. Es de destacar que los territorios mediterráneos y suratlánticos, afectados por limitaciones de recursos hídricos, concentran más del cuarenta por ciento de la actividad industrial española (MIMAM, 2000).

El tránsito de España hacia una sociedad urbano-industrial se produce básicamente desde el año 1959 hasta los años 70, con unas tasas de expansión muy elevadas durante apenas dos décadas. La evolución de la actividad industrial en los años más recientes se ha caracterizado por una disminución de las tasas de expansión anteriores, una creciente transnacionalización –culminada con la integración europea– y una rápida mejora tecnológica, pero sin que todo ello haya modificado sustancialmente la localización de las áreas económico-industriales dominantes del país. Las más importantes: Barcelona, Madrid, Valencia y Vizcaya (MIMAM, 2000).

Energía

Dentro del sector eléctrico, la energía hidroeléctrica ha tenido durante décadas una contribución fundamental en el balance energético español, si bien muestra un comportamiento estacionario e incluso decreciente desde mediados de los años 60 (en los que suponía un 70-80% del total), atribuible tanto a la puesta en marcha de producción nuclear como, desde el año 80, a las desfavorables condiciones hidrológicas registradas en el país.

El sector eléctrico suministra una parte importante de la energía final consumida en España, con una participación que ha ido evolucionando desde el 12,7% en 1973 hasta algo más del 18% en que se sitúa a partir de 1990, cifra que se mantiene prácticamente estable desde entonces (con datos de UNESA, en 1994 los productos petrolíferos aportaron el 68,9%; el gas, el 8,4% y el carbón, el 4,5%). Estas cifras básicas muestran, por tanto, que la hidroelectricidad aporta, dependiendo de los años, entre el 15% y el 25% de la producción eléctrica (mucho más en años de excelentes condiciones hidrológicas).

Marco institucional

Normativa básica en materia de aguas

La Constitución Española de 1978, reserva al Estado la competencia exclusiva en materia de legislación, ordenación y concesión de recursos y aprovechamientos hidráulicos cuando las aguas discurren por más de una Comunidad Autónoma, en el caso contrario las competencias corresponden a dichas comunidades.

La Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, modificada posteriormente (2001 y 2002) (Texto Refundido de la Ley de Aguas), es la legislación básica estatal

reguladora de la materia, al que hay que añadir la Ley de Aguas de Canarias de 1990, de aplicación en dicho territorio. Las disposiciones reglamentarias para el cumplimiento de la Ley de Aguas se desarrollan en los Reglamentos del Dominio Público Hidráulico y de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, respectivamente. A estas normas, hay que añadir la Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/60/CE, que es el instrumento que proporciona el marco legislativo para la futura gestión de los acuíferos. Según esas normas las aguas subterráneas forman parte del dominio público hidráulico a efectos de disposición o afección de los recursos hídricos.

Las funciones de ordenación, gestión y tutela del dominio público hidráulico corresponden a la Administración del Estado en las cuencas hidrográficas que exceden del ámbito territorial de una sola Comunidad Autónoma; en las cuencas comprendidas íntegramente en el territorio de una Comunidad Autónoma, pueden éstas reclamar para sí el ejercicio de las funciones relativas al dominio público hidráulico. En las cuencas intercomunitarias una parte importante de estas funciones –autorizaciones, concesiones, planes de cuenca, proyectos y obras– están encomendadas a los Organismos de cuenca o Confederaciones Hidrográficas.

Instituciones y organizaciones

Del conjunto de instituciones que desarrollan su actividad en el mundo del agua hay que destacar por su mayor participación en las decisiones, dos: los Organismos de cuenca, órgano administrativo básico competente en la materia, en el que se agrupan los diferentes instrumentos para la administración y gestión, y las Comunidades de Regantes, que representa a un sector importante de la economía y el que mayor uso hace del recurso hídrico (MIMAM, 2000).

A la primera de estas instituciones, le corresponde las funciones de elaboración del Plan Hidrológico de cuenca; la administración y control del dominio público hídrico; la administración y control de los aprovechamientos de interés general, entre otras competencias, todas ellas dentro del marco jurídico de las cuencas intercomunitarias. El resto de cuencas intra-comunitarias las competencias corresponden a las Comunidades Autónomas donde se sitúa la cuenca hidrográfica.

En cuanto a las Comunidades de Regantes, el papel de estas instituciones es de gran importancia, en cuanto a lo que se refiere al buen uso de las aguas. El papel no obstante asignado en cuanto a la gestión del recurso no queda especialmente favorecido por la

Ley, lo que hace pensar en la posibilidad de darles un mayor protagonismo especialmente en lo que se refiere al apoyo a la administración del agua en el control y gestión de las mismas.

Hidrogeología descriptiva

Contexto general

En el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas en España (MOPTMA-MINER,1994), se establece una descripción del territorio español, en función del grado de permeabilidad de los diferentes terrenos: rocas graníticas, metamórficas, sedimentarias, volcánicas, etc., que constituyen el puzzle que supone la península y los archipiélagos balear y canario. Una primera visión del territorio, pone de manifiesto que los acuíferos tienen una amplia aunque desigual distribución espacial, resultado de la interacción entre factores climáticos y geológicos, cuyas características se describen a continuación:

- Las rocas silíceas, que coincide a grandes rasgos con los afloramientos más antiguos –granitos, pizarras y esquistos, sobre todo–, dan lugar a formaciones de muy baja permeabilidad, aunque favorecida esta por la presencia de discontinuidades genéticas y/o estructurales. Afloran fundamentalmente en Galicia y demás territorios fronterizos con Portugal y se prolongan hacia el interior de la península por los Montes de León, el Sistema Central y un amplio corredor que se extiende desde los Montes de Toledo hasta Sierra Morena.
- Las rocas calcáreas se corresponden con los dominios de las grandes formaciones carbonatadas y pertenece en su mayor parte a terrenos de edad mesozoica y, en menor grado, a depósitos terciarios. Estas formaciones ocupan algo más de la quinta parte del territorio español. Son rocas en las que se infiltran con facilidad el agua de la lluvia y las escorrentías superficiales. Los fenómenos de disolución de los carbonatos, que pueden dar lugar a importantes redes kársticas internas y a manantiales caudalosos. En la Cordillera Cantábrica ocupan extensiones de gran entidad, con fuentes que contribuyen notablemente a los aportes de los ríos Sella, Cares, Deva, Miera, Asón y del propio Ebro en su cabecera. También están presentes en el Pirineo, en particular en las cuencas altas del Cinca, el Segre y el Ter.

Entre el Sistema Ibérico y las sierras de Cazorla y Segura se desarrolla un extenso y continuo dominio de formaciones calizas y dolomíticas en el que las aguas subterráneas determinan, en gran medida, la hidrología de las diversas cuencas. En

torno al vértice de Albarracín importantes surgencias kársticas alimentan los tramos superiores de los ríos Tajo, Jiloca, Mijares, Guadalaviar, Cabriel y Júcar; este último recoge también aportes subterráneos en La Mancha albaceteña y en las sierras del sur de Valencia.

Las sierras de Cazorla y de Segura se drenan por manantiales que mantienen los caudales del Segura, del Mundo y del Guadalquivir. Desde Cádiz hasta Alicante, las Cordilleras Béticas que afloran después en Ibiza y en Mallorca presentan muchas discontinuidades geológicas, por lo que sólo algunos macizos carbonatados alcanzan extensiones de centenares de km². Los situados en núcleos de altas precipitaciones reciben por ello mayor infiltración, que ceden a ríos de escaso desarrollo pero con caudales muy apreciados, como el Serpis, Algar, Genil, Adra, Guadalhorce, Guadalfeo, Guadiaro o Guadalete.

- Las rocas arcillosas engloban las grandes áreas de sedimentación terciaria, sobre las que se forman los amplios valles de los grandes ríos peninsulares. Corresponden mayoritariamente a extensos afloramientos de materiales predominantemente arcillosos, más o menos consolidados, de muy baja permeabilidad. Pero también contienen grandes acumulaciones de materiales detríticos, arenas y gravas fundamentalmente, con valores altos de permeabilidad y porosidad, que, por ello, resultan especialmente adecuadas para la retención y la circulación del agua subterránea. Alcanzan extensiones considerables en la depresión del Duero, en el Tajo medio y en el bajo Guadalquivir.
- Tienen asimismo interés los depósitos granulares de origen más reciente, desarrollados a lo largo de los principales ejes fluviales o en las planas costeras. En función de su estructura granular y bajo grado de cementación presentan en general condiciones excelentes para la circulación del flujo subterráneo. Los niveles más modernos suelen estar directamente conectados con la circulación superficial, lo que posibilita su utilización intensiva mediante pozos. Son acuíferos aluviales importantes los del Ebro y zonas inferiores de sus afluentes pirenaicos, las vegas del Guadiana en Badajoz, así como las del Guadalquivir, el Segura y el Llobregat. Las planas litorales de Castellón, Valencia y Gandía-Denia, así como el llano de Palma, tienen grandes espesores de este tipo de depósitos, lo que las convierte en notables almacenes del recurso hídrico.
- Por último, los acuíferos volcánicos están muy poco representados en la España peninsular, si tiene gran importancia en el archipiélago canario.

Sistemas acuíferos: unidades hidrogeológicas y masas de agua

Los estudios que se han ido realizando a lo largo de los años han ido delimitando con mayor detalle la superficie abarcada por los acuíferos y su distribución espacial. Las primeras evaluaciones se realizaron a finales de la década de los años sesenta del pasado siglo XX, en el marco del Plan Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas, PIAS, (IGME, 1979). En este Plan se procedió a identificar y a caracterizar las formaciones permeables, con el objetivo de ofrecer una visión general y sintética de la distribución espacial de los acuíferos del territorio nacional, su ubicación y las características generales de su funcionamiento. Se definieron un total de 87 sistemas acuíferos, considerándose en el archipiélago Canario, un sistema acuífero por cada una de las islas.

Posteriormente, con la aprobación de la Ley de Aguas, se introduce la figura legal de la unidad hidrogeológica, con el fin de facilitar a la administración hidráulica, la gestión y control administrativo de los acuíferos. Esta nueva sistematización del territorio ha quedado recopilada en el "*Estudio de delimitación de Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características*", realizado en 1988 por la Dirección General de Obras Hidráulicas y el Instituto Tecnológico Geominero de España (actualmente Instituto Geológico y Minero de España) (MOPU-IGME, 1989 e ITGE, 2000).

En este estudio, se definieron 442 unidades hidrogeológicas; de ellas 422 se desarrollan íntegramente dentro de los límites de los respectivos ámbitos de planificación o Cuencas Hidrográficas, 19 son compartidas por dos ámbitos administrativos diferentes y una es compartida por tres (Cuencas Hidrográficas del Ebro, Tajo y Júcar).

La superficie cubierta por los afloramientos permeables dentro de las unidades hidrogeológicas es del orden de 176.000 km², es decir un 35% aproximadamente del total de la superficie española que se reparten en 99.000 km² correspondientes a formaciones detríticas, 69.700 km² a formaciones carbonatadas y 7.800 km² a formaciones volcánicas. El resto del territorio no cubierto por estas unidades, son formaciones geológicas de baja o muy baja permeabilidad, por lo que las posibilidades de explotación de agua subterránea son reducidas y, por tanto, de interés muy local.

La profundidad a la que se sitúa el agua en los distintos acuíferos es muy variable por la diversidad de condiciones geológicas y orográficas. En los valles aluviales el agua se encuentra, en general, a pocos metros de profundidad; es de algunas decenas en el resto de los acuíferos detríticos y en las zonas bajas de los carbonatados; y llega a más de cien metros –a veces a varios centenares– en los grandes macizos carbonatados de alta permeabilidad y espesor (ITGE, 1989).

La incorporación de la DMA, a la normativa española, ha introducido el concepto de masa de agua subterránea (en adelante m.a.s.). Estas m.a.s. sustituirán en su momento a las actuales unidades hidrogeológicas. Como puede observarse en la tabla 1, hasta el momento se han definido 481 m.a.s. (aún en fase de elaboración por parte del MIMAM e IGME) que representan el 66% de la superficie considerada, lo que supone un incremento importante sobre la superficie cubierta por las unidades hidrogeológicas actualmente definidas (53%) en esos ámbitos. A esta superficie hay que añadir un 14% más ocupada por 54 m.a.s. consideradas como de baja permeabilidad, pero sobre las que se sitúan un número importante de núcleos urbanos abastecidos con aguas

Ámbito de planificación	Superficie (km ²)	Número U.H.	% sup. ámbito	Número MAS	% sup. ámbito	Número MAS B.P.	% sup. ámbito
Norte I	17.605	3	5%	6	100%	3	96%
Norte II	17.311	16	52%	20	80%	4	30%
Norte III	3.524	5	32%	14	99%	7	80%
Duero	78.865	23	70%	31	95%	11	24%
Tajo	55.767	13	40%	16	39%	-	-
Guadiana I	55.412	11	36%	16	42%	2	1%
Guadiana II	4.757	3	21%	4	22%	1	1%
Guadalquivir	63.167	68	42%	68	50%	5	2%
Sur	17.992	48	56%	67	58%	7	6%
Segura	18.987	57	84%	60	71%	0	0%
Júcar	42.869	52	94%	75	95%	1	2%
Ebro	85.564	71	47%	104	63%	13	18%
Total	461.820	370	53%	481	66%	54	14%

Tabla 1. Comparación entre unidades hidrogeológicas (U.H.) y masas de agua subterránea (MAS); (MAS B.P.) masa de agua subterránea de baja permeabilidad

Table 1. Comparison between hydrogeological units (U.H.) and groundwater bodies (MAS); (MAS B.P.) groundwater body of low permeability

subterráneas (mayor de 50 habitantes o con un suministro superior a 10 m³/día). Esto supone que en el 80% de la superficie de las cuencas intercomunitarias, se sitúan formaciones acuíferas, que almacenan agua subterránea que puede ser aprovechada.

Infraestructura del conocimiento hidrogeológico

Estado de conocimiento de los acuíferos

Es a partir de finales de los años sesenta del pasado siglo XX, cuando se produce un avance importante del conocimiento de los acuíferos españoles. Hasta esa fecha, los estudios que se habían realizado, tenían un carácter puntual y siempre referidos a aspectos muy concretos, y realizados como consecuencia de alguna normativa especial, es el caso de la Instrucción del Ministerio de Fomento de 28 de marzo de 1873, en el que se recogía que la cartografía geológica debería contener "el estudio de los manantiales de aguas potables y minerales, y la descripción de las cuencas hidrogeológicas para la perforación de pozos artesianos y el establecimiento de pantanos y represas". Posteriormente, el R.D. de 7 de enero de 1910 encomienda al Instituto Geológico de España, el reconocimiento de las diversas cuenca hidrográficas de España, la dirección y vigilancia de los trabajos de alumbramiento de agua que se emprendan por el Estado, entre otros cometidos (López-Geta, 2000).

La situación actual tiene su punto de partida en el año 1969, cuando siguiendo las recomendaciones establecidas en el "Mapa Hidrogeológico Nacional" el IGME, promueve dentro del marco general del Plan Nacional de Investigación Minera (PNIM), el Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). Este Plan que cubrió prácticamente todo el territorio español, permitió identificar y conocer las principales características de los acuíferos, la calidad de sus aguas y las posibilidades de su aprovechamiento. Los territorios no cubiertos con el mencionado Plan, se complementaron con el "Proyecto del Guadalquivir", realizado por la FAO y el Gobierno Español, y el "Estudio de los Recursos Hídricos Totales del Pirineo Oriental (REPO)". Asimismo se estudiaron los archipiélagos balear y canario.

Está planteado un nuevo programa que permitirá la actualización de la información generada en la década de los setenta y ochenta. Para ello se ha elaborado el Programa "Actualización del inventario hidrogeológico", contempado en el Libro Blanco del Agua Subterránea (MOPTMA-MINER, 1994) que contribuirá a alcanzar un estado de conocimiento acorde con las necesidades actuales.

El desarrollo de este programa se verá favorecido por la posibilidad de la aplicación de nuevas herramientas científicas y tecnológicas. Así la incorporación de las imágenes registradas por sistemas de teledetección, ha supuesto un avance de gran relevancia difícil de cuantificar aunque todavía se está en una fase de desarrollo (Fabregat, 1999), en la estimación y control de las extracciones de aguas subterráneas, a través del conocimiento de cobertura vegetal, y a conocer la evolución de las extracciones mediante las imágenes temporales. Por otro lado, los sistemas de medida y control remoto han venido a resolver algunos de los problemas relacionados con el control y así facilitar la gestión de los acuíferos, todo ello en tiempo real (Diputación de Alicante, 2001).

Los avances alcanzados por las técnicas de prospección geofísica en la exploración de las aguas subterráneas cubren un amplio espectro de aplicaciones, cada vez más rápidos, económicos y sobre todo más resolutivos (Plata, 2000 y Casas, 2000). Todos los métodos geofísicos pueden contribuir, por separado pero especialmente conjuntamente, a conocer y resolver algunas cuestiones que con más frecuencia se presentan. Estas herramientas conjuntamente con la geología y la informática, permiten la modelización del terreno en 3D y una simulación muy fiable, aunque exige inversiones económicas importantes (Pendas, 2000). En la modelación numérica del flujo y transporte de masa, así como en la geoestadística aplicada a la hidrogeología, se han realizado avances muy importantes, especialmente en medios heterogéneos, fisurados, o en la calibración automática o en el análisis de incertidumbres. Actualmente se elaboran modelos estocásticos con centenares de miles de nudos, en los que se realizan un número muy importante de simulaciones estocásticas, o simulaciones inversas para calibrar parámetros (Sahuquillo, 2002).

Planes de cartografía hidrogeológica

El organismo que ha contribuido en un mayor porcentaje en la elaboración de la cartografía hidrogeológica a nivel nacional, ha sido el Instituto Geológico y Minero de España. Es una actividad que viene realizando desde su creación en el año 1849, pero es a partir del año 1969, cuando de forma sistemática inicia una trayectoria que continúa en la actualidad. Esta nueva etapa se inicia con la publicación del Mapa Hidrogeológico Nacional, a escala 1:1.000.000, que posteriormente se ha ido revisando (1990 y 2000). Esta cartografía, se complementa con la publicación de la serie a escala 1:200.000, del cual están elabora-

das más de un tercio (93) de la cuadrícula oficial y una serie a escala 1:50.000 que se ha llevado a cabo en zonas de interés especial. A estas series, hay que añadir las realizadas a nivel de Comunidad Autónoma, como es el caso de Andalucía, Cataluña, País Vasco, etc. o bien a nivel provincial, recogidas en diferentes atlas hidrogeológicos: Burgos, Sevilla, Cádiz, Jaén, Granada, Huelva y Málaga, entre otros. Recientemente se ha elaborado por parte del IGME y el MIMAM, el mapa litológico y de permeabilidades a escala 1:200.000 de toda España. Toda esta información se recoge en el Sistema de Información de Aguas Subterráneas en España (SIAS-España).

Asociaciones científicas y profesionales en recursos hídricos

Existen varios centros oficiales con larga tradición e interés en los recursos hídricos. Uno de ellos es el Instituto Geológico y Minero de España, Organismo Público de Investigación adscrito al Ministerio de Educación y Ciencia, que ha tenido una gran actividad en la realización de estudios, preferentemente en relación con los recursos hídricos subterráneos. Otro es el CEDEX, que mediante el CEH (Centro de Estudios Hidrográficos) ha dedicado grandes esfuerzos al estudio de la hidrología de superficie, y, a través de su Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA) ha realizado también notables trabajos en el campo de la hidrología isotópica y ambiental.

Más recientemente se han creado algunos Institutos Universitarios del Agua, en diferentes Comunidades Autónomas, con o sin apoyo de otros organismos públicos y privados. En 1992 se creó el Centro de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), en Andalucía, como una asociación mixta sin ánimo de lucro, integrada por empresas y Organismos públicos. También hay que destacar algunas empresas públicas como el Canal de Isabel II y la Sociedad General de Aguas de Barcelona, con desarrollos notables en algunos aspectos de tratamiento de aguas potables, técnicas analíticas y manejo de recursos hídricos.

Es destacable el gran desarrollo de grupos de investigación universitarios durante los últimos decenios alrededor de la hidrología subterránea, en buena parte aunque no exclusivamente, en relación con departamentos de geodinámica, estando casi todos los restantes en departamentos en relación con la ingeniería civil, minera, agronómica, forestal o industrial.

A nivel de asociaciones profesionales, hay que destacar la Asociación Española de Hidrogeólogos; la

Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español y el Club del Agua Subterránea. Igualmente, diversos Colegios Profesionales, dispone de grupos de trabajo como es el caso del Grupo Especializado de Aguas Subterráneas de la Asociación Profesional de Ingenieros de Minas, entre otros.

Actividades de investigación y desarrollo de recursos hídricos

Existen diferentes iniciativas, fomentadas por diferentes disposiciones legales e implementados por diferentes instituciones. En primer lugar, están los planes de investigación, soportados por el Ministerio de Educación y Ciencia, a través de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), que ha asumido esta responsabilidad, a través del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (Plan Nacional de I+D). El Programa Nacional de Recursos Hídricos del Programa Nacional de I+D es un intento de clasificar las áreas de investigación e identificar las principales necesidades.

Existen otros planes de I+D, como es el recogido en la Ley 10/2001, del Plan Hidrológico, donde se encomienda al Ministerio de Medio Ambiente, el desarrollo de un Plan de Acción en materia de aguas subterráneas, que permita el uso sostenible de las aguas subterráneas, que incluirá un programa para la mejora del conocimiento hidrogeológico y la protección y la ordenación de los acuíferos y de las aguas subterráneas. Así mismo, el Texto Refundido de la ley de Aguas, encomienda al Instituto Geológico y Minero de España "la formulación y desarrollo de planes de investigación tendentes al mejor conocimiento y protección de las aguas subterráneas".

Actividades universitarias y formación en hidrogeología

En la universidad, hasta mediados de los años sesenta no existían cursos de especialización en materia de hidrogeología, ésta se impartía casi exclusivamente en la escuela de Ingenieros de Minas y en algunas facultades. Coincidiendo con el desarrollo de una serie de planes de investigación a nivel nacional es cuando se crean una serie de cursos de especialización en materia de Hidrogeología. En Barcelona inicia su andadura el Curso Internacional de Hidrología Subterránea, que continúa hasta la fecha; simultáneamente en Madrid se imparten dos cursos, el primero de ellos patrocinado y promovido por el

Instituto Geológico y Minero de España y la Escuela de Ingenieros Superiores de Minas, y el segundo el curso Noel Llopis, desarrollado a través de la Universidad Complutense de Madrid. Estos dos últimos cursos por diferentes circunstancias han dejado de impartirse, lo que ha originado un perjuicio en el colectivo de posgraduados y en la oferta de especialistas al mundo empresarial.

El auge de los profesionales de la hidrogeología, reinicia con el desarrollo de los Planes de Investigación comentados anteriormente. La importante inversión económica que se realiza durante esos años, dio lugar a la contratación de un número muy importante de hidrogeólogos, no sólo por parte de las empresas públicas y privadas, sino también por parte de la administración del Estado, especialmente por el Instituto Geológico y Minero de España y en menor cuantía por el desaparecido Servicio Geológico de Obras Públicas.

Con la finalización de esos planes se produce un período de recesión, sólo paliado durante unos pocos años por los trabajos del Plan de Emplazamiento de Residuos Nucleares liderado por la empresa pública ENRESA, así como, por los profesionales dedicados a la investigación y a la enseñanza en las universidades.

Tras ese período la situación actual puede catalogarse como estable, debido a la entrada de los hidrogeólogos en un mercado, donde los estudios requieren la participación de equipos multidisciplinares, como pueden ser los proyectos geotécnicos, o de impacto ambiental o los estudios de suelos contaminados, entre otros muchos. A esta circunstancia se une la expectativa de una nueva política del agua en España en la que las aguas subterráneas deben jugar un papel importante y con la que se quiere potenciar los equipos de especialistas asignados a los Organismos de Cuenca.

Consideraciones cuantitativas del recurso

Recursos renovables y reservas. Recarga natural de acuíferos

Del total de la aportación hídrica (110 km³/año), el 82% corresponde a lo que se denomina escorrentía superficial, el resto, el 18%, constituye la recarga natural anual media o escorrentía subterránea, que para el conjunto de las unidades hidrogeológicas (MOPTMA-MINER, 1994), está estimada en unos 20.000 hm³/año. Este volumen debe ser algo superior si se contabiliza la contribución de los acuíferos de pequeña entidad, no incluidos en los cálculos gene-

rales. La cifra coincide con las aportadas por otras fuentes de información, sin embargo la última estimación realizada por el Ministerio de Medio Ambiente, recogida en el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000), se eleva hasta los 30.000 hm³/año. La disparidad de cifras induce a plantear la necesidad de profundizar en el conocimiento de la recarga natural de los acuíferos, así como de la repercusión de otros parámetros en la cuantificación de las entradas al acuífero (Tabla 2).

No se dispone de estudios detallados sobre la cuantificación de las reservas hídricas subterráneas, no obstante existen diferentes fuentes en las que se ofrece una estimación de las mismas. Así, en el libro "Las aguas subterráneas en España, presente y futuro" (ANIM, 1979), se indica que el agua almacenada a profundidades de hasta 75 m supera los 300.000 hm³, por otro lado, en el libro "Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis" (ITGE, 1989), se estiman unas reservas, hasta los 200 m, de aproximadamente 120.000 hm³. En otro trabajo del MOPTMA-MINER-UPC (1993), las reservas se valoran en unos 180.000 hm³, sin incluir la cuenca de Segura ni el archipiélago canario. Hay una discrepancia importante entre las diferentes valoraciones, sin embargo en el peor de los casos las reservas o capacidad de almacenamiento de los acuíferos supera en más de dos veces la

Ambito de Planificación	1993 (a)	1998 (b)	1998 (c)
Galicia Costa	-	-	2.234
Norte I	-	-	2.745
Norte II	2.644	2.587	5.077
Norte III	331	410	894
Duero	2.975	2.997	10.950
Tajo	1.875	1.840	3.000
Guadiana I	1.646	1.565	2.393
Guadiana II	656	646	687
Guadiana	98	141	63
Guadalquivir	754	787	750
Sur	2.315	2.573	2.343
Segura	1.160	865	680
Júcar	548	674	588
Ebro	3.505	3.011	2.492
C.I. Cataluña	2.923	4.433	4.614
<i>Total Península</i>	<i>18.736</i>	<i>19.683</i>	<i>28.719</i>
Baleares	585	517	508
Canarias	700	681	681
<i>Total España</i>	<i>20.021</i>	<i>20.881</i>	<i>29.908</i>

(a) MOPT (1993). Memoria del anteproyecto de Ley del PHN. También en MOPTMA-MINER (1995).
 (b) Datos de los Planes Hidrológicos de cuenca (1998).
 (c) Datos de la evaluación realizada en el Libro Blanco del Agua en España (año 2000)

Tabla 2. Estimación de la recarga a los acuíferos (MIMAM, 2000)
 Table 2. Aquifer recharge estimation (MIMAM, 2000)

capacidad de embalses superficiales (del orden de 50.000 hm³).

Recursos superficiales y subterráneos

En España los valores de precipitación anual varían mucho, como se ha comentado anteriormente, desde los más de 1.600 mm en extensas zonas del territorio, en las que se superan puntualmente incluso los 2.000 mm, a los 300 mm de amplias áreas del Sureste peninsular y los menos de 200 mm en algunas zonas de las Islas Canarias. La media para España es de 684 mm/año, equivalentes a 346 km³/año para el total de la superficie y la evapotranspiración potencial media anual de 862 mm, lo que resulta una aportación total o lluvia útil de unos 110 km³/año, es decir, del orden de un tercio de la precipitación total, (suma de las aportaciones superficiales y subterráneas).

Del total de las aportaciones hídricas, sólo están regulados de forma natural, –caudales de base circulantes por los ríos–, unos 9.000 hm³/año, cifra que se sitúa muy por debajo de otros países de nuestro entorno, como es el caso de Francia, donde se eleva a 40.000 hm³/año. Ese volumen de agua regulado naturalmente era suficiente para satisfacer las necesidades existentes hasta finales del siglo XIX y para diluir la carga contaminante que llegaba a ellos. El incremento de las demandas, requirió que se aumentara de forma artificial la regulación que hasta el momento existía. Para ello, por un lado se han realizado más de 1000 presas con una capacidad que supera los 50.000 hm³ y por otro lado aproximadamente un millón de pozos para el aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Recursos disponibles

El grado de disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos, responde, a la suma del balance hídrico, entre entradas y salidas, del aprovechamiento planificado de las reservas y de los recursos que puedan adicionarse procedentes de mejorar la regulación hídrica al aprovechar la capacidad de almacenamiento de los acuíferos.

El aprovechar las reservas hídricas almacenadas en los acuíferos, es una operación que supone una explotación minera del agua. Es una alternativa muy debatida por los científicos y técnicos, motivada por el carácter no renovable de este recurso. En cuanto a aprovechar la capacidad de almacenamiento, su objetivo es aumentar la capacidad de regulación de una

cuenca o sistema de explotación. El papel del acuífero es similar a un embalse de superficie. Para esto hay que tener en cuenta dos características principales de los acuíferos: su *capacidad de almacenamiento*, aptitud natural que presentan los acuíferos para almacenar en su interior significativos volúmenes de agua, y su *capacidad de regulación*, aptitud que presentan los acuíferos para almacenar el agua en unas épocas y poderla extraer en otras. Teniendo en cuenta esto, los acuíferos o sistemas hidrogeológicos pueden cumplir las siguientes funciones:

- Permitir una gestión estática para regulación en tránsito. En ellos se recarga agua en el período de excedentes, para posteriormente volver a bombearla al canal de transporte en los períodos de demanda (Figura 4).
- Permitir una gestión estática con aprovechamiento. Las aguas se recargan temporalmente en el acuífero, permitiendo el uso directo en zonas próximas al almacenamiento subterráneo.
- Permitir una gestión dinámica por conducción. Se aprovecha la capacidad de regulación natural que poseen los acuíferos, en función de la combinación de las funciones de almacenamiento y conducción a través del mismo, tal manera que, el agua recargada fluye a través del acuífero hasta las zonas de demanda, donde es captada (Figura 5).

Estas alternativas permiten mejorar el grado de disponibilidad. En el libro "Las aguas subterráneas. Importancia y perspectivas" (López Geta y Murillo, 1993), se ofrece un balance hídrico que indica que del total de aportaciones hídricas subterráneas, estimadas en 20.000 hm³/a, unos 6.000 hm³/año se aprovechan a través de bombeos, esto supondría que estarían sin regular unos 14.000 hm³/año, que en principio podrían utilizarse. Sin embargo parte de estos recursos están comprometidos, bien porque estén regulados mediante embalses, o bien estén comprometidos al mantenimiento de los caudales ambientales o bien por salidas al mar. Destacando esos usos, el balance hídrico indica que pueden existir unos 10.000 hm³/año, susceptibles de utilizar. Ante esta cifra la pregunta es: ¿En qué condiciones se puede alcanzar ese límite de explotación?. En principio la respuesta es sencilla, ya que los condicionantes a tener en cuenta para llevar a cabo su explotación es que existan condiciones técnicas, económicas y ambientales adecuadas. No obstante estas posibilidades pueden quedar muy mermadas si se aplica, sin ningún condicionante, el concepto de recurso disponible establecido en la DMA, esta limitación puede extenderse a las aguas subterráneas actualmente aprovechadas.

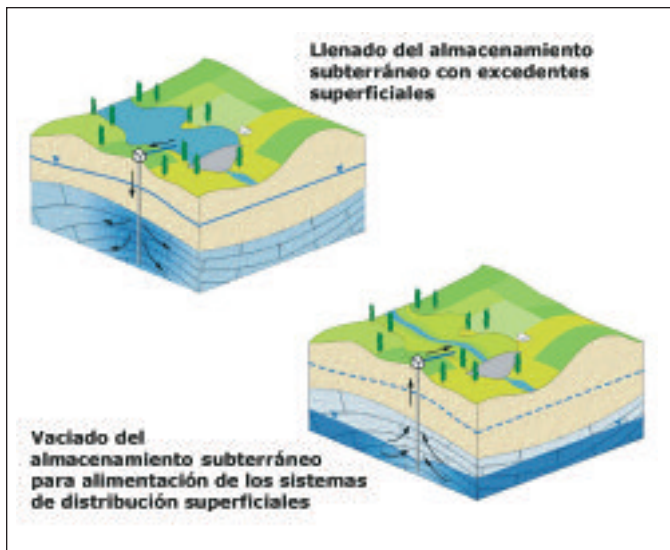


Fig. 4. Gestión estática de almacenamiento subterráneo
Fig. 4. Static management of subterranean storage



Fig. 5. Gestión dinámica de almacenamiento subterráneo
Fig. 5. Dynamic management of subterranean storage

Redes de control de las aguas subterráneas

Las medidas más antiguas de niveles piezométricos en España, de las que se tienen referencia, datan del año 1836, en el río Besos, en el que se perforarán los primeros pozos para abastecimiento la ciudad de Barcelona. Ya en la década de los sesenta del pasado siglo XX, se iniciaron controles sistemáticos en los acuíferos de la Vega de Granada (Granada) y en Almonte-Marismas (Sevilla-Huelva), así como en los deltas de los ríos Llobregat y Besós (Barcelona). El inicio fué la red que el IGME operaría, durante más de

treinta años. Posteriormente a partir de esa fecha sería operada conjuntamente con el Ministerio de Medio Ambiente. La red controlaba, la evolución de los niveles piezométricos y la calidad de agua, mediante 3.000 y 2.000 captaciones respectivamente. Este conjunto de puntos de control, se extendían por más del sesenta por ciento de las unidades hidrogeológicas. A partir del año 2002, este seguimiento se viene realizando por los Organismos de Cuenca (Confederaciones Hidrográficas); para ello se está construyendo una red especial dedicada exclusivamente a este fin (MIMAM, 1998a).

Recursos no convencionales: desalación y reutilización de las aguas residuales

Tradicionalmente se han considerado los recursos hídricos provenientes de la desalación y de la regeneración de las aguas residuales como recursos no convencionales, posiblemente por el poco aprovechamiento que se ha hecho generalmente de ellas y por lo tanto por la limitada repercusión en el cómputo total de los recursos disponibles. Esta idea se ha modificado como consecuencia de los avances tecnológicos y la necesidad de disponer de mayor cantidad de recursos hídricos.

El aprovechamiento de los recursos hídricos por métodos convencionales, ha llegado a una situación, que cualquier incremento supone una problemática especial, determinada por factores sociales, técnicos o ambientales. Por eso la importancia que puede tener el aprovechamiento de estos denominados recursos no convencionales.

La desalación de agua de mar o de aguas salobres ha experimentado un auge muy importante en estos últimos años como consecuencia del avance tecnológico que se ha producido en el desarrollo industrial de estas instalaciones especialmente en lo que se refiere a las membranas de osmosis inversa y a los sistemas de operación, con un consumo energético mucho menor. Las cifras varían rápidamente, no obstante en España existen más de 300 instalaciones de desalación de tamaños muy variables, con una capacidad que supera los 300 hm³/año.

Los avances en las tecnologías de desalación han conseguido que el coste de desalación se sitúe por debajo de los 0,60 euros, lo que permite su uso para abastecimiento urbano, y aunque con más limitaciones para otros usos como puede ser el agrícola, sin embargo los cultivos que se producen en diversas zonas con altos rendimientos productivos y económicos pueden asumir el pago de esos costes.

En el caso de la desalación habría que estudiar la posibilidad de utilizar como materia prima las aguas salobres almacenadas en ciertas estructuras geológicas subterráneas (en adelante EGS), lo que permitiría un menor coste de desalación; esto será posible en ciertos lugares y siempre que se den las condiciones técnicas adecuadas para hacer este tipo de explotación. Asimismo, y aunque viene haciéndose en algunos casos, para subsanar los problemas que han surgido en la captación de las aguas de mar a través de las EGS situadas en el litoral, habría que mejorar el grado de conocimiento de las mismas y las técnicas de captación, favoreciéndose así la disponibilidad de agua con mejor calidad, especialmente las condiciones físicas y biológicas; esto es importante porque afecta al coste final del agua desalada. Además de este papel, las EGS podrían contribuir por un lado a optimizar la capacidad de las plantas de desalación y por tanto a disminuir el coste de las mismas, ya que en las EGS pueden almacenarse las aguas sobrantes en los períodos de menor utilización y extraerse en los períodos de máxima demanda, y por otro lado contribuir a resolver uno de los problemas más importantes como es la eliminación de las aguas de desecho de la desalación, mediante la inyección de estos residuos en dichas estructuras subterráneas.

La reutilización de las aguas residuales urbanas regeneradas, constituye otra alternativa que nos permite obtener, dados los avances tecnológicos, aguas de muy buena calidad prácticamente utilizables para cualquier uso –sin embargo, existe cierto rechazo todavía por parte de la sociedad–, dependiendo del proceso empleado. El posible potencial de aguas regeneradas está en que el 80% del agua destinada al uso urbano, es decir unos 4.800 hm³/año, retornan al ciclo hidrológico pero en malas condiciones de calidad. La gran mayoría de ellos se originan en las zonas costeras, donde existe una mayor demanda de recursos hídricos, y sin embargo la gran mayoría de ellos se vierten directamente al mar a través de emisarios submarinos. También pueden utilizarse para mejorar la calidad de ciertos acuíferos o para luchar contra la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros. La entrada en funcionamiento de diversos proyectos, han puesto en evidencia el coste que supone, que permiten competir con otros sistemas. Un ejemplo ilustrativo, corresponde al proyecto de gestión integrada del agua de Victoria-Gasteiz (Mujeriego, 2005), donde se puso en evidencia que el coste de producción de regeneración reutilización del agua se sitúa en el orden de los 0,06 euros/m³.

Calidad de las aguas subterráneas

Composición natural de las aguas subterráneas

En el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MOPT-MA-MINER, 1994), se hace una descripción general de la calidad y composición natural de las aguas subterráneas. En este documento se pone en evidencia, que la complejidad y variedad litológica y geología de España condiciona la gran diversidad de situaciones detectadas en las características de sus aguas subterráneas, que a su vez son modificadas por las acciones antrópicas y pueden llegar a producir la contaminación del recurso. En términos generales, las características físicas de las aguas subterráneas (color, turbiedad, temperatura, sólidos en suspensión, etc.), excepto en ciertas ocasiones, no plantean problemas, debido al filtrado natural del terreno y a la regularidad térmica del subsuelo; no ocurre lo mismo con los constituyentes químicos, que pueden encontrarse en cantidades excesivas para un determinado uso.

Las aguas de mejor calidad y en general aptas para todos los usos son las de facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, provenientes de las formaciones carbonatadas. Esta agua suelen presentar mineralizaciones ligeras o medias, con residuos secos no superiores a 1.000 mg/L y con contenidos en macroconstituyentes generalmente dentro de las limitaciones de potabilidad establecidos, excepto en casos puntuales. Este tipo de aguas predominan en la cuenca Norte y en unidades de cabecera y del área septentrional del Duero, así como en los bordes de la Sierra de Guadarrama, en el Tajo. Igualmente se encuentran presentes en la cuenca alta del Guadiana, algunas unidades del Guadalquivir y del Sur y en las unidades interiores del Júcar, Ebro y Cuencas Internas de Cataluña.

En las unidades detríticas la variación es la característica principal, con facies desde bicarbonatadas cálcicas y magnésicas –como es el caso de las grandes cuencas detríticas del Duero y el Tajo, de las planas litorales levantinas y de los aluviales del Guadiana y el Guadalquivir– a sulfatadas o cloruradas cálcicas y sódicas, bajo la influencia de materiales evaporíticos (terciario detrítico del Duero, Llanura Manchega del Guadiana, Sierras de Orce, Jabalcón, Ronda y Lújar, vegas de los ríos Segura y Guadalentín y Campo de Cartagena). En general la dureza y mineralización de las aguas de las formaciones detríticas es superior a la de los macizos carbonatados y especialmente elevadas en las aguas procedentes o influidas por depósitos salinos. Debido al desarrollo de las actividades humanas en estas zonas son también

más frecuentes los problemas de contaminación. En este tipo de unidades las aguas suelen ser de buena calidad y aptas para todos los usos, no obstante, debido a la propia naturaleza de los acuíferos, aparecen ocasionalmente contenidos en especies mayoritarias (calcio, magnesio y sodio, fundamentalmente) superiores a los máximos admitidos para su uso en abastecimiento.

Contaminación de las aguas subterráneas

Los problemas de calidad más habituales en las aguas subterráneas son los derivados de la presencia de concentraciones elevadas de compuestos nitrogenados, de cloruros y sodio. El primer caso es propio de las áreas de desarrollo agrícola intensivo y el segundo de los acuíferos costeros con intrusión marina producida por la sobreexplotación de los recursos.

Contaminación por actividades agropecuarias

Las actividades agropecuarias constituyen un factor de alteración de la calidad natural del agua subterránea en cuanto modifican las características del medio y adicionan sustancias ajenas al mismo. El origen puede estar en los fertilizantes, plaguicidas o en los residuos ganaderos.

El contenido en nitratos de las aguas subterráneas ha aumentado de forma paulatina en amplias zonas de agricultura intensiva, donde las concentraciones del ion nitrato exceden en ciertos lugares, sistemáticamente los 50 mg/L, límite que se establece en el Real Decreto 140/2003, sobre calidad del agua de consumo humano. La contaminación por nitratos afecta de forma importante al litoral mediterráneo, y es especialmente acusada en el Maresme (Barcelona), donde se llega a superar los 500 mg/L y en grandes áreas de las planas costeras del Levante (Castellón y Valencia), donde se superan 100 mg/L. Entre las unidades interiores, la Llanura Manchega, el aluvial del Ebro y algunos sectores del valle del Guadalquivir (aluviales del Guadalquivir y Guadalete) son las más afectadas, con contenidos entre 50 y 100 mg/L de nitratos. De forma local la presencia de nitratos afecta a diversas áreas de las cuencas del Duero (región central del Duero, Esla-Valderaduey y Arenales), Tajo (La Alcarria, Tiétar y Ocaña), Sur (Campo de Níjar, Dalías y Fuente Piedra) y Segura (Campo de Cartagena, Guadalentín, y Vegas del Segura). En las zonas norte de Tenerife y de Gran Canaria se han observado también contenidos que exceden el límite de potabilidad de 50 mg/L.

En la figura 6, se puede observar el mapa de España, donde están representadas las zonas designadas como vulnerables, según el Real Decreto 261/1996, sobre la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos de origen agrario.

La afección de las aguas subterráneas por la aplicación agrícola de productos fitosanitarios es un fenómeno difícil de constatar, posiblemente por la dificultad, tanto de identificar la zona contaminada como por la complejidad analítica; no obstante se ha detectado la presencia de cloroetilenos, triclorobencenos, aldrin y lindano en acuíferos detríticos de las cuencas del Tajo, Guadalquivir, Sur y Ebro.

La mayor parte de la contaminación ganadera, en cifras absolutas, corresponde a las Comunidades de Castilla-León, Andalucía, Castilla-La Mancha, Cataluña y Galicia, si bien las mayores concentraciones de carga contaminante se producen en Cantabria, Cataluña y Asturias. Es de destacar la considerable vulnerabilidad de los acuíferos en estas áreas, constituidos por materiales fracturados y karstificados y, por tanto, escasamente protegidos frente a la infiltración.

Intrusión salina

Un arrastre de aguas salinas que contaminan otras de mayor calidad, se dice que se ha producido un proceso de intrusión salina; si el origen de esta agua es formación de materiales muy solubles (yesos, halita, silvina, etcétera), se habla de intrusión salina continental, cuando el origen es el mar, se trata de un proceso de intrusión marina.

Existen numerosas formaciones geológicas situadas en el interior de la península cuyas aguas presentan características de elevada salinidad. Por ejemplo, las aguas del valle del Guadaletín, en su sector alto, con un total de sólidos disueltos que oscilan entre 200 y 1.500 mg/L, al este de Puerto Lumbreras y al sur de Lorca, mientras que en el tramo inferior de este mismo río se alcanzan valores que varían entre 1.000 y más de 6.000 mg/L. En la zona sur de la Sierra de Quibas las cifras del total de sólidos disueltos oscilan entre 1.500 y 4.000 mg/L, alcanzándose los 10.700 mg/L en Pinoso. El terciario detrítico central del Duero, que se extiende en una amplia banda a ambos lados de este río, da lugar también a aguas de elevada salinidad, de carácter clorurado o sulfatado.

La relación de España con el mar se deriva de su geografía peninsular e insular, abierta al océano atlántico y al mar mediterráneo, y que en conjunto alcanza los 7.876 km de costa (Tabla 3). De ellos unos 3.514 km, entre litoral peninsular e islas Baleares,

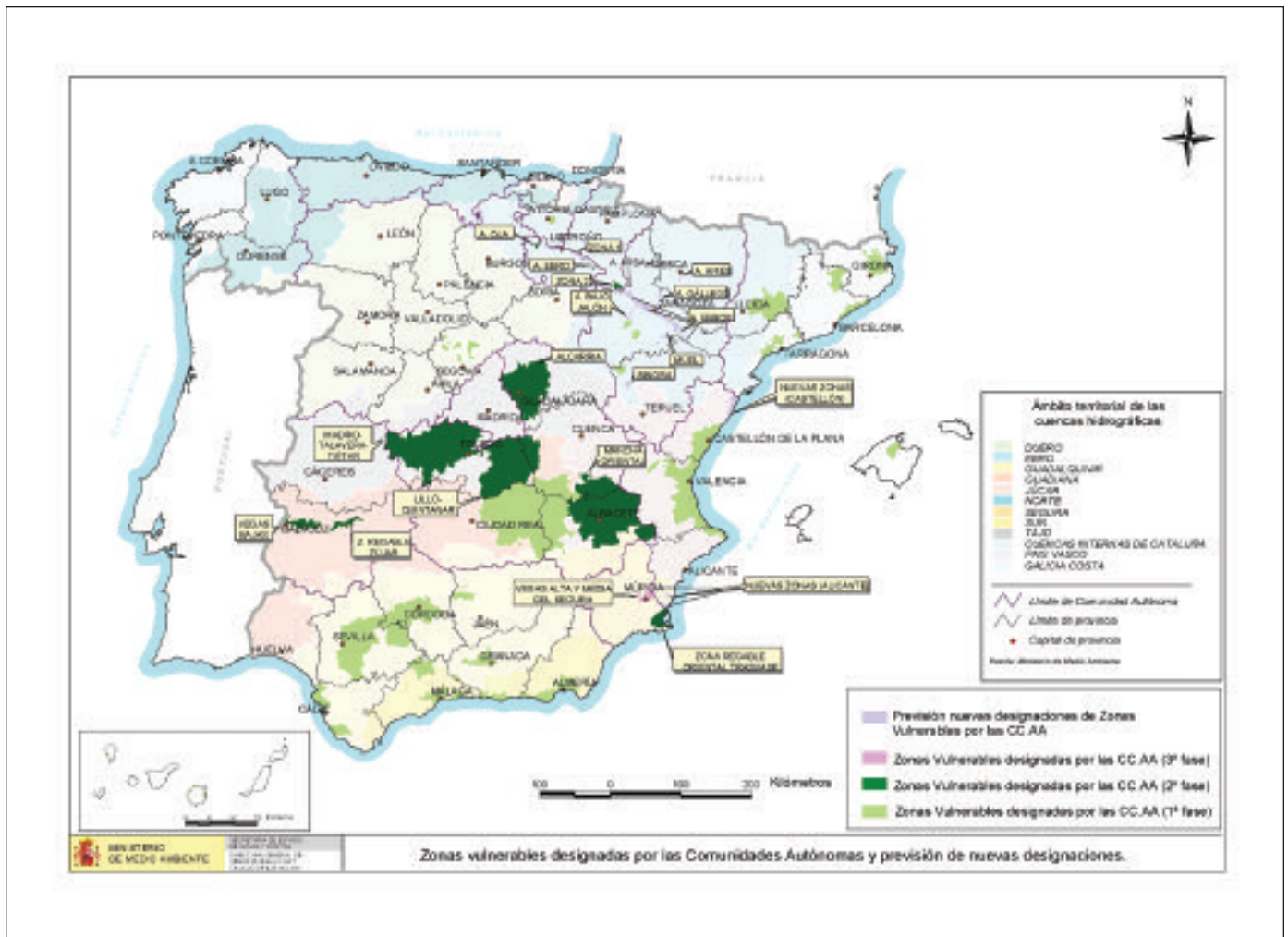


Fig. 6. Zonas vulnerables debido a contaminación por nitratos de origen agrario
 Fig. 6. Vulnerable zones due to pollution by nitrates of farming source

están bañados por el mar mediterráneo. Esa tradicional relación se refleja igualmente en la distribución demográfica, ya que es en las áreas costeras donde se concentra un mayor porcentaje de población: casi el 59% de la población total del estado se asienta en las provincias costeras, favorecidos por la geomorfología de la costa española cuyo modelo genérico es bastante similar a lo largo de todo su contorno: llanuras costeras de no más de 20 ó 30 km de ancho, y en otros casos alcanzan el mar formando acantilados, o dejan paso a valles fluviales que forman deltas en algún caso. En estas llanuras costeras, favorecida por un clima benévolo, se desarrolla una intensa actividad turística, urbana, agrícola e industrial, lo que supone una importante demanda hídrica. Por ello los acuíferos costeros adquieren una importancia estratégica como fuente inmediata y a veces única de los recursos hídricos necesarios para el desa-

rollo socioeconómico de estas áreas (MOPTMA-MINER,1994). La importante demanda de agua en estas áreas supone una intensa explotación de los acuíferos, induciendo la aparición del fenómeno de intrusión marina que pone en peligro la sostenibilidad de su aprovechamiento.

Sector Litoral	Longitud de costa km	%
Atlántico norte	2429	31
Atlántico suroccidental	350	4
Mediterráneo peninsular	2086	26
Baleares	1428	18
Canarias	1583	20
Total	7876	100

Tabla 3. Longitud de costa por áreas del litoral español
 Tabla 3. Coastal length by areas of Spanish littoral line

A lo largo del litoral de la España peninsular, Islas Baleares e Islas Canarias, se han definido un total de 95 unidades hidrogeológicas (UH), lo que supone el 25% del total de unidades en España (considerando en Canarias cada isla como unidad). Cada una de ellas puede comprender uno o varios acuíferos. 72 de esas unidades corresponden al litoral mediterráneo (49 en la Península y 23 en las Islas Baleares). El archipiélago Balear es el que tiene un mayor número de unidades costeras definidas (23 UHs), seguido de la cuenca hidrográfica del Sur con 19 y de las cuencas internas de Cataluña con 13. Sin embargo en cuanto a la superficie ocupada por estas unidades la mayor es la cuenca del Júcar con 5.286 km², seguida de la Norte con 5.230 km² y Sur con 5.224 km², además de Canarias donde se ha considerado la superficie total de las islas.

Las unidades hidrogeológicas con un mayor desarrollo socioeconómico son las que soportan una ex-

plotación más intensa de sus recursos hídricos. Como indicativo de este desarrollo se puede utilizar la superficie de regadío y la población que albergan, destacando en ambos aspectos la cuenca del Júcar con 153.085 ha y 2.088.570 habitantes. En población es superada por las cuencas internas de Cataluña con unos 2.700.000 habitantes y una importante actividad industrial y turística. También la cuenca Sur presenta en sus unidades costeras una considerable superficie de regadío, 137.100 ha, con una población de 1.382.810 habitantes y una actividad turística muy desarrollada.

La distribución de los acuíferos afectados se muestra en la Figura 7. La intrusión marina aparece en un total de 56 unidades con diferente grado de afección. Se han considerado tres grados de intrusión: local, zonal o general (López Geta, 1996). La intrusión local corresponde a los acuíferos donde este fenómeno tiene lugar de una manera puntual,

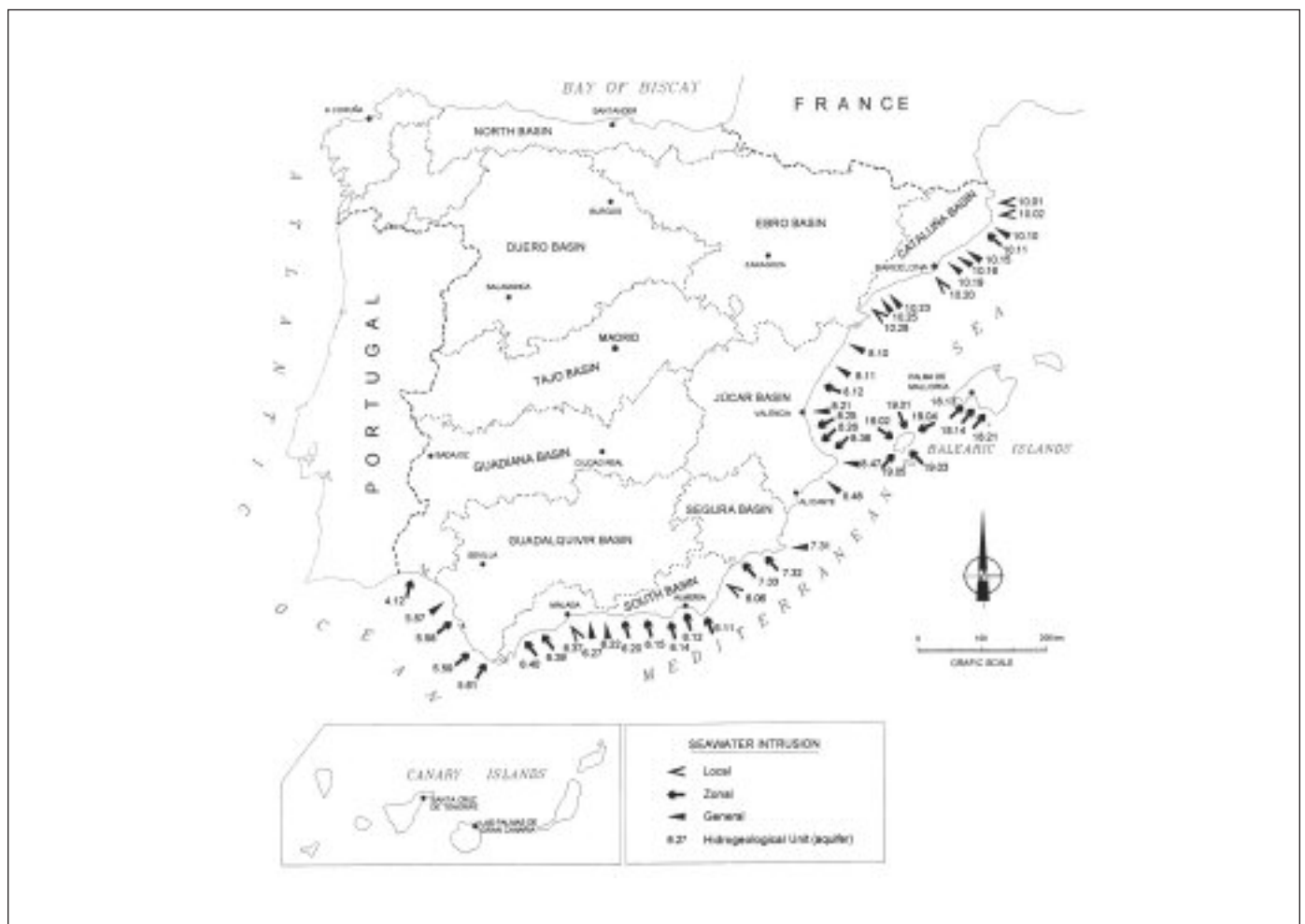


Fig. 7. Distribución de la intrusión marina en las unidades hidrogeológicas costeras
 Fig. 7. Distribution of sea-water intrusion in the coastal hydrogeological units

en un pozo o concentración de pozos intensamente explotados que producen un ascenso de la interfase agua dulce-salada. Indica un estado inicial de la afección o su aparición de una manera estacional. La intrusión zonal supone un grado más alto de afección en el que la salinización se extiende a un área importante del acuífero, que no recupera su calidad inicial en los períodos de recarga. Finalmente, la intrusión general indica un avance tierra adentro de la interfaz agua dulce-salada a lo largo de toda la línea de costa del acuífero, como consecuencia de una intensa explotación en toda su superficie.

En cifras globales (Tabla 4) se puede resumir que un 60% del total de unidades costeras españolas presenta algún grado de afección por intrusión marina, correspondiendo a un 17% de ellas el grado de intrusión generalizada, a un 31% la intrusión de carácter zonal y a un 12% local.

Usos del agua subterránea

Demandas y usos sectoriales

Una de las propiedades de los acuíferos es su distribución espacial, y por tanto su proximidad a los centros de demanda. Esto los diferencia de las aguas superficiales, cuya regulación (presas, embalses, etc.) se adapta a la linealidad de los ríos y a las condiciones topográficas, lo que condiciona su utilización a la creación de infraestructuras de transporte más o menos largas y coste económico importante para alcanzar los lugares demandantes. El 80% de la superficie de las cuencas intercomunitarias pueden encontrarse aguas subterráneas y formaciones acuíferas, aproximando los acuíferos a los lugares demandantes.

Cuenca	Nº UH costeras	Sin intrusión	Int. Local	Int. Zonal	Int. General
Norte	10	10	0	0	0
Guadiana	1	0	0	1	0
Guadalquivir	5	2	0	2	1
Sur	19	9	4	4	2
Segura	6	2	2	1	1
Júcar	10	0	1	7	2
Ebro	1	0	0	1	0
Cataluña	13	2	4	1	6
Baleares	23	14	0	5	4
Canarias	7	0	0	7	0
<i>Total</i>	<i>95</i>	<i>39</i>	<i>11</i>	<i>29</i>	<i>16</i>

Tabla 4. Grado de intrusión en unidades hidrogeológicas (UH) costeras

Table 4. Grade of sea-water intrusion in coastal hydrogeological units (UH)

Es difícil dar datos actualizados sobre el consumo de aguas subterráneas en España, ya que no existen estadísticas recientes, no obstante la información disponible (IGME-FMB, 2001 y MOPTMA-MINER, 1994), revela la importancia que las aguas subterráneas tienen en la satisfacción de las demandas. Se estima entre 5.500 a 6.500 hm³/año la extracción de aguas subterráneas.

El volumen de agua utilizado para suministro de poblaciones, incluyendo las industrias conectadas a la red urbana, asciende a unos 1.180 hm³/a, lo que supone que, en términos generales, del orden del 70% de los núcleos urbanos se abastece con aguas subterráneas, y casi el 30% de la población española. Esta cifra está muy lejos de la de la mayoría de los países de nuestro entorno. Hay países como Dinamarca, Austria, Luxemburgo, Italia, Holanda o Alemania, donde prácticamente en todos ellos se supera el 70% del abastecimiento urbano con aguas subterráneas. En el caso de España, en los últimos años, la cifra posiblemente se haya modificado a la baja, como consecuencia del deterioro de la calidad del agua subterránea de algunos acuíferos, por contaminación por nitratos, especialmente en las planas litorales. En estos casos, se han sustituido los abastecimientos con aguas subterráneas por aguas superficiales, lo que sin duda ha mejorado la calidad del agua de abastecimiento, pero su dependencia de los sistemas de regulación superficial ya existentes, los hacen más vulnerables a las sequías hídricas.

Hay cuencas con una fuerte dependencia de las aguas subterráneas para abastecimientos, como las del Júcar y el Sur, en las que la población abastecida con aguas de este origen se sitúa en torno al 50%. En los archipiélagos se tiende a cubrir la práctica totalidad del consumo con aguas subterráneas, que se completa con instalaciones desaladoras.

Por provincias son importantes los volúmenes consumidos en Barcelona, Jaén, Alicante y Valencia, entre las cuatro superan el 20% del total abastecido con aguas subterráneas. Entre los municipios destaca el de Castellón, con todo el suministro urbano cubierto por aguas subterráneas, a continuación se sitúa Almería, donde el 80% del abastecimiento proviene de acuíferos.

El agua subterránea utilizada para regadío se estima entre 3.500 y 4.500 hm³/año, lo que supone casi el 30% de la superficie total dedicada al riego, concentrándose principalmente en el Levante y sureste español, con unas condiciones climatológicas especiales, lo que favorece una alta productividad y rentabilidad económica. Según Juan Corominas, en el documento titulado " El papel económico de las aguas subterráneas" (Corominas, 2000), de las más de 815.000 ha

de regadíos andaluces, una cuarta parte se abastecen con aguas subterráneas, y su producción supera el 57 por ciento del conjunto de la agricultura de regadío, contribuyendo con casi el 50% del empleo generado. Y de ese 57%, el 66,5% corresponde a los regadíos de las zonas litorales.

El uso del agua subterránea destinado al consumo industrial, desligado de la red urbana asciende a unos 360 hm³/año, correspondiendo la mayor utilización a las Cuencas Internas de Cataluña, y a las Cuencas Hidrográficas del Júcar y Ebro.

Aprovechamiento de las aguas superficiales

El valor medio anual de la esorrentía total en España es de unos 110.000 hm³ como se ha comentado anteriormente (220 mm). En cuanto a la distribución espacial son evidentes las grandes diferencias territoriales que muestra, variando desde áreas donde la esorrentía es de menos de 50 mm/año (sureste de España, La Mancha, el valle del Ebro, la meseta del Duero, y las Islas Canarias) hasta otras donde supera los 800 mm/año (cuencas del Norte y áreas montañosas de algunas cuencas) (MIMAM, 2000).

La regulación natural en la Península es de 9.190 hm³/año para demandas uniformes y de 4.445 hm³/año para demandas variables de riego (MIMAM, 2000). En lo referente a la demanda total, se estima en unos 30.000 hm³/año, que se satisface a través de los volúmenes regulados a través de embalses superficiales (presas, etc.). El número de presas actualmente en servicio como se comentaba anteriormente supera el millar (1.133 incluyendo diques laterales), con una capacidad de almacenamiento total próxima a los 56.000 hm³, con ellas se satisface una demanda del orden de unos 24.000 hm³/año, de los que más de la mitad corresponden a las grandes cuencas del Ebro, Duero y Guadalquivir.

Según la encuesta realizada por AEAS (1998), la procedencia del agua utilizada, para abastecimientos de poblaciones mayores de 20.000 habitantes, se distribuye entre un 79% de agua superficial, un 19% de agua subterránea (incluyendo 2% de manantiales), y un 2% de otros orígenes (básicamente desalación). En las poblaciones menores de 20.000 habitantes las proporciones se invierten, con un 22% de origen superficial, un 70% subterráneo (39 de pozo o sondeo y 31 de manantial), y el resto sin especificar (Sanz Pérez, 1995).

Uso conjunto aguas superficiales-aguas subterráneas

Es importante prever las posibles repercusiones que

el aprovechamiento, independizado de las aguas superficiales o de las subterráneas, puede tener entre sí, a esto hay que añadir la posible presencia de aguas procedentes de la desalación o depuración de las aguas residuales. Es por ello que el uso conjunto se reafirma como el instrumento adecuado para la planificación hidrológica y la mejora de la gestión.

Es una posibilidad poco utilizada posiblemente porque en principio su implementación pueda parecer compleja para los técnicos responsables y de un cierto coste económico, sin embargo en aquellos casos que esto se ha realizado, se ha puesto de manifiesto las ventajas que ello tiene. En este sentido pueden destacarse los casos del abastecimiento a las ciudades españolas de Barcelona y Madrid. El sistema de abastecimiento a Barcelona, es el más antiguo en España. Más recientemente, la ciudad de Madrid y gran parte de la Comunidad (con una demanda del orden de los 600 hm³/año para una población del orden de los 6 millones de habitantes), ha incorporado, con muy buenos resultados, las aguas subterráneas al sistema general de abastecimiento, especialmente en los períodos de bajas precipitaciones. En estos momentos la ciudad de Madrid y la Comunidad Autónoma (Sánchez Sánchez, 2003) cuenta con unos quince embalses que almacenan y regulan las aguas superficiales procedentes de la sierra de Guadarrama y Somosierra, y del orden de 120 pozos, que en la actualidad se han reducido a 72, al haberse eliminado los que abastecían a los pequeños núcleos. Del conjunto de pozos, el 90% captan agua del acuífero detrítico de Madrid y el resto del acuífero carbonatado de Torrelaguna (Madrid); el conjunto puede aportar un volumen de 92 hm³/año, con un coste hasta los centros de distribución de 0.06 a 0,07 euros. Desde el año 1992, el Canal de Isabel II (Sánchez Sánchez, 2003), ha extraído un total de 252 hm³, durante un tiempo total de 59 meses, en períodos intermitentes, lo que representa un valor medio del 10% del total del abastecimiento.

Con el fin de aplicar esta técnica, se ha desarrollado un estudio dirigido a definir e implantar la utilización conjunta en aquellas zonas donde puedan obtenerse mejoras significativas en la gestión (MIMAM, 1998b). Se han seleccionado 27 esquemas en los que se integran 70 unidades hidrogeológicas junto a 71 embalses y 16 grandes infraestructuras de conducción. En la actualidad se están desarrollando algunos de los proyectos propuestos, es el caso de la Marina Baja y valle del Vinalopó en Alicante o en la Vega del Genil en Granada.

Hidrogeología y medio ambiente

Zonas húmedas

Las zonas húmedas, o humedales, son el resultado de la interacción de múltiples factores –geológicos, climáticos e, incluso, antrópicos– que dan lugar a zonas de concentración de escorrentías, más o menos desarrolladas y evidentes, cuya alimentación –superficial, subterránea o la combinación de ambas, que es lo más frecuente– permite el mantenimiento de una cierta lámina de agua.

El número de humedales españoles incluidos en la Lista de Convenio de Ramsar es muy importante, teniendo en cuenta que la riqueza de zonas húmedas en España es muy elevada. Actualmente se han inventariado más de 2.500 humedales. Pese a la sustancial reducción que se produjo en su número y en la superficie ocupada por las mismas durante la segunda mitad del siglo XX, se tiene constancia que de las 280.000 ha, estas se han reducido actualmente a unas 114.000. Dentro de la Unión Europea, España es el país que presenta una mayor diversidad de tipos ecológicos de humedales, incluyendo algunos ecosistemas únicos en cuanto a su funcionamiento y presencia de especies endémicas o amenazadas, además de constituir una zona clave dentro de las rutas migratorias de numerosas aves.

De este amplio conjunto de humedales y hasta diciembre de 2003, España ha incluido en la Lista de Ramsar, 49 humedales (Figura 8) que se encuentran distribuidos por todo el ámbito territorial, continental e insular, siendo Andalucía la Comunidad Autónoma con mayor número de humedales Ramsar protegidos, 9. De estos 49 humedales, solamente 3 de ellos no son estrictamente naturales a lo largo de su historia, localizándose expresamente sobre embalses, estos son: Embalse de Orellana, Embalses de Cordobilla y Malpasillo y Embalse de Ullibarri-Gamboa.

Desde el punto de vista hidrogeológico, un 73% de los humedales Ramsar españoles, mantienen una cierta dependencia de las aguas subterráneas de los acuíferos del entorno, alcanzando un nivel de dependencia muy alto para el mantenimiento de su lámina hídrica, en aproximadamente una tercera parte de los casos.

Los humedales que dependen del agua subterránea, presentan una gran variedad de formas, de salinidades, de procesos de formación, etc, es decir, sin criterios claros que permitan definir asociaciones con este tipo de alimentación. En general existen dos tipos de humedales con dependencia del agua subterránea, los que se asientan directamente sobre siste-

mas acuíferos, tanto en las áreas de recarga como de descarga, formando parte directa de este sistema hídrico, encontrándose intrínsecamente relacionado con el acuífero asociado del que dependen. El otro tipo, es aquel en que el humedal se asienta sobre una zona de baja permeabilidad que impide la infiltración del agua, en la que el aporte hídrico procede directamente de sistemas de acuíferos laterales que pueden estar conectados o no, directamente con el humedal.

Es importante indicar que los humedales son fácilmente afectados por los impactos negativos de acciones que ocurren fuera de ellos. Por tal motivo, la conservación y el uso sostenible de los humedales deben desarrollarse a través de un enfoque integrado que considere los distintos ecosistemas asociados ayudando este estudio a establecer pautas de comportamiento que sirvan para su gestión sostenible.

Parajes asociados a manantiales

Ligadas a estas surgencias se localizan áreas de esparcimiento y recreo. En algunas de ellas, cuyas aguas presentan un carácter termal o minero-medicinal, se ubican lugares de descanso con fines terapéuticos, que disponen de instalaciones balnearias.

Son numerosos los ejemplos que cabría citar (MOPTMA-MINER,1994). En algunas grandes fuentes kársticas, que drenan acuíferos carbonatados, está el origen de muchos ríos. Es el caso del Pisuerga, que surge de la cueva del Cobre, en el sector palentino de la Cordillera Cantábrica; o el del Sil que inicia su andadura en la gran fuente de la Cueta, no lejos del puerto de Somiedo. El nacimiento del brazo más occidental del Garona en el caudaloso manantial del Güel del Jueu es la surgencia de un importante trasvase subterráneo que tiene su origen en la cabecera del Esera, es decir en la cuenca del Ebro; allí las aguas del macizo del Aneto se pierden en el Forao de Aygualluts y se interiorizan en un acuífero de amplio desarrollo, abierto en una banda de calizas devónicas que corre al Norte de los Montes Malditos, conectando la cuenca del Esera con la del Garona. Es también el resultado de otro trasvase subterráneo la fuente de Vozmediano, donde nace el Queiles, afluente derecho del Ebro, que recoge aguas infiltradas al sur del Moncayo en la cuenca del Duero. El Guadiana es bien conocido por la peculiaridad de sus varios “nacimientos” y pérdidas, hoy muy disminuido por las extracciones que se realizan en los acuíferos de La Mancha.

acuífero está sobreexplotado o en riesgo de estarlo cuando se está poniendo en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo, como consecuencia de venirse realizando extracciones anuales superiores o muy próximas al volumen medio de los recursos anuales renovables o que se produzca un deterioro grave de su calidad. De acuerdo con estos criterios, en la figura 9, están representados los acuíferos en los que la relación bombeo/recarga es superior a la unidad (MOPTMA-MINER, 1994).

En este conjunto de acuíferos, el déficit, obtenido como diferencia entre bombeos y recargas, es de 710 hm³/año. Más de un tercio de este déficit lo soporta la unidad hidrogeológica de La Mancha Occidental, en la provincia de Ciudad Real; casi otro tanto corresponde a diversos acuíferos de la provincia de Murcia, entre los que destaca el valle del Guadalentín; el resto se distribuye entre las provincias de Alicante (cuenca

del río Vinalopó) y Almería (Campo de Dalías, Campo de Nijar).

El problema es también importante, en otras 23 unidades hidrogeológicas, donde el cociente bombeos/recargas está comprendido entre 0,8 y 1,0, lo que es un índice de riesgo de sobreexplotación e implica la necesidad de actuaciones inmediatas con el fin de no alcanzar situaciones negativas. Hay además otras 25 unidades en las que, aun teniendo el cociente bombeos/recargas valores inferiores a 0,8, se han detectado descensos piezométricos importantes en determinadas zonas o degradación en la calidad del agua, que obligan a estudiar las medidas de corrección pertinentes.

Conclusiones

No hay alternativa al agua, es la clave del desarrollo

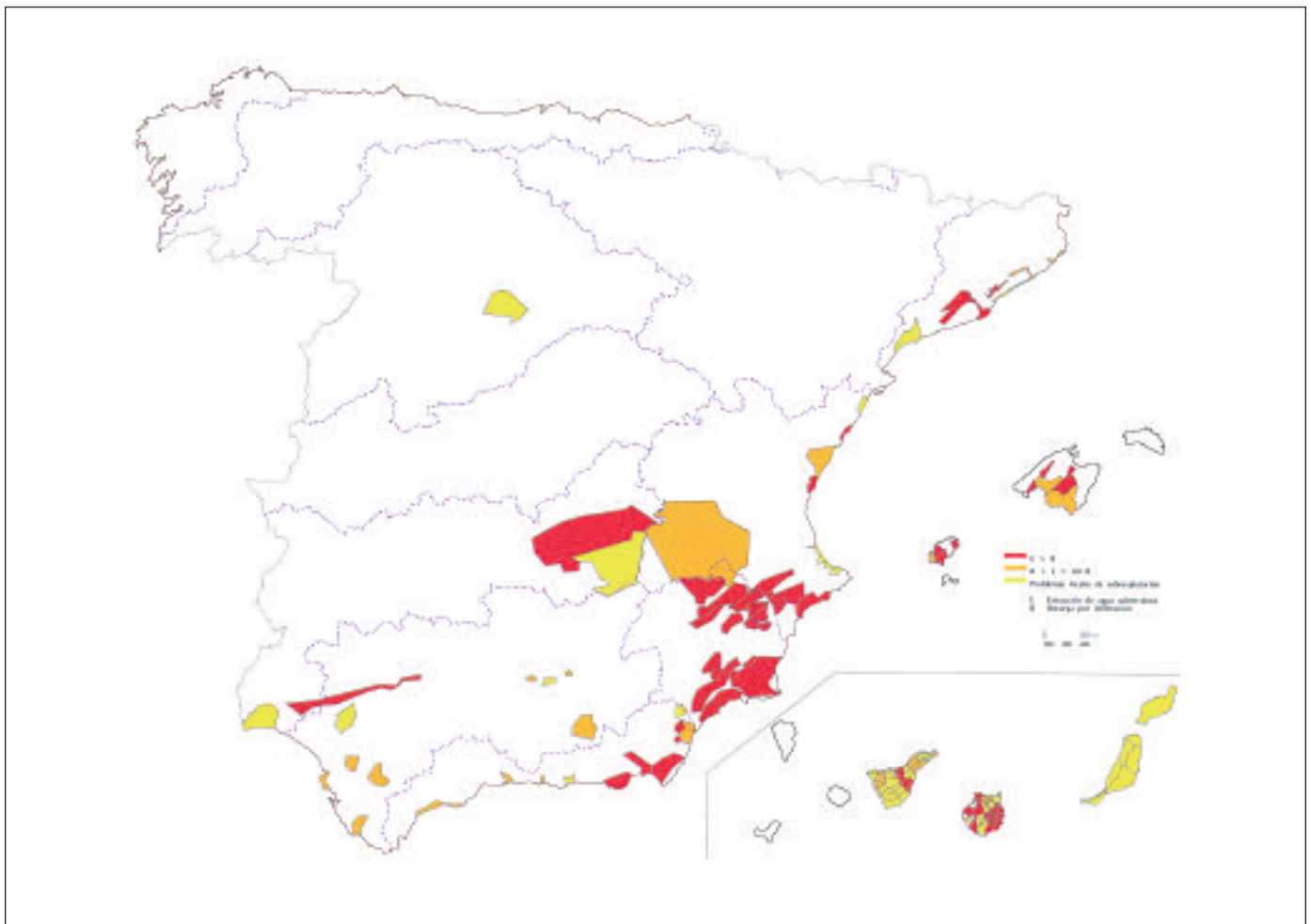


Fig. 9. Unidades hidrogeológicas con problemas de sobreexplotación (MOPTMA-MINER, 1994)
Fig. 9. Hydrogeological units with problems of overexploitation (MOPTMA-MINER, 1994)

sostenible y del bienestar económico y social. Es por tanto prioritario garantizar un equitativo acceso al agua de todos los ciudadanos. En el mundo existen más de 3000 millones de personas que no disponen de aguas en las debidas condiciones y 3 millones mueren al año por enfermedades relacionada con el agua.

En España, las aguas subterráneas juegan un papel muy importante, no sólo como fuente de suministro continuo (más del 70% de los núcleos urbanos y un tercio de la superficie de regadío se satisface con aguas subterráneas), sino en situaciones de emergencia, en períodos de sequías y cuando falla la garantía de los sistemas superficiales. Los casos del abastecimiento a las ciudades de Madrid y Barcelona y sus áreas metropolitanas, es un ejemplo de la contribución de las aguas subterráneas a resolver algunos problemas de falta de recursos hídricos.

Los recursos hídricos subterráneos renovables están estimados según las fuentes, entre 20.000 y 30.000 hm³/año, de los que se aprovechan de forma directa, es decir por bombeo, unos 5.500 hm³/año, que pueden llegar a los 6.500 hm³/año, en períodos de sequía. Estos aprovechamientos vienen utilizándose históricamente para satisfacer parte de las demandas originadas por los diferentes sectores: abastecimiento urbano, industrial y agrícola.

En el caso más pesimista de que los recursos hídricos subterráneos sean del orden de los 20.000 hm³/año, y descontando la suma de los bombeos, más los recursos regulados indirectamente (embalses), más las salidas al mar, más los caudales ambientales, se pueden estimar los recursos disponibles en unos 10.000 hm³/a. Su posible aprovechamiento depende de las condiciones técnicas, económicas y ambientales.

Los acuíferos deben intervenir no sólo como suministradores de agua, sino dada su capacidad de almacenamiento pueden jugar un papel importante como modulador de las aportaciones superficiales, aprovechando la capacidad de almacenamiento, cuantificada entre 125.000 hm³ y 300.000 hm³, y además contribuir a mejorar la garantía de regulación.

Es importante prever las posibles repercusiones que el aprovechamiento, independizado de las aguas superficiales o de las subterráneas, puede tener entre sí. Es por ello que el uso conjunto se reafirma como el instrumento adecuado para la planificación hidrológica y mejora de la gestión. La integración de las aguas subterráneas en la planificación hidrológica es una tarea, en principio sencilla, sin embargo por razones difíciles de comprender, esto prácticamente no se ha realizado a pesar de que tanto la Legislación española en materia de aguas como la propia DMA,

lo consideran como un instrumento necesario para mejorar la gestión hídrica.

En el momento actual no se puede seguir pensando en un aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas, sin que en la explotación de cada una de ellas, se tenga en cuenta la existencia en cada caso de la otra. Por ello, una gestión moderna del uso del agua conlleva la integración en un único sistema de explotación de recursos, de todos los elementos que intervienen en él, es decir, por un lado, los elementos de oferta, y por otro los elementos que configuran la demanda. En este nuevo planteamiento el acuífero no cumple exclusivamente el fin antes mencionado de suministrar agua, sino que interviene con una misión más relevante: la de embalse de regulación, donde su capacidad de almacenamiento (embalse "natural" subterráneo) puede jugar un papel muy importante en la modulación de las aportaciones, y en la mejora de la garantía de regulación.

La gestión y protección de las aguas superficiales y subterráneas en España viene regulada en el seno de la Ley de Aguas de 1985 y de su texto refundido de 2001, modificado posteriormente en el año 2002, para incorporar algunos aspectos de la DMA. Según esta norma las aguas subterráneas forman parte del dominio público hidráulico a efectos de disposición o afección de los recursos hídricos. Las disposiciones reglamentarias para el cumplimiento de la Ley de Aguas están contenidas en los Reales Decretos 849/1986 y 927/1988, en los que se desarrollan los Reglamentos del Dominio Público Hidráulico (modificado en el Real Decreto 606/2003) y de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, respectivamente.

La Directiva Marco del Agua (DMA), Directiva 2000/60/CE, es el instrumento que proporciona el marco legislativo para la futura gestión de los acuíferos. Uno de los ejes fundamentales sobre los que bascula esta nueva directiva es el uso sustentable del agua. Las principales tareas asignadas a los Estados Miembros son las siguientes (Grima *et al.* 2002):

- Definición del estado cualitativo y cuantitativo de las masas de agua subterránea.
- Tendencias en la evolución de las masas de agua subterránea.
- Impacto de las actividades antrópicas.
- Resultado de las acciones protectoras y correctivas.
- Relación de las masas de agua subterránea con ecosistemas asociados.

La DMA exige una caracterización hidrogeológica de cada una de las m.a.s. identificadas y delimitadas, para mejorar el conocimiento de que se dispone en la actualidad de la geometría de los acuíferos, de los

parámetros hidráulicos y de la calidad de las aguas, entre otros aspectos. Para ello se dispone de un programa diseñado y valorado económicamente, denominado Plan de Investigación Hidrogeológica (PAIH), que sólo requeriría pequeños retoques para su adaptación a los requerimientos de la DMA.

Los avances científicos y tecnológicos han contribuido a la mejora del conocimiento de los acuíferos y a su aprovechamiento, a la mejora de la gestión y al uso sostenible. Existen no obstante problemas importantes que hay que corregir como es la sobreexplotación o la contaminación de las aguas.

El PHN, volvía a repetir el error histórico de no incorporar las aguas subterráneas y los acuíferos a la planificación hidrológica y por tanto a la gestión hídrica. La integración de las aguas subterráneas en la planificación hidrológica es una tarea, en principio sencilla, sin embargo por razones difíciles de comprender, esta tarea prácticamente no se ha realizado a pesar de que tanto la Legislación española en materia de aguas como la propia DMA, lo consideran como un instrumento necesario para mejorar la gestión hídrica. Sigue siendo la asignatura pendiente de la administración hidráulica, posiblemente debido a la falta de medios humanos especializados en esta materia.

La adaptación de la Directiva Marco de política del agua en la Unión Europea, ha supuesto, según los primeros estudios, que en prácticamente el 80% de la superficie cubierta por las cuencas hidrográficas intercomunitarias, existe agua subterránea y están identificadas masas de aguas subterráneas.

Referencias

- AEAS, 1996. *Suministro de agua potable y saneamiento en España*. V Encuesta Nacional de Abastecimiento, Saneamiento y Depuración.
- ANIM, 1979. *Las aguas subterráneas en España, presente y futuro*. Asociación Nacional de Ingenieros de Minas. Madrid, 235 pp.
- Casas, A. 2000. Prospección geofísica aplicada a la hidrogeología: metodología y técnicas emergentes En: *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*. (Eds. M. Olmo y J.A. López-Geta). ITGE-Diputación de Granada, 33-43, Madrid.
- Corominas, J. 2000. *El papel económico de las aguas subterráneas en Andalucía*. Fundación Marcelino Botín. Serie B. La economía de las aguas subterráneas en España, 53 pp. Santander.
- Diputación de Alicante, 2001. *Sistema de telemedida y control de recursos hídricos e infraestructuras hidráulicas*. Diputación de Alicante, 48 pp. Alicante.
- Fabregat, V. 1999. Fundamentos teóricos del control de las extracciones mediante teledetección. En: *Medidas y evaluación de las extracciones de agua subterránea* (Eds. A. Ballester, J.A. Fernández Sánchez y J.A. López-Geta), 89-105, ITGE-MIMAM, Madrid.
- Grima, J., Custodio, E. y López Geta, J.A. 2002. Papel de los organismos públicos de investigación en la implantación de la Directiva Marco del Agua. *Jornadas sobre presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco Europea*. Zaragoza.
- IGME, 1979. *Mapa hidrogeológico de España*. Instituto Geológico y Minero de España. 54 pp + 3 mapas.
- IGME-FMB, 2001. *Las aguas subterráneas. Un recurso del subsuelo*. Instituto Geológico y Minero de España. Fundación Marcelino Botín. Madrid. 94 pp + 1 CD-ROM.
- ITGE, 1989. *Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis*. 600 pp. Madrid.
- ITGE, 2000. *Unidades hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. Madrid.
- López-Geta, J.A. 1996. Papel, utilización y gestión de los acuíferos litorales. En: *Las aguas subterráneas en las cuencas del Ebro, Júcar e Internas de Cataluña y su papel en la planificación hidrológica*. AIH-GE, 169-176. Lleida.
- López-Geta, J.A. 2000. Contribución del Instituto al conocimiento y protección de las aguas subterráneas en España. En: *Ciento cincuenta años. 1849-1999. Estudio e investigación en Ciencias de la Tierra*, 199-234, ITGE. Madrid.
- López-Geta, J.A. y Murillo, J.M. 1993. Recarga de acuíferos y reutilización de recursos hídricos. En: *Las aguas subterráneas. Importancia y perspectivas*. IGME-Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 235-252, Madrid.
- Llamas, M., Fornés, J.M., Hernández-Mora, N. y Martínez Cortina, L. 2001. *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. FMB-Ediciones Mundi-Prensa, 529 pp.
- MIMAM, 1998a. *Programa de redes básicas de control de las aguas subterráneas. Cuencas intercomunitarias y Baleares*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 60pp.
- MIMAM, 1998b. *Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados/salinizados. Formulación de estudios y actuaciones*. Ministerio de medio Ambiente. Madrid, 66pp.
- MIMAM, 2000. *Libro Blanco del Agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 637 pp.
- MOPTMA-MINER, 1994. *Libro Blanco de las Aguas Subterráneas*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 135 pp +1 mapa.
- MOPTMA-MINER-UPC, 1998. *Inventario de recursos de aguas subterráneas en España. 1ª fase*. Cobertura temática.
- MOPU-IGME, 1989. *Catálogo de acuíferos peninsulares e islas Baleares*. Informe inédito.
- Mujeriego, R. 2005. *La reutilización, la regulación y la desalación de agua* (en prensa).
- Pendas, F. 2000. La geofísica en la era del "Agua Nueva". En: *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*. (Eds. M. Olmo y J.A. López-Geta). ITGE-Diputación de Granada, 1-21, Madrid.
- Plata, J.L. 2000. Técnicas convencionales de geofísica de superficie aplicada en hidrogeología. En: *Actualidad*

- de las técnicas geofísicas aplicadas en hidrogeología*. (Eds. M. Olmo y J.A. López-Geta). ITGE-Diputación de Granada, 21-33, Madrid.
- Sahuquillo, A. 2002. Desarrollos científicos y nuevas tendencias en hidrogeología. En: *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*, 1-15, IGME-Madrid.
- Sánchez Sánchez, E., Muñoz García, A., Iglesias Martín, J.A. y Cabrera Méndez, E. 2003. Explotación de los acuíferos para el abastecimiento urbano de la Comunidad de Madrid: situación actual y futura. En: *El agua y la ciudad sostenible: hidrogeología urbana*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas nº 11, 169-179, Madrid.
- Sanz Pérez, E. 1995. Los manantiales de España: clasificación según caudales, litologías y actuación de sus aportaciones. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. 106-1. Madrid.
- Unión Europea, 2000. *Decreto 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2000, por lo que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política del Agua*. DOL 327 de 22-12-2000.
- Vera, J.A. 2004. (Ed.). *Geología de España*. Instituto Geológico y Minero de España y Sociedad Geológica de España, 884 pp. y mapa. Madrid.

Recibido: noviembre 2005.

Aceptado: febrero 2006.