Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN
GENERAL DEL
AGUA

Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica

Edición a cargo de: **Loreto Fernández Ruiz**

Las AGUAS subterráneas en la planificación hidrogeológica/ Loreto Fernández Ruiz, ed.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2012

481 pgs; ils; 30 cm
Nipo 474-11-028-8

1. Aguas subterráneas 2. Planificación cuenca hidrogeológica 3. Piezometría 4. Mapa piezométrico 5. Balance de agua. I Instituto Geológico y Minero de España, ed. II. Fernández Ruiz, L., ed.

556.1

Ninguna parte de este libro y mapa puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotocopias, grabación o por cualquier sistema de almacenar información, sin el previo permiso escrito del autor y editor.

© Instituto Geológico y Minero de España.
Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid

NIPO: 474-11-028-8
Depósito legal: M-21523-2012

Diseño interiores, cubierta y producción: Oficina gráfica de Barrero & Acedo

Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica

INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
2012

ÍNDICE

PRESENTACIÓN ix

Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. 1

Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas, manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. 37

Mapa piezométrico de España. 71

Establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de descargas ambientales al mar en masas de agua subterránea costeras. 127

Protección de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano. 151

Determinación de tendencias y punto de inversión en las cuencas intercomunitarias. 175

Selección e identificación de masas de agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de recarga artificial de acuíferos. 193

Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. 235

Incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y la cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales. 267

Diseño y metodología de intercambio de información hidrogeológica. 297

ESTUDIOS ESPECÍFICOS DE APOYO A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

Actualización de la masa de agua subterránea de Xinzo de Limia. 313

Evaluación de los recursos disponibles de agua subterránea en las masas de agua subterránea de la La Alcarria, Talavera, Ocaña, Tiétar de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. 331

Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana 347

Propuesta de zonificación, basada en criterios geológicos e hidrogelógicos de la cuenca alta del río Guadiana. 363

Estudio hidrometeorológico y análisis del efecto del periodo húmedo 2009/10 en los acuíferos en la cuenca alta del Guadiana. 377

Estudio de la evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana a partir de diferentes escenarios meteorológicos y de explotación. 397

Propuesta de declaración de sobreexplotación de un conjunto de masas de agua subterránea situadas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. 415

Estudio de definición de la transferencia subterránea de la MASb Boquerón con otras masas definidas en la Demarcación hidrográfica del Júcar. 439

Caracterización básica de masas de agua subterránea de la Confederación hidrográfica del Júcar.. 457

Presentación

La Dirección General del Agua, del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, tiene entre sus competencias la elaboración, seguimiento y revisión del Plan Hidrológico Nacional, el establecimiento de criterios homogéneos y de sistematización para la revisión de los Planes Hidrológicos de los organismos de cuenca, bajo el principio de sostenibilidad, así como la elaboración de la información sobre los datos hidrológicos y de calidad del agua y, en general, de aquella que permita un mejor conocimiento de los recursos, del estado de las infraestructuras y del dominio público hidráulico.

Los objetivos generales de la planificación hidrológica se centran en conseguir el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas, la satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales, guiándose para ello por criterios de sostenibilidad en el uso del agua, mediante la gestión integrada y la protección a largo plazo de los recursos hídricos. Asimismo, la planificación hidrológica debe contribuir a paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

Para el cumplimiento de estos objetivos, las aguas subterráneas constituyen un elemento esencial en el proceso de planificación, en tanto que la superficie del país cubierta por afloramientos permeables es del orden de 176.000 km^2 que reciben una recarga natural media que asciende a casi 21.000 hm^3/año. Son numerosas las demandas atendidas en España por aplicación directa de las aguas subterráneas, sea por medio de captación a través de pozos o galerías, sea por el aprovechamiento directo de las surgencias en fuentes o manantiales, estimándose en más de 6.000 hm^3 el total aplicado para los distintos usos.

Las aguas subterráneas están íntimamente ligadas con el medio ambiente, tanto en sus aspectos de generación como de preservación y constituyen una de las fórmulas que permiten incrementar la oferta de agua de manera rápida en situaciones extremas, si bien están también expuestas a los procesos de contaminación que, aunque con un mayor grado de protección frente a ella que las superficiales, su detección desde que se produce puede tardar mucho tiempo, tratándose además de un fenómeno masivo cuya solución puede ser compleja y costosa.

Por su parte, el Instituto Geológico y Minero de España, Organismo Público de Investigación adscrito al Ministerio de Economía y Competitividad a través de la Secretaria Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, tiene entre sus funciones la información, la asistencia técnico-científica y el asesoramiento a las Administraciones públicas, agentes económicos y a la sociedad en general, en geología, hidrogeología, ciencias geoambientales, recursos geológicos y minerales y realización de estudios y proyectos conducentes al establecimiento de criterios que sirvan de base para la elaboración de normativas ambientales preventivas y correctoras, así como realizar el control y seguimiento de la aplicación de las medidas en lo que haga referencia al terreno y al agua subterránea.

La Disposición Adicional Cuarta del Texto Refundido de la Ley de Aguas, faculta al IGME para colaborar y prestar asesoramiento a las distintas Administraciones Públicas en materia de Aguas Subterráneas, así como para formular y desarrollar planes de investigación tendentes a mejorar el conocimiento y protección de los acuíferos.

En estas circunstancias, en noviembre del año 2007 se tomó la decisión, por parte de los Ministerios de Medio Ambiente y Educación y Ciencia, de suscribir un acuerdo para la encomienda de gestión al Instituto Geológico

y Minero de España cuyo objetivo se centraba en la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas, a fin de mantener sus funciones potenciales y lograr una gestión sostenible, mediante un enfoque que armonizara los procesos cualitativos y cuantitativos, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Aguas, en la Directiva Marco del Agua y en la Directiva sobre protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

El presente documento presenta una síntesis del resultado de los trabajos realizados para cumplimentar las actividades objeto de la encomienda, y pretende ser una guía que permita conocer a quien la examine el alcance de la labor realizada.

Cabe mostrar aquí la satisfacción por los frutos obtenidos y, muy en particular, por la fluidez, disposición y espíritu de cooperación con que se ha desarrollado este proceso de colaboración entre dos Departamentos de la Administración, para cuyo desarrollo ha sido necesario coordinar a organismos de muy distinta naturaleza, empresas públicas y privadas y entidades de muy distinta índole cuyo único nexo común era el interés por el conocimiento del uso sostenible del agua.

Juan Urbano López de Meneses
Director General del Agua

Rosa de Vidania Muñoz
Directora del Instituto Geológico y Minero de España

CARACTERIZACIÓN ADICIONAL DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RIESGO DE NO CUMPLIR LOS OBJETIVOS MEDIO AMBIENTALES EN 2015

Julio López Gutierrez
José María Ruiz Hernández
Celestino García de la Noceda

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 2 *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas

Director de la actividad:

Miguel del Pozo Gómez. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España

Julio López Gutiérrez
José M.ª Ruiz Hernández
Celestino García de la Noceda Márquez
Loreto Fernández Ruiz
José Román Hernández Manchado
Miguel Mejías Moreno

Dirección General del Agua:

Manuel Varela Sánchez
Ignacio del Río Marrero
Isaac Sánchez Navarro
Blanca Sahún Artiga
Antonio Perez Baviera

Empresas colaboradoras:

CONSULNIMA
U.T.E. AYESA-IBERHIDRA
ZETA AMALTEA

CARACTERIZACIÓN ADICIONAL DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RIESGO DE NO CUMPLIR LOS OBJETIVOS MEDIOAMBIENTALES EN 2015

INTRODUCCIÓN

El objetivo de los trabajos llevados a cabo en esta actividad, fue dar apoyo a las Confederaciones Hidrográficas en la realización de la caracterización adicional de aquellas masas de agua subterránea que, tras la revisión de las que habían sido designadas en estudio, fueron consideradas en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015 a fecha de enero de 2008 (232 masas de agua subterránea de las 8 Demarcaciones Hidrográficas intercomunitarias).

Como antecedentes más destacables de estos trabajos, hay que mencionar, entre otros, el desarrollo dentro del Convenio de Colaboración entre el la Dirección General del Agua (DGA) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), de una documento guía para la caracterización adicional de las masas de agua subterránea y, la realización de estudios piloto de caracterización adicional de cuatro masas representativas de diferentes problemáticas.

Los trabajos se realizaron en coordinación con los órganos responsables de las Demarcaciones Hidrográficas intercomunitarias, competentes en el cumplimiento de esta obligación de ámbito comunitario, solicitando de los mismos los datos que estuvieran manejando o fueran a reflejar en los planes hidrológicos de cuenca en proceso.

La información disponible se almacenó en una ficha diseñada al efecto, incorporada a una base de datos desarrollada en Access, que permitió recoger de forma sistemática la información requerida para la caracterización adicional de las masas en riesgo y disponer de datos representativos para su posterior utilización.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

El elemento central de la actividad es la *Ficha de caracterización adicional para cada una de las masas de agua subterránea*, compuesta por los apartados que se describen a continuación.

APARTADO	DENOMINACIÓN
1	IDENTIFICACIÓN
2	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS GENERALES
3	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS
4	ZONA NO SATURADA
5	PIEZOMETRÍA. VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO
6	SISTEMAS DE SUPERFICIE ASOCIADOS Y ECOSISTEMAS DEPENDIENTES
7	RECARGA
8	RECARGA ARTIFICIAL
9	EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
10	CALIDAD QUÍMICA DE REFERENCIA
11	EVALUACIÓN DEL ESTADO QUÍMICO
12	DETERMINACIÓN DE TENDENCIAS DE CONTAMINANTES
13	USO DEL SUELO
14	FUENTES SIGNIFICATIVAS DE CONTAMINACIÓN
15	OTRAS PRESIONES
16	OTRA INFORMACIÓN GRÁFICA

Identificación

En este apartado se incluyó la información correspondiente a la *clase de riesgo* asignado a la masa (cuantitativo o químico) y al *ámbito administrativo* (características geográficas, administrativas y población asentada). La *información gráfica* incluye un mapa básico de situación (límites de la masa, núcleos urbanos, altimetría, vías de comunicación y red hidrográfica) y un mapa digital de elevaciones de cada masa (figura1).

Características geológicas

El conocimiento de las características geológicas del acuífero o acuíferos en la masa, incluidas la extensión y el tipo de unidades geológicas, ocupa el primer lugar en la relación de requisitos citados en el Anexo II.2 de la DMA para efectuar la caracterización adicional de las masas de agua en riesgo. La información relativa a las características geológicas se representó mediante mapas, cortes y columnas procedentes principalmente, de la revisión bibliográfica, de la cartografía geológica digitalizada procedente de las hojas del MAGNA, a escala 1:50.000 y del *mapa litoestratigráfico,* elaborado por el IGME durante la primera fase de los trabajos del Convenio DGA-IGME. Asimismo se confeccionó la *columna estratigráfica* sintética y característica de cada masa, recogida en la ficha, junto con un texto descriptivo conciso. La figura 2 muestra un ejemplo del mapa litoestratigráfico adjuntado como información gráfica.

Características hidrogeológicas

A partir de los estudios e informes consultados relativos a este apartado y del análisis de la información recopilada en el anterior apartado, se diferenciaron los acuíferos existentes en la masa. En algunos casos y como información complementaria, se han incluido mapas, bloques diagrama, cortes, etc., correspondientes a estudios hidrogeológicos realizados en los acuíferos de la masa, así como un texto hidrogeológico descriptivo. Los valores de permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento se obtuvieron de diversas fuentes de información consultadas. Como información gráfica se adjuntó un mapa de permeabilidades de la masa (figura 3).

Zona no saturada

La información sobre litología de la zona no saturada correspondió básicamente al apartado 2 de la ficha sobre características geológicas. Mientras que

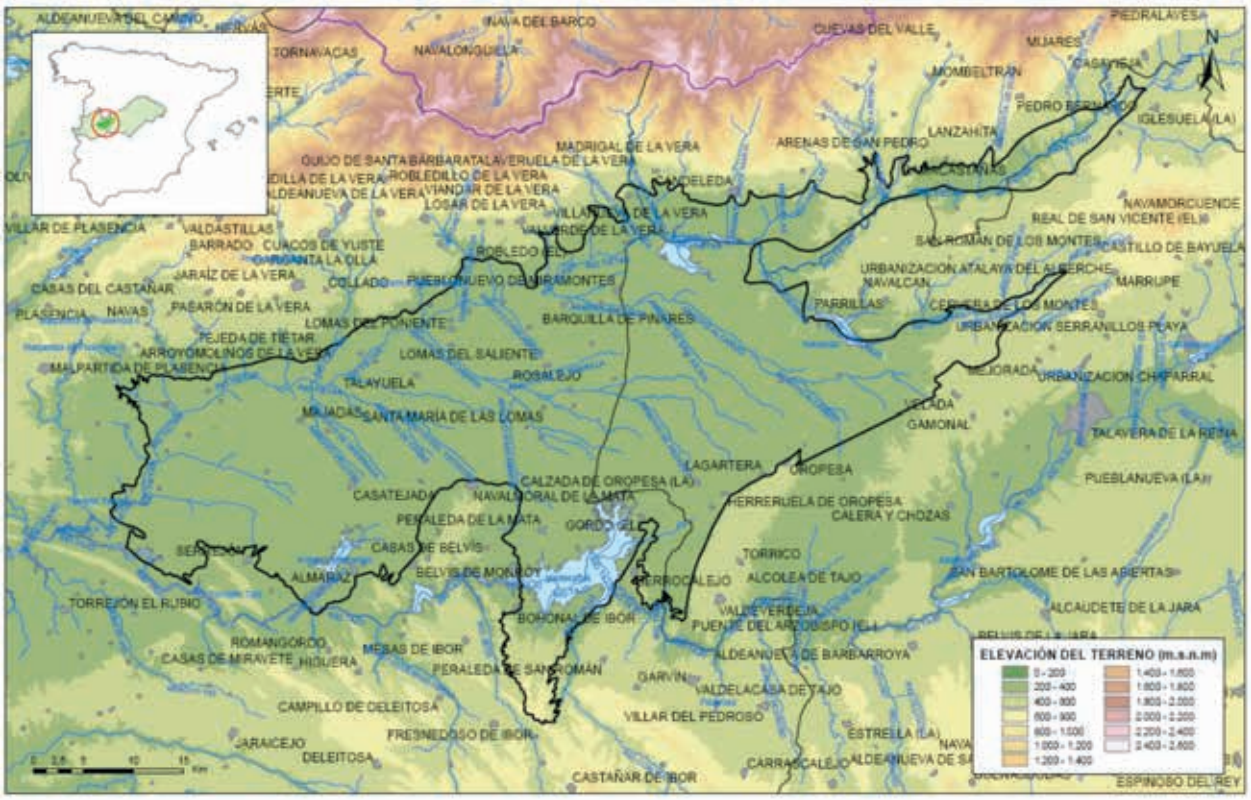


Figura1. Mapa de elevación del terreno 030.022 Tiétar

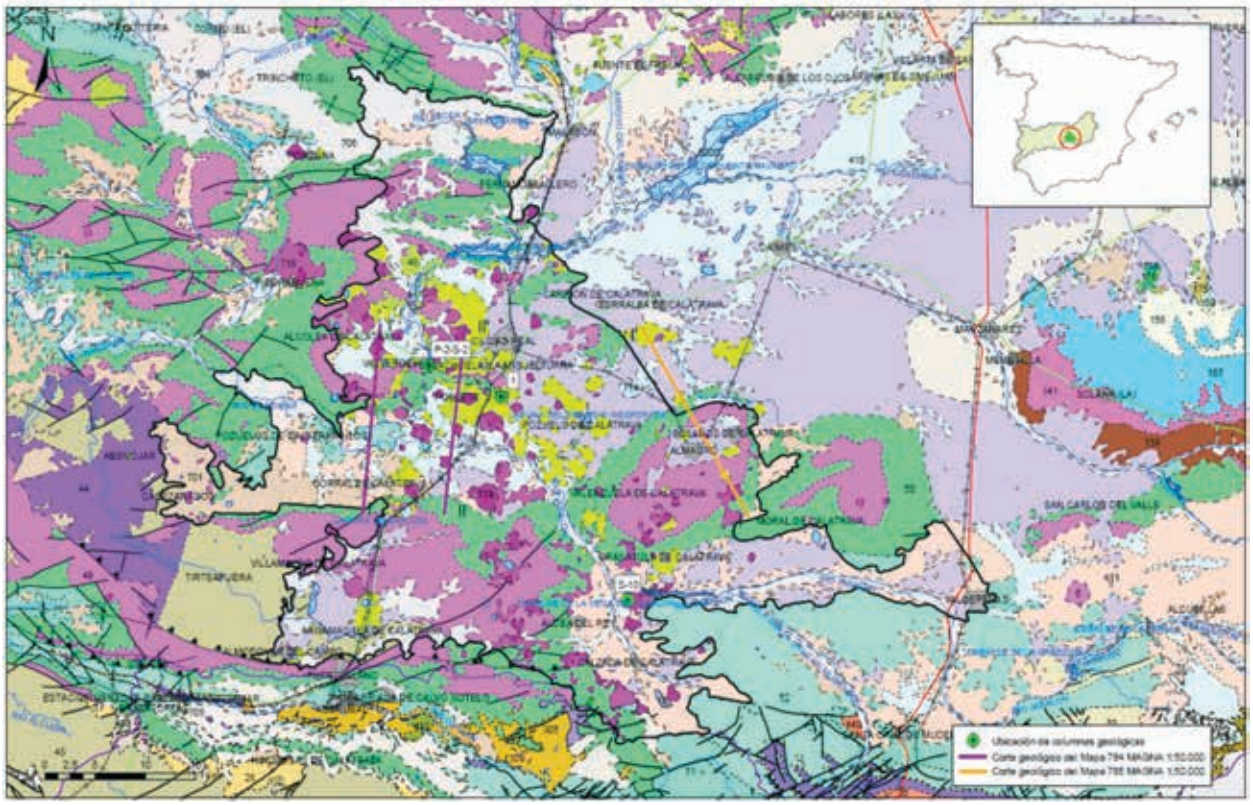


Figura 2. Mapa litoestratigráfico 041.009 Campo de Calatrava.

Figura3. Mapa de permeabilidades con especificación de acuíferos 070.003 Alcadozo

los datos de espesores se calcularon, cuando existía información, por diferencia entre las cotas del modelo digital de elevaciones del terreno y las cotas de la superficie piezométrica del acuífero. En el caso de no poder calcularse, se representaron mediante puntos con los valores calculados en un mapa, cuya base era el mapa de permeabilidades.

La información edafológica se recogió en una tabla en la que se incluyeron tanto la clasificación sistemática de los distintos tipos de suelos, como la superficie ocupada por cada tipo de suelo. En los casos en los que no existían mapas edafológicos de detalle, se optó por utilizar el mapa de suelos del IGN, a escala 1:1.000.000 (figura 4).

En el apartado correspondiente a la vulnerabilidad frente a la contaminación se recogen los valores procedentes de estudios publicados, indicando en cada caso el procedimiento de cálculo del índice, y la información gráfica disponible (figura 5).

Piezometría. Variación del almacenamiento

Se hace referencia a la red de seguimiento utilizada para el control de la piezometría en la masa (número de puntos, densidad espacial etc.) y al análisis de tendencias sobre la evolución observada en algunos piezómetros.
Dentro del apartado de *Características piezométricas*, se recoge la información básica que procede tanto de los datos de las redes de observación de piezometría actuales e históricas, como de los datos numéricos o gráficos existentes en estudios e informes de interés, para año seco y húmedo, de acuerdo con los siguientes criterios:

a) *Piezometría de referencia*: definida como aquella que corresponde a la situación menos antropizada y que más se debe asemejar al flujo natural.
b) *Recientes de estiaje:* Se consideró como periodo de estiaje el correspondiente a la situación existente al finalizar el año hidrológico, es decir septiembre-octubre, del año más reciente disponible.
c) *Reciente de periodo húmedo*: En este caso, se considera la situación que se debe encontrar en aguas altas, es decir al final del periodo de lluvias de primavera, normalmente en mayo.
d) *De año seco y de año húmedo:* Se utilizó la serie de precipitaciones de cada Demarcación para un perio-

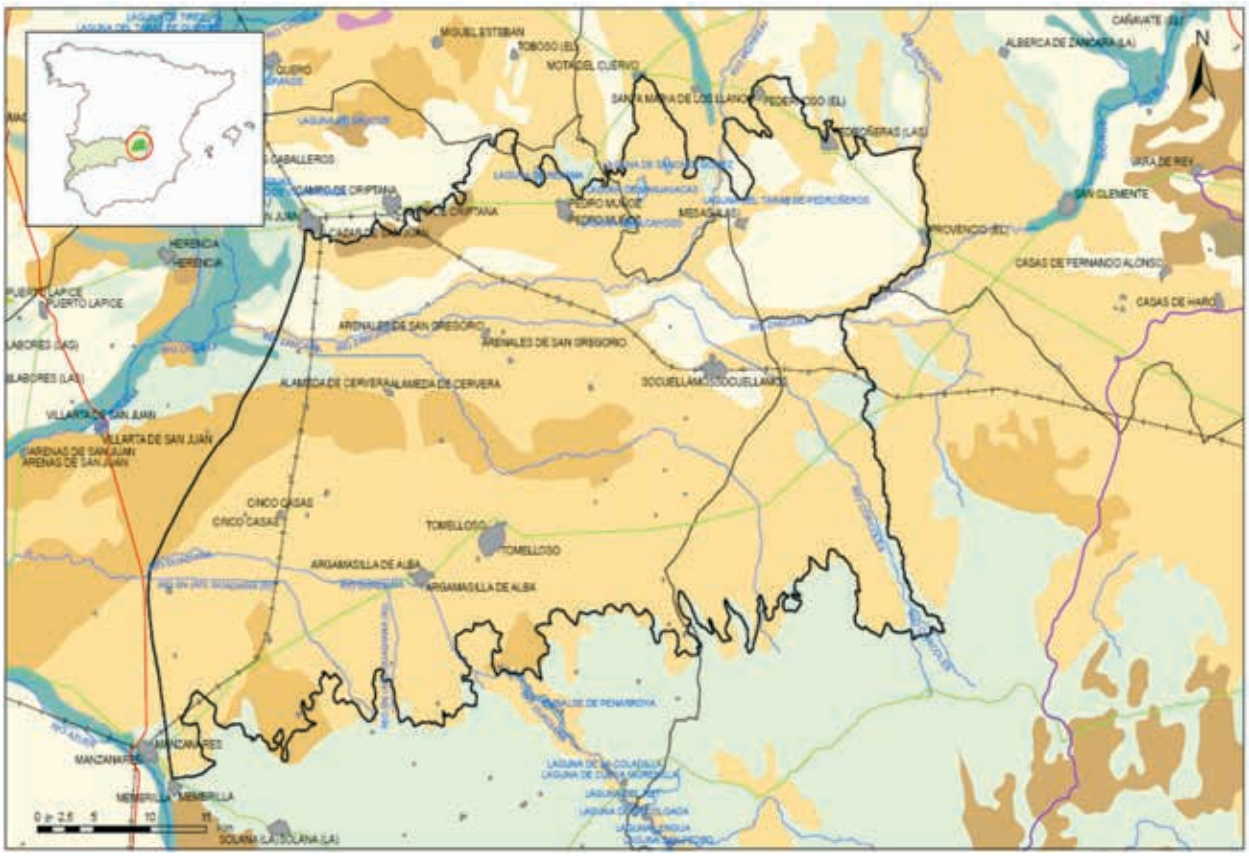


Figura 4. Mapa de suelos 041.006 Mancha Occidental II.

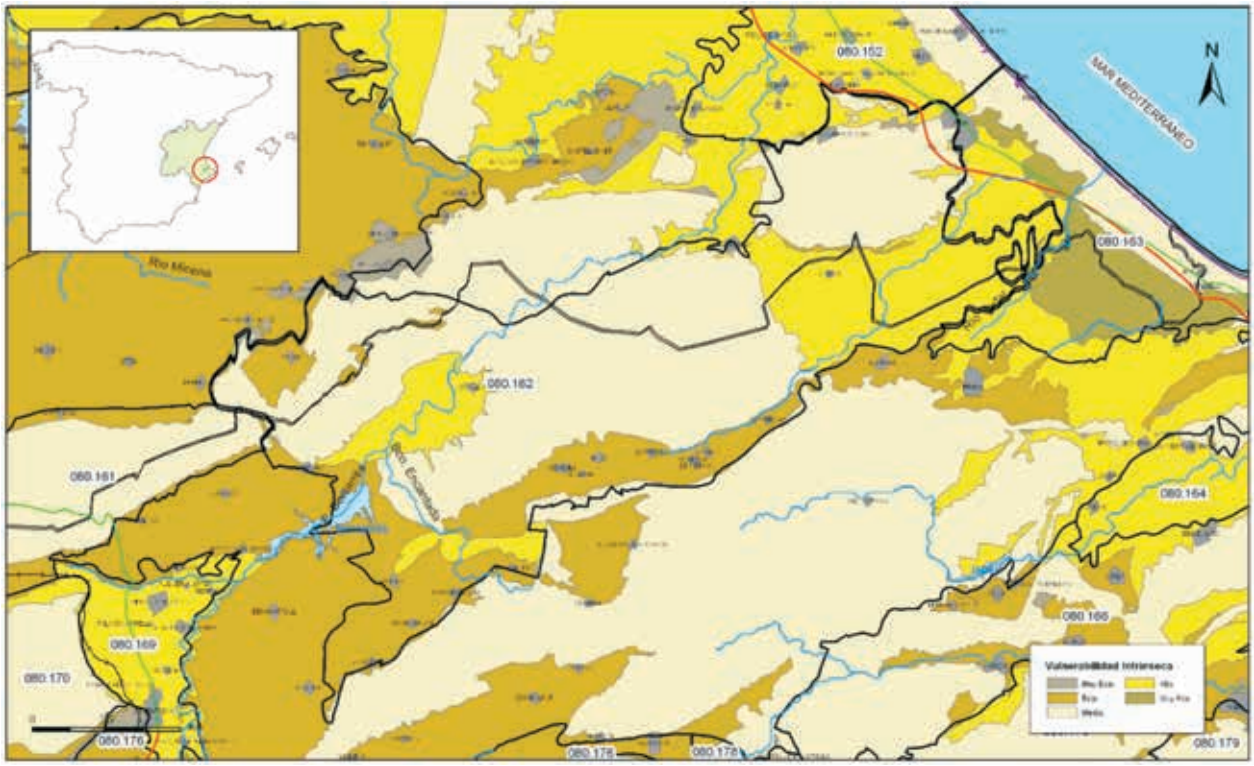


Figura5. Mapa de vulnerabilidad intrínseca 080.162 Almirante Mustalla.

do de al menos 50 años, para identificar años secos y húmedos.

Los planos de piezometría correspondientes a estos periodos o años tipo, se incluyeron en el apartado de información gráfica (figura 6).

El apartado *Estado/variación del almacenamiento* se cumplimentó, de acuerdo con los criterios de la Dirección General del Agua (DGA), mediante la representación de un índice de llenado de acuíferos para el periodo 2004-2007, utilizando los datos de piezómetros y la metodología empleada en los Informes anuales de coyuntura que realizaba el DGA y que se resume a continuación.

El índice se define para una MASA, en la que existen n piezómetros con datos. Para cada piezómetro se necesitan los valores mensuales de profundidad de nivel (h) y los valores máximos y mínimos conocidos de su historia.

De este modo se obtienen los 12 valores mensuales del índice de los n piezómetros y se calcula, para cada mes, el índice de llenado de la masas (media de los índices de un mes). Por ejemplo, para el caso de la masa de agua subterránea 080.127 Plana de Castellón, se utilizaron los datos de 12 piezómetros, durante el

Figura 6 Mapa de isopiezas año actual (2006-2007) 030.012 Madrid: Aldea del Fresno-Guadarrama.

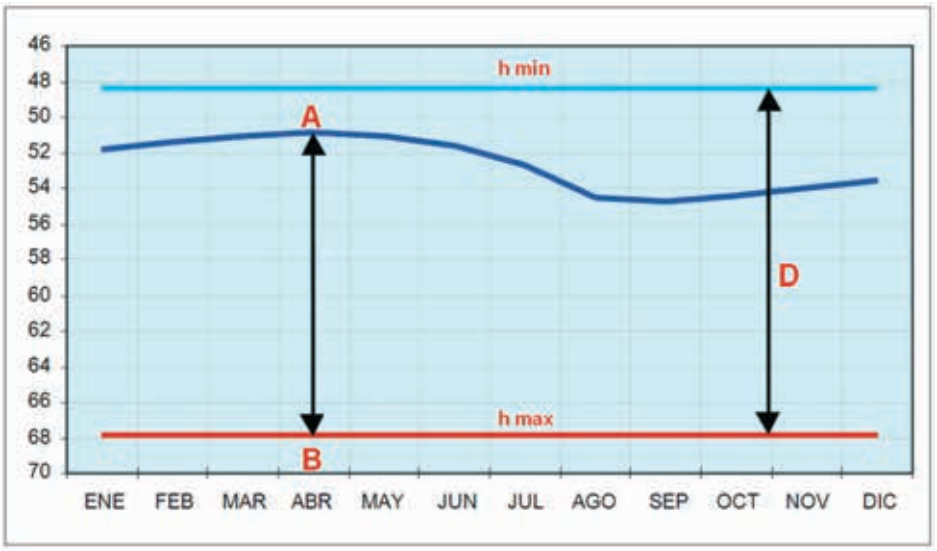


Gráfico 1. Índice de llenado

Por ejemplo: i(ABR) = índice de llenado en un piezómetro para el mes de abril (un mes cualquiera) es: i(ABR) = AB/D
h(ABR) = Profundidad del nivel de agua en el mes de abril.
h max Máxima profundidad absoluta del nivel de agua (en la historia del piezómetro)
h min Mínima profundidad absoluta del nivel de agua (en la historia del piezómetro)
AB = h max – h(ABR)
D = h max – h min

periodo 2004-2007. El índice de llenado se representa por la relación porcentual entre la situación del nivel medio de cada mes con respecto al máximo y mínimo histórico absoluto. Estos porcentajes se definen por el cociente entre la situación actual y la de máximos niveles conocidos.

En el gráfico 2, la envolvente del área rellena representa la evolución del llenado o vaciado de acuíferos, mes a mes, durante el periodo de estudio. En condiciones estables, la tendencia se correspondería con una envolvente horizontal, lo que indicaría que no hay variación de reservas de agua subterránea; no obstante, esto no ocurre nunca así ya que depende de la variación estacional intra-anual, que a su vez se manifiesta en mayor o menor grado por la climatología, extracciones de aguas subterráneas y duración interanual de los periodos secos o húmedos. Analizando el índice de llenado se observa como se manifiesta una tendencia

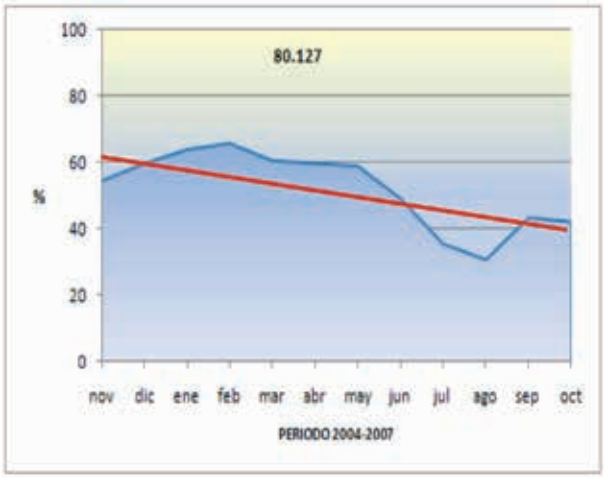


Gráfico 2. Evolución del índice de llenado. 080.127 Plana de Castellón.

de disminución del llenado, desde un 55% con respecto al máximo almacén conocido, hasta un 41%. Por lo tanto durante el periodo referido, se puede hablar de una disminución del 14%.

Sistemas de superficie asociados y ecosistemas dependientes

Debido a la complejidad y falta de información existente, el objeto de este apartado fue únicamente disponer de una relación de los espacios naturales que estuvieran o pudieran estar ligados directamente con las aguas subterráneas dentro de la masa de agua. Se recopilaron los elementos de la Red Natura 2000 (LIC's y ZEPA's) y las zonas RAMSAR. Como información gráfica se incluyó un mapa con la situación de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (figura 7).

Recarga

Con carácter general, este capítulo se cumplimentó con los datos facilitados por las distintas CC.HH. en el proceso de planificación hidrológica vigente en 2008. Como información gráfica, en el caso de la demarcación hidrográfica del Duero se incluyeron mapas de zonas de recarga de las masas en riesgo (figura 8).

Recarga artificial

De acuerdo con los criterios metodológicos establecidos, en este apartado solo se plasmaron aquellas operaciones de recarga artificial, que a la fecha de ejecución de los trabajos, disponían de autorización administrativa. Al no existir ninguna actuación con autorización , este apartado no presenta datos.

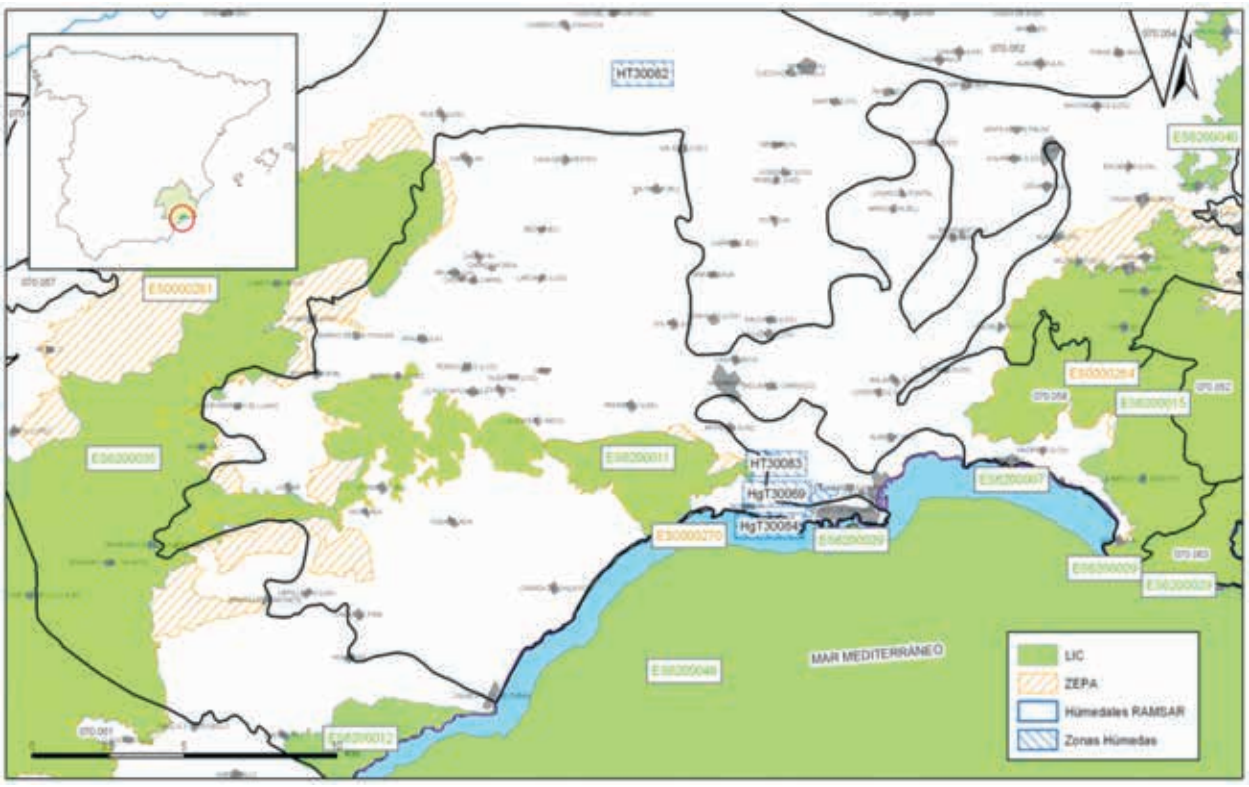


Figura 7. Mapa de situación de ecosistemas dependientes. 070.058 Mazarrón

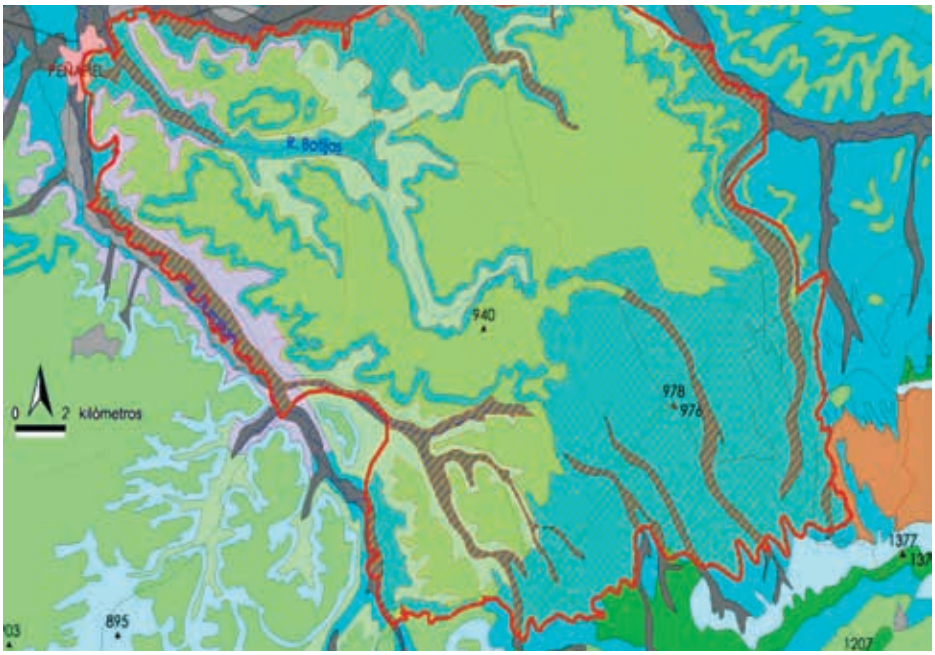


Figura 8. Ejemplo de mapa de áreas de recarga D.H. Duero.

Explotación de las aguas subterráneas

Los datos para cumplimentar este apartado, de acuerdo con las decisiones metodológicas de la DGA y el IGME, procedieron exclusivamente de las correspondientes Confederaciones Hidrográficas al ser los organismos que administran el Dominio Público Hidráulico. En algunos casos, como en la demarcación del Ebro, se presenta como información gráfica un plano con los principales puntos de extracción de cada masa, desglosados por usos (figura 9).

Calidad química de referencia

La Directiva relativa a la protección de las aguas subterráneas 2006/118/CEE, establecía dos indicadores

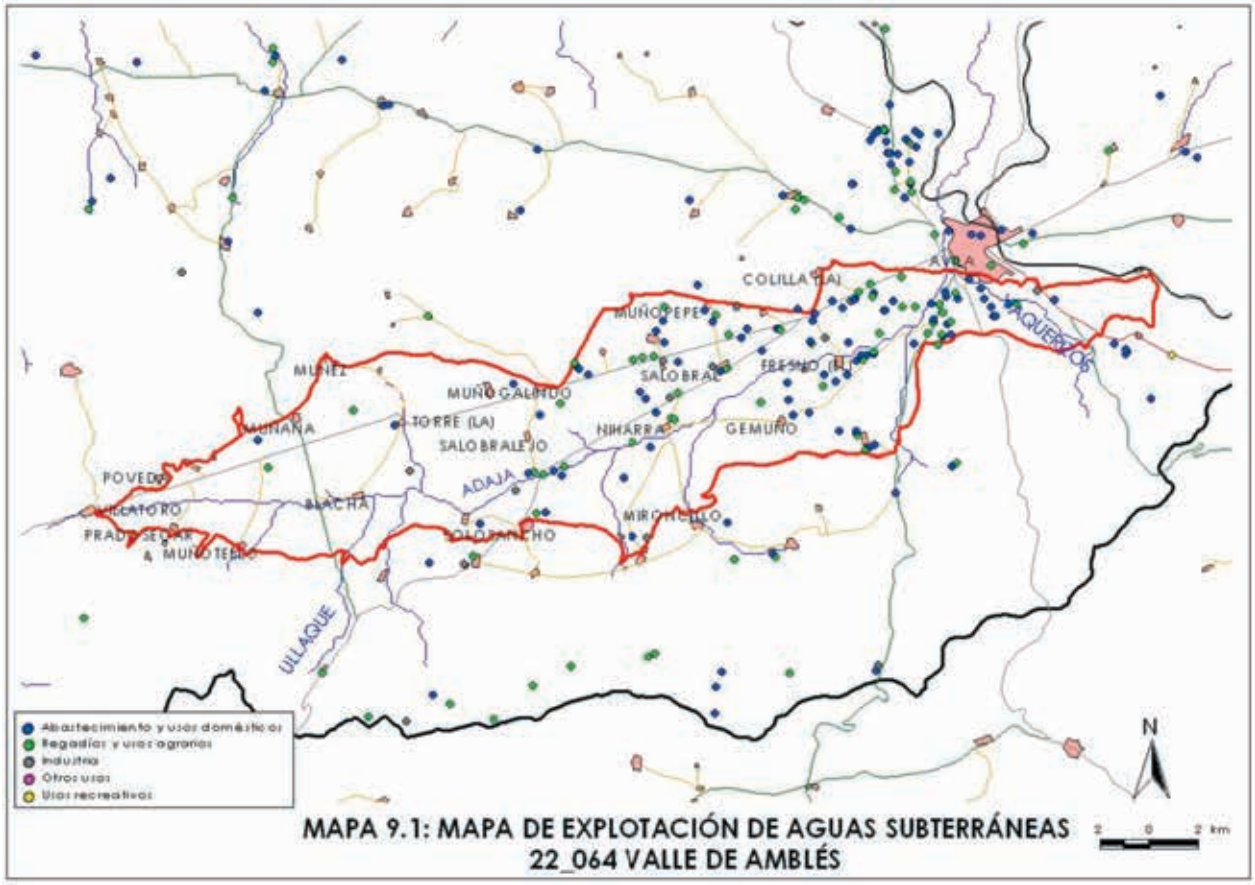


Figura 9. Ejemplo de mapa de explotación de aguas subterráneas.

que deben ser utilizados para la evaluación del estado químico y para la determinación de tendencias de contaminantes: los niveles de referencia y niveles básicos. En la ficha se distinguen tres tipos de datos: niveles de referencia, niveles básicos y estratificación del agua subterránea.

En el apartado de los *niveles de referencia* (concentraciones de sustancias, o valores de parámetros en las condiciones menos antropizadas posibles, y por tanto más parecidos a las condiciones naturales) se determinaron los valores máximo, medio, mínimo, mediana y varios percentiles de cada parámetro. Para los cálculos, realizados por la DGA, se utilizaron los datos existentes en la base de datos de calidad de esa Dirección, que incluye los procedentes del IGME, complementados con análisis recopilados en el proceso de análisis bibliográfico y que no figuraban en ninguna base de datos.

Respecto a los niveles básicos (concentración de sustancias o valores de parámetros físico-químicos que se produzcan naturalmente y como resultado de actividades humanas para las que hay que determinar tendencias significativas y sostenidas al aumento), no se pudo cumplimentar hasta disponer de los datos las redes de calidad correspondientes a los años de referencia 2007 y 2008, por lo que fueron incluidos en una actualización de marzo de 2010 de la base de datos de esta actividad.

Como información gráfica de este apartado se incluía:

Mapas de situación de puntos utilizados en la determinación de niveles de referencia y de valores de especies nitrogenadas, compuestos salinos, metales pesados y plaguicidas (ver figuras 10)

Mapa de facies hidrogeoquímicas predominantes en la masa de agua (ver figura 11)

Mapa de calidad química de referencia (figuras 12 y 13). Gráficos de evolución temporal de los parámetros hidrogeoquímicos utilizados para la realización de los mapas y diagramas de dispersión.

Evaluación del estado químico

Dentro de este apartado se recogen la información generada en relación con la determinación de valores

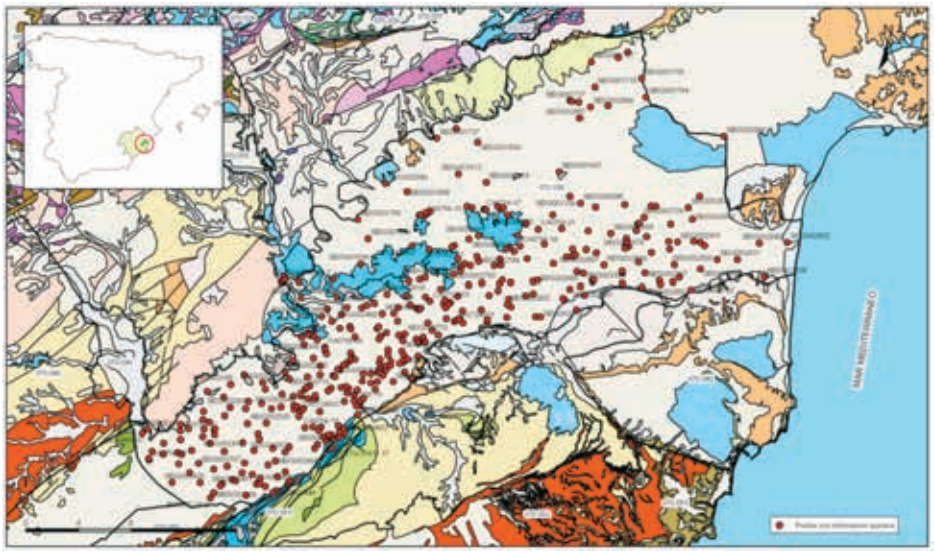


Figura 10. Mapa de situación de puntos para determinación de niveles de referencia. 070.036 Vega media y baja del Segura.

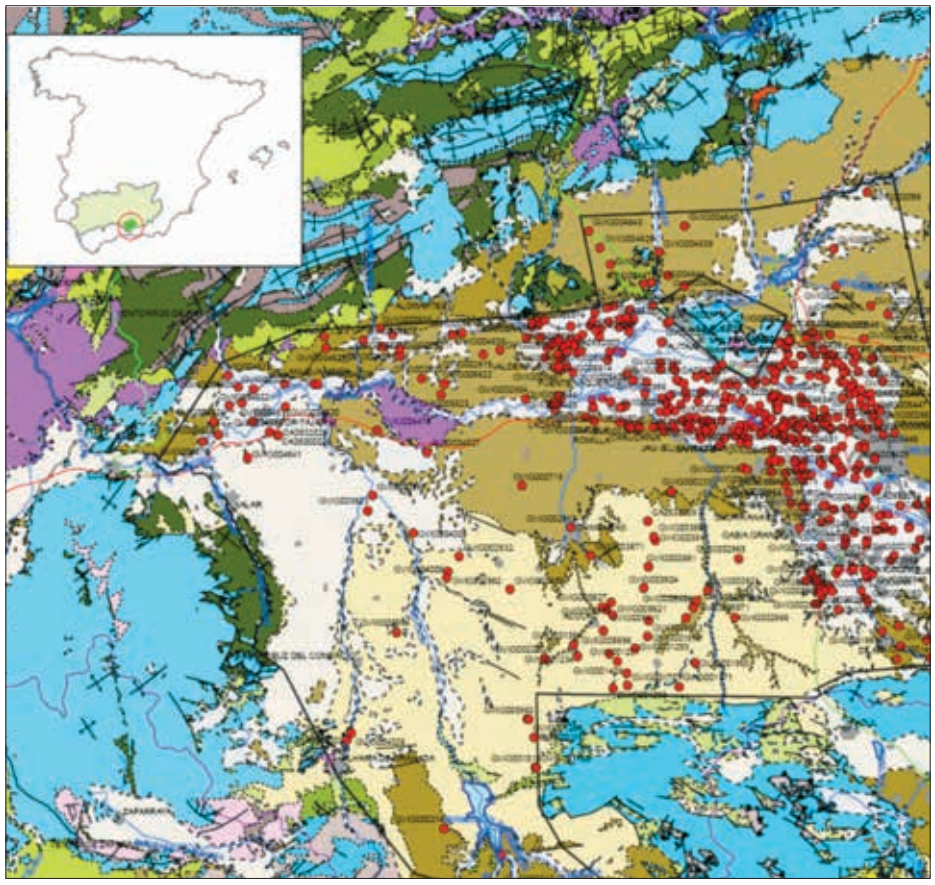
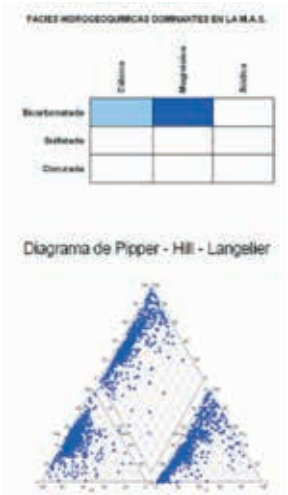


Figura 11. Mapa de facies hidroquímicas. 050.032 Depresión de Granada.



umbral y sobre la evaluación del estado químico. Esta tabla se cumplimentó tras la actualización de los datos aportados por la DGA al IGME en marzo de 2010, y por lo tanto no aparecen en las versiones anteriores a esta fecha, aunque si fue actualizada la base de datos.

La Directiva 2006/118/CE establece que se deben fijar los valores umbral únicamente para las masas de agua subterránea identificadas en riesgo químico, y para los contaminantes, grupos de contaminantes e indicadores de contaminación que contribuyen a la caracterización de la masa de agua como en riesgo (químico), teniendo en cuenta como mínimo la lista que figura en la parte B del anexo II de esta Directiva. Esto no significa que haya que establecer valores umbral para cada uno de los contaminantes de esa lista, sino solamente para aquellos que se hayan identificado como que contribuyen a que la masa de agua esté en riesgo químico.

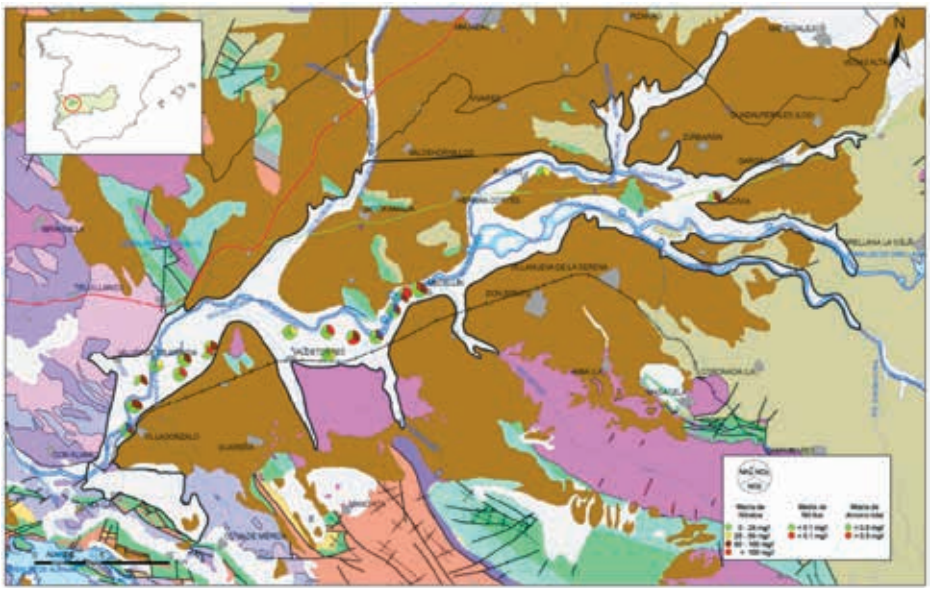


Figura12. Mapa de calidad química de referencia de compuestos nitrogenados. 041.016 Vegas Altas.

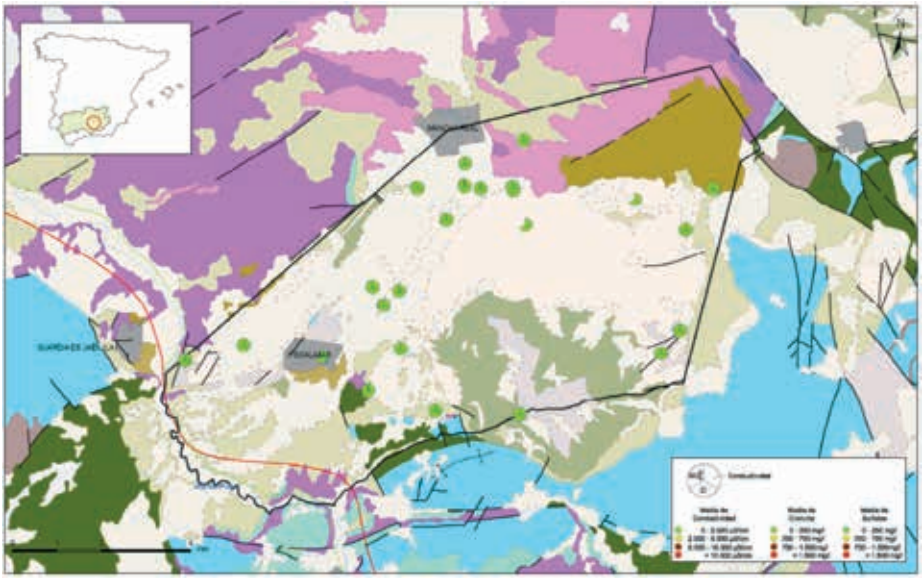


Figura 13. Mapa de calidad química de referencia (conductividad, cloruros y sulfatos) 050.019 Mancha Real-Pegalajar

Para los contaminantes nitratos, plaguicidas individuales y plaguicidas totales, la Directiva 2006/118/CE establece normas de calidad.

Para determinar las sustancias que contribuyen a generar riesgo químico en una masa de aguas subterráneas, se atendió a una serie de valores criterio, dependiendo del tipo de receptor potencial de la contaminación. De este modo, y a falta de otro se utilizaron por un lado los valores de los parámetros incluidos en el R.D. 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, *valor criterio consumo humano (CV DWS)*, y por otro los valores de referencia para los parámetros conductividad, cloruros y los sulfatos resultantes de aplicar la metodología propuesta en la *Guia sobre el estado de las aguas subterráneas y la evolución de tendencias,* en la que se indica que para este receptor el valor umbral de estos parámetros se sitúa en el nivel de referencia, *valor criterio de intrusión salina (CV INTRU)*.

La Directiva 2006/118/CE establece en su considerando 10 "Las disposiciones relativas al estado químico de las aguas subterráneas no se aplican a las situaciones en que se dan niveles naturales elevados de sustancias o iones, o de sus indicadores, contenidos en una masa de agua subterránea o en masas asociadas de aguas superficiales, debidos a condiciones hidrogeológicas específicas no incluidas en la definición de «contaminación». Asimismo tampoco se aplican a los cambios, provisionales y limitados en el espacio, de la dirección del flujo y de la composición química, que no se con-

sideran intrusiones."Además, en la parte A del anexo II establece "cuando se produzcan elevados niveles de referencia de sustancias o iones, o de sus indicadores, debidos a motivos hidrogeológicos naturales, a la hora de establecer los valores umbral se tendrán en cuenta esos niveles de referencia de la masa de agua subterránea de que se trate".

De este modo, y tras analizar los datos de la Base de Datos de Calidad de las Aguas Subterráneas del MARM, se pudo cumplimentar la tabla relativa a los valores umbral definidos, indicando las sustancias para las que se han definido, el valor de los mismos, el receptor (valor criterio) y si contribuía a generar riesgo, ya sea por no atribuirse a motivos naturales o por tener un desarrollo amplio en la masa.

El apartado de evaluación del estado químico se cumplimentó igualmente tras la actualización de los datos aportados por la DGA al IGME en febrero, a partir de los datos de las redes de seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas para aquellas sustancias para las que las CCHH establecieron que contribuían a generar riesgo. En la tabla correspondiente a este apartado se recoge tanto la sustancia que genera riesgo por superar la norma de calidad (caso de nitratos y plaguicidas) o los valores umbral definidos para la masa en la tabla anterior, y a los que se le atribuye riesgo. Se recoge asimismo el valor medio, máximo y mínimo detectado del parámetro, el año de los datos utilizados de la red, el número de estaciones utilizadas, el número de análisis, y el número de estaciones en los que se han superado el valor umbral o la norma de calidad correspondiente.

Determinación de tendencias de contaminantes

Para la evaluación del estado químico y de tendencias de las masas de agua subterráneas, se tuvieron en cuenta solamente los resultados de la red de seguimiento del estado químico de las aguas subterráneas definida en virtud del artículo 8 de la Directiva 2000/60/CE, cuyos resultados se compararon con los valores umbral establecidos y las normas de calidad para nitratos y plaguicidas establecidas en la Directiva 2006/118/CE, como se explica gráficamente en la figura 14.

Los datos, tras el tratamiento estadístico realizado por la DGA en 2010, permitieron cumplimentar la tabla y actualizar la base de datos recogiendo: los contaminantes que superan los valores umbral o la norma de calidad correspondiente, el número de estaciones pertenecientes a la red y el número de muestras utilizados en cada año con datos disponibles, los valores medio, máximo y mínimo de cada año con datos, y para cada año el número de estaciones en los que el valor medio supera el 75% del valor umbral o la norma de calidad.

Usos del suelo

En este apartado se utilizó la información existente en el proyecto Corine Land Cover 2000, por ser la información más actualizada disponible ejemplo en la figura 15.

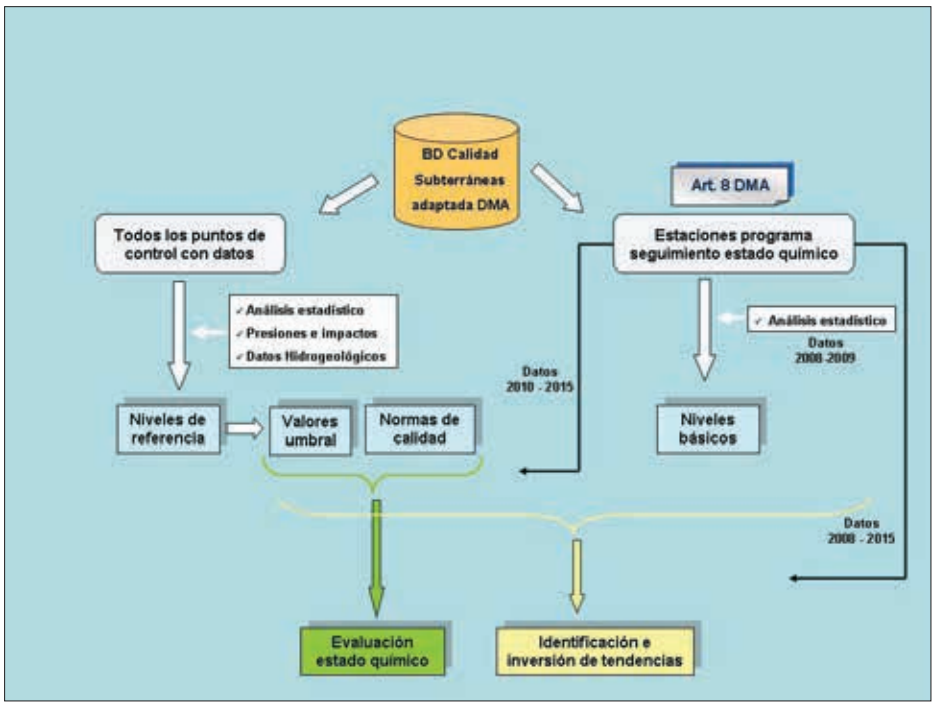


Figura 14. Diagrama resumen de las actuaciones para la determinación del estado químico e identificación e inversión de tendencias

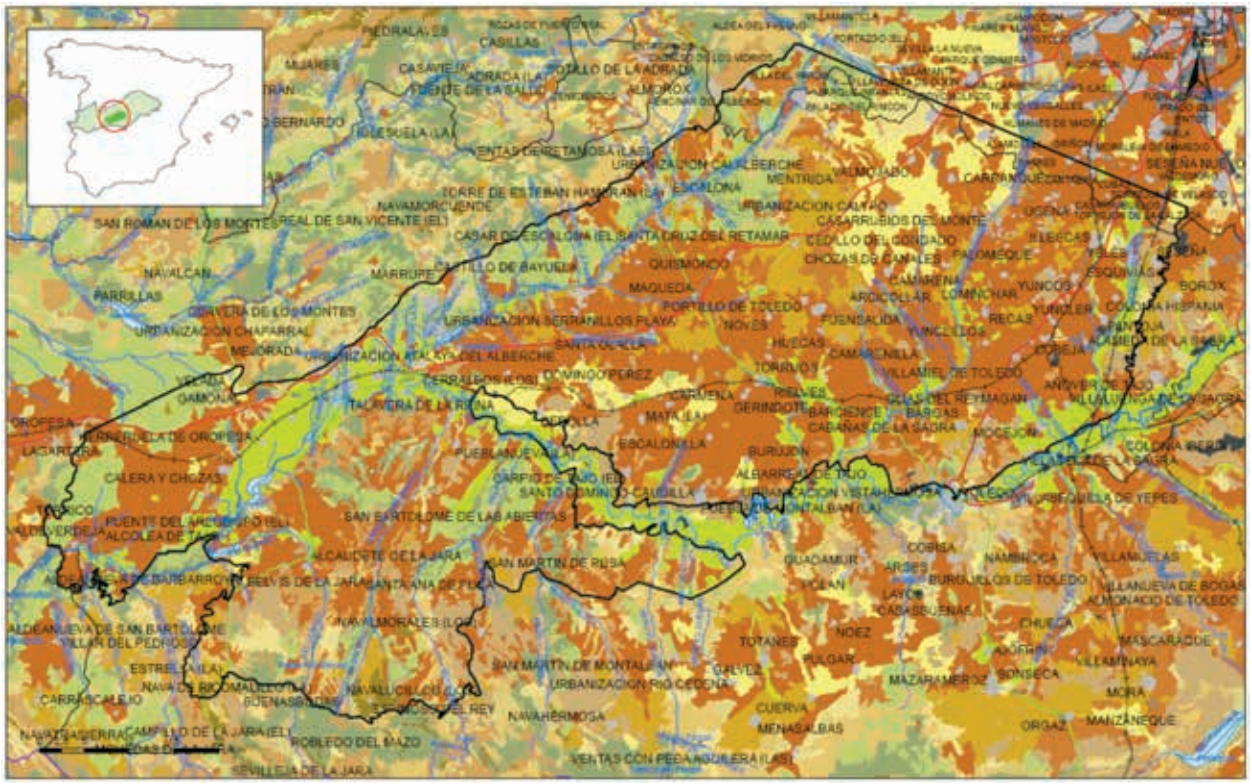


Figura15. Mapa de usos del suelo. 030.015 Talavera.

Fuentes significativas de contaminación

Para las fuentes puntuales de contaminación la información procedió fundamentalmente del IMPRESS de aguas superficiales (base de datos DATAGUA sobre impactos y presiones), realizado por el MARM para dar cumplimiento al artículo 5 de la DMA en marzo de 2007. El motivo de utilizar esta fuente de información es la ausencia de coberturas de puntos en el IMPRESS de aguas subterráneas. En todas las demarcaciones siempre se ha utilizado la información recogida en las bases de datos de balsas y escombreras mineras del IGME. Como criterio general se consideró que las presiones sobre las aguas superficiales también representan presiones sobre las aguas subterráneas. Sin embargo hay que indicar que para la elaboración del IMPRESS de aguas superficiales se utilizaron umbrales concretos para definir los impactos sobre las aguas superficiales (como por ejemplo la distancia a cauces), que no son coherentes con los criterios que se deben seguir para las aguas subterráneas.

Para las fuentes difusas**,** la principal fuente de información fue Corine Land Cover 2000, calculando, para cada tipo de presión, la superficie en hectáreas ocupada en la masa, así como el porcentaje de superficie que ocupa dentro de la misma.

Otras presiones

En este apartado se recogen otras actividades susceptibles de generar impactos sobre las aguas subterráneas. Se consideraron principalmente las modificaciones morfológicas de cauces o cursos fluviales (encauzamientos, azudes, presas) y en el caso de la demarcación del Júcar, los sectores de las masas costeras en las que se ha identificado sobreexplotación con procesos asociados de intrusión marina por altas concentraciones de cloruros o la presencia de la superficie piezométrica bajo la cota del nivel del mar. La información utilizada procedió de la base DATAGUA del MARM, del IMPRESS y la facilitada por las propias Confederaciones.

RESULTADOS OBTENIDOS

Para cumplimentar la información requerida en la caracterización adicional se diseñó una base de datos en Access 2007 para cada demarcación hidrográfica, capaz de recoger los datos alfanuméricos e información gráfica, con un formato similar al de la ficha y con capacidad de futuras actualizaciones como las realizadas en 2010 en los apartados 10, 11 y 12.

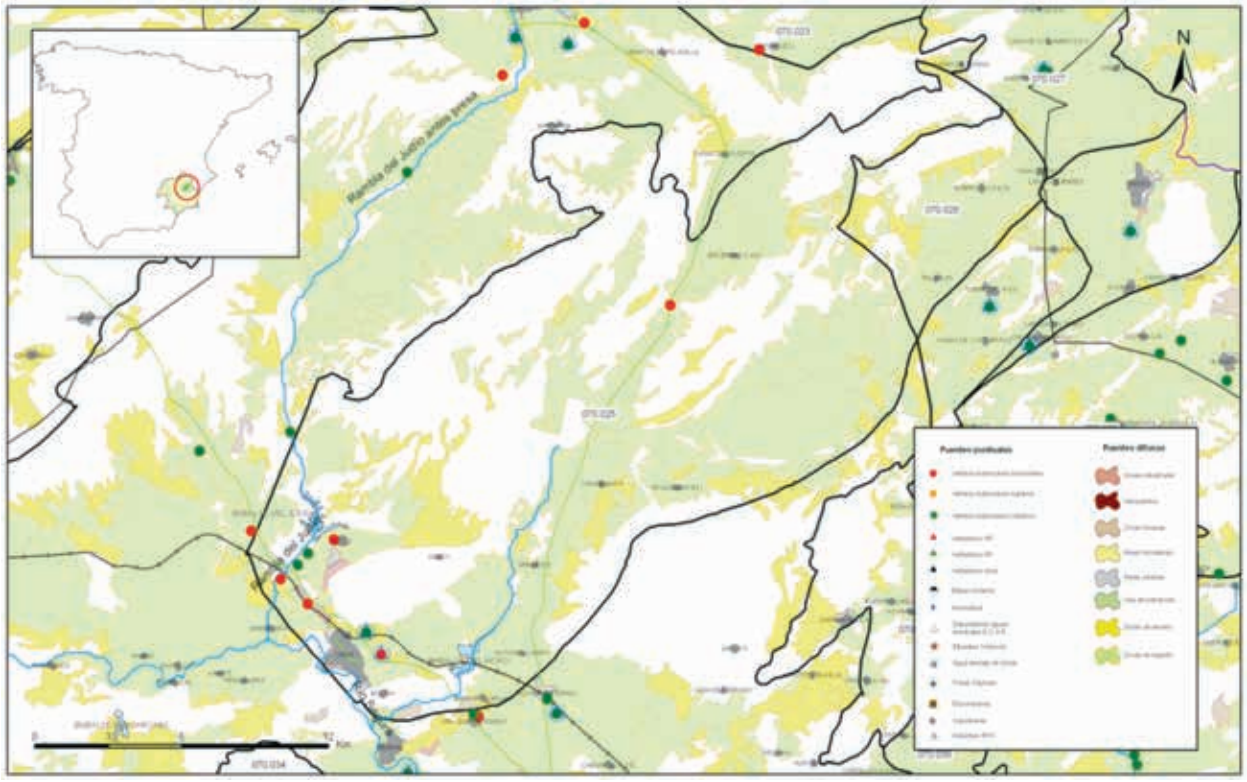


Figura 16. Ejemplo del mapa de fuentes significativas de contaminación. 070.025 Ascoy-Sopalmo

Para el diseño se prestó especial interés a la información bibliográfica relativa a cada uno de los apartados de la ficha de caracterización, facilitando los estudios futuros, de una manera más ágil y efectiva. Con el objeto de poder unir, si fuese preciso, todas las bases, se diseñó con códigos que permiten identificar de forma inequívoca los diferentes datos correspondientes a cada una de las masas.

Los trabajos de apoyo a la caracterización adicional se realizaron para un total de 232 masas de agua subterránea en las 8 demarcaciones hidrográficas intercomunitarias, que a fecha de enero de 2008, se consideraban en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015.

El grado de cumplimentación de los distintos apartados de la ficha de caracterización adicional se refleja en los siguientes cuadros, elaborados a modo de resumen al final de la actividad en octubre de 2008. En ellos, se aprecia tanto el número de masas en riesgo, como el motivo del mismo, y el grado de detalle alcanzado en la ficha. La leyenda es la siguiente:

Leyenda de las claves color de los cuadros resumen

- Realizado con grado de detalle aceptable, excepto recarga artificial por no existir concesión administrativa.
- Realizado con carencias importantes debido a escasez de información.
- Realizado por DGA-MARM. Actualizado en la base de datos en febrero 2010.
- No realizado por ser competencia de las CCHH (indicación MARM).
- Realizado al ser facilitados los datos por las CCHH.
- No realizado por tener la masa riesgo exclusivamente químico.
- No realizado por falta de datos.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL MIÑO-SIL																					
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL															
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																	
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
011.004	Cubeta del Bierzo		x																		
011.005	Aluvial del Bajo Miño		x																		

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO																					
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL															
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																	
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
7	Terc y Cuat. del Esla-Cea		X																		
9	Tierra de Campos		X																		
16	Castrojeriz		X																		
20	A. Pisuerga-Arlanzón		X																		
25	Páramo de Astudillo		X																		
28	Verín	X																			
29	Páramo de Esgueva		X		X																
30	Aranda de Duero	X	X		X																
31	Villafáfila		X																		
32	Páramo de Torozos	X	X																		
37	Cuenca de Almazán		X																		
38	Tordesillas		X																		
39	A.Duero: Aranda-Tordesi		X																		
41	A.Duero:Tordesillas-Zam		X																		
43	Páramo de Cuéllar		X		X																
44	Páramo de Corcos		X																		
45	Los Arenales		X		X																
47	Medina del Campo		X		X																
48	Tierra del Vino		X		X																
52	Salamanca	X	X																		
55	Cantimpalos		X																		
59	Fuente de San Esteban		X																		
64	Valle de Amblés		X																		

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO																					
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL															
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																	
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
030.006	Guadalajara		X																		
030.007	Aluvial Jarama-Tajuña		X																		
030.008	La Alcarria		X																		
030.010	Madrid:Manza.-Jarama		X		X																
030.011	Madrid:Guadar.-Manz.		X		X																
030.012	Madrid:A.Fresno-Guad.		X		X																
030.013	A. Tajo: Zorita-Aranjuez		X		X																
030.015	Talavera		X																		
030.016	A.Tajo:Toledo-Montea.		X																		

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
030.017	A.Tajo:Aranjuez-Toledo		X		X															
030.018	Ocaña		X																	
030.019	Moraleja		X																	
030.022	Tiétar		X		X															
030.024	A.Jarama:Mad.-Guadal.		X		X															
041.001	Sierra de Altomira		X																	
041.003	Lilo-Quintanar		X																	
041.004	Consuegra - Villacañas		X																	
041.005	Rus-Valdelobos		X		X															
041.006	Mancha Occidental II		X		X															
041.007	Mancha Occidental I				X															
041.008	Bullaque		X																	
041.009	Campo de Calatrava		X																	
041.010	Campo de Montiel				X															
041.011	Aluvial del Jabalón		X																	
041.012	Aluvial del Azuer		X																	
041.013	Los Pedroches		X																	
041.015	Vegas Bajas		X		X															
041.016	Vegas Altas		X																	
041.017	Tierra de Barros		X																	
041.018	Zafra-Olivenza		X																	
041.020	Ayamonte		X	X	X															

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
041.001	Sierra de Altomira		X																	
041.003	Lilo-Quintanar		X																	
041.004	Consuegra - Villacañas		X																	
041.005	Rus-Valdelobos		X		X															
041.006	Mancha Occidental II		X		X															
041.007	Mancha Occidental I				X															
041.008	Bullaque		X																	
041.009	Campo de Calatrava		X																	
041.010	Campo de Montiel				X															
041.011	Aluvial del Jabalón		X																	
041.012	Aluvial del Azuer		X																	
041.013	Los Pedroches		X																	
041.015	Vegas Bajas		X		X															
041.016	Vegas Altas		X																	
041.017	Tierra de Barros		X																	
041.018	Zafra-Olivenza		X																	
041.020	Ayamonte		X	X	X															

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0501	Sierra de Cazorla				X								*							
0504	Huescar-Puebla D. Fadrique				X															
0505	Sierra de la Zarza				X															
0506	Orce-Maria-Cullar				X															
0507	AhilloCaracolera -San Pedro				X															
0508	Sierra Estancias		X																	
0509	Baza-Caniles				X															
0512	Guadix Marquesado				X															
0513	El Mencal		X																	
0514	Bedmar-Jodar				X															
0515	Torres-Jimena		X																	
0516	Jabalcuz				X															
0517	Jaén				X															
0518	San Cristóbal				X															
0519	Mancha Real-Pegalajar				X															
0522	Mentidero-Montesinos				X															
0523	Ubeda		X																	
0524	Bailén-Guarromán		X																	
0525	Rumblar		X																	
0526	A. Guadalquivir (curso alto)		X																	
0527	Porcuna		X																	
0528	Montes Orientales		X																	
0532	Depresión de Granada		X																	
0533	Sierra Elvira		X																	
0535	Cabra-Gaena		X																	
0536	Rute-Horconera		X																	
0538	Pedroso-Arcas		X		X															
0541	Guadahortuna-Larva				X															
0543	Sierra de Estepa		X		X															
0544	Altiplano de Ecija		X																	
0546	A. Guadalquivir (curso medio)		X																	
0547	Sevilla-Carmona	X	X		X															
0548	Arahal-Coronil-Morón-P.Cazalla		X																	
0549	Niebla-Posadas		X		X															
0550	Aljarafe				X															
0551	Almonte-Marismas		X																	
0552	Sierra de Lebrija		X		X															
0568	Puente Genil-La Rambla-Montilla		X																	
0569	Osuna		X																	
0571	C. de Montiel				X															

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
070.001	Corral Rubio		X		X															
070.002	Sinclinal de la Higuera				X															
070.003	Alcadozo				X															
070.004	Boquerón		X		X															
070.005	Tobarra-Teder-Pinilla			X	X															
070.007	Conejeros-Albatana				X															
070.008	Ontur				X															
070.009	Sierra de la Oliva				X															
070.011	Cuchillos-Cabras		X		X															
070.012	Cingla			X	X															
070.021	El Molar				X															
070.023	Jumilla-Yecla				X															
070.024	Lacera				X															
070.025	Ascoy-Sopalmo		X		X															
070.026	El Cantal-Viña Pi				X															
070.027	Serral-Salinas				X															
070.028	Baños de Fortuna			X	X															
070.029	Quibas			X	X															
070.030	Sierra del Argallet		X																	
070.031	Sierra de Crevillente				X															
070.032	Caravaca				X															
070.033	Bajo Quípar		X																	
070.034	Oro Ricote				X															
070.035	Cuaternario de Fortuna		X																	
070.036	Vega media del Segura		X																	
070.039	Bullas				X															
070.040	Sierra Espuñaa				X															
070.041	Vega alta del Segura		X																	
070.042	Terciario Torrevieja		X		X															
070.047	Triásico Sierra Espuña				X															
070.048	Santa Yéchar				X															
070.049	Aledo				X															
070.050	Bajo Guadalentín		X		X															
070.051	Cresta del Gallo		X		X															
070.052	Campo de Cartagena		X		X															
070.053	Cabo Roig			X	X															
070.054	Triásico de los Victoria			X	X															
070.055	Triásico Carrascoy				X															
070.056	Sierra de las Estancias				X															
070.057	Alto Guadalentín	X			X															
070.058	Mazarrón			X	X															
070.059	Enmedio-Cabezo Jara				X															
070.060	Las Norias				X															
070.061	Águilas		X	X	X															
070.062	Sierra de Almagro				X															
070.063	Sierra de Cartagena	X			X															

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
080.106	Plana de Cenia				X															
080.107	Plana de Vinaroz		X	X	X															
080.110	Plana Oropesa-Torrebl		X	X																
080.127	Plana de Castellón		X	X	X															
080.128	Plana de Sagunto		X	X	X															
080.129	Mancha Oriental				X															
080.130	Medio Palancia				X															
080.131	Liria-Casinos		X		X															
080.140	Buñol-Cheste		X		X															
080.141	Plana Valencia Norte		X	X																
080.142	Plana de Valencia Sur		X																	
080.143	La Contienda				X															
080.144	Sierra del Ave				X															
080.148	Hoya de Játiva		X		X															
080.149	Sierra de las Agujas		X																	
080.151	Plana de Jaraco			X	X															
080.152	Plana de Gandía		X	X																
080.155	Valle de Albaida				X															
080.157	Sierra de la Oliva				X															
080.158	Cuchillo-Moratilla				X															
080.159	Rocín				X															
080.160	Villena-Benejama				X															
080.161	Volcadores-Albaida				X															
080.162	Almirante-Mustalla		X																	
080.163	Oliva-Pego		X	X	X															
080.164	Ondara-Denia		X	X	X															
080.165	Montgó		X		X															
080.166	Peñón- Bernia		X		X															
080.169	Muro de Alcoy				X															
080.170	Salt San Cristóbal				X															
080.171	Sierra Mariola				X															
080.172	Sierra de Lácera				X															
080.173	Sierra de Castellar				X															
080.174	Peñarrubia				X															
080.175	Hoya de Castalla				X															
080.176	Barrancones-Carrasque				X															
080.178	Serella-Aixorta-Algar				X															
080.179	Depresión de Benisa				X															
080.180	Jávea			X	X															
080.181	Sierra de Salinas				X															
080.182	Argüeña-Maigmó				X															
080.184	San Juán-Benidorm		X		X															
080.185	Agost-Monnegre				X															
080.186	Sierra del Cid				X															
080.187	Sierra del Reclot				X															
080.188	Sierra de Argallet				X															
080.189	Sierra de Crevillente				X															
080.190	Bajo Vinalopó			X	X															

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO																				
MASb		En riesgo				Apartados de la ficha de CARACTERIZACIÓN ADICIONAL														
N.º	Nombre	Químico		Cuantitativo																
		Pun	Dif	Intr	Extr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
090.002	Páramo de Sedano- Lora	X																		
090.009	Aluvial Miranda de Ebro	X	X																	
090.012	Aluvial de Vitoria		X																	
090.029	Sierra de Alaiz	X																		
090.030	Sinclinal Jaca-Pamplona	X																		
090.043	Aluvial del Oca		X																	
090.044	Aluvial del Tirón		X																	
090.045	Aluvial del Oja		X																	
090.047	Aluvial del Najerilla-Ebro	X	X																	
090.048	Aluvial Rioja-Mendavia	X	X																	
090.049	A. Ebro: Lodosa-Tudela		X																	
090.050	Aluvial del Arga Medio		X																	
090.051	Aluvial del Cidacos		X																	
090.052	A. Ebro:Tudela-Alagón		X																	
090.053	Arbas		X																	
090.054	Saso de Bolea-Ayerbe		X																	
090.055	Hoya de Huesca		X																	
090.056	Sasos de Alcanadre		X																	
090.057	Aluvial del Gállego		X																	
090.058	Aluvial Ebro: Zaragoza	X	X																	
090.060	Aluvial del Cinca	X	X																	
090.061	Aluvial del Bajo Segre		X																	
090.062	Aluviall Medio Segre		X																	
090.063	Aluvial de Urgell		X																	
090.064	Calizas de Tárrega		X																	
090.067	Detrítico de Arnedo	X																		
090.075	Campo de Cariñena		X																	
090.076	Pliocuaternario Alfamén		X																	
090.077	Mioceno de Alfamén		X		X															
090.079	Campo de Belchite		X																	
090.080	Cubeta de Azuara		X																	
090.081	Aluvial jalón Jiloca		X																	
090.086	Páramos del Alto Jalón	X																		
090.087	Gallocanta		X																	
090.088	Monreal-Calamocha		X																	
090.089	Cella-Ojos de Monreal		X																	
090.091	Cubeta de Olite		X																	
090.092	Aliaga-Calanda	X																		
090.101	Aluvial de Tortosa		X																	
090.102	Plana de Galera		X																	
090.103	Mesozoico Galera		X																	
090.104	Sierra de Montsiá		X																	

Además de cumplimentar la ficha de caracterización adicional, en algunas demarcaciones hidrográficas, se realizaron trabajos complementarios de campo con el objeto de obtener datos nuevos en algunos de los apartados donde las carencias eran significativas. Debido al escaso tiempo disponible para realizar esta actividad, hubo que hacer una selección de los trabajos de campo a realizar, en coordinación con las correspondientes Confederaciones Hidrográficas. Las actuaciones llevadas a cabo fueron:

TRABAJOS COMPLEMENTARIOS DE CAMPO		
Demarcación	**MASb**	**Tipo de trabajos**
Júcar	080.143 La Contienda	Mejora del inventario de puntos de agua, medidas piezométricas y de calidad
	080.148 La Hoya de Xátiva	
	080.188 Sierra de Argallet	
Segura	070.024 Lácera	Toma de muestras y análisis en directo sectorde la MASb en estudio "Cuenca del Sil".
	070.026 El Cantal-Viña Pi	
	070.030 Sierra de Argallet	
	070.033 Bajo Quípar	
	070.035 Cuaternario de Fortuna	
	070.060 Las Norias	
	070.062 Sierra de Almagro	
Tajo	030.013 Aluvial del Tajo: Zorita de los Canes-Aranjuez	Inventario de puntos de agua y medidas de nivel para mapa de isopiezas en época de estío.
	030.016 Aluvial del Tajo: Toledo-Montearagón	
Guadiana	041.009 Campo de Calatrava	Identificación y caracterización de los abastecimientos urbanos con aguas subterráneas no contemplados por la Oficina de Planificación
	041.013 Los Pedroches	
	041.018 Zafra-Olivenza	
Guadalquivir	En 40 MASb de la demarcación	Toma de muestras y análisis en 114 captaciones de aguas subterráneas repartidas de la demarcación hidrográfica
Miño-Sil	MASb de la demarcación	Toma de muestras y análisis

RESULTADOS OBTENIDOS POR DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA

En este apartado se muestra un resumen de los aspectos más significativos que se obtuvieron en cada una de las Demarcaciones intercomunitarias en las que se llevaron a cabo los trabajos de caracterización adicional en las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015.

Demarcación Hidrográfica del Júcar

En general, el estado de la información disponible sobre las masas de agua subterránea en riesgo es aceptable en lo que respecta a aspectos de identificación, características geológicas básicas, usos del suelo y presiones causadas por modificaciones morfológicas de cauces. Sin embargo en cuanto a las características hidrogeológicas, la piezometría, las características de la zona no saturada y la calidad, existe un desfase entre las masas que han estado sujetas a un aprovechamiento histórico de sus recursos (masas costeras, y con una amplia ocupación antrópica como las planas y las vegas de los ríos) y aquellas masas de interior de menor entidad y situadas en parajes más inhóspitos. En las primeras se dispone normalmente de información adecuada procedente de estudios destinados a la gestión y explotación de los recursos, así como de las redes de control de calidad y piezometría. Sin embargo entre las segundas se ha detectado una importante carencia e incluso ausencia absoluta de datos básicos de piezometría y calidad. Las masas en las que la ausencia de información relacionada con la piezometría y calidad es más palpable, y en las que se debería hacer un esfuerzo enfocado a la obtención de datos mínimos que permitan hacer un seguimiento de la evolución son:

A escala de Demarcación, se deduce que los principales problemas de calidad están principalmente relacionados con las sales (cloruros y sulfatos generalmente) debido tanto a procesos de intrusión marina en las masas costeras, como a la influencia de litologías evaporíticas en las masas de interior, aunque en el caso de problemas por sulfatos aparte de una posible influencia natural (litoló-

gica) en todos los casos hay que tener en cuenta que la actividad agrícola, mediante la aplicación de fitosanitarios, puede suponer importantes aportes de sulfatos.

Otro de los problemas de calidad más generalizados es por concentraciones elevadas en nitratos. Tal es el caso de las masas: 080.129 Mancha Oriental, 080.130 Medio Palancia; 080.143 La Contienda, 080.151 Plana de Jaraco, en las que se detectan problemas más o menos generalizados.

También hay masas con problemas puntuales por nitritos en las que posiblemente se están produciendo, o en algún momento se han producido, vertidos urbanos o domésticos en la proximidad de los puntos de muestreo. Solo se han detectado anomalías zonales por esta sustancia en la masa 080.141 Plana de Valencia Norte.
En cuanto a la contaminación por plaguicidas, solo se han detectado problemas puntuales en las masas 080.127 Plana de Castellón y 080.131 Liria-Casinos, aunque hay que destacar el elevado número de masas en las que no se cuenta con datos o estos son insuficientes para poder establecer conclusiones, tabla 1.

Código	Nombre	Carencia de información		Tipo de riesgo
		Piezometría	Calidad	
080.143	La Contienda		x	Cuantitativo
080.148	Hoya de Játiva	x	x	Químico (difuso)/ Cuantitativo
080.158	Cuchillo-Moratilla	x	x	Cuantitativo
080.159	Rocín	x		Cuantitativo
080.165	Montgó	x	x	Químico (difuso)/ Cuantitativo
080.172	Sierra de Lácera	x	x	Cuantitativo
080.188	Triásico de Sierra Espuña	x	x	Cuantitativo
080.190	Bajo Vinalopó		x	Cuantitativo

Tabla 1. Masas con carencia importante de información

En menor medida, se detectan problemas relacionados con metales pesados, especialmente mercurio, y el metaloide selenio. En cuanto al mercurio solo se ha podido establecer una posible influencia natural en el caso de la Plana de Castellón, gracias a un estudio del IGME de 2007 donde se indica la posibilidad de que dicho mercurio tenga un origen relacionado con las mineralizaciones de la sierra de Espadán, aunque su removilización desde el acuífero tenga una componente antrópica relacionada con arrastres provocados por altos regimenes de bombeos. En relación con el selenio, su origen más probable está relacionado con el uso de fertilizantes fosfatados y una posterior concentración a través de los retornos de riego. Esta hipótesis adquiere relevancia si se tiene en cuenta que la mayor parte de las masas en las que se han encontrado valores por encima de los 10 µg/L corresponden a planas litorales y acuíferos detríticos de interior en los que se desarrolla una importante actividad agrícola. Tal es el caso de las planas de Vinaroz, Oropesa-Torreblanca, Castellón, Sagunto, Valencia, Ondara-Denia y Bajo Vinalopó, y las masas no costeras de Buñol-Cheste, Hoya de Játiva, Líria-Casinos, Sierra de Las Agujas y Almirante-Mustalla.

En relación con los aspectos cuantitativos, en general se observa en todas las masas en riesgo cuantitativo hay una tendencia a los descensos del índice de llenado, que indica un vaciado de la masa. Los descensos piezométricos más significativos se dan en las masas: 080.129 Mancha Oriental, 080.160 Villena-Benejama, 080.171 Sierra Mariola, 080.173 Sierra del Castellar y 080.182 Argueña-Maigmó, mientras que el índice de variación del almacenamiento en el período 2004-07 sufre un descenso muy acusado en las masas 080.128 Plana de Sagunto, 080.151 Plana de Jaraco y 080.164 Ondara-Denia.

Se realizaron una serie de trabajos complementarios de campo enfocados a la obtener datos de piezometría y calidad donde no existía este tipo de información o se consideraba escasa, en las siguientes masas, tabla 2.

MASb	Mejora: Inventario/ Piezometría		Mejora: Calidad	
	Puntos inventariados	Medidas de piezometría	Medidas In Situ	Análisis en laboratorio
080.143 La Contienda	26	10	4	4
080.148 La Hoya de Xátiva	25	3	4	4
080.188 Sierra de Argallet	12	9	2	1
TOTAL	**63**	**22**	**10**	**9**

Tabla 2. Resumen de los trabajos complementarios de campo realizados indicando aquellos

Demarcación Hidrográfica del Segura

Se observa un desigual grado de información hidrogeológica entre las masas sujetas a un aprovechamiento histórico de sus recursos y las de menor entidad, que presentan una importante carencia, e incluso ausencia absoluta de datos básicos de piezometría y calidad. Las

masas en las que la ausencia de información relacionada con la piezometría y calidad es más palpable son las que se muestran en la tabla 3.

Código	Nombre	Carencia de información		Tipo de riesgo
		Piezometría	Calidad	
070.024	Lácera	x		Cuantitativo
070.026	El Cantal-Viña Pi	x	x	Cuantitativo
070.030	Sierra de Argallet	x	x	Químico (difuso)
070. 031	Sierra de Crevillente	x	x	Cuantitativo
070.033	Bajo Quípar	x	x	Químico (difuso)
070.035	Cuaternario de Fortuna	x		Químico (difuso)
070.047	Triásico de Sierra Espuña	x		Cuantitativo
070.055	Triásico de Carrascoy	x		Cuantitativo
070.056	Sierra de las Estancias	x		Cuantitativo
070.060	Las Norias	x	x	Cuantitativo
070.062	Sierra de Almagro	x		Cuantitativo
070.063	Sierra de Cartagena	x		Químico (puntual)/ cuantitativo

Tabla 3. Relación de masas de agua subterránea con carencia importante de información

En relación con el estado químico de la demarcación, los principales problemas de calidad están relacionados con altas concentraciones de sales (sulfatos y cloruros). Aparte de las tres masas costeras en las que se detectan problemas generalizados de intrusión marina (070.053 Cabo Roig; 070.058 Mazarrón y 070.061 Águilas), en el resto de las masas parece haber un control litológico que justifica estas altas concentraciones. Ello se debe posiblemente a la presencia de materiales triásicos con evaporitas asociados a los dominios prebético y subbético.

En cuanto a las especies nitrogenadas, con los datos disponibles, se han identificado problemas puntuales por nitratos en numerosas masas, identificándose problemas generalizados en las que existe una importante actividad agropecuaria como: las masas 070.001 Corral Rubio (donde además aparecen problemas generalizados por nitritos), 070.036 Vega media y baja del Segura, 070.041 Vega alta del Segura (también con problemas generalizados por nitritos); 070.042 Terciario de Torrevieja, 070.051 Cresta del Gallo, 070.052 Campo de Cartagena (también con problemas generalizados por nitritos). En la masa 070.061 Águilas se han identificado problemas por nitratos no generalizados pero que sin embargo afectan a amplias áreas. En estos casos el origen de la contaminación se puede establecer casi con seguridad a la aplicación de fertilizantes y purines.

MASb	Mejora: Inventario/Piezometría		Mejora: Calidad	
	Puntos inventariados	Medidas de piezometría	Medidas *In Situ*	Análisis en laboratorio
070.024 Lácera	2	1	1	1
070.026 El Cantal-Viña Pi	14	10	2	2
070.030 Sierra de Argallet	12	9	2	1
070.033 Bajo Quípar	17	8	3	3
070.035 Cuaternario de Fortuna	8	5	1	1
070.060 Las Norias	18	11	2	2
070.062 Sierra de Almagro	86	51	12	11

Tabla 4. Resumen de los trabajos complementarios de campo realizados

En relación con metales pesados las masas que presentan mayores problemas de calidad son 070.050 Bajo Guadalentín y 070.052 Campo de Cartagena, por Pb y Cd. En estos casos las mineralizaciones de Pb-Zn, asociadas al vulcanismo neógeno del SE ibérico, existentes en los distritos mineros de Cartagena, La Unión, Mazarrón y en menor medida de Águilas, Lorca y Zarzadilla de Totana, parecen ser el origen de elevados fondos geoquímicos de Pb. En cuanto al Cd, cabe indicar que la blenda es su principal mena, y que este mineral se encuentra asociado a la galena en los distritos mineros anteriormente mencionados, por lo que también se le puede atribuir un origen geogénico. Sin embargo, en ambos casos la industria extractiva y los residuos generados pueden actuar como focos de concentración de estos metales. Del mismo modo y para el caso del plomo, los vertidos de purines pueden ser fuentes puntuales de contaminación, a diferencia del cadmio con el que no se puede establecer una relación directa. No obstante, el hecho de que los valores anómalos encontrados de ambos metales suelan estar asociados, hace pensar en un origen geogénico.

Se realizaron una serie de trabajos complementarios de campo para mejorar la información utilizada en la caracterización adicional de las siguientes masas:

Demarcación Hidrográfica del Duero

El riesgo más frecuente que afecta a 22 masas de agua subterránea es la contaminación difusa de origen agrícola, generalizada en la mayor parte de la cuenca, en particular en la zona central. Existen además eventos de contaminación de carácter puntual en 4 masas que, en líneas generales, no están suficientemente caracterizados (tabla 5). Se han registrado contenidos elevados en sulfatos, nitrito, plomo y amonio. Se trata de episodios generados usualmente por vertidos urbanos e industriales. Este tipo de contaminación tiende a localizarse en plumas con una extensión areal limitada, que depende de los parámetros hidrodinámicos del acuífero y que no suele exceder la escala kilométrica.

IDENTIFICACIÓN MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA		TIPO DE RIESGO QUÍMICO	
Código	**Nombre**	**Puntual**	**Difuso**
7	Terciario y Cuaternario del Esla-Cea		X
9	Tierra de Campos		X
16	Castrojeriz		X
20	Aluviales del Pisuerga-Arlanzón		X
25	Páramo de Astudillo		X
28	Verín	X	
29	Páramo de Esgueva		X
30	Aranda de Duero	X	X
31	Villafáfila		X
32	Páramo de Torozos	X	X
37	Cuenca de Almazán		X
38	Tordesillas		X
39	Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas		X
41	Aluvial del Duero: Tordesillas-Zamora		X
43	Páramo de Cuéllar		X
44	Páramo de Corcos		X
45	Los Arenales		X
47	Medina del Campo		X
48	Tierra del Vino		X
52	Salamanca	X	X
55	Cantimpalos		X
59	La Fuente de San Esteban		X
63	Ciudad Rodrigo		
64	Valle de Amblés		X

Tabla 5. Masas de agua subterránea en riesgo químico

El exceso de extracción respecto la cantidad de recurso disponible da lugar a una situación de desequilibrio en el acuífero que se traduce en un descenso acumulado de los niveles piezométricos. La explotación es más intensa en los acuíferos de la región central del Duero y se va amortiguando hacia los bordes. La mayor afección afecta a 6 masas de agua subterránea, (tabla 6) destacando las zonas más septentrionales de las masas de Medina del Campo y Los Arenales.

Los hidrogramas de evolución piezométrica reflejan una ciclicidad que obedece a causas naturales. Existe una ciclicidad de periodo corto que se debe a la variación climática e hidrológica estacional, y otra de periodo plurianual que responde a la alternancia de periodos secos y húmedos. Por lo tanto, para que una tendencia visible en un hidrograma pueda ser atribuida a causas no naturales es necesario que se mantenga durante un periodo significativamente largo.

La mayor parte de los piezómetros con tendencias negativas se localizan en la región central y meridional de la cuenca, ya que es donde se produce una mayor presión extractiva.

Una circunstancia bastante generalizada en los piezómetros con tendencia negativa es un cambio de pendiente más o menos pronunciado en esta, de manera que se observa una cierta estabilización de los niveles o, cuando menos, una clara reducción de la pendiente a partir de mediados de los años noventa. Dicha estabilización se justifica por la reducción de la extracción en las dos últimas décadas. En la región central de la cuenca es donde se observa más claramente un descenso continuado del índice de variación de almacenamiento.

Para establecer un balance del estudio realizado, se ha llevado a cabo un examen detallado del grado de cumplimentación para cada una de los 15 epígrafes en que se divide la ficha de caracterización adicional; en cada apartado se indica la suficiencia o insuficiencia de la información disponible.

Los aspectos relativos a las características geométricas están suficientemente resueltos con la modelización hidrogeológica. Existen además numerosos perfiles geológicos e hidrogeológicos así como sondeos que complementan adecuadamente esta información.

En cuanto a la información relativa a los parámetros de permeabilidad y transmisividad están disponibles en casi la totalidad de las masas de agua subterránea, en cambio,

la información relativa a el coeficiente de almacenamiento es escasa y, en muchas masas de agua, inexistentes.

De la misma manera, los elementos básicos del balance cuantitativo están adecuadamente determinados, tanto en términos de recarga como en volumen de recurso comprometido tal como se refleja en los expedientes de concesión. No así la extracción real, para la que apenas se dispone de datos fiables y homogéneos. No obstante, en conjunto, y junto con las redes de observación piezométrica, permiten establecer un marco de información suficiente para la valoración del estado cuantitativo.

Entre los aspectos relacionados con el estado cualitatativo de las masas de agua subterránea, existe una gran cantidad de información hidroquímica. La información incluye todos los componentes mayoritarios así como buena parte de la lista mínima de contaminantes requeridos en la Directiva 2006/118/CE.

Las mayores carencias en este sentido proceden de la información relativa a las presiones. Si bien se dispone de la información mínima necesaria para describir las presiones difusas (a partir del CORINE LAND COVER, mayoritariamente), la información para analizar las presiones puntuales no está, en líneas generales, suficientemente tratada. La fuente de información de referencia para cumplimentar este apartado, la base de datos DATAGUA del MARM, está específicamente diseñada para el tratamiento de presiones sobre la red superficial, de forma que su adaptación para el análisis de presiones sobre aguas subterráneas adolece de una grave falta de adecuación. La mayor parte de la información necesaria para su caracterización está dispersa en fondos documentales diversos y no homogéneos (fundamentalmente de las comunidades autónomas).

Otra insuficiencia notable atañe a los aspectos relativos a la relación entre las masas de agua subterránea y los ecosistemas y hábitat protegidos. Podría decirse que a fecha actual la única cuestión que parece aclarada es la lista de humedales en los que su alimentación tiene una importante componente hipogea. Más allá, la información existente en cuanto a zonas y tasas de transferencia puede considerarse prácticamente inexistente.

Demarcación Hidrográfica del Ebro

El riesgo más frecuente sobre la cuenca del Ebro, que afecta a 36 masas de agua subterránea, (figura 18) es la contaminación difusa de origen agrícola, tanto en secano como en regadío, aunque también en gran medida a

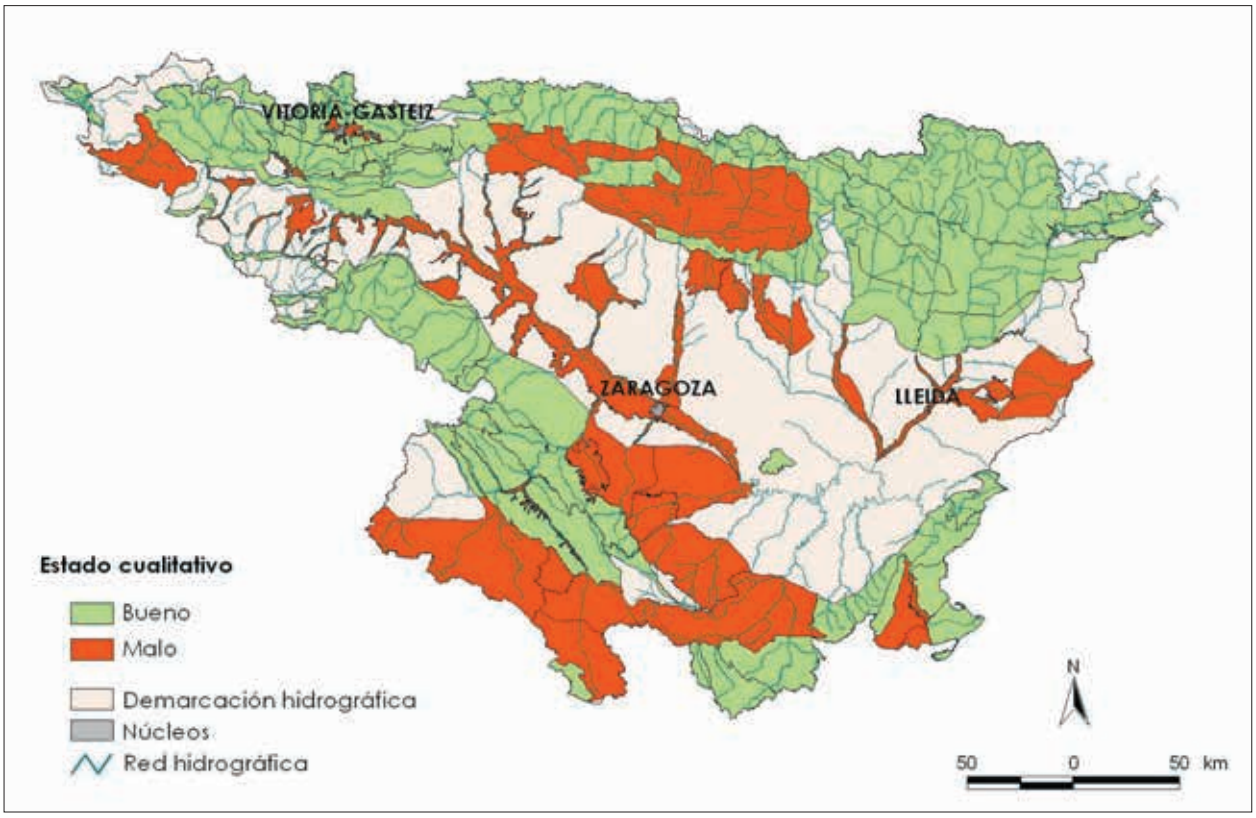


Figura 18. Estado químico de las MASb

los usos ganaderos. Estos problemas se manifiestan especialmente en la concentración de nitratos, pero también en un incremento de la salinidad, y en episodios ocasionales de altos contenidos en plaguicidas (o sus metabolitos) en las aguas subterráneas.

La mayor parte de los acuíferos afectados por la contaminación difusa son aluviales, constituidos por arenas y gravas de elevada porosidad intergranular, de naturaleza libre y con el nivel freático relativamente cercano a la superficie, condicionando todo ello una gran vulnerabilidad frente a la contaminación. Además, estos acuíferos —por su situación y características— coinciden con principales ejes económicos de desarrollo de la cuenca, en los que las fuertes presiones agropecuarias, urbanas o industriales, tienen una prolongada historia.

Existen además eventos de contaminación de carácter puntual en 11 MASb que, en líneas generales, no están suficientemente caracterizados. Se trata de episodios relacionados con redes deficientes de saneamiento y, sobre todo, con actividades industriales o urbanas. Este tipo de contaminación se localiza en plumas de una extensión areal limitada que depende de los parámetros hidrodinámicos del acuífero y que no suele exceder la escala kilométrica.

En lo que se refiere al riesgo por razones cuantitativas, únicamente lo está la masa de agua 090.077, Mioceno de Alfamén. Las importantes extracciones de agua subterránea han tenido como contrapartida un fuerte impacto sobre el hidrodinamismo de los acuíferos Terciario (confinado) y Pliocuaternario, creando situaciones de desequilibrio local en algunos sectores centrales del Campo de Cariñena, especialmente en la zona de Alfamén donde se registran descensos acumulados muy próximos a los 40 m entre 1988 y 2006 (figura 19). Estas zonas sometidas a una alta presión extractiva son las que sustentan el riego de una amplia superficie destinada a la industria vitivinícola y hortofrutícola.

El seguimiento de los niveles piezométricos muestra un comportamiento del acuífero mioceno diferente según el área. Se aprecia un sector donde se concentran los bombeos con descensos continuados desde finales de los años 70 del siglo pasado (Alfamén-Cariñena), con una tendencia que parece amortiguarse desde 2002, probablemente por el efecto combinado de unos años con precipitaciones relativamente abundantes, una disminución de la productividad de las captaciones situadas en las zonas más intensamente explotadas y cambio a cultivos menos exigentes de agua.

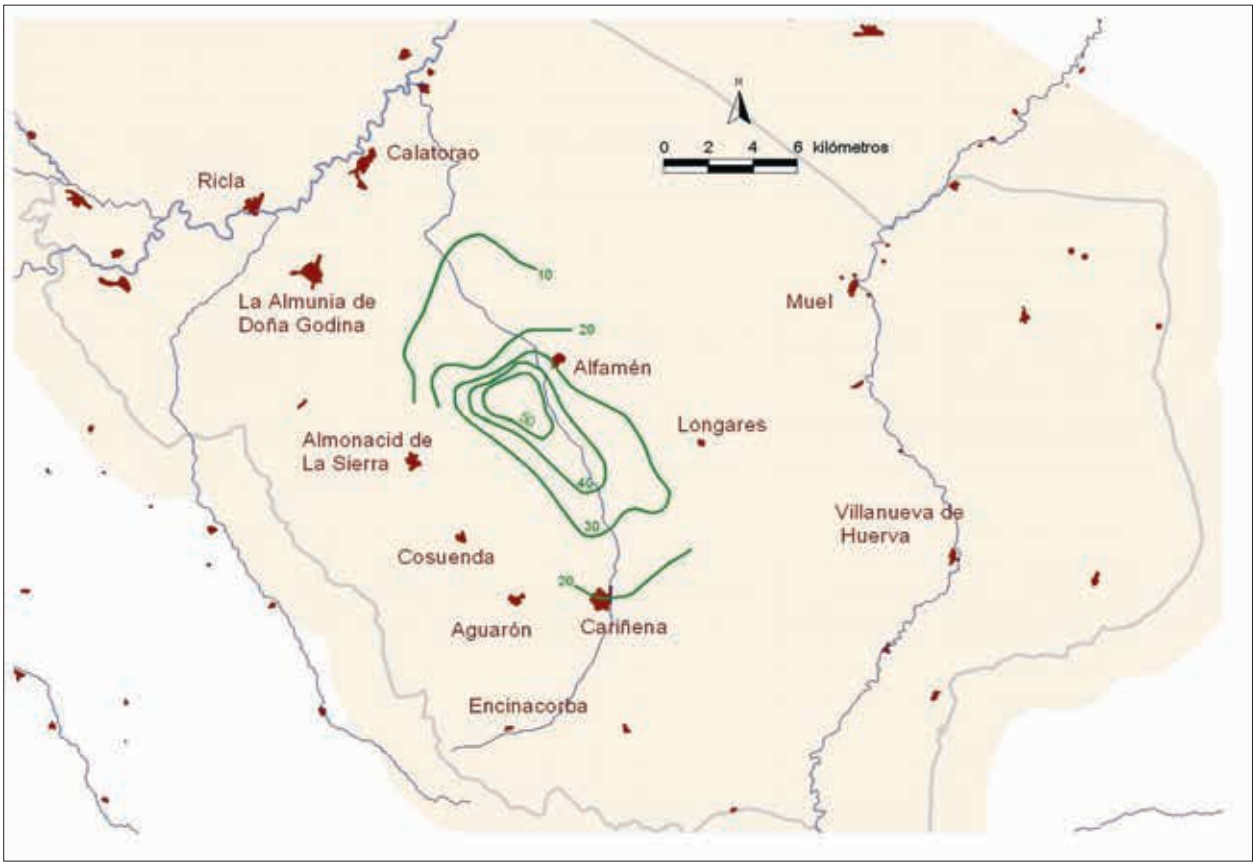


Figura 19. Isodescensos (m) en el acuífero de Alfamén. Periodo 1988-2006

Se ha realizado un examen detallado del grado de cumplimentación para cada una de los 15 en los que se ha dividido la caracterización adicional y en líneas generales, los aspectos relativos a las características geométricas están suficientemente resueltos. La cartografía hidrogeológica elaborada en el GIS-EBRO de la Confederación Hidrográfica, dispone de una escala suficiente para su entendimiento a la escala de detalle de la caracterización adicional. Existen además numerosos perfiles geológicos e hidrogeológicos así como sondeos que complementan adecuadamente esta información.

De la misma manera, los elementos básicos del balance cuantitativo están adecuadamente determinados, tanto en términos de recarga como en volumen de recurso comprometido tal como se refleja en los expedientes de concesión. No así la extracción real, para la que apenas se dispone de datos fiables y homogéneos. No obstante, en conjunto, y junto con las redes de observación piezométrica, permiten establecer un marco de información suficiente para la valoración del estado cuantitativo.

En cuanto a la información relativa a los parámetros hidrodinámicos, la situación es muy desigual en las distintas masas de agua subterránea. Los parámetros de permeabilidad y transmisividad son disponibles en casi la totalidad de las masas de agua subterránea tratada. En cambio, la información relativa a la porosidad y coeficiente de almacenamiento son escasas y, en muchas masas de agua, inexistentes.

Entre los aspectos relacionados con el estado químico de las masas de agua subterránea, existe una gran cantidad de información hidroquímica, mayoritariamente ya incorporada en la base de datos QUIMIPA de la Oficina de Planificación. La información incluye todos los componentes mayoritarios así como buena parte de la lista mínima de contaminantes requeridos en la Directiva 2006/118/CE.

Las mayores carencias en este sentido proceden de la información relativa a las presiones. Si bien se dispone de la información mínima necesaria para describir las presiones difusas (a partir del CORINE LAND COVER, mayoritariamente), la información para analizar las presiones puntuales no está, en líneas generales, suficientemente tratada. La fuente de información de referencia para cumplimentar este apartado, la base de datos DATAGUA del MARM, está específicamente diseñada para el tratamiento de presiones sobre la red superficial, de forma que su adaptación para el análisis de presiones sobre aguas subterráneas adolece de una grave falta de adecuación. La mayor parte de la información necesaria para su caracterización está dispersa en fondos documentales diversos y no homogéneos (fundamentalmente de las comunidades autónomas).

Otra insuficiencia notable atañe a los aspectos relativos a la relación entre las masas de agua subterránea y los ecosistemas y hábitat protegidos. Podría decirse que a fecha actual la única cuestión que parece aclarada es la lista de humedales en los que su alimentación tiene una importante componente hipogea. Más allá, la información existente en cuanto a zonas y tasas de transferencia puede considerarse prácticamente inexistente.

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil

El riesgo más significativo sobre esta demarcación , que afecta a 2 masas de agua subterránea, Aluvial del Bajo Miño y la Cubeta del Bierzo, es la contaminación difusa de origen agrícola. Las actividades agropecuarias generan efluentes, procedentes del abono de las tierras de cultivo y de la gestión de los purines de origen ganadero, que producen problemas de contaminación difusa en las aguas subterráneas. Dichos problemas se manifiestan especialmente en la concentración de nitratos. Es reseñable, igualmente, la existencia de numerosas balsas mineras, ejercen presiones significativas sobre el terreno y podrían afectar de forma relevante a la calidad de las aguas subterráneas.

Se han llevado a cabo trabajos complementarios de toma de muestras y análisis de compuestos mayoritarios, en el ámbito geográfico de estas dos MASb, enfocados a la obtención de información acerca de la calidad química de sus aguas subterráneas, dada la insuficiente información hidroquímica de partida.

Las masas de agua de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil no están en riesgo por razones cuantitativas.
En cuanto a la información manejada para el estudio existe una insuficiencia destacable relativa a la explotación de las aguas subterráneas, para la que no se dispone de datos.

Otra carencia notable procede de la información referida a las presiones. Si bien se dispone de la información mínima necesaria para describir las presiones difusas (a partir del CORINE LAND COVER, mayoritariamente), la información para analizar las presiones puntuales no está, en líneas generales, suficientemente tratada. La fuente de información de referencia para cumplimentar

este apartado, la base de datos DATAGUA del MARM, está específicamente diseñada para el tratamiento de presiones sobre la red superficial, de forma que su adaptación para el análisis de presiones sobre aguas subterráneas adolece de una grave falta de adecuación. La mayor parte de la información necesaria para su caracterización está dispersa en fondos documentales diversos y no homogéneos (fundamentalmente de las comunidades autónomas).

En cuanto a la información relativa a los parámetros hidrodinámicos, la situación es muy desigual en las distintas masas de agua subterránea.

Los parámetros de permeabilidad y transmisividad son disponibles en casi la totalidad de las masas de agua subterránea tratada. En cambio, la información relativa a la porosidad es escasa y para el coeficiente de almacenamiento inexistente. Otra insuficiencia notable atañe a los aspectos relativos a la relación entre las masas de agua subterránea y los ecosistemas y hábitat protegidos.

Demarcación Hidrográfica del Tajo

De las 24 masas de agua subterránea definidas en el Tajo, se identificaron 14 masas en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales definidos en la DMA, debido a presiones sobre la cantidad de recurso subterráneo y/o a la calidad de las aguas subterráneas (enero 2008).

En relación a las presiones sobre la calidad del agua subterránea en las 14 MASb identificadas en riesgo, se deben a problemas de contaminación difusa, siendo la contaminación por nitratos una de las causas más comunes de deterioro de la calidad de aguas subterráneas, y cuyo origen, en la mayoría de las ocasiones, responde a fuentes difusas relacionadas con la actividad agrícola y ganadera derivada del uso excesivo e inadecuado de fertilizantes y el aumento del número de estabulaciones. En general, en aquellas MASub en las que el valor medio de nitrato no es excesivamente alto, pero puede ser indicativo del mal estado químico de las mismas (25-50 mg/L), sería necesario hacer un análisis en profundidad una vez establecidos los valores umbral, para determinar el grado de afección real de las mismas y llevar a cabo un programa de medidas adecuado a las necesidades de cada una de las MASb. Esto ocurre en las MASb 030.006, 030.007, 030.008, 030.013, 030.015, 030.016, 030.017, y 030.019. La MASb 030.018 Ocaña, está claramente en mal estado químico por nitratos. Los materiales carbonatados de la misma la hacen además más vulnerable frente a la contaminación y la tendencia contaminante es claramente ascendente.

El contenido en sulfatos para algunas MASb (030.007, 030.013, 030.017, 030.018 y 030.024) también es elevado, pero su origen parece ser natural conferido por los niveles yesíferos existentes.

MASb	Cloruros	Sulfatos	Nitratos	Nitritos	Metales (Hg,Pb, Cd)	Plaguicidas
030.006 Guadalajara		p	p		p	
030.007 Aluviales Jarama-Tajuña		x	p			
030.008 La Alcarria		p	x	p		
030.010 Madrid: Manzanares-Jarama		p	x	x	p	
030.011 Madrid: Guadarrama-Manzanares			x	p	x	
030.012 Madrid: A. Fresno-Guadarrama			x	p	p	
030.013 Aluvial Tajo: Zorita-Aranjuez		p				
030.015 Talavera			x		p	
030.016 Aluvial Tajo: Toledo-Montearagón		p				
030.017 Aluvial Tajo: Aranjuez-Toledo	p	p	p			
030.018 Ocaña		x	x			
030.019 Moraleja			p			
030.022 Tiétar			x			p
030.024 Aluvial Jarama: Madrid-Guadalajara		p				

Tabla 6. Análisis de la depuración piezométrica. (p = puntual)

En la tabla 6 se muestra un resumen de los principales problemas de calidad química detectados en las aguas subterráneas. Para sustancias como nitratos, nitritos, amonio total y plaguicidas, solo cabe esperar un origen antrópico de estos valores elevados. Para el caso de cloruros, sulfatos y metales pesados se puede deber tanto a un origen antrópico como a valores de fondo elevados de origen natural.

En cuanto a las presiones sobre la cantidad del recurso subterráneo destacaban 7 MASb que presentan en general una tendencia descendente de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo. En la tabla 7 se resumen los aspectos más significativos que se obtuvieron del análisis de la información obtenida en el apartado de piezometría de la ficha, así como las tendencias de los gráficos del índice de llenado. Para las MASb 030.013 y 030.017, prácticamente no hay información.

El descenso de los niveles piezométricos de los acuíferos, fundamentalmente desde 1995 a la actualidad, es el efecto de una explotación concentrada en determinados sectores de las MASb. Fuera de los sectores en los que se concentran las explotaciones, los descensos del nivel piezométrico se han mantenido más o menos equilibrados.

MASb	Descenso piezométrico	Estabilización piezométrica	Recuperación piezométrica	Descenso índice de llenado	Estabilización índice de llenado	Recuperación índice de llenado
030.010	—					—
030.011	—	—	—		—	
030.012	—	—		—		
030.013						
030.017					—	
030.022	—	—			—	
030.024				—		

Tabla 7. Tendencias por MASb

Los trabajos complementarios de campo consistieron en la realización de un inventario y una campaña de piezometría en las masas de los aluviales 030.013 Aluvial del Tajo: Zorita de los Canes-Aranjuez y del aluvial 030.016 Aluvial del Tajo: Toledo-Montearagón, con el fin de elaborar un mapa de isopiezas en época de estío (verano 2008, figura 20).

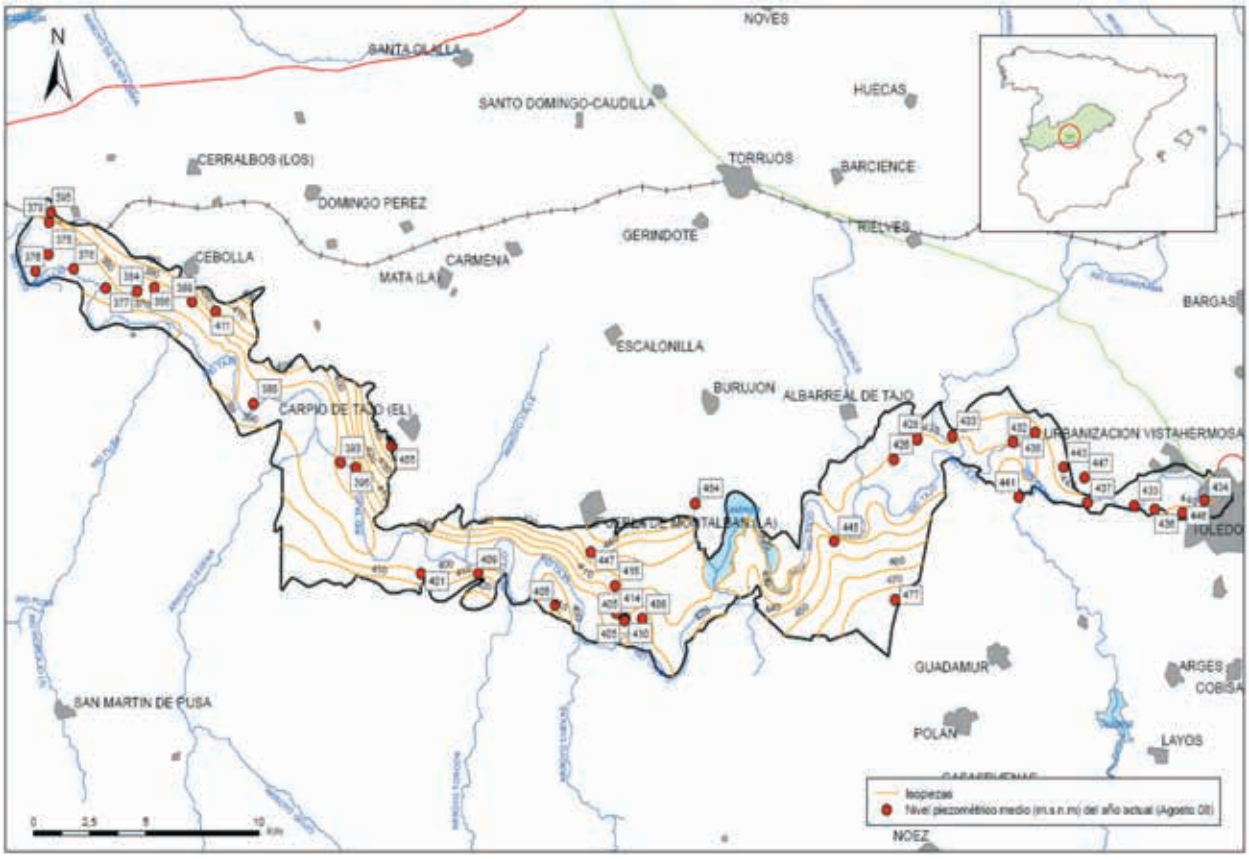


Figura 20. Isopiezas agosto 2008 030.016 Aluvial del Tajo: Toledo-Montearagón

En resumen, como se aprecia en la tabla referente al grado de cumplimentación de los apartados de la ficha de caracterización adicional, los apartados que se han realizado con mayor grado de detalle son los de identificación, características geológicas y usos del suelo. Para el resto de apartados, relacionados con características hidrogeológicas, zona no saturada, piezometría, sistemas de superficie asociados, calidad y presiones, el grado de conocimiento depende en gran medida tanto de los datos procedentes de las redes de control (piezometría, calidad, intrusión), como de estudios específicos en la masa (definición de acuíferos, ensayos de bombeo, estudios sobre vulnerabilidad frente a la contaminación, inventarios de focos contaminantes). Un caso especial es el de los sistemas de superficie asociados. En este caso, aunque se dispone de los inventarios RAMSAR y la red Natura 2000, hay todavía mucho trabajo por hacer a la hora de conocer la relación de estos sistemas con las aguas subterráneas, y en caso de que exista, definir tasas y zonas de transferencia. La ausencia de estos datos en la mayor parte de los casos, no ha permitido cumplimentar un porcentaje elevado de la información de la ficha de caracterización adicional.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana

De las 20 masas de agua subterránea de la Demarcación, a fecha de enero de 2008, estaban identificadas 17 en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales debido a presiones sobre la cantidad de recurso subterráneo y/o la calidad de las aguas subterráneas.

En relación a la presiones sobre la calidad del agua subterránea, las 17 masas estaban definidas en riesgo por problemas de contaminación difusa por contaminación por *nitratos* relacionada con la actividad agrícola y ganadera. Las MASub 041.003, 041.004, 041.005, 041.009, 041.010, 041.015, 041.016 y 041.017 se encontraban claramente en mal estado químico por nitratos (más de 50mg/L como valor medio).

El contenido en sulfatos para algunas MASb (041.001, 041.003, 041.004, 041.005, 041.006, 041.007, 041.009, y 041.012) también es elevado, pero su origen, en general, parece ser natural provocado por los niveles evaporíticos.

En la tabla 8 se muestra un resumen de los principales problemas de calidad química detectados en las aguas subterráneas.

Con la información disponible para la elaboración de la actividad, se consideraba conveniente una ampliación de la Red de control de calidad para todas las masas, en especial en la 041.013, en la que no se disponía de ningún punto de control y en los aluviales 041.011 y 041.012.

MASb	Cloruros	Sulfatos	Nitratos	Nitritos	Plaguicidas
041.001 Sierra de Altomira		x	x		
041.003 Lillo-Quintanar		x	x		
041.004 Consuegra- Villacañas	x	x	x		
041.005 Rus- Valdelobos		x	x		
041.006 Mancha Occidental II	p	x	x	p	
041.007 Mancha Occidental I	p	x	x	p	
041.008 Bullaque					
041.009 Campo de Calatrava	x	x	x	p	
041.010 Campo de Montiel		p	x	p	
041.011 Aluvial del Jabalón		p			
041.012 Aluvial del Azuer		p	p		
041.013 Los Pedroches					
041.015 Vegas Bajas	p	p	x	p	p
041.016 Vegas Altas		x	x		
041.017 Tierra de Barros			x		
041.018 Zafra-Olivenza			p		
041.020 Ayamonte	p		p	p	

Tabla 8. Problemas de calidad detectados por MASb (p=puntual)

Respecto a las presiones sobre la cantidad de recurso subterráneo, existían 6 masas en riesgo debido a que los niveles piezométricos presentaban una tendencia descendente a lo largo del tiempo. En la tabla 9 se resumen los aspectos más significativos que se obtuvieron del análisis de la información piezométrica utilizada en la elaboración de la ficha de caracterización adicional.

MASb	Descenso piezométrico	Estabilización piezométrica	Recuperación piezométrica	Descenso índice de llenado	Estabilización índice de llenado	Recuperación índice de llenado
041.005	—			—		
041.006	—	—		—		
041.007	—	—	—	—		
041.010	—	—		—		
041.015		—	—			—
041.020			—			—

Tabla 9. Tendencias por MASb

Los trabajos de campo en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (tabla 10) consistieron en la identificación, localización y caracterización de captaciones de aguas subterráneas utilizadas para el uso urbano que no estuvieran recogidos en las bases de datos actuales, o de las que tuvieran una información parcial en 3 masas en riesgo (zona de ampliación de la masa 041.009 Campo de Calatrava, 041.013 Los Pedroches y 041.018 Zafra-Olivenza)

MASb	Captaciones para abastecimiento urbano inventariadas	Núcleos abastecidos
041.009 Campo de Calatrava	11	3
041.013 Los Pedroches	9	6
041.018 Zafra-Olivenza	26	13
TOTAL	**46**	**22**

Tabla 10. Trabajos de campo

En resumen, como ocurre en general en el resto de Demarcaciones existen diferencias en el grado de detalle en el que se han podido cumplimentar los diferentes apartados de la ficha de caracterización adicional. La ausencia de datos concretos no permitió cumplimentar un porcentaje importante de la ficha de caracterización adicional.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

De las 58 masas de agua subterránea definidas en la Demarcación (aunque durante el proceso de revisión del Plan de Cuenca se delimitaron dos nuevas masas de agua subterránea; 05.72 Sierra de Cañete y 05.73 Aluvial del Guadalquivir-Sevilla), se identificaron, a fecha de enero de 2008, 40 masas en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales definidos en la DMA, debido a presiones sobre la cantidad y/o a la calidad de las aguas subterráneas.

En relación a las presiones sobre la calidad del agua subterránea, 24 masas se identificaron en riesgo por problemas de contaminación difusa, y una de ellas además, por problemas de contaminación puntual.

La contaminación por nitratos representa una de las causas más comunes de deterioro de la calidad de aguas subterráneas, ligado principalmente a la fertilización de suelos por compuestos nitrogenados en el regadío. Las masas 05.23, 05.25, 05.26, 05.27, 05.32, 05.44, 05.46, 05.47, 05.50, 05.52, 05.68 y 05.69, estaban claramente en mal estado químico debido al elevado contenido de nitratos, superando en algunos casos los 100 mg/L y hasta los 300 mg/L de valor medio para la masa 05.27 Porcuna, en la que la tendencia es claramente ascendente.

En algunos sectores de la demarcación también es importante la contaminación de los acuíferos debida a causas naturales como consecuencia de la naturaleza yesífera y salina de formaciones (Triásico de facies Keuper) por lo que el contenido en sulfatos para algunas masas (05.08, 05.13, 05.26, 05.27, 05.32, 05.33, 05.52 y 05.69) es elevado.

Los valores de algunos metales también son elevados en algunas masas (05.27, 05.32, 05.33, 05.46 y 05.49), y podrían tener su origen en la actividad industrial de estas zonas.

En la tabla 11 se muestra un resumen de los principales problemas de calidad química detectados en las aguas

MASb	Cloruros	Sulfatos	Nitratos	Nitritos	Metales (Hg,Pb, Cd)	Plaguicidas
05.01 Sierra de Cazorla		p	p			
05.04 Huescar-Puebla D. Fadrique						
05.05 Sierra de la Zarza						
05.06 Orce-Maria-Cullar	p		p			
05.07 Ahillo-Caracolera-San Pedro		p				
05.08 Sierra Estancias		x				
05.09 Baza-Caniles		p				
05.12 Guadix-Marquesado		p				
05.13 El Mencal	p	x				
05.14 Bedmar-Jodar						
05.15 Torres-Jimena						
05.16 Jabalcuz		p	p			
05.17 Jaén						
05.18 San Cristóbal		p				
05.19 Mancha Real-Pegalajar			p			
05.22 Mentidero-Montesinos		p				
05.23 Ubeda		x	x	p		
05.24 Bailén-Guarromán		p	x			
05.25 Rumblar			x			
05.26 A.Guadalquivir (curso alto)	x	x	x	p		
05.27 Porcuna	p	x	x		Pb(p)	
05.28 Montes Orientales Norte		p	p			
05.32 Depresión de Granada		x	x	x	Pb(p)	
05.33 Sierra Elvira	p	x				
05.35 Cabra-Gaena		p		x		
05.36 Rute-Horconera		p		x		
05.38 Pedroso-Arcas			p	x		
05.41 Guadahortuna-Larva		x				
05.43 Sierra y Mioceno de Estepa	x	p	p			
05.44 Altiplano de Ecija	x	p	x	x	Pb(p)	
05.46 A. Guadalquivir (curso medio)		x	x	p	Pb(p)	
05.47 Sevilla-Carmona	x	x	x	p		
05.48 Arahal-Coronil-Morón-Puebla	x	x	x			
05.49 Niebla-Posadas	p	p	p	x	Pb(p)	
05.50 Aljarafe	p	p	x		Pb(p)	
05.51 Almonte- Marismas	x	p	p		Pb(p)	
05.52 Sierra de Lebrija	x	x	x			
05.68 Puente Genil-Rambla-Montilla	p	p	p			
05.69 Osuna	x	x	p			
05.71 Campo de Montiel						

Tabla 11. Problemas de calidad detectadas por MASb (p=puntual)

subterráneas, a la luz de los datos empleados para la elaboración de la ficha de caracterización adicional.

En cuanto a las presiones sobre la cantidad del recurso subterráneo**,** en enero de 2008 se habían definido 21 masas en riesgo. En estas masas se observa, en general, una tendencia descendente de los niveles piezométricos y del índice de llenado, comprometiendo en algunos casos los abastecimiento urbanos (Como La Roda de Andalucía en la masa 05.43 "Sierra y Mioceno de Estepa").

En la tabla 12 se resumen los aspectos más significativos que se obtuvieron del análisis de la información obtenida en el apartado de piezometría de la ficha de caracterización adicional.

MASb	Descenso piezométrico	Estabilización piezométrica	Recuperación piezométrica	Descenso índice de llenado	Estabilización índice de llenado	Recuperación índice de llenado
05.01	x			—		
05.04	—	—		—		
05.05			—			x
05.06	—	—			x	
05.07						
05.09	—	—	—	—		
05.12	—	—		—		
05.14	—			—		
05.16						
05.17				—		
05.19	—	—		—		
05.22						
05.38		·				
05.41						
05.43	—		—	—		
05.47	—	—	—	—		
05.49	—	—		—		
05.50	—			—		
05.52		·	—			
05.71		·		·		

Tabla 12. Tendencias piezométricas por MASb.

Aunque en un principio se estimó oportuno realizar como trabajos complementarios de campo alguna campaña de piezometría e inventario en alguna masa, la DGA propuso que, debido a diversos problemas para llevarse a cabo la toma de datos en la red de calidad en este año, se contemplaran estos trabajos en la Encomienda.

En concreto se propuso la toma de muestras y posterior determinación en laboratorio de 142 captaciones de aguas subterráneas repartidas por todas las masas de agua subterránea en riesgo de la demarcación (116 puntos de la Red de Control y 16 puntos adicionales propuestos, figura 21).

El muestreo se llevó a cabo durante el mes de agosto y la primera quincena de septiembre de 2008, pudiendo muestrearse 114 captaciones de las propuestas. En todos los puntos de muestreo, siempre que fue posible, se ha procedió a medir la profundidad de nivel o caudal de manantiales y a la determinación *in situ* de los parámetros no conservativos (temperatura del agua, temperatura ambiente, pH, conductividad, oxígeno disuelto y REDOX), cumplimentando una ficha de campo. Los resultados de laboratorio se incorporaron a una base de datos con la misma estructura que la base de calidad del MARM.

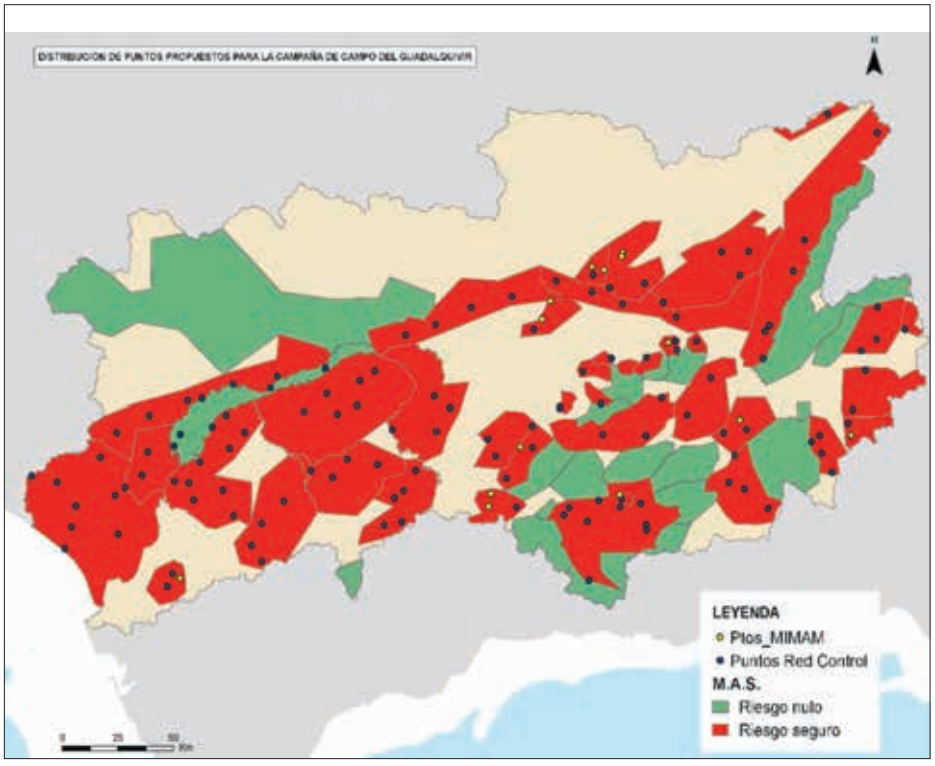


Figura 21. Puntos de agua de la campaña de muestreo agosto-septiembre 2008.

En resumen, la información disponible en algunas masas no resultó suficiente para cumplimentar la totalidad de los apartados en los que se estructuró la ficha de caracterización adicional tal como se indica en el cuadro de grado de cumplimentación del punto 3 de este capítulo. Fue imposible evaluar el estado cuantitativo de algunas masas (05.07, 05.16, 05.17, 05.18, 05.22, 05.38 y 05.41) dada la carencia de información disponible, por lo que sería conveniente ampliar la Red de control piezométrica e hidrométrica en las mismas. En cuanto a la evaluación del estado cualitativo, se utilizaron puntos no sólo de la red de control, sin embargo se hace evidente la escasez de información disponible, fundamentalmente en lo que se refiere a plaguicidas y metales en masas como 05.05, 05.08, 05.13, 05.16, 05.25, 05.27, 05.33, 05.35, 05.38 y 05.71. En general, se cree conveniente una ampliación de la Red de control de calidad para todas las masas, pero por la importancia del seguimiento de nitratos, sería necesaria la ampliación de dicha red sobre todo para la 05.08 y 05.35.

CONSIDERACIONES FINALES

En los trabajos de apoyo a la caracterización adicional, se han caracterizado 232 masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015, figura 22, definidas a fecha de enero de 2008, según la siguiente distribución por demarcación hidrográfica, tabla 13

Demarcación HIDROGRÁFICA	N.º de Masas de Agua Subterránea en riesgo
Miño-Sil	2
Duero	23
Tajo	14
Guadiana	17
Guadalquivir	40
Segura	46
Júcar	48
Ebro	42
TOTAL	**232**

Tabla 13. Distribución por demarcaciones de las MASb en riesgo.

Cada una de las masas en riesgo fue objeto de una ficha de caracterización adicional. Como promedio en cada masa se realizaron 19 mapas, lo que para la totalidad de los trabajos de caracterización adicional implica la elaboración de unos 4.400 documentos cartográficos, a los que acompañan un promedio de 2 columnas litológicas por masa, un corte geológico, tres gráficos de evolución piezométrica, un gráfico de evolución del índice de llenado, 10 gráficos de evolución de la calidad química y un gráfico de cajas para la determinación de los valores umbral. En total la información gráfica no cartográfica elaborada, asciende como mínimo a unos 4.100 gráficos.

La información que acompaña a cada ficha se presenta además en formato digital (coberturas, imágenes, do-

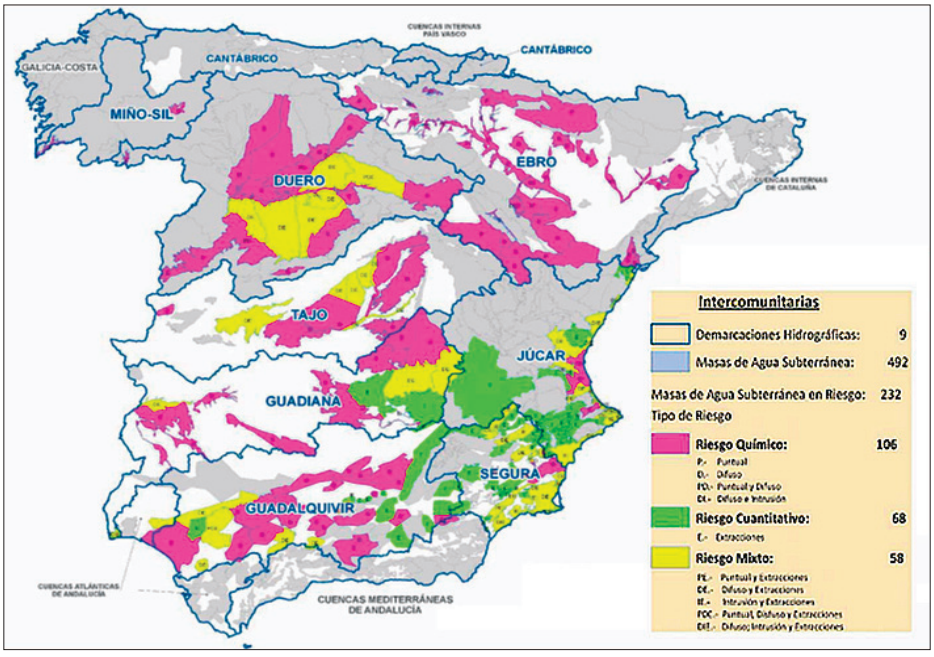


Figura 22. Masas de agua subterránea intercomunitarias declaradas en riesgo. Enero 2008

cumentos en formato pdf de cada masa) para su utilización posterior en un SIG, y se almacena en una base de datos Access 2007 por cada demarcación.

Entre los trabajos realizados de mayor interés se destaca la recopilación y el análisis de la información documental existente en cada masa de agua subterránea. El resultado se plasma en los distintos apartados de la ficha de caracterización adicional, en forma de listados de documentos. Se trata, por lo tanto, de una catalogación temática de los principales documentos hidrogeológicos, actuales y antiguos, de cada masa de agua subterránea en cada una de las demarcaciones intercomunitarias. De este modo la caracterización adicional, además de aportar una síntesis sobre el estado del conocimiento de cada masa de agua, permite disponer de un catálogo de documentos de referencia.

El estado de la información encontrada y utilizada ha sido muy dispar en cada apartado de la ficha. Por lo general, los aspectos más básicos, como aquellos relacionados con las características geológicas e hidrogeológicas de las masas de agua, se han podido cumplimentar debido a la existencia de una infraestructura cartográfica sólida a nivel nacional como es la cartografía geológica MAGNA, el mapa continuo litoestratigráfico y de permeabilidades y el mapa de suelos a escala 1:1.000.000.

Las principales carencias de información, se encontraron en los aspectos relacionados con la piezometría de algunas masas poco conocidas por su escasa entidad, en las que no se ha realizado un control histórico a través de las redes de seguimiento. Del mismo modo, se ha detectado una importante ausencia de datos geográficamente distribuidos de los principales parámetros hidráulicos.

En relación con los apartados de calidad química, se produce el mismo problema que en el caso de la piezometría, la ausencia significativa de datos en algunas masas de agua subterránea poco conocidas. En general se puede establecer que la principal fuente de información son las redes actuales e históricas de control y que en aquellas masas en las que no se ha llevado a cabo el control oficial de las mimas, no se dispone de información suficiente para hacer un diagnóstico fiable. Aunque este problema se puede solventar en el diseño de las futuras redes, afectará sobre todo en la determinación de los niveles de referencia, tanto de piezometría como de calidad, ya que en muchos casos no se dispone de datos históricos.

Otro aspecto relevante a remarcar es la deficiencia de los datos utilizados para los apartados de presiones sobre las aguas subterráneas. La fuente principal de información han sido las presiones e impactos para aguas superficiales (IMPRESS). Aunque esta información es, en principio, válida igualmente para las aguas subterráneas, hay que tener en cuenta que los parámetros y los umbrales utilizados en su momento para determinar los impactos son específicos para las aguas superficiales. Así, por ejemplo, un parámetro es la distancia a los cauces públicos, de modo que aquellas presiones situadas a gran distancia de los mismos pueden no estar contempladas en el IMPRESS y sin embargo suponer un impacto para las aguas subterráneas.

Teniendo en cuenta que esta actividad fue una de las primeras en desarrollarse en la Encomienda de Gestión, algunos de los aspectos contemplados en origen y que no se pudieron abordar, sobre todo por la escasez de tiempo, podrán ser complementados o mejorados con la información y los datos que se han obtenido durante el desarrollo de otras actividades, y que en su momento podrán ser incorporadas a la estructura de base de datos de caracterización adicional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Europea (2009) Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). Documento Guía n.º 18. Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de tendencias. (Traducción Dirección General del Agua MARM).

Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Agua (2005) Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitaria.

IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Demarcaciones Hidrográficas del Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro.Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME (MCIN) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

IGME-DGA (2006) Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades.

IGME-DGA (2005) Guía metodológica de caracterización de masas de agua subterránea.

INTERRELACIÓN ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS, MANANTIALES, ZONAS HÚMEDAS Y OTROS ECOSISTEMAS DE ESPECIAL INTERÉS HÍDRICO

José Manuel Murillo Díaz

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 4 *Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Director de la actividad

José Manuel Murillo Diaz. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España (por orden alfabético):

Ramón Aragón Rueda
Antonio Azcón González de Aguilar
Bruno J. Ballesteros Navarro
Julio López Gutiérrez
Luís Martinez Cortina
Mónica Meléndez Asensio
José M.ª Ruiz Hernández
Juan Carlos Rubio Campos

Dirección General del Agua

Manuel Varela Sánchez
Ignacio del Río Marrero

Empresas colaboradoras

EPTISA
TIHGSA
ALJIBE

INTERRELACIÓN ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS, MANANTIALES, ZONAS HÚMEDAS Y OTROS ECOSISTEMAS DE ESPECIAL INTERÉS HÍDRICO

INTRODUCCIÓN Y CONTENIDO DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

Los trabajos que se presentan, han tenido como objetivo realizar, para distintos regímenes de funcionamiento hídrico (natural e influenciado), siempre que fuera posible, una primera caracterización, evaluación y cuantificación de la interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden, manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

El ámbito de los trabajos realizados se circunscribió a las 9 Demarcaciones Hidrográficas intercomunitarias españolas, la unidad básica de estudio fue la masa de agua subterránea (MASb), pero según avanzaba el proyecto se consideró necesario, debido a la necesidad de finalizarlo en plazo, modificar el criterio inicialmente adoptado, por lo que, junto a la anterior unidad de estudio, se establecieron otras de mayor extensión, como los sistemas de explotación o los dominios hidrogeológicos, que englobaban varias MASb.

Para lograr el objetivo establecído fue preciso realizar cinco subactividades:

1. Fase de consulta bibliográfica y de captura de información.
2. Identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas con los cursos fluviales.
3. Identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales.
4. Identificación y caracterización de la interrelación entre las aguas subterráneas y las zonas húmedas.
5. Identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas con otros ecosistemas naturales distintos de las zonas húmedas de especial interés hídrico.

El contenido del trabajo realizado en cada una de estas actividades se detalla a continuación:

1. Fase de consulta bibliográfica y de captura de información. Se ha realizado en diferentes centros de índole pública y privada, entre los que cabe citar las Confederaciones Hidrográficas, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, el Instituto Geológico y Minero de España y los departamentos de geología, hidrogeología, ecología, hidrología y otras materias afines, relacionadas con la temática en estudio, pertenecientes a distintas universidades españolas.
2. Identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas con los cursos fluviales. Se han identificado aquellos lugares o tramos de río donde los acuíferos drenan a los cauces superficiales, así como aquellos tramos donde los ríos son perdedores y recargan a los acuíferos. En función de los datos actuales e históricos disponibles se ha cuantificado, siempre que ha sido posible, la ganancia o pérdida que tiene lugar, incluso en algunas ocasiones se ha caracterizado la interrelación río-acuífero en régimen natural e influenciado. En numerosos casos, los datos de que se ha dispuesto pertenecían a series cortas, discontinuas y/o sin periodicidad, que no han permitido elaborar un modelo conceptual de funcionamiento de la relación río-acuífero robusto y consistente, ni cuantificar una pérdida o ganancia de agua sustentada en series de datos suficientemente largas y representativas.

Cuando los datos han sido suficientemente representativos se ha descompuesto el hidrograma en escorrentía superficial y subterránea, y obtenido el coeficiente de agotamiento. En general solo se ha podido dibujar y analizar hidrogramas mensuales medios, en menor cuantía hidrogramas diarios y solo en casos excepcionales trazar el hidrograma para la serie histórica completa. En este último caso se han identificado los diferentes periodos de agotamiento y obtenido cada uno de los coeficientes que los caracterizan.

3. Identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales. Se han identificado los lugares donde puntualmente las aguas subterráneas descargan en la superficie del terreno. Todas las surgencias identificadas se han situado en mapas donde ha quedado reflejado su caudal medio, o puntual en aquellos casos en que solo existe un único registro. Debido al gran déficit en los datos de medida y control de las descargas de los manantiales, únicamente ha sido posible representar e interpretar su hidrograma en un porcentaje relativamente reducido, por lo que en general solo se ha estudiado la evolución del caudal y determinado el coeficiente de agotamiento en un porcentaje relativamente pequeño de manantiales. En las descargas más importantes y significativas se ha realizado un bloque diagrama o un esquema explicativo de su funcionamiento hidrogeológico.
4. Identificación y caracterización de la interrelación entre las aguas subterráneas y las zonas húmedas. En esta actuación se han tratado de identificar aquellas zonas húmedas que se encuentran directamente relacionadas con las aguas subterráneas. Generalmente no se ha dispuesto de datos que hayan posibilitado la realización de un estudio cuantitativo y/o cualitativo de los humedales, con lo que en la mayoría de los casos se ha definido el carácter influente o efluente de los mismos y el modelo conceptual de relación entre las zonas húmedas y los acuíferos.
5. Identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas con otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Se ha realizado una caracterización hidrogeológica básica de espacios naturales con especial interés hídrico, identificando y enumerando los elementos que interrelacionan las aguas superficiales y subterráneas, tales como manantiales, sumideros, humedales relacionados con las masas de agua subterránea y tramos de relación río-acuífero bien sea ésta de ganancia o pérdida.

En función de los resultados que ha proporcionado la realización de la actividad 4 se ha elaborado un plan de seguimiento y control, que incluye la propuesta de nuevos puntos de medida, que permitan obtener una información más precisa y detallada, que conduzca a un mejor conocimiento en un futuro próximo de la interrelación que existe entre las aguas superficiales y las subterráneas, ya que el existente en la actualidad, como se ha puesto de manifiesto en el estudio realizado, es bastante precario.

METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología utilizada en el estudio de la caracterización, evaluación y cuantificación de la interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden, manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden.

Se ha esquematizado a partir de tres criterios: sentido de la relación hídrica, distribución espacial y continuidad o discontinuidad de la conexión hidráulica.

Sentido de la relación hídrica

En el presente trabajo el sentido de la relación río-acuífero hace referencia a una pérdida o ganancia de agua entre una formación geológica permeable y un río. Se ha analizado tanto en función de datos piezométricos, como hidrométricos y foronómicos. Se han distinguido cuatro situaciones: cauce efluente, cauce influente, cauce con relación variable y cauce con relación compuesta o mixta.

Cauce efluente o ganador. Es aquel que recibe aportes de agua subterránea desde una o varias formaciones geológicas permeables.

Cauce influente o perdedor. Es aquel que cede parcial o totalmente su caudal a favor de una o varias formaciones geológicas permeables.

Cauce con relación variable. Corresponde a aquel cauce que presenta un régimen de perdida-ganancia de agua variable en el tiempo. Esta circunstancia se produce cuando el nivel freático o piezométrico del acuífero fluctúa por encima o por debajo de la lámina de agua que existe en un determinado momento en el cauce del río.

Cauce con relación compuesta o mixta. Corresponde a una situación muy poco frecuente, que tiene lugar en un tramo de río donde se produce simultáneamente la situación de ganador y perdedor. Es el caso de un cauce que discurren sobre una formación geológica permeable a la que cede agua, pero a su vez es alimentado por manantiales o descargas difusas procedentes de otra formación acuífera muy próxima o en contacto directo con el cauce en una de sus orillas.

Distribución espacial de la relación hídrica

Desde un punto de vista espacial la relación río-acuífero se ha establecido de acuerdo a las siguientes tipologías:

Puntual. La relación de ganancia o pérdida se produce de forma localizada y visible en lugares y puntos concretos de un determinado tramo de un río. Se pueden diferenciar los siguientes subtipos:

— Punto único: La descarga o pérdida de agua se produce de forma visible en un único lugar.
— Puntual agrupada: La descarga o pérdida de agua tiene lugar a través de varios puntos de agua perfectamente diferenciables entre sí. Estos puntos se pueden situar según una estructura más o menos lineal y paralela al cauce principal, que descargan agua subterránea a varios cursos secundarios, que confluyen en uno principal. La agrupación también puede ser en cascada. En este caso los puntos se localizan uno detrás de otro a lo largo de un único curso secundario, cuando se trata de manantiales, o en el propio curso principal cuando se trata de sumideros.

Difusa. La relación de ganancia o pérdida se produce a lo largo de un tramo más o menos largo del cauce de un río, sin que se pueda identificar una descarga o un sumidero concreto.

Mixta. Se trata de aquellos casos en los que para un mismo tramo de un río es posible identificar simultáneamente una ganancia o pérdida de agua tanto de tipo difuso como puntual.

Continuidad o discontinuidad de la conexión hidráulica

Contempla el estudio de la situación relativa que existe entre el nivel de agua en el río y en la superficie piezométrica de los acuíferos que están interconectados con el curso fluvial. Dependiendo de la posición que ocupe uno u otra se pueden establecer dos situaciones, que hacen referencia a la continuidad o discontinuidad hidráulica de la relación río-acuífero. En el presente documento a la primera situación se la ha denominado directa y a la segunda indirecta. Esta última se produce cuando el nivel del acuífero desciende por debajo de la cota del lecho del río y ambos quedan desconectados hidráulicamente entre sí, dando lugar a una infiltración constante de agua. Por lo que respecta a la primera situación se ha analizado de acuerdo con la expresión de Cauchy, que matemáticamente se escribe:

$$Q = C_R (H - h) \quad (1)$$

Donde:
Q es el caudal de agua que se intercambia entre el río y el acuífero.
H es la cota de la lámina de agua en el tramo del río que se está analizando.
h es la cota de agua del acuífero en el tramo del río que se está analizando.
y
C_R es la conductancia hidráulica entre el río y el acuífero, que se calcula a través de la expresión:

$$C_R = A_L K_L / e_L \quad (2)$$

Donde:
K_L es la permeabilidad del lecho del río en el tramo del mismo que se está analizando.
e_L el espesor del lecho del río en el tramo del mismo que se está analizando.
y
A_L la superficie del lecho del río, que se determina mediante:

$$A_L = P_M L_C \quad (3)$$

Donde:
P_M es el perímetro mojado.
y
L_C la longitud del cauce para cada tramo del mismo que se está analizando.

En la expresión (1) puede ocurrir que H > h y H < h. En el primer caso el caudal es positivo y se produce una infiltración variable de agua desde el río al acuífero.

En el segundo supuesto el caudal es negativo y tiene lugar una descarga de agua también variable desde el acuífero al río. La alternativa H = h implica que no hay cesión de agua ni en uno ni otro sentido.

De acuerdo a los criterios anteriormente desarrollados se muestran en la tabla 1 las diferentes tipologías que se han establecido para caracterizar la interrelación que se presenta entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL		CONTINUIDAD O DISCONTINUIDAD DE LA CONEXIÓN HIDRÁULICA	SENTIDO (PÉRDIDAS-GANANCIAS)	DESCRIPCIÓN
Difusa		Directa	Ganador	El río gana, pierde, o mantiene una relación variable a lo largo de un tramo concreto del mismo y de un determinado intervalo de tiempo, sin que exista desconexión hidráulica entre el río y el acuífero, y sin que se pueda identificar el punto o los puntos de recarga o descarga al acuífero.
			Perdedor	
			Variable	
		Indirecta con efecto ducha en acuíferos de tipo granular	Perdedor	El río atraviesa una formación geológica permeable, pero su curso se encuentra descolgado respecto de la superficie piezométrica del acuífero, dando lugar a lo largo de un tramo de su cauce a una pérdida de agua, que se denomina "efecto ducha".
			Variable	La posición de la superficie piezométrica con respecto a la lámina de agua del río se comporta tanto de efluente como de influente. Cuando el río es ganador, la conexión hidráulica es siempre de tipo directo, cuando es perdedor, la conexión puede pasar a indirecta en el instante en que la superficie piezometrica desciende por debajo de la cota en que se descuelgan el río y el acuífero. En ese momento aparece el denominado efecto ducha.
		Indirecta con efecto ducha en acuíferos de tipo kárstico	Perdedor	El río, que discurre sobre una formación geológica permeable karstificada, que se sitúa a mayor cota topográfica que la superficie piezométrica del acuífero, presenta en su cauce, multitud de grietas, fracturas y oquedades a través de las que se produce una recarga de agua al acuífero de tipo ducha, sin que se identifique a lo largo del tramo un lugar concreto donde se produzca una pérdida predominante.
			Variable	El río, que presenta una fisiografía como la descrita en el apartado anterior, presenta un régimen variable de ganancia o pérdida a lo largo de un tramo más o menos grande. Cuando se comporta como efluente, la conexión hidráulica es de tipo directo, aunque la descarga de agua no se produce de forma totalmente continua; cuando se comporta como influente, la conexión hidráulica es de tipo indirecto, ya que la superficie piezométrica del acuífero se descuelgan físicamente del río y se sitúa por debajo de la cota del lecho del mismo.
		Indirecta con flujo profundo	Ganador	El flujo subterráneo responde a un esquema de circulación profunda a través formaciones geológicas de comportamiento acuitardo, que descargan directamente a los cauces naturales, o a un acuífero (aluviales o terrazas fluviales), situado a techo de la formación de baja permeabilidad, que está en conexión directa con el cauce del río.
		Indiferenciada	Perdedor	La relación río-acuífero es de tipo difuso, pero se desconoce si es directa o indirecta.
			Variable	Se trata de un río de régimen variable que, cuando se comporta como perdedor, se desconoce si existe conexión difusa directa o indirecta.
Puntual	Punto único	Directa	Ganador	El cauce es receptor de una descarga subterránea a favor de un único manantial, independientemente de que éste drene directamente al cauce principal o a un tributario del mismo.
		Indirecta	Perdedor	El acuífero es receptor de una recarga a favor de un único sumidero, bien localizado directamente en el cauce principal o bien en un tributario del mismo.
	Agrupada	Directa	Ganador	El cauce es receptor de una descarga de agua subterránea a favor de un grupo de manantiales, independientemente de que éstos drenen directamente al cauce principal o a uno o varios de sus tributarios.
		Indirecta	Perdedor	El acuífero es receptor de una recarga a favor de varios sumideros, bien localizados directamente en el cauce principal o bien en tributarios del mismo.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	CONTINUIDAD O DISCONTINUIDAD DE LA CONEXIÓN HIDRÁULICA	SENTIDO (PÉRDIDAS-GANANCIAS)	DESCRIPCIÓN
Mixta	Directa	Ganador	En un mismo tramo de un río es posible identificar simultáneamente una ganancia o pérdida de agua, tanto de tipo difuso como puntual, con un resultado global de ganancia.
		Perdedor	En un mismo tramo de un río es posible identificar simultáneamente una ganancia o pérdida de agua, tanto de tipo difuso como puntual, con un resultado global de pérdida.
		Variable	En un mismo tramo de un río es posible identificar simultáneamente una ganancia o pérdida de agua, tanto de tipo difuso como puntual, con un resultado global de alternante para un determinado periodo de tiempo.
	Indirecta	Ganador	En un mismo tramo de un cauce se establece al tiempo una conexión difusa indirecta con una formación geológica permeable y, además, se recibe agua de la misma o de otra mediante la descarga de un manantial o grupo de manantiales

Tabla 1. Tipologías de interrelación entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden.

Por lo que respecta al régimen hidrológico se han distinguido los siguientes:

— Natural: El tramo de río analizado presenta un régimen hidrológico sin antropizar por el hombre o escasamente alterado.
— Natural modificado. El tramo de río analizado presenta un régimen hidrológico alterado con respecto al natural, pero las acciones realizadas hasta el momento no han modificado la tipología de la relación río-acuífero en régimen natural, aunque sí han ocasionado una variación en el volumen de agua intercambiado entre el río y el acuífero.
— Influenciado. El tramo de río analizado presenta un régimen hidrológico muy diferente al natural, que ha dado lugar a una modificación de la tipología de la relación río-acuífero y de la cuantía del volumen de agua intercambiado. También se han considerado tramos influenciados, aunque no se haya modificado la tipología de la relación río-acuífero, aquellos tramos sobre los que existe una fuerte presión o impacto, como es el caso de los situados aguas abajo de los embalses en los ríos que son perdedores, o aquellos otros que se encuentran conectados con acuíferos fuertemente explotados.

En cada tramo analizado se han indicado las condiciones hidrológicas (naturales o influenciadas) bajo las que se ha definido la tipología de la relación río-acuífero. En los casos en los que el régimen es influenciado y, siempre que ha sido posible, se ha indicado el tipo de conexión río-acuífero para el régimen natural.

Identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales

La información de partida, que se ha utilizado para la identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales, proviene de la base de datos AGUAS del IGME, que contiene información de 23228 manantiales en el ámbito del estudio realizado. De éstos, poseen datos de caudal 19.061, que en su mayoría corresponde a un dato aislado tomado en el instante en el que se inventarió el manantial, y en menor medida a controles hidrométricos puntuales, que se realizaban con periodicidad mensual, bimensual, trimestral o semestral, y en un porcentaje muy pequeño a registros continuos de cadencia diaria u horaria.

El proceso de identificación, caracterización y clasificación de manantiales se ha realizado de acuerdo a las siguientes premisas:

— Se ha considerado que a priori todo manantial situado dentro de la poligonal, que delimita a la unidad en estudio, pertenece a dicha unidad, salvo las excepciones que constituyen los manantiales que, situado en el interior de la poligonal, se tiene constancia que reciben agua de una unidad contigua o próxima.
— Se han definido como manantiales principales los manantiales que poseen elevados caudales históricos de referencia. Dentro de esta categorización también se han incluido agrupaciones de manantiales que, aunque a escala individual tienen un reducido caudal, en el conjunto de la unidad en estudio dan lugar a una

descarga de agua importante. Este es el caso de los páramos calcáreos, que se drenan a través de múltiples manantiales situados en sus bordes.

— Se han considerado como manantiales principales, aquellos manantiales cuyo caudal de drenaje tiene un peso importante sobre el total de los recursos de una determinada masa de agua subterránea, aunque en valor absoluto su caudal sea pequeño. Esto ha conllevado a que un manantial de 100 o 200 L/s en masas de agua subterránea del Pirineo no se haya considerado, en algunos casos, como principal, pues su aportación porcentual sobre el total de la escorrentía subterránea que se genera en la masa de agua subterránea puede ser pequeña. Sin embargo, si se ha podido considerar como principal un manantial de 10 o 20 L/s en algunas masas de agua subterránea localizadas sobre zonas áridas o semiáridas, si el montante de dicha descarga representa un volumen de agua significativo sobre los recursos totales de la masa de agua subterránea.
— La calificación de manantial principal también se ha aplicado a aquellas descargas subterráneas que constituyen las salidas principales de acuíferos catalogados de orden menor, bien por sus escasos recursos o bien por sus malas características hidrodinámicas para la captación de agua subterránea.
— A todo manantial catalogado como principal se le ha asociado un tramo de río, una formación geológica permeable, una tipología de relación río-acuífero y un caudal. El estudio que se ha realizado de los mismos ha incluido, siempre que ha sido posible, una importante descripción y caracterización hidrogeológica de su funcionamiento, incorporando, cuando ha sido viable, cortes hidrogeológicos publicados en otros trabajos o realizados específicamente para este proyecto.
— Los manantiales que no se han considerado como principales se han incluido dentro de un apartado que se ha denominado "resto de manantiales". Dada la falta de información que se tiene sobre estos manantiales y su importante número, solo se ha realizado un estudio muy somero de los mismos, que se ha limitado a una breve reseña de su caudal, a su localización sobre el mapa litoestratigráfico del IGME, y a la relación que tienen con las distintas formaciones permeables presentes en cada una de las unidades que se han estudiado.

Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre agua subterránea y zonas húmedas

Las zonas húmedas que se han incluido en el estudio provienen de tres fuentes de información:

— Cobertura de humedales del MARM (2008). Esta cobertura procede de la "Base documental de humedales españoles" elaborada por la Dirección General de Biodiversidad (2006) que, a su vez, tiene como antecedente el "Estudio de zonas húmedas de la España peninsular: Inventario y tipificación" de la Dirección General de Obras Hidráulicas (1990).
— Cobertura de masas de agua superficial tipo "lago" y "aguas de transición" del MMA (2007) que contiene las masas de agua superficial tipo "lago" y "aguas de transición" definidas conforme a la Directiva Marco del Agua.
— Relación de zonas húmedas del Libro Blanco del Agua Subterránea (MOPTMA-MINER, 1994), que incluye las zonas húmedas peninsulares conectadas con unidades hidrogeológicas, que presentan una superficie máxima igual o superior a las 10 hectáreas. En general, estas zonas húmedas se encuentran incluidas en las coberturas anteriores.

El estudio de la interrelación que se presenta entre agua subterránea y zonas húmedas se ha desarrollado en tres fases:

— Identificación de los humedales relacionados con cada unidad de estudio.
— Caracterización de la relación humedal-acuífero.
— Cuantificación de la relación

A continuación se describen detalladamente los procedimientos seguidos en cada una de las tres fases:

Identificación de los humedales relacionados con cada unidad de estudio

Durante esta fase se ha procedido a localizar los humedales situados dentro de los límites de la poligonal envolvente de cada unidad en estudio con el objeto de determinar cuáles se encuentran relacionados con formaciones geológicas permeables. En principio se ha considerado que un humedal está relacionado con una determinada formación geológica permeable, tanto si se encuentra situado directamente sobre la misma, como si recibe agua de alguna otra cercana a pesar de no encontrarse en contacto directo con ella.

Caracterización de la relación humedal-acuífero

Se ha realizado de acuerdo a los siguientes criterios:

Alimentación

Se han establecido los siguientes tipos:

— *Humedales epigénicos*: Sus aportes proceden estrictamente de la escorrentía superficial y/o directamente de la precipitación directa.
— *Humedales hipodérmicos*: Reciben aportes procedentes de flujos subsuperficiales o ligados a sistemas hidrogeológicos muy someros de carácter fundamentalmente detrítico, como coluviones, glacis, rañas, etc.
— *Humedales hipogénicos*: La alimentación es fundamental de origen subterráneo.
— *Humedales mareales*: Su régimen de aportación se encuentra asociado al flujo de las mareas.
— *Humedales costeros*: En su alimentación intervienen aportaciones de índole superficial y/o subterránea, además de los procesos de alimentación ligados a la oscilación de las mareas.
— *Humedales mixtos*: La alimentación procede tanto de la escorrentía superficial, como de la subterránea, sin que predomine ninguna de ellas.

Drenaje

Se han establecido los siguientes tipos:

— *Humedales abiertos o exorréicos:* Su drenaje tiene lugar de forma natural a través de la red de drenaje superficial o directamente al mar.
— *Humedales con drenaje cerrado*: El agua se libera por evaporación en lámina libre.
— *Humedales con descarga profunda*: El agua se libera por procesos de infiltración hacia el acuífero subyacente (flujos verticales).
— *Humedales con drenaje inducido*: El agua se libera de forma controlada a través de bombeos u otros sistemas de descarga superficial o subterránea inducida.
— *Humedales con drenaje mixto*: Confluyen varios de los anteriores mecanismos.
— *Humedales con drenaje abierto o exorréico antrópico*: Se drenan directamente a través de infraestructuras creadas por el hombre.

Hidroperiodo

Atendiendo a la duración y frecuencia de la inundación o saturación del suelo se han establecido los siguientes tipos:

— *Permanente no fluctuante*: humedales que mantienen una lámina de agua permanente cuyo espesor es variable con el tiempo en función de los sistema hidrológicos que tienen relación con el humedal.
— *Permanente fluctuante*: humedales cuya lámina de agua no es permanente, pero que al desaparecer ésta se mantienen como un criptohumedal (humedal alimentado por un nivel freático cercano a la superficie pero no aflorante).
— *Temporales estacionales*: humedales, que bien pueden tener lámina de agua o ser un criptohumedal, que mantienen su condición de zona húmeda sólo en determinados periodos del año. Se suelen secar y desaparecer en la época de estiaje.
— Temporales esporádicos o erráticos: humedales epigénicos ligados a zonas áridas o semiáridas que se presentan asociados a un sistema hidrológico marcadamente estacional.

Atendiendo a las anteriores características se han establecido 8 tipologías (modelos conceptuales) de relación humedal-acuífero, que se muestran en la tabla 2. A su vez, dichas tipologías se han subdividido y se recogen en la tabla 3.

Cuantificación de la relación humedad-río

En general no se han podido cuantificar la relación humedal-acuífero, salvo en contadas ocasiones, debido a una importante falta de datos, tanto en lo que respecta a la hidrometría y foronomía de entrada y salida de agua al humedal, como a la piezometria próxima al mismo y a otra serie de datos de tipo climatológico, batimétrico y topográfico.

Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

Esta actividad tiene como finalidad obtener una caracterización hidrogeológica básica que permita identificar, en la medida de lo posible, las principales entradas y salidas de aguas subterráneas, tanto de tipo puntual como difuso, que existen en estos espacios naturales de especial interés hídrico, así como cuantificar el volumen y la cadencia temporal con la que se producen.

En este sentido cabe recordar, que la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas), y su posterior

MODELO CONCEPTUAL	DESCRIPCIÓN
Humedal hipogénico	Son humedales que se encuentran directamente relacionados con formaciones geológicas permeables. Un humedal es hipogénico ganador, cuando recibe agua de una formación geológica permeable; perdedor si drena el agua que contiene hacia un acuífero, y, por tanto, lo recarga; variable, si se modifica su condición de ganador o perdedor en función de la época del año o de tipologías climáticas de carácter hiperanual (diferente secuencia de años secos, medios y húmedos); e indiferenciado cuando se desconoce el sentido en que fluye el agua subterránea entre la zona húmeda y la formación geológica permeable. Los humedales hipogénicos ganadores puede recibir de forma directa o diferida agua de una formación geológica permeable, o bien alimentarse a través de flujos subterráneos profundos procedentes de formaciones que se comportan como acuitardos.
Humedal con alimentación subterránea externa (flujo horizontal)	Se trata de humedales que se alimentan desde un acuífero a favor de una descarga que puede ser difusa (río ganador), puntual (manantial/es) o de ambos tipos al mismo tiempo, que se sitúa fuera del ecotopo.
Humedal con alimentación subterránea mixta (vertical y externa)	Se trata de humedales que reciben su alimentación desde un acuífero como consecuencia de la confluencia de varios procesos (flujo vertical y horizontal) que tienen lugar dentro o fuera del ecotopo.
Origen antrópico	Se trata de humedales creados por el hombre tales como graveras, antiguas minas, etc. Pueden estar conectados o no con una formación geológica permeable o con un curso de agua superficial.
Sin criterio hidrogeológico	Debido a falta de información no es posible clasificar una zona húmeda en ninguno de los modelos anteriores.
Sin relación con la formación geológica permeable	Se trata de humedales que no tienen ninguna relación con formaciones geológicas de entidad. Generalmente son zonas húmedas alimentadas únicamente a partir de aguas superficiales y drenadas en fase de vapor o hacia cursos de agua superficial, o alimentadas y/o drenadas a partir de materiales de escasa permeabilidad que no tienen importancia como acuíferos. Como ejemplo se pueden citar los humedales ligados a las formaciones triásicas del keuper o a los materiales impermeables o semipermeables del mioceno.
Humedal costero	Se trata de humedales que reciben aportaciones superficiales, subterráneas o ambas ligadas al efecto de las mareas.
Humedal hipodérmico	Su alimentación tiene lugar a partir de un flujo subsuperficial.

Tabla 2. Tipologías (modelos conceptuales) de relación humedal-acuífero.

MODELO CONCEPTUAL		DESCRIPCIÓN
Humedal hipogénico ganador (Tipo A)	Flujo vertical estricto positivo	El humedal recibe una aportación procedente de la descarga del acuífero subyacente
	Flujo vertical profundo positivo	El humedal recibe una cierta alimentación desde un acuífero profundo a favor del un flujo vertical que está condiciona por la presencia de una formación de comportamiento acuitardo existente entre el fondo del humedal y el acuífero profundo subyacente
Humedal hipogénico perdedor (Tipo B)	Flujo vertical estricto negativo indiferenciado	El humedal se drena recargando el acuífero subyacente, pero se desconoce la relación hidráulica que se establece entre la lámina de agua en el humedal y la superficie piezométrica
	Flujo vertical estricto negativo con conexión directa	El humedal se drena recargando el acuífero subyacente y existe una conexión hidráulica directa entre la lámina de agua en el humedal y la superficie piezométrica
	Flujo vertical estricto negativo con conexión indirecta	El humedal se drena recargando el acuífero subyacente y existe una conexión hidráulica indirecta entre la lámina de agua en el humedal y la superficie piezométrica ("efecto ducha" o recarga a favor de sumideros)
	Flujo vertical estricto negativo con conexión fluctuante	El humedal se drena recargando el acuífero subyacente y existen datos que permiten determinar que la relación hidráulica, entre la lámina de agua en el humedal y la superficie piezométrica, oscila (anual o hiperanualmente) entre una relación directa e indirecta
Humedal hipogénico fluctuante (Tipo C)	Flujo vertical estricto fluctuante	El humedal oscila (anual o hiperanualmente) entre una situación en la que es alimentado por el acuífero subyacente o se drena recargando al acuífero subyacente

MODELO CONCEPTUAL		DESCRIPCIÓN
Humedal Hipogénico indiferenciado (Tipo D)	Flujo vertical estricto indiferenciado	Existe un flujo vertical entre el humedal y el acuífero subyacente pero se desconoce si es positivo o negativo
Humedal con alimentación subterránea externa (flujo horizontal) (Tipo E)	Flujo horizontal positivo con descarga directa externa puntual	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga puntual (manantial o grupo de manantiales) situada fuera del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa externa difusa	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga difusa (río ganador) situada fuera del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa externa mixta	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga de tipo mixta (puntual —manantial o grupo de manantiales— y difusa -río ganador-) situada fuera del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa interna puntual	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga puntual (manantial o grupo de manantiales) situada dentro del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa interna difusa	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga difusa (río ganador) situada dentro del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa interna mixta	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga de tipo mixta (puntual –manantial o grupo de manantiales- + difusa -río ganador-) situada dentro del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa puntual	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga puntual (manantial o grupo de manantiales) pero se desconoce si esta se produce fuera o dentro de los límites del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa difusa	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga difusa (río ganador) pero se desconoce si esta se produce fuera o dentro de los límites del ecotopo
	Flujo horizontal positivo con descarga directa mixta	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero a favor de una descarga de tipo mixta (puntual –manantial o grupo de manantiales- + difusa -río ganador-) pero se desconoce si esta se produce fuera o dentro de los límites del ecotopo
Humedal con alimentación subterránea mixta (vertical y externa) (Tipo F)	Flujo mixto positivo interno	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero como consecuencia de la confluencia de varios procesos (flujo vertical y flujo horizontal) que se desarrollan dentro del ecotopo
	Flujo mixto positivo externo	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero como consecuencia de la confluencia de varios procesos (flujo vertical y flujo horizontal), desarrollándose los procesos asociados al flujo horizontal fuera del ecotopo
	Flujo mixto positivo indiferenciado	El humedal recibe la alimentación desde el acuífero como consecuencia de la confluencia de varios procesos (flujo vertical y flujo horizontal), pero se desconoce si las descarga directas se producen dentro o fuera del ecotopo
Origen Antrópico (Tipo G)	Origen Antrópico	Humedales de origen antrópico tales como graveras, etc…
Sin criterio hidrogeológico (Tipo H)	Sin criterio hidrogeológico	Sin criterio hidrogeológico para clasificar el modelo conceptual que regula la relación humedal-acuífero
Sin relación con la FGP (Tipo I)	Sin relación con la FGP	Humedales que no tienen una relación directa con la FGP, Ej: antiguo 420 (Flujo vertical peculiar). En los casos en que se sitúe sobre sustratos salinos, etc habrá que citarlo en el texto
Humedales costeros (Tipo J)	Humedales costeros	Humedales situados en zonas costeras, en los que existe alimentación subterránea y alimentación asociada a la oscilación de las mareas.
Humedales hipodérmicos (Tipo K)	Humedales hipodérmicos	Reciben la aportación del flujo subsuperficial.

Tabla 3 Tipologías (modelos conceptuales) de relación humedal-acuífero (ampliada). Cuantificación de la relación humedal-acuífero.

incorporación al Texto Refundido de la Ley de Aguas española, incluyen entre sus prioridades la protección tanto de los ecosistemas acuáticos como de los ecosistemas terrestres y los humedales, que dependen directamente de ellos, así como la necesidad de evaluar las repercusiones que el estado cuantitativo de las masas de agua subterránea puede tener en la calidad ecológica de las aguas superficiales y de los ecosistemas terrestres asociados.

Para el desarrollo de este objetivo específico se han seleccionado los ecosistemas que forman parte de la Red Natura 2000, ya que se trata de lugares designados para dar cumplimiento a las obligaciones de dos Directivas relacionadas con la conservación de la naturaleza y la biodiversidad en la Unión Europea:

— Directiva 79/409/CEE del Consejo, de 2 de abril de 1979, relativa a la conservación de las aves silvestres ("Directiva de Aves").
— Directiva 92/43/CEE, del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres ("Directiva de Hábitats").

Ambas Directivas han sido objeto de transposición al ordenamiento jurídico español mediante diversas disposiciones aprobadas desde el año 1995, entre las que cabe destacar la reciente actualización y ampliación normativa aplicable en virtud de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

La Red Natura 2000 constituye el principal instrumento para la conservación de la naturaleza en la Unión Europea, con la finalidad de asegurar la supervivencia a largo plazo de las especies y los hábitats más amenazados, y detener la pérdida de biodiversidad natural en los Estados miembros.

En su fase final la Red Natura 2000 estará formada por "Zonas Especiales de Conservación" (ZEC), designadas a partir de las propuestas de los Estados miembros como "Lugares de Importancia Comunitaria" (LIC) previstas en la "Directiva de Hábitats", así como por las "Zonas de Especial Protección para las Aves" (ZEPA), declaradas en virtud de la "Directiva de Aves". Esta red también incluirá los corredores ecológicos que permitan garantizar la conectividad funcional entre los espacios naturales de singular relevancia para la flora o la fauna silvestres.

En este sentido, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) ha recopilado las propuestas remitidas por las Comunidades autónomas, y en junio de 2009 ha publicado la relación actualizada de los lugares LIC y ZEPA, junto con sus respectivas coberturas digitales para su representación en el entorno de los sistemas de información geográfica. Estas coberturas se encuentran disponibles en la página web del MARM: www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/rednatura2000.

Para el estudio de la interrelación, que se presenta entre aguas subterráneas y ecosistemas naturales de especial interés hídrico, solo se han considerado aquellos LIC y ZEPA donde se han identificado, al menos, uno de los siguientes procesos:

— Tramos de ríos que, según la metodología expuesta en el punto "A" del presente apartado, son susceptibles de dar lugar a un intercambio de agua entre un acuífero y un río en uno u otro sentido.
— Presencia de manantiales principales de acuerdo a la metodología definida en el punto "B" del presente apartado.
— Intercambio de agua, bien en el sentido de ganancia o perdida, entre una zona húmeda y un acuífero, según la metodología expuesta en el punto "C" del presente apartado.

Los resultados que se han obtenido para cada LIC o ZEPA se han recogido en una ficha-resumen y en un mapa sinóptico de cada ecosistema de especial interés hídrico, con los contenidos que se describen a continuación.

Características generales de los ecosistemas

En este apartado se recogen los datos de identificación del ecosistema: Figura de protección (LIC o ZEPA), código y nombre oficial, comunidad autónoma, superficie (expresada en kilómetros cuadrados) y perímetro (en kilómetros). También se indica la vinculación, si ésta existe, entre ambas figuras de protección (LIC y ZEPA), que pueden coincidir total o parcialmente en su extensión.

Contexto hidrogeológico

En este apartado se recogen los principales rasgos que caracterizan la hidrología e hidrogeología del ecosistema a través de los siguientes subapartados:

Litoestratigrafía y permeabilidad. Identifica y describe las formaciones geológicas permeables vinculadas hidrogeológicamente con el ecosistema, indicando su denominación, edad y permeabilidad.

Funcionamiento hidrogeológico. Presenta una breve descripción del funcionamiento hidrogeológico del ecosistema: características de flujo subterráneo regional y local, mecanismos principales de recarga y descarga de aguas subterráneas, y su relación con la red hidrográfica significativa, que afecta a cada ecosistema.

Masas de agua subterránea relacionadas geográficamente con el ecosistema. Se describen las características de las masas de agua subterránea que se encuentran en el ámbito del ecosistema: código, nombre, superficie total de la masa, superficie de la masa en el ecosistema, porcentaje de la superficie del ecosistema que se corresponde con la masa y demarcación hidrográfica a la que pertenece la masa.

Identificación y caracterización de la relación río-acuífero. Contempla los siguientes subapartados:

— *Modelo conceptual.* Se presenta una tabla en la que se relacionan los tramos de cauce fluvial con conexión río-acuífero. Cada tramo se identifica mediante un código compuesto por el indicativo de la demarcación hidrográfica, más el código de la masa de agua subterránea en la que tiene lugar la conexión y el número de tramo asignado dentro de esa masa de agua subterránea. En la tabla también se indica el nombre del cauce correspondiente, y si está comprendido total o parcialmente en el ecosistema; así como las características de la masa de agua superficial relacionada (codificación del CEDEX); la tipología del modelo conceptual asignado a la relación río-acuífero, y las formaciones geológicas permeables en las que se verifica la relación.
— *Cuantificación de la interrelación entre tramos de río y formaciones geológicas permeables.* Para cada tramo de conexión río-acuífero se indica su código, si la descarga es puntual o difusa, y los datos que se han utilizado en el cálculo de la cuantificación, así como el régimen hidrológico sobre el que se han realizado los cálculos.
— *Manantiales.* La información de los manantiales que han sido documentados en el ámbito del ecosistema se ha estructurado de acuerdo al siguiente esquema:

  - *Manantiales inventariados en el ecosistema.* Se indica el número total de manantiales inventariados en el ecosistema, especificando los puntos en que se conoce su localización y caudal (manantiales principales y otros) y los puntos en que únicamente se conocen sus coordenadas.
  - *Manantiales principales con descarga directa a tramos de río que atraviesan o nacen en el ecosistema.* Se detalla la relación de manantiales principales que descargan directamente hacia los tramos de río vinculados con el ecosistema, así como su localización con respecto a los límites del ecosistema, el cauce receptor de la descarga y su correspondencia con el tramo en que se ha caracterizado la conexión río-acuífero, el número de datos, la amplitud de la serie, y el caudal de referencia de cada punto.
  - *Manantiales principales con descarga directa a zonas húmedas en el ecosistema.* Se describe la relación de manantiales principales que descargan directamente hacia zonas húmedas vinculadas con el ecosistema, así como su localización con respecto a los límites del ecosistema, la identificación de la zona húmeda receptora, el número de datos, la amplitud de la serie, y el caudal de referencia de cada punto.

Zonas húmedas. De acuerdo a las tres fuentes de información, que se han descrito en el punto C del apartado de metodología, se indica si cada una de las zonas húmedas que se han analizado están incluidas total o parcialmente en el ecosistema de la Red Natura 2000. También se han caracterizado la tipología que presenta el modelo conceptual de la relación 'zona húmeda-acuífero', incluyendo su clasificación y descripción.

Observaciones. En este apartado se ha incluido información complementaria que se ha considerado de interés para la caracterización hidrogeológica del ecosistema como, por ejemplo, los valores ambientales del lugar que están vinculados al medio hídrico, y su grado de vulnerabilidad en situaciones de sequía. También se ha indicado, en su caso, la existencia de otras figuras de protección de ámbito internacional, nacional o autonómico, declaradas en el ecosistema en estudio.

Mapa sinóptico de la relación río-acuífero, manantiales y zonas húmedas. El mapa sinóptico (figura 1) que acompaña a la ficha-resumen de cada ecosistema de especial interés hídrico de la Red Natura 2000 se ha generado en el entorno de los sistemas de información geográfica, integrando las coberturas y leyendas elaboradas durante la realización de las subactividades 2, 3 y 4 de la Actividad 4 de la Encomienda de Gestión para el ámbito de cada masa de agua subterránea, junto con las coberturas de LIC y ZEPA actualizadas en junio de 2009 por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

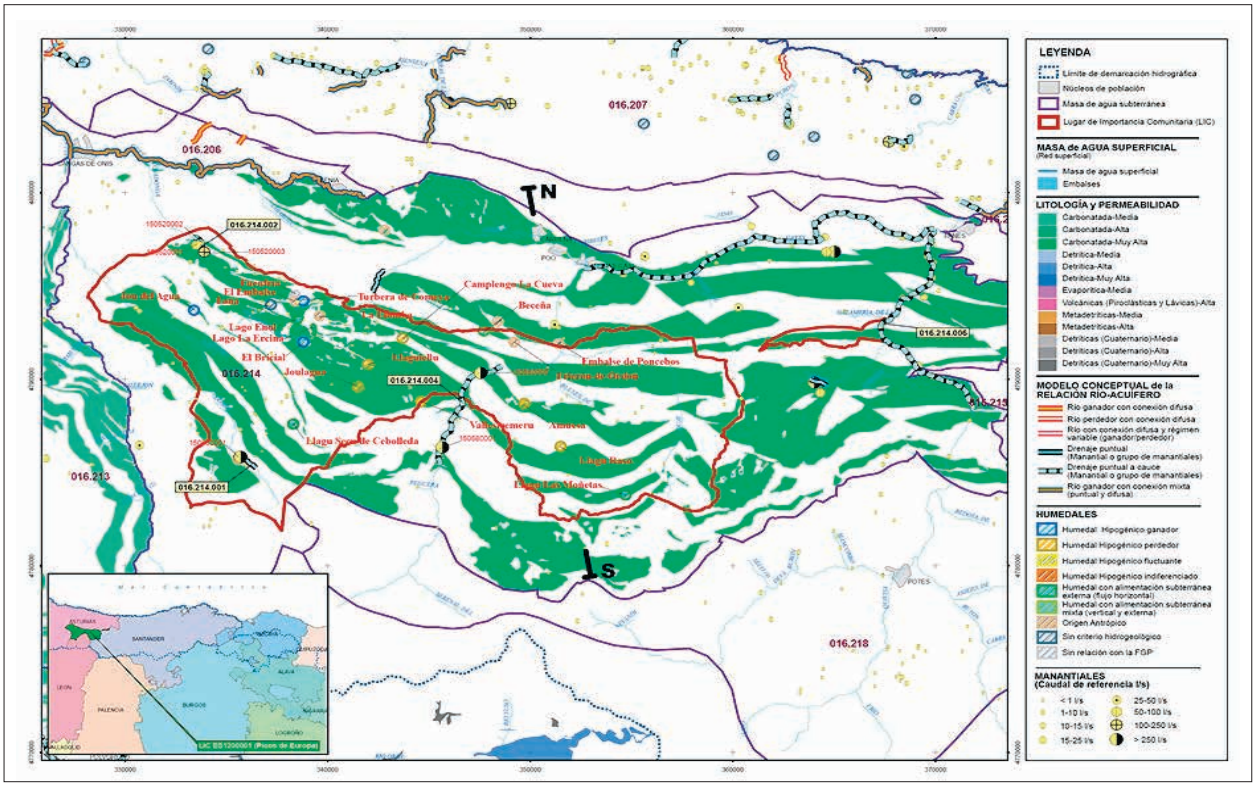


Figura 1. Ejemplo del mapa sinóptico de la relación río-acuífero, manantiales y zonas húmedas en un ecosistema natural de especial interés hídrico de la Red Natura 2000.

RESULTADOS OBTENIDOS

Estos se han estructurado de acuerdo a los siguientes subapartados:

A. Interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden.

B. Identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales.

C. Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre agua subterránea y zonas húmedas.

D. Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

Interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden.

En la tabla 4 se muestra, para cada Demarcación intercomunitaria a la fecha de la firma del Acuerdo suscrito por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) del Ministerio de Educación y Ciencia para la realización del presente trabajo, el número de tramos que se han identificado para cada tipología de modelo conceptual de relación río-acuífero, que se han definido en el apartado de metodología, en la tabla 5 la longitud total de los tramos definidos para cada tipología de modelo conceptual de relación río-acuífero, y en la tabla 6 el número de tramos y la longitud de los mismos atendiendo al sentido de la relación hídrica (ganador, perdedor o variable). En la figura 2 se muestra el mapa de caracterización de la relación río-acuífero identificando los tramos que son ganadores, perdedores o bien tienen una relación de tipo variable, y en la figura 3 el mapa sinóptico de relación río-acuífero atendiendo a su modelo conceptual. A modo de síntesis se realiza para cada demarcación intercomunitaria una breve descripción de su relación río-acuífero.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico. Se han identificado y caracterizado 235 tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero. Estos tramos se distribuyen sobre 30 de las 36 masas de agua subterránea, que se han definido en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico. Los tramos con tipología perdedora se circunscriben en un elevado porcentaje a ríos que atraviesan acuíferos carbonatados con un gran desarrollo kárstico, donde la infiltración se produce a través de sumideros, resurgiendo el agua nuevamente un poco más abajo del lugar donde se produjo la perdida. Los tramos

MODELO CONCEPTUAL DE RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO		NÚMERO DETRAMOS DEFINIDOS									
		Demarcación									
		Cantábrico	Duero	Ebro	Guadalquivir	Guadiana	Júcar	Segura	Miño-Sil	Tajo	TOTAL
Difusa directa (por cauce)	En cauces efluentes	13	39	149	44	8	64	27	13	24	441
	En cauces influentes			13		5				6	
	En cauces variables			21		6				9	
Difusa indirecta (por cauce)	Efecto ducha	0	10	34	26	15	92	15	0	0	414
	Tipo sumidero	11	3	27	0		1	4	0	2	
	Flujo profundo	4	34	3	26		45	10	0	8	
	Indiferenciada	15	5	5	4		3	11	0	1	
Descarga puntual	Un solo manantial	24	17	74	74	6	42	30	0	8	723
	Grupo de manantiales	64	38	78	138		53	71	6		
Conexión mixta (por cauce y manantiales)	Directa y manantiales	97	20	54	57	2	32	14	6	14	364
	Indirecta y manantiales	7	13	15	6		25	2	0	0	
Difusa indiferenciada	Cauces variables	0	0	1	0	0	0	0	0	13	14
TOTAL		**235**	**179**	**474**	**375**	**42**	**357**	**184**	**25**	**85**	**1956**

Tabla 4. Número de tramos por Demarcaciones intercomunitarias que se han identificado para tipología de modelo conceptual de relación río-acuífero que se han definido en el apartado de metodología.

MODELO CONCEPTUAL DE RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO		LONGITUD DE LOS TRAMOS DEFINIDOS (km)									
		Demarcación									
		Cantábrico	Duero	Ebro	Guadalquivir	Guadiana	Júcar	Segura	Miño-Sil	Tajo	TOTAL
Difusa directa (por cauce)	En cauces efluentes	34	1706	1790	482	129	1089	181	399	617	7414
	En cauces influentes			87		183				123	
	En cauces variables			240		165				189	
Difusa indirecta (por cauce)	Efecto ducha	0	320	186	178	346	816	83	0	0	4402
	Tipo sumidero	22	13	74	0		3	8	0	33	
	Flujo profundo	15	1241	13	321		324	42	0	149	
	Indiferenciada	71	24	26	8		18	63	0	5	
Descarga puntual	Un solo manantial	36	22	79	215	55	106	89	0	45	3382
	Grupo de manantiales	276	706	219	692		260	414	168		
Conexión mixta (por cauce y manantiales)	Directa y manantiales	727	429	325	609	141	366	90	139	242	4081
	Indirecta y manantiales	29	314	66	30		386	4	0	184	
Difusa indiferenciada	Cauces variables			4						231	235
TOTAL		**1210**	**4775**	**3109**	**2535**	**1019**	**3368**	**974**	**706**	**1818**	**19514**

Tabla 5. Longitud total por Demarcaciones intercomunitarias de los tramos definidos para cada tipología de modelo conceptual de relación río-acuífero.

ganadores no se sitúan sobre ninguna zona en concreto y se reparten a lo largo de toda la cuenca.

Según la relación de pérdida-ganancia que se ha definido en los tramos de los cauces fluviales, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es la de río ganador (207 tramos y 1.107 kilómetros). Se han identificado 23 tramos en

Demarcación	TIPOLOGÍA DEL TRAMO							
	Ganador		Perdedor		Variable		Total	
	Número de tramos	Longitud total (km)	Número de tramos	Longitud total (km)	Número de tramos	Longitud total (km)	Número de tramos	Longitud total (km)
Cantábrico	207	1107	23	96	5	7	235	1210
Duero	147	3524	12	190	20	1061	179	4775
Ebro	371	2493	80	371	23	245	474	3109
Guadalquivir	339	2256	32	211	4	68	375	2535
Guadiana	16	325	20	529	6	165	42	1019
Jucar	252	2487	84	755	21	126	357	3368
Segura	145	717	29	184	10	73	184	974
Miño-Sil	12	307	0	0	13	399	25	706
Tajo	54	1192	7	128	24	498	85	1818
TOTAL	1543	14408	287	2464	126	2642	1956	19514

Tabla 6. Número de tramos y longitud de los mismos, para cada demarcación intercomunitaria, atendiendo al sentido de la relación hídrica (ganador, perdedor o variable).

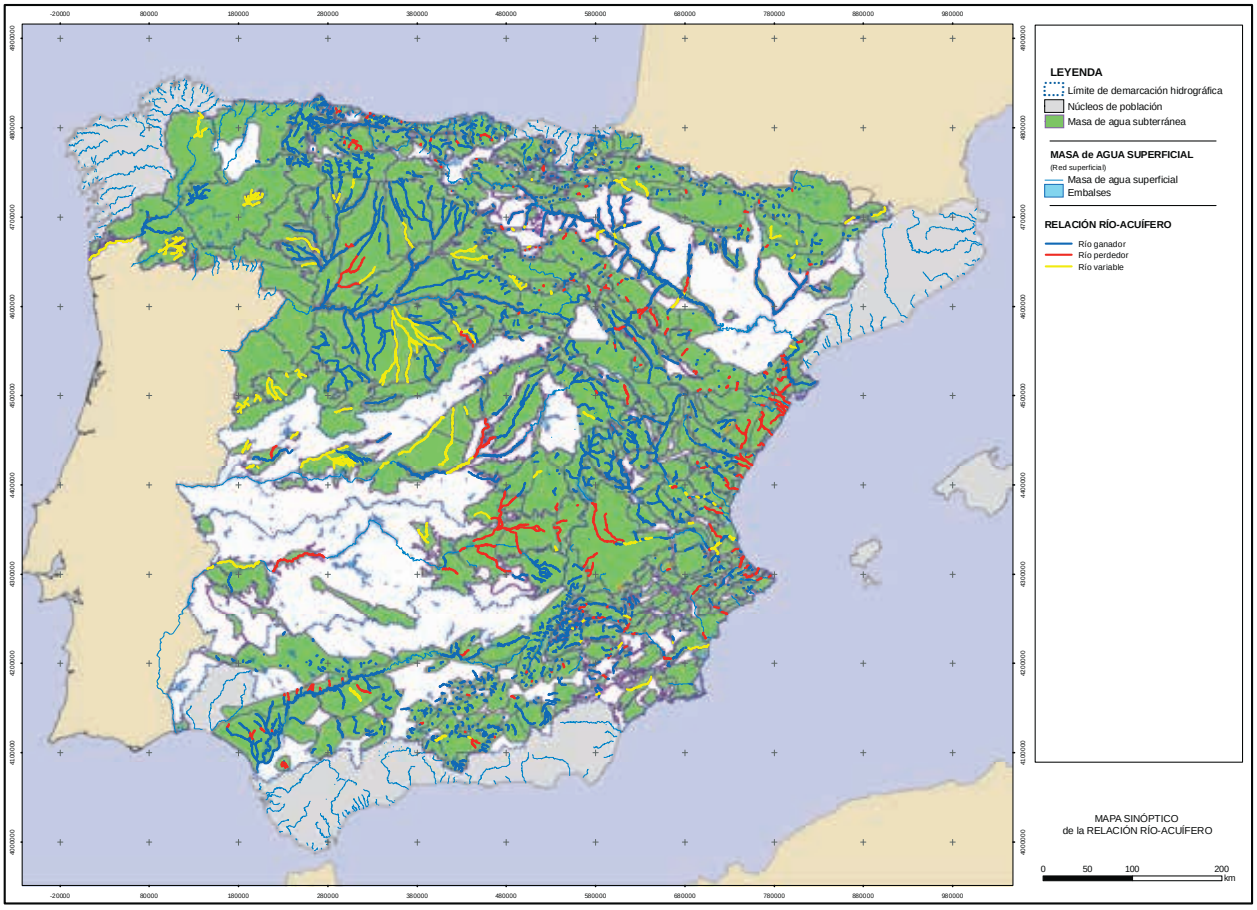


Figura 2. Mapa sinóptico de relación río-acuífero identificando los tramos que son ganadores, perdedores o bien tienen una relación de tipo variable.

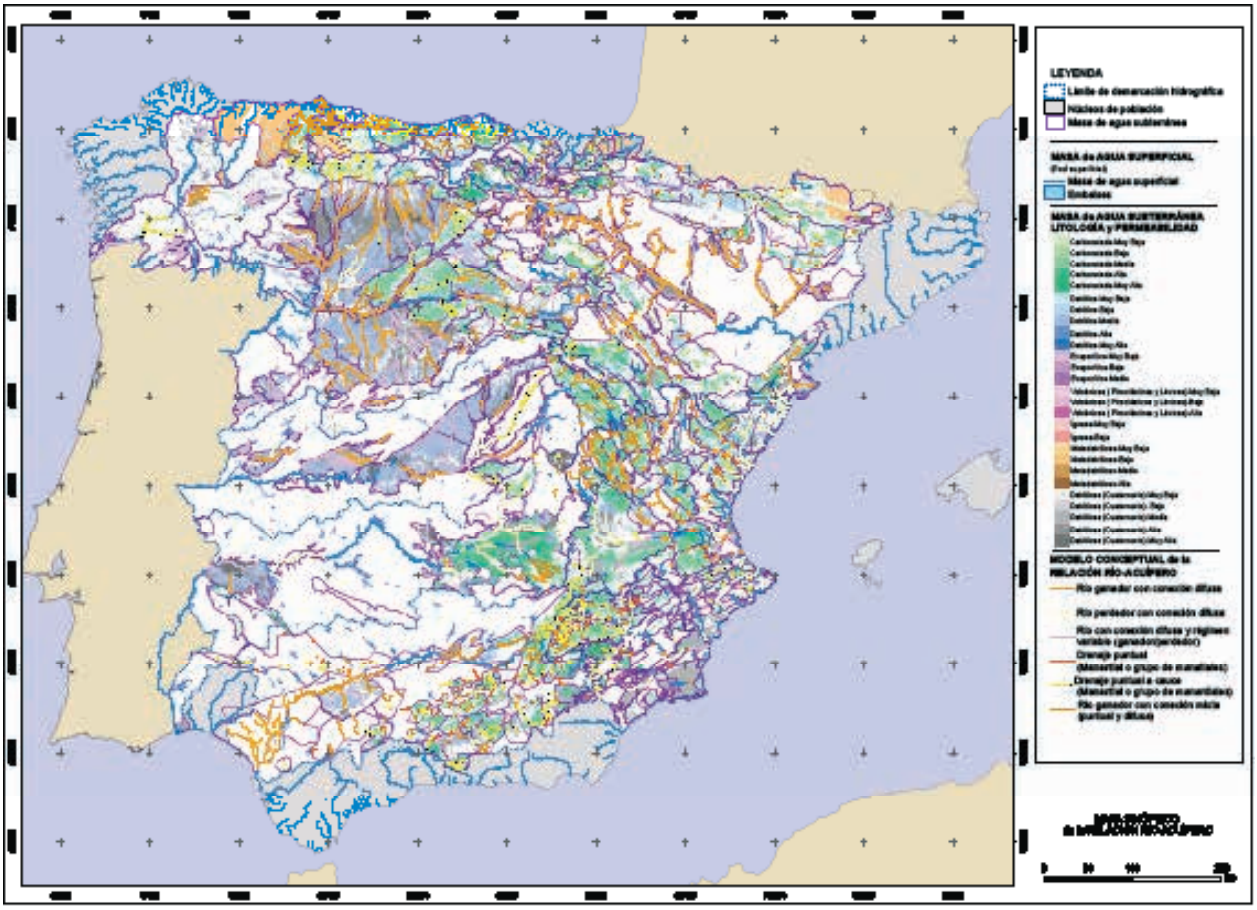


Figura 3. Mapa sinóptico de relación río-acuífero atendiendo al modelo conceptual.

cauces perdedores, y únicamente 5 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable, es decir, donde el río funciona alternativamente como ganador o perdedor dependiendo de una estacionalidad anual o hiperanual.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la conexión clasificada como mixta difusa directa y con manantiales (41 %), en segundo lugar se encuentra la descarga puntual por varios manantiales (27 %) y finalmente la descarga a través de un único manantial (10 %). Estos tres tipos de relación río-acuífero suponen el 78 % de las relaciones río-acuífero que se han identificado.

Demarcación Hidrográfica del Duero. Se han identificado y caracterizado 179 tramos, que en su mayoría se han definido como cauces ganadores con respecto al acuífero. Los tramos que presentan un comportamiento variable se localizan en los ríos Adaja, Eresma y Águeda. El número de tramos con comportamiento perdedor es muy escaso y se localizan en los cauces de los ríos Valderaduey y San Juan, afluentes del río Duratón.

Según la relación de pérdidas-ganancias en los tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es de río efluente o ganador (147 tramos y 3.524 kilómetros). Se han identificado 20 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable, y únicamente 12 tramos donde se ha considerado que los cauces son influentes o perdedores. Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la conexión difusa, tanto directa como indirecta, a través del cauce fluvial. Las conexiones difusas (directas e indirectas) representan el 51 % del total de los tramos caracterizados en la Demarcación Hidrográfica del Duero, mientras que las descargas puntuales por un único manantial o grupo de manantiales representan el 31%, y las conexiones mixtas (por cauce y manantiales) el 18 % del total de tramos identificados.

Demarcación Hidrográfica del Ebro. En la Demarcación del Ebro se ha identificado y caracterizado 474 tramos de cauces fluviales. La gran mayoría de los tramos de río que se han definido como ganadores se localiza geográficamente en el sector central de la Demarcación Hidrográfica del Ebro, coincidiendo con los tramos finales de los principales afluentes del río Ebro y con el propio río Ebro. Los tramos perdedores presentan una mayor dispersión geográfica, aunque suelen tener una mayor presencia en los tramos de cabecera de las cordilleras Ibérica y Pirenaica.
Según la relación de pérdidas-ganancias que se ha definido en los tramos de los cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es de río efluente o ganador (371 tramos y 2.493kilómetros). Se han identificado 80 tramos en cauces influentes o perdedores, y únicamente 23 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable, es decir, donde el río funciona alternativamente como ganador o perdedor con respecto al acuífero durante un cierto periodo de tiempo. Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la conexión difusa, tanto directa como indirecta, a través del cauce fluvial. Las conexiones difusas directas representan el 68 por ciento del total de los tramos caracterizados en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. La interrelación entre cauces fluviales y formaciones geológicas se localiza en 58 masas de agua subterránea y sobre 375 tramos de cauces fluviales. Los tramos perdedores se circunscriben principalmente a los acuíferos detríticos situados al pie de los relieves montañosos impermeables de Sierra Morena o Sierra Nevada. En menor medida se han definido tramos perdedores sobre algunos ríos importantes que atraviesan materiales permeables carbonatados y en otros casos sobre acuíferos aluviales en los que debido a los fuertes bombeos los ríos han pasado a alimentar el acuífero. Los tramos ganadores no se localizan sobre ninguna zona en concreto y se reparten por toda la geografía de la cuenca.

Según la relación de pérdidas-ganancias en los tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es la de río ganador (339 tramos y 2256 kilómetros). Se han identificado 32 tramos en cauces perdedores, y únicamente 4 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la descarga puntual por varios manantiales (36%) y también a través de un único manantial (20%). Entre ambas suman más del 50 % de los tramos con relación río-acuífero identificado en esta demarcación. En otro 17% de las relaciones río-acuífero que se han identificado también se detecta la presencia de algún manantial o grupo de manantiales, que se distribuyen según los modelos de conexión mixta, difusa directa y manantiales (tanto directa como indirecta). El resto de modelos conceptuales identificados en la Demarcación tienen una menor significación.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana. La interrelación entre cauces fluviales y formaciones geológicas permeables se ha identificado en 15 de las 20 masas de agua subterránea que se han definido en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana. Con respecto a las 5 masas de agua subterránea restantes, cabe indicar que en dos masas de agua subterránea no se han identificado formaciones geológicas permeables susceptibles de formar acuíferos de interés (Los Pedroches y Cabecera del Gévora), en otras dos se han reconocido formaciones geológicas permeables, pero su permeabilidad es escasa (Zafra-Olivenza y Ayamonte), y en la última (Aluvial de Jabalón,) la formación geológica permeable que la caracteriza no tiene suficiente entidad como para que la relación río-acuífero se pueda considerar de interés. La conexión río-acuífero se ha identificado y caracterizado en 42 tramos de cauces fluviales.

La gran mayoría de los tramos de río definidos como ganadores se localiza geográficamente en las zonas de cabecera de la cuenca alta del Guadiana. Los tramos perdedores se sitúan mayoritariamente en la zona central de la cuenca alta, en la Mancha Occidental y sus zonas periféricas debido a la actual explotación de la zona. Los tramos de río con conexión variable se localizan principalmente en acuíferos aluviales. En esta cuenca se ha podido estudiar la relación río-acuífero en la cuenca alta del Guadiana en régimen natural e influenciado (figura 4).

La principal diferencia entre la relación de los ríos de la Cuenca Alta en estado natural y en la actualidad, radica en que los ríos que atraviesan la zona central de la misma han pasado de ser variables y recargar el acuífero de la Mancha Occidental en épocas de estiaje y descargarlo en épocas de lluvia, a su actual condición de ríos perdedores debido al descenso del nivel freático por efecto directo de la gran explotación de agua realizada en este acuífero.

Según la relación de pérdida-ganancia que actualmente se da en los cauces fluviales de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, la tipología mayoritaria, tan-

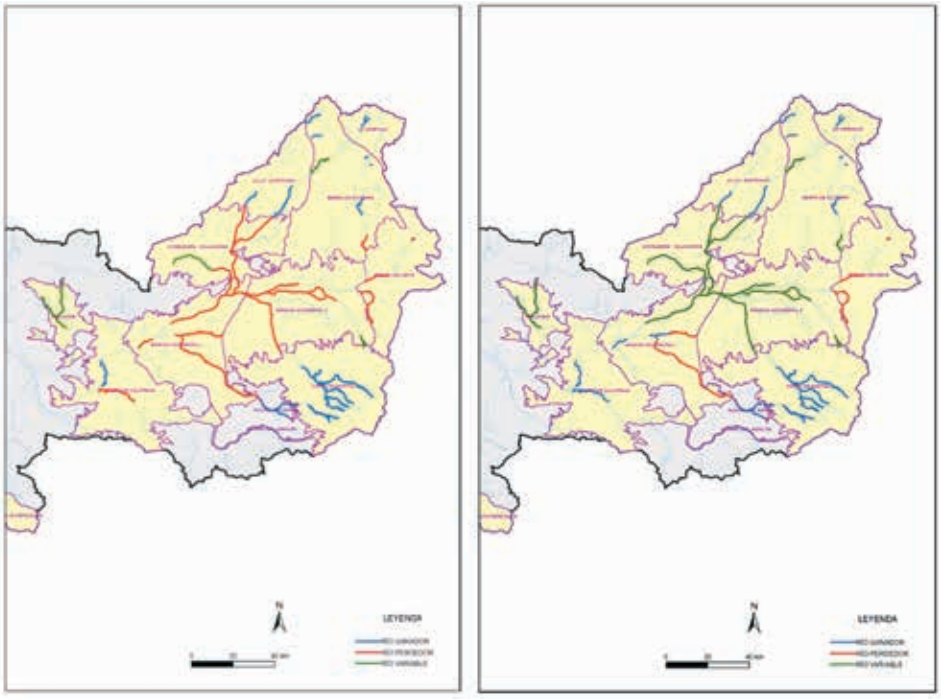


Figura 4. Conexión río-acuífero en régimen natural e influenciado (actual) en la Cuenca Alta del Guadiana

to en número de tramos como en longitud total de los mismos, es la de río influente o perdedor (20 tramos y 529 kilómetros). Se han identificado 16 tramos en cauces efluentes o ganadores, y únicamente 6 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento de tipo variable.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio tanto de la conexión difusa directa como indirecta a través del cauce fluvial. Las conexiones difusas representan el 34 por ciento del total de los tramos donde se han identificado conexión río-acuífero en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana.

Demarcación Hidrográfica del Júcar. La interrelación entre cauces fluviales y formaciones geológicas permeables se ha identificado y caracterizado en 357 tramos de cauces fluviales. La gran mayoría de los tramos de río que se han definido como ganadores se localizan geográficamente en el sector septentrional de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, y también en las zonas montañosas del sector central, entre las que destacan el Macizo del Caroch y la Sierra Grossa. Los tramos perdedores se sitúan mayoritariamente en las zonas costeras, en las que la variación piezométrica y la transición hacia las formaciones hidrogeológicas de las planas costeras favorece la infiltración a través de los cauces fluviales. En el régimen influenciado actual también se han caracterizado como perdedores diversos tramos de cauces fluviales en la Mancha Oriental. Los tramos de río con conexión variable se localizan principalmente en el sector central de la demarcación hidrográfica, coincidiendo fundamentalmente con los cursos medios y bajos de los ríos Júcar y Turia.

Según la relación de pérdidas-ganancias en los tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es de río efluente o ganador (252 tramos y 2.487 kilómetros). Se han identificado 84 tramos en cauces influentes o perdedores, y únicamente 21 tramos con funcionamiento variable.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la conexión difusa, tanto directa como indirecta, a través del cauce fluvial.

Demarcación Hidrográfica del Segura. Se ha identificado conexión río-acuífero en 33 masas de agua subterránea. La interrelación existente entre cauces fluviales y formaciones geológicas permeables se ha identificado y caracterizado en 184 tramos de cauces fluviales. Los tramos perdedores se localizan tanto en algunos acuíferos detríticos con el nivel piezométrico descolgado con respecto a la lámina de agua en el río, como en ciertas zonas en las que los ríos atraviesan acuíferos carbonatados con un gran desarrollo kárstico que favorece la infiltración. Los tramos ganadores se sitúan en la zona de cabecera de los ríos, que en numerosas ocasiones se encuentran ligados a caudalosos manantiales.

Según la relación de pérdidas-ganancias en los tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es de río ganador (145 tramos y 717 kilómetros). Se han identificado 29 tramos en cauces perdedores, y únicamente 10 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio de la descarga puntual por varios manantiales 39 %, seguido de la descarga puntual por un único manantial 16 % y de la conexión difusa directa 14 %, ya que entre las tres suman casi el 70 % de los casos.

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. Se ha identificado y caracterizado 25 tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero. Estos tramos se localizan sobre todas las masas de agua subterránea definidas en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. Su distribución es la siguiente: 2 tramos en la MASb Cuenca Alta del Miño, 5 tramos en la MASb Cuenca Baja del Miño, 7 tramos en la MASb Cuenca del Sil, 4 tramos en la MASb Cubeta del Bierzo, 1 tramo en la MASb Aluvial del Bajo Miño y 6 tramos en la MASb Xinzo de Limia. Los tramos definidos como variables, en los que el río funciona alternativamente como ganador o perdedor durante periodos estacionales o hiperanuales, se localiza en terrenos constituidos por depósitos cuaternarios. Los tramos ganadores se sitúan mayoritariamente en la zona de cabecera del río Sil, en el río Cabe y en el curso bajo del río Miño. Todos estos tramos reciben las descargas de manantiales, aunque en algún caso la conexión es de tipo difusa-directa. En casi todos los tramos analizados el régimen se encuentra influenciado, excepto en dos de ellos, que se corresponden con la cabecera del río Miño.

Según la relación de pérdidas-ganancias que se ha definido en los tramos de los cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es la de cauces variables anuales o hiperanuales, con un total de 13 tramos y 399 kilómetros. Se han identificado otros 12 tramos en cauces ganadores con un total de 307 km.

Según los modelos conceptuales de relación río-acuífero definidos para el presente trabajo, únicamente se han identificado tres tipologías: el 52% corresponde a descarga difusa en cauces variables (ganador-perdedor), mientras que el 48% restante se distribuye a partes iguales entre la descarga puntual a través de varios manantiales 24% y la conexión mixta difusa directa y por manantiales 24%.

Demarcación Hidrográfica del Tajo. Se ha identificado y caracterizado 85 tramos de cauces fluviales que presentan relación río-acuífero. Estos tramos se localizan en 21 de las 24 masas de agua subterránea que se han definido en territorio de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. Los tramos de río definidos como ganadores se distribuyen por toda la cuenca, aunque son más numerosos en la cuenca alta y en las zonas montañosas de cuenca media. Los tramos perdedores son escasos y se distribuyen por toda la cuenca no existiendo ninguna zona donde predominen especialmente. Los tramos perdedores de la cuenca media y baja se encuentran en régimen influenciado. Por lo que respecta a los tramos definidos como variables cabe indicar que se localizan en las zonas medias y bajas, preponderando en éstas últimas.

Según la relación de pérdidas-ganancias en los tramos de cauces fluviales con conexión río-acuífero, la tipología mayoritaria, tanto en número de tramos como en longitud total de los mismos, es de río efluente o ganador (54 tramos y 1.192 kilómetros). Se han identificado, únicamente, 7 tramos en cauces influentes o perdedores, y 24 tramos en los que el cauce presenta un funcionamiento variable.

Con respecto al modelo conceptual de relación río-acuífero, se observa un predominio mayoritario de la conexión difusa directa a través del cauce fluvial. Las conexiones difusas representan el 75 por ciento del total de los tramos en los que se ha identificado conexión río-acuífero en la Demarcación Hidrográfica del Tajo.

Identificación y caracterización de las descargas que tienen lugar a través de manantiales

En figura 5 se muestra el mapa sinóptico de manantiales atendiendo a su caudal. A modo de síntesis se realiza para cada Demarcación intercomunitaria una breve descripción sobre la identificación y caracterización que se ha realizado de estas descargas de agua subterránea.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico. Se han identificado un total de 3.210 manantiales a partir del in-

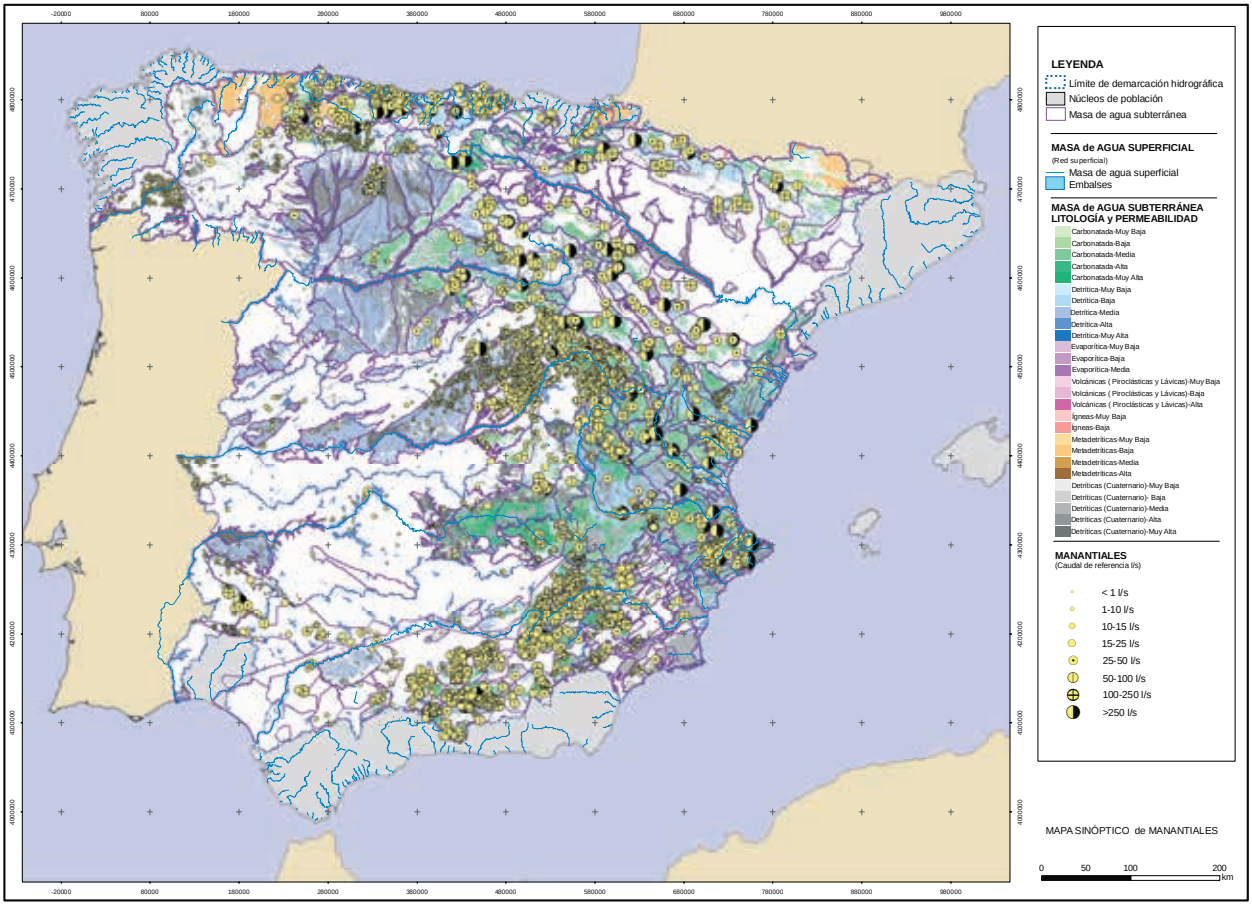


Figura 5. Mapa sinóptico de manantiales atendiendo a su caudal.

ventario del IGME y un total de 93 manantiales a partir del inventario del Ente Vasco de la Energía (EVE). Estas surgencias se distribuyen por todo el ámbito geográfico de la Demarcación hidrográfica del Cantábrico. La mayoría de ellas cuentan con al menos una medida histórica de caudal.

En concreto se ha dispuesto de datos de caudal en 2.874 manantiales inventariados por el IGME, y en 81 por EVE. De este conjunto de surgencias se han seleccionado 333 manantiales (29 corresponden al inventario del EVE) que se han catalogado de principales y representativos de la demarcación.

Demarcación Hidrográfica del Duero. Se han identificado un total de 1.367 manantiales a partir de los datos del inventario de puntos de agua del IGME. Estas surgencias se distribuyen de forma irregular en el ámbito geográfico de la Demarcación Hidrográfica del Duero. Se dispone de datos de caudal en 1.083 manantiales, si bien, la mayoría de estos puntos solo presentan una o dos mediciones de caudal. Del total de manantiales inventariados se han seleccionado 392 manantiales, que se han catalogado como principales o significativos.

Demarcación Hidrográfica del Ebro. A a partir de los inventarios del IGME y de la Confederación Hidrográfica del Ebro se han identificado un total de 4.824 y 7.300 manantiales respectivamente en esta demarcación y se distribuyen por todo su ámbito geográfico. Los puntos donde se han realizado aforos presentan datos correspondientes a diversos periodos de medición, que abarcan desde la actualidad hasta principios de la década de 1970 en los puntos con registros más antiguos.

Se dispone de datos de caudal en 4.119 de los manantiales inventariados por el IGME y en la totalidad de los inventariados por la Confederación (5.253 manantiales) y no por el IGME, si bien la mayoría presentan solo una o dos mediciones de caudal por punto. De la anterior relación se han seleccionado 315 manantiales principales.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Se han identificado un total de 4.968 manantiales a partir del inventario realizado por el IGME en la demarcación. Estas

surgencias se localizan sobre todo en el sector oriental de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y la mayoría de ellas cuenta con al menos un registro histórico de caudal.

En concreto se dispone de datos de caudal en 4.499 manantiales. De éstos se han seleccionado 558 como principales o significativos, dado su importante valor de descarga dentro del contexto hidrogeológico de la masa de agua subterránea a la que pertenecen, o por su importancia histórica. La mayor parte de estos manantiales se encuentran captados para riego y/o abastecimiento a poblaciones, por lo que el régimen hidrológico de los cauces a los que alimentan se encuentra alterado.

MASA	MANANTIALES PRINCIPALES			
Nombre	Código IGME	Nombre	Formación geológica permeable	Caudal medio histórico (L/s)
Sierra de Altomira	222510007	Fuentes de Uclés (1)	Calizas y dolomías mesozoicas	11.1
	222510012	Fuentes de Uclés (2)	Calizas y dolomías mesozoicas	5.6
	222510011	Fuentes de Uclés (3)	Calizas y dolomías mesozoicas	2.8
La Obispalía	-	-	-	-
Lillo - Quintanar	212630003	-	Calizas neógenas	22.2
Consuegra - Villacañas	-	-	-	-
Rus - Valdelobos	232820003	Desconocido	FGP Cenozoica	100.0
Mancha Occidental II	-	-	-	-
Mancha Occidental I	-	-	-	-
Bullaque	-	-	-	-
Campo de Calatrava	-	-	-	-
Campo de Montiel	223110008	-	Calizas y dolomías mesozoicas	100.0
	223110009	-	Calizas y dolomías mesozoicas	100.0
	223150012	-	Calizas y dolomías mesozoicas	40.0
	223150013	-	Calizas y dolomías mesozoicas	200.0
	223150015	-	Calizas y dolomías mesozoicas	50.0
Aluvial del Jabalón	-	-	-	-
Aluvial del Azuer	-	-	-	-
Vegas Bajas	-	-	-	-
Vegas Altas	-	-	-	-
Tierra de Barros	-	-	-	-
Zafra-Olivenza	-	-	-	-
Aroche - Jabugo	093730002	Desconocido	Carbonatos de Aracena	1.4
	093730015	Desconocido	Carbonatos de Aracena	5.0
	093730016	Desconocido	Carbonatos de Aracena	6.0
	093730018	Desconocido	Carbonatos de Aracena	5.0
	103720005	Fuente.Santa	Carbonatos de Aracena	20.0
	103720006	Fuente del Carmen	Carbonatos de Aracena	1.9
	103760010	Fuente de la Duquesa	Carbonatos de Aracena	11.6
	103770051	Fuente Patrimonio	Carbonatos de Aracena	4.0
	103770005	Fuenteheridos	Carbonatos de Aracena	10.0
Ayamonte	—	—	—	—

Tabla 7. Manantiales principales de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana con indicación de la masa de agua subterránea con la que se relacionan, la formación geológica permeable y su caudal medio histórico.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana. La mayoría de los manantiales importantes que se han inventariado en esta demarcación drenan materiales carbonatados en contacto con otros materiales de menor permeabilidad. Se han identificado 19 manantiales principales. Solo se han considerado los que tienen una especial relevancia en la relación río-acuífero, tanto por los materiales que drenan como por los caudales que descargan. En la tabla 7 se indica la masa de agua subterránea con la que se relacionan, la formación geológica permeable que drenan y su caudal histórico.

Demarcación Hidrográfica del Júcar. Se ha identificado un total de 6.094 manantiales a partir de los inventarios realizados por el IGME y la Confederación Hidrográfica del Júcar. Estas surgencias se distribuyen por todo el ámbito geográfico de Demarcación Hidrográfica del Júcar. Los puntos donde se han realizado aforos presentan datos correspondientes a diversos periodos de medición, que abarcan desde la actualidad hasta principios de la década de 1970 en los puntos con registros más antiguos. Se dispone de datos de caudal en 3.723 manantiales, si bien la mayor parte de ellos únicamente presenta una o dos medidas de caudal. Del anterior conjunto se han seleccionado 596 manantiales como de índole principal.

Demarcación Hidrográfica del Segura. Se han identificado un total de 2.392 manantiales a partir del inventario del IGME en esta demarcación. Estas surgencias se distribuyen, sobre todo, en el sector noroccidental, que se corresponde con las sierras de Albacete y de Jaén. La mayor parte de los puntos inventariados cuentan con al menos una medida histórica de caudal. Del anterior conjunto de puntos se han seleccionado 353 como manantiales principales, ya sea por su elevado caudal o por su importancia histórica dentro del contexto de la masa de agua subterránea a la que pertenecen.

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. Se han inventariado un total de 377 manantiales a partir de los inventarios realizados por el IGME y la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil. De las seis masas de agua subterránea definidas en la demarcación, la masa de agua subterránea que se denomina Cuenca Baja del Miño es la que posee un mayor número de manantiales, mientras que la masa de agua subterránea de Xinzo de Limia no tiene inventariada ninguna surgencia de agua. En total se han seleccionado 73 manantiales principales.

Demarcación Hidrográfica del Tajo. A partir del inventario del IGME se han identificado un total de 1.521 manantiales. Estas surgencias se distribuyen por todo el ámbito geográfico de demarcación. La mayor concentración de manantiales, por número e importancia, se localiza en la cuenca alta, disminuyendo en cantidad y caudal hacia el este, según el recorrido del propio río. Casi todos los manantiales inventariados presentan una medición de caudal correspondiente al momento en que se inventarió, que generalmente fue a principios de la década de los 70 de la pasada centuria. Se dispone de datos de caudal en 1.435 manantiales, de los cuales se han seleccionado 62 manantiales como de índole principal.

Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre agua subterránea y zonas húmedas

En figura 6 se muestra el mapa sinóptico de zonas húmedas y masas de agua subterránea. A modo de síntesis se realiza para cada demarcación intercomunitaria una breve descripción sobre las tipologías (modelos conceptuales) de relación humedal-acuífero.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

Se ha inventariado un total de 241 humedales en esta Demarcación, cuya distribución, por Comunidades Autónomas, es la siguiente:

— Cantabria: 17 humedales
  (1 compartido con Asturias)
— Galicia: 1 humedal (1 compartido con Asturias)
— País Vasco: 23 humedales
  (1 compartido con Navarra)
— Principado de Asturias: 200 humedales
  (1 compartido con Cantabria, 1 con Galicia
  y 5 con Castilla y León)
— Castilla y León: 6 humedales (5 compartidos con
  Asturias)
— Comunidad Foral de Navarra: 2 humedales
  (1 compartido con País Vasco).

De los 241 humedales inventariados, 72 se localizan sobre la masa de agua subterránea Eo-Navia-Narcea y 14 no están relacionados con ninguna de las 36 masas de agua subterránea que se han definido en la Demarcación. De los 155 humedales que restan, solamente 42 tienen relación con formaciones geológicas permeables, aunque hay que señalar, que dos

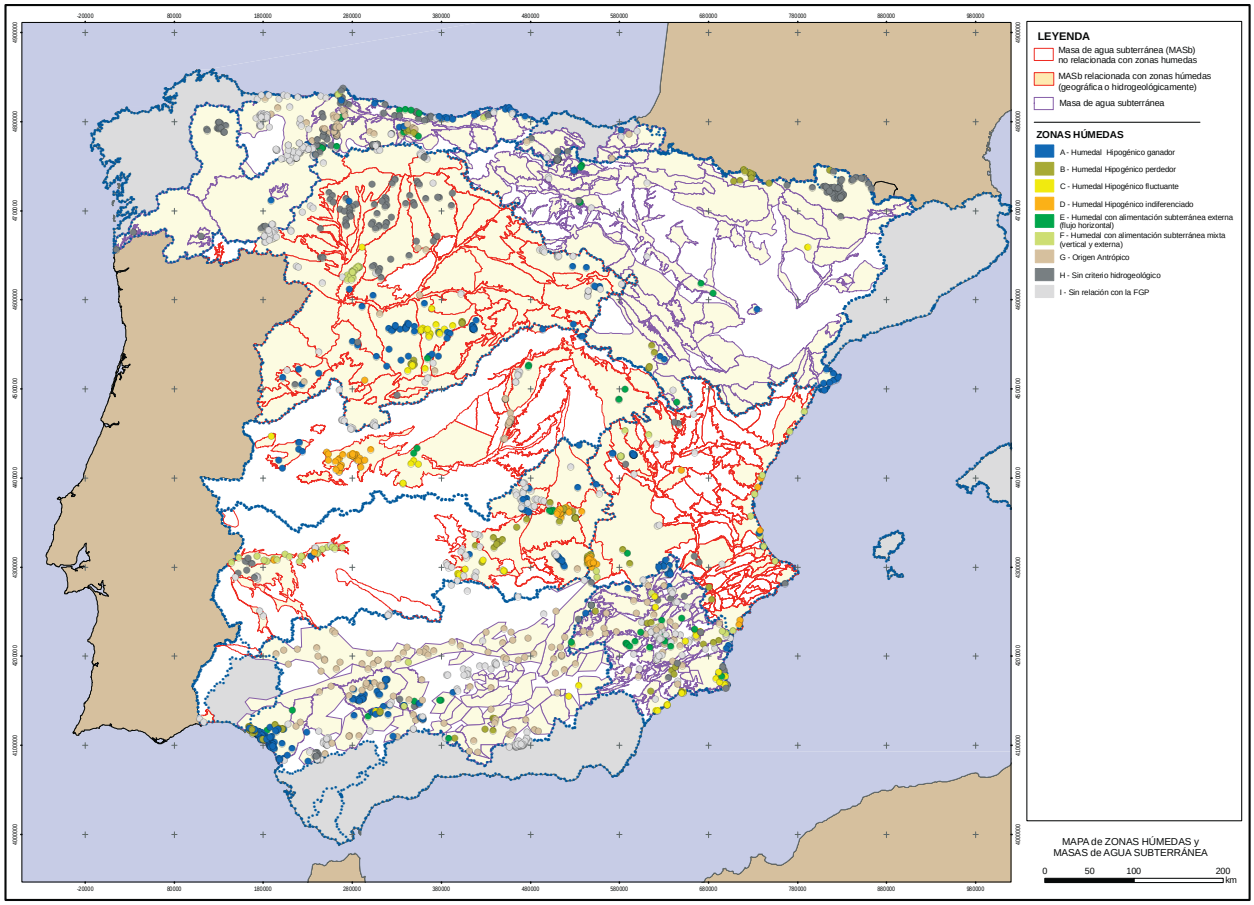


Figura 6. Mapa sinóptico de zonas húmedas y masas de agua subterránea con indicación de la tipología (modelo conceptual) de relación humedal-acuífero.

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º zonas húmedas
A Hipogénico ganador	22
B Hipogénico perdedor	6
C Hipogénico fluctuante	0
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	17
F Alimentación subterránea mixta	5
G Origen Antrópico	34
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	72
I Sin Relación con la masa de agua subterránea	73
TOTAL	**229**

Tabla 8 Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación hidrográfica del Cantábrico)

Nota: Los humedales tipo G pueden ser a su vez tipo H y tipo I.

de estos humedales se relacionan con varías masas de agua subterránea, por eso el número de relaciones tipológicas que figuran en la tabla 8 asciende a 229 en vez de 227.

La masa de agua subterránea con mayor número de humedales es Eo-Navia-Narcea con 72 (4 presentan relación humedal-acuífero), seguida de Somiedo-Trubia-Pravia con 41 (5 presentan relación humedal-acuífero), Picos de Europa con 23 (14 presentan relación humedal-acuífero), Balmaseda-Elorrio con 18 (2 presentan relación humedal-acuífero), Llanes-Ribadesella con 16 (4 presentan relación humedal-acuífero) y Región del Ponga con 16 (ninguno presenta relación humedal-acuífero). Por otro lado hay 16 masas de agua subterránea que carecen de humedales.

En cuanto al tipo de conexión humedal-acuífero, predominan los humedales sin relación con la masa de agua subterránea (73), seguidos de los sin criterio hidrogeológico para clasificarlos (72) y de los de origen antrópico (34).

Demarcación Hidrográfica del Duero. Se han identificado 277 zonas húmedas (tabla 9). Todas ellas se localizan geográficamente en la comunidad autónoma de Castilla y León. En la figura 7 se muestra su distribución por provincias. En dicho gráfico algunas zonas húmedas se han contabilizado por duplicado, ya que se encuentran a caballo entre los ámbitos de dos provincias.

De las 277 zonas húmedas analizadas, 76 no disponen de información suficiente para caracterizar la relación humedal-acuífero. En las 199 restantes, 86 no presentan ninguna relación con formaciones geológicas de permeabilidad media-alta. En las 113 zonas húmedas en las que se ha identificado algún tipo de relación con

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º dezonas húmedas
A Hipogénico ganador	60
B Hipogénico perdedor	8
C Hipogénico fluctuante	23
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa (flujo horizontal)	1
F Alimentación subterránea mixta (vertical y externa)	18
G Origen antrópico	5
H Sin criterio hidrogeológico para clasificarlo	76
I Sin relación con la formación geológica permeable	86
TOTAL	**277**

Tabla 9. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación hidrográfica del Duero)

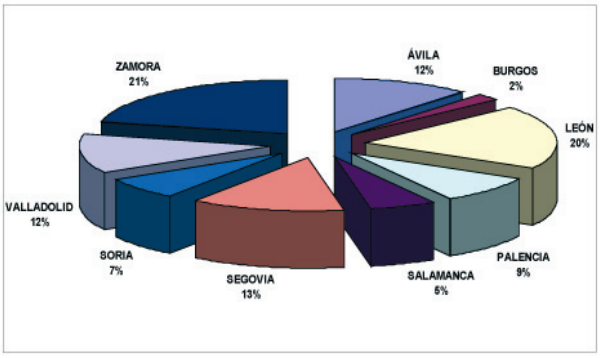


Figura 7. Distribución porcentual por provincias de las zonas húmedas identificadas en la Demarcación Hidrográfica del Duero.

las formaciones geológicas permeables, la tipología de relación humedal-acuífero predominante es la de humedal hipogénico ganador, seguida en número por la de humedal hipogénicos fluctuantes. La única tipología que no se ha identificado ha sido la de hipogénico indiferenciado.

Demarcación Hidrográfica del Ebro. Se han identificado 105 zonas húmedas. Su distribución geográfica por comunidades autónomas es la siguiente: 56 humedales en Cataluña, 28 humedales en la Comunidad Autónoma de Aragón, 9 humedales en el País Vasco, 5 humedales en la Comunidad Foral de Navarra, 3 humedales en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, 2 humedales en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha y 2 humedales en la Comunidad Autónoma de La Rioja.

De los 105 humedales que se han identificado, 91 se encuadran dentro de los límites de alguna de las masas de agua subterránea que se han definido en la Demarcación hidrográfica del Ebro, aunque sólo 36 tienen relación con las formaciones geológicas permeables de alta y media permeabilidad, que afloran en dicha Demarcación, 6 no presentan ningún tipo de conexión y el resto tienen una relación desconocida que no se ha podido determinar.

Las masas de agua subterránea con un mayor número de humedales interrelacionados con acuíferos son el Alto Gállego y el Delta del Ebro. Otra masa de agua subterránea, que presenta un elevado número de humedales (49), aunque sólo uno tiene una relación probada con el acuífero, es la denominada Macizo Axial Pirenaico.

En la tabla 10 se presenta una síntesis con la tipología de relación humedal-acuífero para las 91 zonas húmedas analizadas en el presente estudio. El modelo conceptual de humedal-acuífero que predomina en los humedales de la Demarcación hidrográfica del Ebro es el denominado sin criterio hidrogeológico (64 por ciento), seguido de los hipogénicos perdedores (16 por ciento) y de los hipogénicos ganadores (14 por ciento).

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Se han identificado 375 zonas húmedas. El reparto, por Comunidades Autónomas, es el siguiente:

— Andalucía: 370 humedales
— Castilla-La Mancha: 5 humedales (1 compartido con Andalucía)
— Murcia: 0 humedales
— Extremadura: 2 humedales (1 compartido con Andalucía)

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	13
B Hipogénico perdedor	15
C Hipogénico fluctuante	1
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	7
F Alimentación subterránea mixta	0
G Origen Antrópico	0
H Sin criterio hidrogeológico para clasificarlo	49
I Sin relación con la formaciones geológicas permeables	6
TOTAL	**91**

Tabla 10. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación Hidrográfica del Ebro)

De los 375 humedales que se han identificado, 95 no presentan ninguna relación con las formaciones geológicas permeables, que conforman las 58 masas de agua subterránea que se han definido en la Demarcación hidrográfica del Guadalquivir, y de los 280 humedales que restan solo 189 tienen relación con las formaciones geológicas permeables presentes en la cuenca.

La masa de agua subterránea con un mayor número de humedales es con gran diferencia la Almonte-Marismas del Guadalquivir con 109, seguida de la Altiplanos de Écija con 41. Por otro lado en 19 masas de agua subterránea, pertenecientes a la cuenca alta del Guadalquivir en su mayoría, no se han identificado humedales.

En cuanto a la tipología de relación humedal-acuífero (tabla 11), predominan los humedales hipogénicos ganadores (118), seguidos de los de origen antrópico (114) y de los hipogénicos perdedores (37). El número total de relaciones analizadas asciende a 302, no a 280, ya que hay zonas húmedas, que están compuestos por varios humedales o conjuntos lagunares, que se extienden sobre más de una masa de agua subterránea, dándose la paradoja, que su tipología de relación humedal-acuífero, para cada una de las masas de agua subterráneas interrelacionadas con cada uno de elemento que conforman la zona húmeda, es diferente. Algunos de los humedales con relación tipo G, que se contabilizan en la tabla 11, presentan a su vez (tabla 12) otra categoría adicional dentro de las diferentes tipologías de relación humedal-acuífero definidas en el apartado metodológico.

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º Zonas húmedas
A Hipogénico ganador	118
B Hipogénico perdedor	37
C Hipogénico fluctuante	4
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	8
F Alimentación subterránea mixta	2
G Origen Antrópico	114
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	13
I Sin Relación con la MASb	6
TOTAL	**302**

Tabla 11. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación hidrográfica del Guadalquivir).

Tipología adicional de relación humedal-acuífero para los humedales de Tipo G	N.º Zonas húmedas
A Hipogénico ganador	5
B Hipogénico perdedor	0
C Hipogénico fluctuante	0
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	15
F Alimentación subterránea mixta	2
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	92
I Sin Relación con la MASb	
TOTAL	**114**

Tabla 12. Tipología adicional de relación humedal-acuífero para los humedales de tipo G (Demarcación hidrográfica del Guadalquivir)

Demarcación Hidrográfica del Guadiana. Existen una multitud de zonas húmedas debido a su escaso relieve y a los materiales que la forman. Entre estas zonas húmedas existen algunas que por estar situadas sobre materiales impermeables no tienen relación con las aguas subterráneas, mientras que otras están íntimamente relacionadas con el funcionamiento hidrogeológico de los materiales sobre los que se ubican.

En total se han identificado 339 humedales, cuya distribución por Comunidades Autónomas es la siguiente:

— Extremadura: 201 humedales
— Castilla-La Mancha: 147 humedales
— Andalucía: 4 humedales

De los 339 humedales, que se han identificado en la Demarcación hidrográfica del Guadiana, 182 se localizan sobre masas de agua subterránea, aunque no todos ellos se interrelacionan hidráulicamente con las formaciones geológicas permeables que afloran sobre las mismas. El número de los que presentan conexión hidráulica acuífero-humedal es de 117.

Las masas de agua subterránea con mayor número de humedales interrelacionados con acuíferos son la Mancha Occidental II y el Campo de Montiel, aunque sobre las que se contabiliza un número más elevado de humedales sean las de Consuegra-Villacañas y Campo de Calatrava.

Las masas de agua subterránea de Lillo-Quintanar, Zafra-Olivenza y Ayamonte no tienen humedales que se interrelacionen con las aguas subterráneas, mientras que las masas de agua subterránea de Bullaque, Aluvial del Jabalón, Aluvial del Azuer, Los Pedroches y Cabecera del Gévora carecen de zonas húmedas.

En cuanto a la tipología de relación humedal-acuífero tabla 13, predominan los humedales hipogénicos perdedores 27%, seguidos de los hipogénicos ganadores 24%, en contraposición con los de origen antrópico y

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	28
B Hipogénico perdedor	32
C Hipogénico fluctuante	9
D Hipogénico indiferenciado	16
E Alimentación subterránea externa	4
F Alimentación subterránea mixta	20
G Origen Antrópico	1
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	7
TOTAL	**117**

Tabla 13. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación Hidrográfica del Guadiana)

los que tienen alimentación subterránea externa, que suman únicamente el 4% de los humedales con relación humedal-acuífero.

Demarcación Hidrográfica del Júcar. Se han identificado 68 zonas húmedas. Su distribución por Comunidades Autónomas es la siguiente: 4 humedales en la Comunidad Autónoma de Aragón, 43 humedales en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha y 21 humedales en la Comunidad Valenciana.

En 53 zonas húmedas la información consultada ha permitido definir el modelo conceptual que caracteriza la tipología de la relación humedal-acuífero, en ocho se ha establecido que no existe vinculación hidrogeológica entre el humedal y el acuífero, y en siete no se ha podido determinar la posible interrelación entre el humedal y el acuífero.

Las masas de agua subterránea en las que se localizan un mayor número de zonas húmedas son el Cretácico de Cuenca Norte y Lezuza-El Jardín. En la primera, el elevado número de zonas húmedas que se han identificado se debe a que se ha efectuado un análisis individualizado de las lagunas que figuran en la cobertura del MARM (2008) y que conforman el complejo lagunar de Torcas de Cañada Hoyo: Laguna Seca, Laguna del Tejo, Laguna de la Cruz, Lagunillo del Tejo, Laguna de la Parra, Laguna de las Tortugas, Laguna de la Cardenilla, Laguna Llana y Lagunillo de la Casa de Cantarranas; así como las lagunas que se agrupan en el complejo lagunar de Fuentes: Laguna Negra, Laguna de la Atalaya y Laguna Ojo de Corba.

En la tabla 14 se presenta la tipología de relación humedal-acuífero para las 68 zonas húmedas identificadas en la Demarcación hidrográfica del Júcar. En la misma se observa el predominio de los humedales hipogénicos indiferenciados 28 %, hipogénicos ganadores 21 % y con alimentación subterránea mixta vertical y externa 21 %.

Demarcación Hidrográfica del Segura. Se han identificado 161 humedales. Su distribución por Comunidades Autónomas es la siguiente:

— Andalucía: 4 humedales (1 compartido con Castilla-La Mancha)
— Castilla-La Mancha: 35 humedales (1 compartido con Andalucía y 2 con la Región de Murcia)
— Murcia: 114 humedales (2 compartidos con Castilla-La Mancha)
— Comunidad Valenciana: 11 humedales

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	14
B Hipogénico perdedor	4
C Hipogénico fluctuante	1
D Hipogénico indiferenciado	19
E Alimentación subterránea externa (flujo horizontal)	1
F Alimentación subterránea mixta (vertical y externa)	14
G Sin criterio hidrogeológico para clasificarlo	7
H Sin relación con la FGP	8
TOTAL	**68**

Tabla 14 Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación Hidrográfica del Júcar)

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	17
B Hipogénico perdedor	13
C Hipogénico fluctuante	17
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	16
F Alimentación subterránea mixta	5
G Origen Antrópico	44
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	11
I Sin Relación con la MASb	18
TOTAL	**141**

Tabla 15. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-humedal-acuífero (Demarcación hidrográfica del Segura)

Tipología adicional de relación humedal-acuífero para los humedales de Tipo G	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	1
B Hipogénico perdedor	7
C Hipogénico fluctuante	0
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	6
F Alimentación subterránea mixta	11
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	19
I Sin Relación con la MASb	
TOTAL	**44**

Tabla 16. Tipología adicional de relación humedal-acuífero para los humedales de tipo G (Demarcación hidrográfica del Segura)

De los 161 humedales que se han identificado en la Demarcación hidrográfica del Segura se ha podido establecer que 125 se localizan sobre alguna de las 63 masas de agua subterránea, que se han definido en la Demarcación, aunque solo 66 tienen relación con formaciones geológicas permeables. Los 36 humedales que resta, hasta completar el número de 161, no se encuentran relacionados con ninguna masa de agua subterránea.

La masa de agua subterránea con mayor número de humedales es Sierra Espuña con 15, seguida de Campo de Cartagena con 10, Sinclinal de La Higueracon 9, Vega Media y Baja del Segura con 8, Caravaca con 7 y Sinclinal de Calasparra con 7. Por otro ladocabe indicar que en 23 masas de agua subterránea no se ha identificado ninguna zona húmeda.

En cuanto a la tipología de relación humedal-acuífero (tabla 15), predominan los humedales de origen antrópico (44), seguidos de los hipógenicos ganadores (17) y los sin relación con la masa de agua subterránea (18). El número total de relaciones que se han podido establecer asciende a 141, y no a 125, por las mismas razones que se expusieron en la Demarcación hidrográfica del Guadalquivir.

Algunos de los humedales con relación tipo G, que se contabilizan en la tabla 16 presentan a su vez, tabla 16, otra categoría adicional dentro de las diferentes tipologías de relación humedal-acuífero definidas en el apartado metodológico.

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. En la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil se han identificado 39 zonas húmedas. Su distribución por Comunidades Autónomas es la siguiente:

— Galicia: 19 humedales
— Asturias: 7 humedales (2 compartidos con Castilla-León)
— Castilla-León: 15 humedales (2 compartidos con Asturias)

De los 39 humedales identificados, 35 se localizan sobre alguna de las 6 masas de agua subterránea que se

han definido en la Demarcación (tabla 17), aunque tan solo 4 se interrelacionan con formaciones geológicas permeables.

Masa de agua subterránea	N.º de zonas húmedas que se localizan sobre la masa de agua subterránea	N.º de zonas húmedas con relación humedal-acuífero
A Cuenca Alta del Miño	13	0
B Cuenca Baja del Miño	0	0
C Cuenca del Sil	19	2
D Cubeta del Bierzo	0	0
E Aluvial del bajo Miño	2	0
F Xinzo de Limia	1	0
TOTAL	**35**	**2**

Tabla 17. Zonas húmedas relacionados con masas de agua subterránea y zonas húmedas interrelacionadas con acuíferos (Demarcación hidrográfica del Miño-Sil).

La masa de agua subterránea con un mayor número de humedales es la Cuenca del Sil con 19 seguida de la masa de agua subterránea Cuenca Alta del Miño con 13. En cuanto a la tipología de relación humedal-acuífero (tabla18), predominan los humedales sin criterio hidrogeológico para clasificarlos (19), seguidos de los sin relación con la MASb (14).

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	2
B Hipogénico perdedor	0
C Hipogénico fluctuante	0
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	0
F Alimentación subterránea mixta	0
G Origen Antrópico	0
H Sin Criterio hidrogeológico para clasificarlo	19
I Sin Relación con la MASb	14
TOTAL	**35**

Tabla 18. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación hidrográfica del Miño-Sil)

Demarcación Hidrográfica del Tajo. Se han identificado 171 zonas húmedas, aunque solo 71 se localizan sobre alguna de las 24 masas de agua subterránea que se han definido en dicha Demarcación. De esas 71, en 15 no se puede establecer ningún vínculo con el agua subterránea, ya que se localizan sobre terrenos impermeables, mientras que en 27 no se dispone de información suficiente para su clasificación y en 29 si se puede definir la tipología de un modelo conceptual que explique la relación hidrológica que existe entre la zona húmeda y la masa de agua subterránea.

Las masas de agua subterránea Tiétar y Aluviales Jarama-Tajuña son las que posee un mayor número de zonas húmedas, 27 la primera y 11 la segunda. Además, todas ellas se encuentran interrelacionadas con el agua subterránea.

En la tabla 19 se muestra la tipología del modelo conceptual que explica la relación hidrológica que existe entre la zona húmeda y la masa de agua subterránea. La mayoría de las zonas húmedas tienen un origen antrópico y son graveras situadas en los aluviales de los ríos Jarama y Alberche.

Tipología de relación humedal-acuífero	N.º de zonas húmedas
A Hipogénico ganador	1
B Hipogénico perdedor	0
C Hipogénico fluctuante	6
D Hipogénico indiferenciado	0
E Alimentación subterránea externa	6
F Alimentación subterránea mixta	0
G Origen antrópico	16
H Sin criterio hidrogeológico para clasificarlo	27
TOTAL	**56**

Tabla 19. Número de zonas húmedas según su tipología de relación humedal-acuífero (Demarcación Hidrográfica del Tajo)

Interrelación entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

A continuación se realiza para cada Demarcación intercomunitaria una breve descripción sobre la interrelación entre aguas superficiales y subterráneas por lo que respecta a ecosistemas naturales de especial interés hídrico.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico. En el ámbito de esta demarcación se han identificado 138 lugares de la Red Natura 2000, que corresponden a 109 LICs y 29

ZEPAs, cuya superficie se encuentra comprendida total o parcialmente dentro de dicha Demarcación.

El 20,7 % (3.565 km^2) de la superficie de las masas de agua subterránea de la Demarcación del Cantábrico se encuentra ocupada por LICs. La masa de agua subterránea con una mayor superficie ocupada por LICs es Itxina, con un 92 %, seguida de Peña Ubiña-Peña Rueda, con un 92 %. En contraposición, la masa de agua subterránea de Oiz no tiene ningún LICs o parte de los mismos dentro de sus límites. La masa de agua subterránea que contiene (total o parcialmente) un mayor número de LICs es Eo-Navia-Narcea, que interseccIona con 12 de ellos.

El 15 % de la superficie de las masas de agua subterránea de la demarcación del Cantábrico está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta una mayor superficie ocupada por ZEPAs es Peña Ubiña-Peña Rueda, con una superficie del 92 %. Dentro de la demarcación, 18 masas de agua subterránea no interseccionan con ninguna ZEPA. La masa de agua subterránea con un mayor número de ZEPAs es Eo-Navia-Narcea, que interseccIona con 7 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 81 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 61 LICs, de los cuales 39 (64 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico, mientras que los 22 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 20 ZEPAs, de las cuales 9 (45 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico, mientras que los 11 restantes están compartidos con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Duero. En el ámbito de esta demarcación se localizan total o parcialmente 185 lugares de la Red Natura 2000, que corresponden a 115 LICs y 70 ZEPAs.

El 17 % (13.856 km^2) de la superficie de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Duero se encuentra ocupada por LICs. La MASb con una mayor superficie cubierta por LICs es Cervera de Pisuerga, con más del 76 %. En contraposición, las masas de agua subterránea Raña del Órbigo y Verín no tiene ningún LICs o parte de los mismos dentro de sus límites. La masa de agua subterránea que contiene total o parcialmente un mayor número de LICs es Sierra de Ávila, que interseccIona con 8 ecosistemas de este tipo.

El 18 % (14.421 km^2) de la superficie de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Duero está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta una mayor superficie ocupada por ZEPAs es Tierra de Campos, con más del 87 %, seguida de Cervera de Pisuerga con una superficie cubierta superior al 76 %. Las MASb Aluvial del Esla, Raña del Órbigo, Vilardevós-Laza, Páramo de Astudillo, Verín, Cabrejas-Soria, Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas), Páramo de Cuellar, Páramo de Corcos, Valle de Amblés y Valdecorneja no tienen ZEPAs o parte de las mismas dentro de sus límites. Las que contienen total o parcialmente un mayor número de ZEPAs son Tierra de Campos, Medina del Campo y Sierra de Ávila que interseccionan con 6 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 95 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 56 LICs, de los cuales 40 (71 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica, mientras que los 16 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 39 ZEPAs, de las cuales 25 (64 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica, mientras que las 14 restantes se encuentran compartidas con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Ebro. En el ámbito de esta demarcación se localizan total o parcialmente 437 lugares de la Red Natura 2000, que corresponden a 302 LIC y 135 ZEPA.

Se ha identificado que existe una interrelación directa con las aguas subterráneas en 175 lugares (119 LICs y 56 ZEPAs), que se distribuyen de la siguiente manera:

— Por lo que respecta a los 119 LIC, 107 (90 %) se encuentran íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica, mientras que los 12 restantes están compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— De las 56 ZEPA, 48 (88 %) se encuentran íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica, mientras que las 14 restantes están compartidas con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. En el ámbito de esta demarcación se localizan total o parcialmente 113 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 81 LICs y 31 ZEPAs.

El 26,6% (9.438 km^2) de la superficie de masas de agua subterránea de la demarcación del Guadalquivir se encuentra ocupada por LICs. La MASb con una mayor superficie ocupada por LICs es Quesada-Castril , con el 85%, en contraposición, las de La Zarza, Ahillo-Caracolera, Sierra de Las Estancias, Jabalcón, Jabalcuz, Jaén, San Cristobal, Mentidero-Montesinos, Porcuna, Montes Orientales. Sector Norte, Sierra Elvira, Madrid-Parapanda, Albayate-Chanzas, Guadahortuna-Larva, Grajales-Pandera-Carchel y Gracia-Ventisquero carecen de LICs dentro de sus límites. Las MASb que contienen (total o parcialmente)un mayor número de LICs son Sierra Morena y Sierra de Cazorla que interseccionan 6 cada una.

El 20 % de la superficie de masas de agua subterránea en la demarcación del Guadalquivir está ocupada por ZEPAs, la que presenta una mayor superficie ocupada por ZEPAs es Sierra Mágina), con una superficie de casi el 80%, seguida de Sierra de Padul, con un 76 %. Dentro de la Demarcación 32 MASb no contienen ninguna ZEPA. La masa de agua subterránea con un mayor número de ZEPAs es Sierra y Mioceno de Estepa, que interseccionan 5 de ellas.

Se ha identificado la interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 62 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 44 LIC, de los cuales 29 (66 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica, mientras que los 15 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 18 ZEPA, de las cuales 9 (50%) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica, mientras que los 9 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana. En el ámbito de esta demarcación Hidrográfica del Guadiana se localizan total o parcialmente 139 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 85 LICs y 54 ZEPAs.

El 5 % (1.146 km^2) de la superficie de masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana se encuentran ocupadas por LICs. La masa de agua subterránea con una mayor superficie ocupada por LICs es Aroche-Jabugo, con casi el 60 %. En contraposición, las masas de agua subterránea de Rus-Valdelobos, Aluvial del Jabalón y Aluvial del Azuer no tienen ningún LICs dentro de sus límites. La masa de agua subterránea que contiene (total o parcialmente) mayor número de LICs es Zafra-Olivenza, que interseccionа a 12 de ellos.

El 9 % de la superficie de masas de agua subterránea en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta mayor superficie ocupada por ZEPAs es, al igual que ocurría con los LICs, Aroche-Jabugo, con una superficie ocupada de casi el 60 %, seguida de Cabecera del Gévora, con un 56 %. Las masas de agua subterránea de La Obispalía y Los Pedroches no contienen ninguna ZEPA en su interior. Al igual que con los LICS, la masa de agua subterránea con mayor número de ZEPAs es Zafra-Olivenza, que interseccionа a 6 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 23 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 12 LICs, de los cuales 8 (66%) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica, mientras que los 4 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 11 ZEPAs, de las cuales 5 (45 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica mientras que las 6 restantes se encuentran compartidas con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Júcar. En el ámbito de esta demarcación se localizan total o parcialmente 180 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 125 LICs y 55 ZEPAs.

El 22,45 % (9.166 km^2) de la superficie de las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Júcar se encuentra ocupada por LICs. La masa de agua subterránea con una mayor superficie cubierta por LICs es Sierra del Toro, con más del 96 %. En contraposición, las masas de agua subterránea Sierra de Oliva, Cuchillo-Moratalla, Rocín, Sierra Lácera, Agost-Monnegre, Sierra del Reclot y Sierra del Argallet no tienen ningún LICs dentro de sus límites. La masa de agua subterránea que contiene total o parcialmente un mayor número de LICs es Montes Universales, que interseccionа con 13 ecosistemas de este tipo.

El 21 % (8.505 km^2) de la superficie de las masas de agua subterránea en la Demarcación Hidrográfica del Júcar está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta mayor superficie ocupada por ZEPAs es Mediodía que, en conjunto, cubren más del 87 % de esta masa, seguida de Onda-Espadán, con un 86 %. Las de la Plana de Vinaroz, Arquillo, Terciario de Alarcón, Sierra del Toro, La Contienda, Hoya de Játiva, Sierra de las Agujas, Rocín, Sierra del Reclot y Sierra del Argallet no contienen ZEPAs. La MASb con un mayor número de ZEPAs es Bajo Vinalopó, que interseccionа con 6 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 98 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 65 LICs, de los cuales 56 (84 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica del Júcar, mientras que los 9 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 33 ZEPAs, de las cuales 26 (79 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la demarcación hidrográfica del Júar, mientras que las 7 restantes se encuentran compartidas con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. En el ámbito de esta demarcación se localizan total o parcialmente 41 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 29 LICs y 12 ZEPAs.

El 20 % (3.490 km^2) de la superficie de masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil se encuentra ocupada por LICs. Lamasa de agua subterránea con una mayor superficie ocupada por LICs es Cuenca del Sil, con un 36,9 %, seguida de Aluvial del Bajo Miño, con un 19,4 % de ocupación. La masa de agua subterránea que contiene (total o parcialmente) un mayor número de LICs es Cuenca del Sil, que interseccionа a 21 de ellos.

El 11 % de la superficie de masas de agua subterránea en esta demarcación está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta mayor superficie ocupada por ZEPAs es Cuenca del Sil, con un 20,5%. Dentro de la demarcación 3 masas de agua subterránea no interseccionan con ninguna ZEPA, que son Cuenca Alta del Miño, Cubeta del Bierzo y Xinzo de Limia. La masa de agua subterránea con un mayor número de ZEPAs es Cuenca del Sil, que interseccionа con 10 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 14 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 10 LICs, de los cuales 6 (60 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica, mientras que los 4 restantes están compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 4 ZEPAs, de las cuales 1 (25 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica, mientras que los 3 restantes están compartidos con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Segura. En el ámbito de la demarcación se localizan total o parcialmente 105 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 75 LICs y 30 ZEPAs.

El 22 % (3.312 km^2) de la superficie de masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Segura se encuentra ocupada por LICs. La masa de agua subterránea con una mayor superficie ocupada por LICs es Machada, con casi el 100 %. En contraposición, de Conejeros-Albatana, Ontur, Sierra de La Oliva, Moratilla, Lacera, Sierra del Argallet, Sierra de La Zarza, Triásico de Las Victorias, Sierra de Las Estancias y Las Norias no tienen ningún LICs dentro de sus límites. La MASb que contiene (total o parcialmente) mayor número de LICs es Sierra de Cartagena, que interseccionа a 5 de ellos.

El 23 % de la superficie de masas de agua subterránea en la Demarcación Hidrográfica del Segura está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta mayor superficie ocupada por ZEPAs es, al igual que ocurría con los LICs, Machada, con una superficie ocupada de casi el 100%, seguida de Calar del Mundo, con un 93 %. Las masas de agua subterránea de Pino, Conejeros-Albatana, Ontur, Cuchillos-Cabras, Lacera, El Cantal-Viña Pi, Sierra del Argallet, Sierra de La Zarza, Alto Quípar, Vega Alta del Segura, Triásico de Las Victoria, Triásico de Carrascoy, Sierra de Las Estancias), Enmedio-Cabezo de Jara, Las Norias y Sierra de Almagro no contienen ninguna ZEPA. La masa de agua subterránea con un mayor número de ZEPAs es Sierra Espuña, que interseccionа a 4 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 50 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 33 LICs, de los cuales 26 (79 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica

del Segura, mientras que los 7 restantes se encuentran compartidas con las demarcaciones limítrofes.
— 17 ZEPAs, de las cuales 12 (71 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Segura, mientras que las 5 restantes se encuentran compartidas con las demarcaciones limítrofes.

Demarcación Hidrográfica del Tajo. En el ámbito de la demarcación se localizan total o parcialmente 181 lugares de la Red Natura 2000, que se corresponden con 102 LICs y 79 ZEPAs.

El 25 % (21.866 km^2) de la superficie de masas de agua subterránea de la Demarcación del Tajo se encuentra ocupada por LICs. Las masas de agua subterráneas con una mayor superficie ocupada por LICs son Cabecera del Bornova y Entrepeñas, superando el 70 % de ocupación. En contraposición, la masa de agua subterránea Talaván, prácticamente carece de superficie ocupada por LICs, seguida de las masas de agua subterránea Galisteo y La Alcarria con tan sólo el 2 % de. La masa de agua subterránea que contiene (total o parcialmente) un mayor número de LICs es Tajuña-Montes Universales, que interseccionа a 12 de ellos.

El 27 % de la superficie de masas de agua subterránea en la Demarcación Hidrográfica del Tajo está ocupada por ZEPAs. La masa de agua subterránea que presenta mayor superficie ocupada por ZEPAs es Tajuña-Montes Universales con una superficie de casi el 74 %, seguida de Entrepeñas con un 70 %. Las masa de agua subterránea de Zarza de Granadilla no tiene ninguna ZEPA en su interior y la masa de agua subterránea Moraleja tiene únicamente una ZEPA interseccionando su superficie, con una ocupación de tan solo el 0,2%.La masa de agua subterránea con un mayor número de ZEPAs es Tiétar que interseccionа a 12 de ellas.

Se ha identificado que existe interrelación directa entre aguas superficiales y subterráneas en 67 lugares pertenecientes a la Red Natura 2000, que se distribuyen de la siguiente manera:

— 38 LICs, de los cuales 23 (60 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica, mientras que los 15 restantes se encuentran compartidos con las demarcaciones limítrofes.
— 29 ZEPAs, de las cuales 19 (65 %) se localizan íntegramente en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Tajo, mientras que los 10 restantes están compartidos con las demarcaciones limítrofes.

CONSIDERACIONES FINALES

La información de carácter hidrogeológico que se dispone en España se puede catalogar a escala de todo el territorio nacional de obsoleta y anticuada, aunque en todas las Demarcaciones existen masas de agua subterránea donde el nivel de conocimiento hidrogeológico se puede calificar de alto o muy alto. De acuerdo a la información media de que se ha dispuesto, se puede afirmar que se ha obtenido un resultado que se puede calificar de pobre en lo que se refiere a la definición, caracterización y cuantificación de los tramos de río que presentan relación río-acuífero, y de claramente insuficiente en lo que respecta a la determinación de la relación humedal-acuífero.

A este respecto, se antoja necesario profundizar en números aspectos de las relaciones río-acuífero identificadas, pero que no han podido ser definidas con mayor rigor y exactitud, ante la falta, por ejemplo, de aforos diferenciales o datos piezométricos próximos a los cauces fluviales. En general, el modelo conceptual de las relaciones río-acuífero se ha podido establecer con una cierta fiabilidad en la mayoría de los tramos que se han identificado, pero no ocurre lo mismo con la cuantificación del caudal ganado o perdido en un determinado tramo, y con su evolución temporal tanto a escala anual como hiperanual, ya que en un gran número de situaciones se ha recurrido con frecuencia a datos de caudal obsoletos, escasos o sin periodicidad temporal.

En el caso de la relación humedal-acuífero la información hidrogeológica de que se dispone es todavía más escasa y deficitaria, por lo que los resultados que se han obtenido se pueden catalogar con el baremo de insuficiente para la mayoría de los humedales que se han analizado. A este respecto cabe indicar que no ha sido posible definir la tipología de la relación humedal-acuí fero en aproximadamente un tercio de los humedales que se han analizados. Por lo que se refiere a su caracterización o a su cuantificación solo ha sido posible realizarla en un número muy reducido de zonas húmedas.

Cabe por tanto recomendar la realización de estudios específicos encaminados a obtener una mejor definición de la interrelación que existe entre aguas superficiales y subterráneas en lo que respecta a cursos fluviales de cualquier orden, manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Entre las distintas actuaciones que se pueden proponer cabe destacar las siguientes:

— Diseño e instalación de nuevas estaciones de aforos definidas con criterios hidrogeológicos.
— Construcción e instrumentación de piezómetros localizados próximos a tramos de ríos ganadores o perdedores.
— Seguimiento periódico de redes de control de foronomía, hidrometría y piezometría.
— Mejora del conocimiento de las extracciones de agua subterránea y superficial con objeto de poder restituir el régimen hidrológico actual al natural.
— Ampliar y mejorar el inventario de manantiales.
— En el caso de la relación humedal-acuífero, dada la escasez de información que existe, se propone como totalmente necesario, si se quiere mejorar el conocimiento hidrogeológico de las zonas húmedas, controlar la evolución de la lámina de agua en los humedales, realizar una batimetría de los mismos, instalar estaciones termopluviométricas y evaporimétricas, construir e instrumentalizar redes de piezometría cercanas a los humedales, y diseñar, construir y realizar periódicamente aforos en los cauces y manantiales tributarios de los humedales.

Antes de proceder a construir y diseñar una red de aforos permanente, se recomienda operar una red temporal de aforos durante dos años con cadencia de medición mensual, e instrumentalizada a nivel diario en sus puntos más significativos. Dicha red constaría de 1.147 secciones de acuerdo a la distribución por demarcaciones hidrográficas, que figura en la tabla 20.

Demarcación Hidrográfica	Estaciones temporales de control foronómico
Miño-Sil	20
Cantábrico	260
Duero	143
Ebro	233
Tajo	56
Júcar	23
Guadiana	49
Segura	168
Guadalquivir	338
TOTAL	**1147**

Tabla 20. Distribución por demarcaciones hidrográficas de las secciones de control de una red temporal de aforos que se recomienda operar antes de diseñar y construir con criterio hidrogeológico una de tipo permanente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DGA-IGME (2010). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico. Demarcaciones Hidrográficas del Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro. Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME (MCIN) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

DGOH (1990). Estudio de las zonas húmedas de la España peninsular: Inventario y tipificación. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid, 435 p.

MMA (2006): Base documental de los humedales españoles (BDHE, Versión 4, abril 2006). Dirección General para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente. Formato digital.

MOPTMA-MINNER (1994). Libro Blanco de las Aguas Subterráneas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Dirección General de Calidad de las Aguas (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente) e Instituto Tecnológico Geominero de España (Ministerio de Industria y Energía), Madrid, 135 p.

MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

Gerardo Ramos González

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 5 *Mapa piezométrico de España* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Director de la actividad:

Gerardo Ramos Gónzalez. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España

Colaboración de los técnicos de las Unidades Territoriales de:
Santiago de Compostela
Asturias
Salamanca
Sevilla
Granada
Almería
Murcia
Valencia
Zaragoza
Baleares

Empresas colaboradoras:

TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA (T.R.T.)
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE RECURSOS NATURALES (IDRENA)
AESIA

MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se expone una síntesis de los trabajos de elaboración del mapa piezométrico de España. Los objetivos específicos del proyecto consistieron en la realización de dos mapas piezométricos generales representativos de dos estados característicos en el régimen hidrodinámico de las aguas subterráneas:

— Un mapa que se pueda considerar lo más aproximado posible a un estado de régimen natural o influenciado en el menor grado posible, de los acuíferos.
— Un mapa representativo del estado actual de las aguas subterráneas, elaborado con los datos de las redes oficiales de control piezométrico existente en cada cuenca hidrográfica. Por indicación de la Dirección General de Aguas este mapa se refiere al mes de mayo de 2008.

PUNTOS DE AGUA UTILIZADOS			
Cuenca	**Estado Natural**	**Manantiales**	**2008**
Norte	466	247	48
Tajo	3.388	121	143
Ebro	1.508	509	232
Segura	3.327	199	115
Internas Cataluña	1.582	89	191
Baleares	4.162	24	625
Guadalquivir	2.951	1.256	160
Guadiana	2.046	137	91
Duero	297	559	206
Andaluzas	5.900	558	171
	28.452	4.560	2.247

Tabla 1. Distribución de puntos de agua por cuencas hidrográficas.

Estos mapas se han realizado para el conjunto de España y para cada una de las demarcaciones excepto las de las Islas Canarias por no haberse podido recopilar suficientes datos durante el desarrollo del proyecto.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para llevar a cabo el proyecto, se desarrolló un esquema metodológico compuesto por los siguientes elementos y líneas de trabajo:

— La unidad básica para la elaboración de las líneas isopiezas ha sido la Masa de Agua Subterránea (MASb). Para la delimitación de las MASb se ha utilizado la versión de la cartografía manejada por el IGME, de enero de 2009.
— Tanto las denominaciones de demarcaciones y de masas de agua como los límites de estas son los establecidos en las fechas de realización del proyecto.
— La cartografía de las masas se ha representado en un SIG compatible con Arcview, empleando una base topográfica del Modelo Digital del Terreno 100x100. También se ha usado como base la red hidrográfica del CEDEX.
— Para la elaboración del mapa piezométrico del período de referencia se ha utilizado en su mayor parte la información disponible en la *Base de Datos de Puntos de Aguas del IGME* (niveles piezométricos en captaciones verticales y cotas de surgencia de agua de manantiales), siendo estos datos referidos, en general, a los inventarios de puntos de agua llevados a cabo dentro del *Programa de Investigación de Aguas Subterráneas* (PIAS), así como a estudios hidrogeológicos posteriores de ámbito regional o local. Complementariamente, en casi todas las cuencas, se ha utilizado información piezométrica procedentes de informes del Servicio Geológico de Obras Públicas, cuando dicha información estaba disponible.
— Se han analizado todos los puntos que disponen de datos de niveles registrados, clasificándolos por unidades hidrogeológicas (división existente con ante-

rioridad a la de las masas de agua y que es la asignada a cada punto de la Base de Datos de Aguas Subterráneas del IGME) y por años. Sobre una primera selección se ha efectuado una revisión y filtrado para eliminar los datos repetitivos en una misma captación (las pertenecientes, en su momento, a redes de control piezométrico) y los correspondientes a captaciones con poca o ninguna representatividad hidrogeológica (normalmente pozos excavados de poca profundidad) en las UH cuyos acuíferos corresponden a formaciones consolidadas.

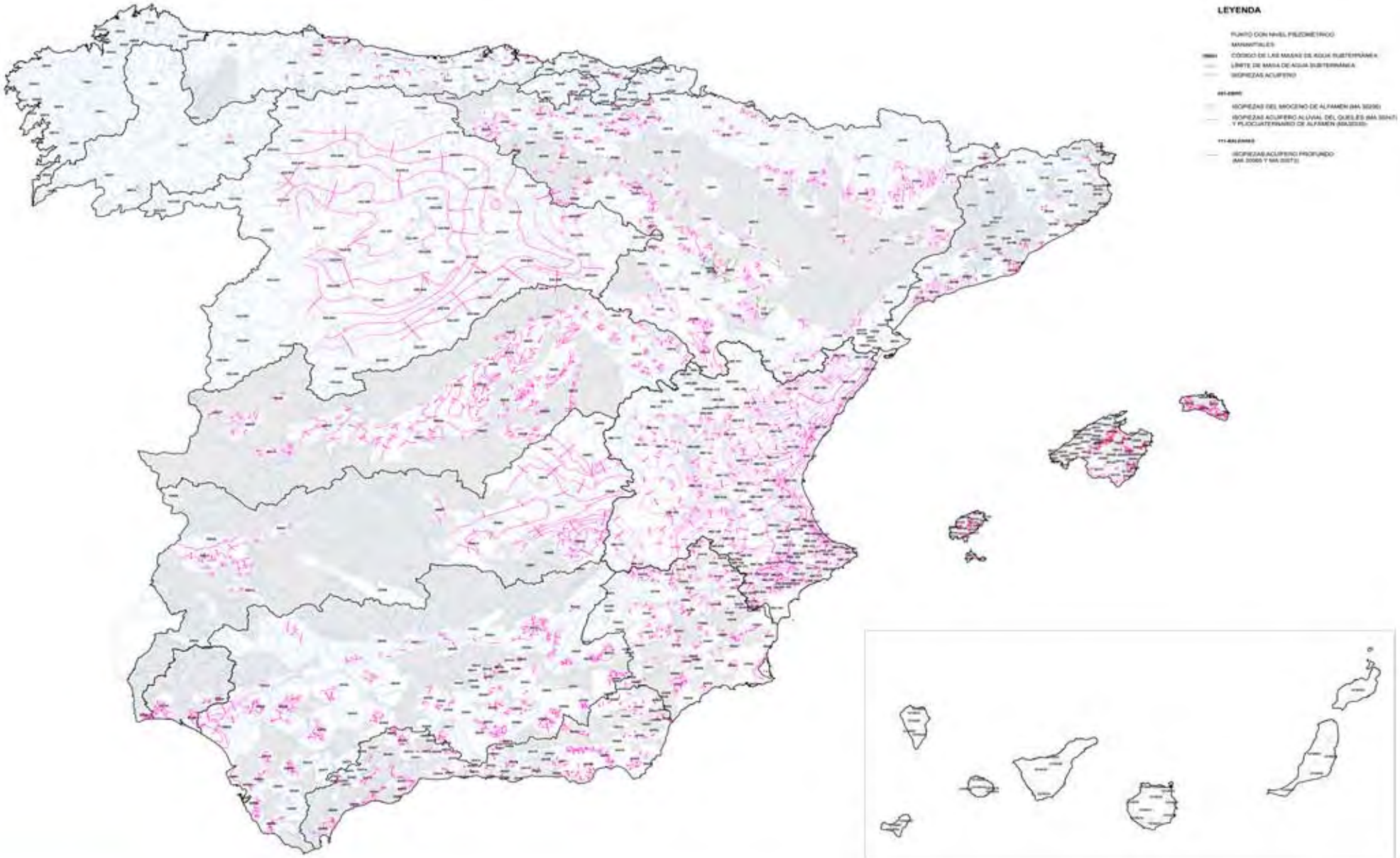
Este proceso ha permitido seleccionar para cada unidad hidrogeológica el año en que existía un mayor número de medidas realmente representativas, y, a partir del conjunto de unidades hidrogeológicas por cuenca, establecer el periodo de años correspondiente al estado de referencia. Normalmente, los datos utilizados son, como ya se ha comentado, en su gran mayoría, procedentes de los inventarios realizados en el PIAS (Programa de Investigación de Aguas Subterráneas). Los puntos seleccionados, con sus datos de localización topográfica (X, Y, Z) y nivel piezométrico se incorporaron a la base de Masas de Aguas Subterráneas asociadas al SIG del IGME. De esta forma quedaron clasificadas por masas en lugar de por unidades hidrogeológicas.

— De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, de forma que se han seleccionado todos los que disponían de alguna información correspondiente al periodo de trabajo. Los manantiales, con sus datos de localización geográfica (X, Y, Z), también han sido incorporados a la base de Masas de Aguas Subterráneas del SIG.
— Para el mapa de "estado actual" –mayo de 2008–, con carácter general se han empleado los datos de la campaña de medidas de niveles en la *red piezométrica oficial de la Dirección General del Agua*, disponibles en la web del Ministerio, complementados ocasionalmente con datos suministrados por Confederaciones Hidrográficas como Guadiana o Guadalquivir. Además, para las demarcaciones hidrográficas con cuencas no intercomunitarias, se han utilizado los datos de las redes oficiales de control piezométrico de los organismos autonómicos responsables de la gestión del agua: Agencia Vasca del Agua (AVA) del Gobierno Vasco, Agencia Catalana del Agua (ACA) de la Generalitat de Catalunya, Agencia Andaluza del Agua del Gobierno de Andalucía, Dirección General de Recursos Hidráulicos (DGRH) del Govern Balear y Consejos Insulares de Aguas de las Islas Canarias.
— Para cada masa de agua se ha elaborado mediante una herramienta IDW (Interpolación por distancia inversa ponderada) de ARGIS 9.2, una primera aproximación de las isolíneas de igual cota del agua subterránea (isopiezas). Esta elaboración automática de isolíneas ha sido corregida posteriormente de forma manual, aplicando los criterios hidrogeológicos e hidrogeológicos propios de la naturaleza de las masas.
— Las correcciones manuales de las isolíneas se han digitalizado e incorporado a Arcview, integrándose en agrupaciones continúas de masas de agua subterránea con características hidrogeológicas homogéneas. Estas agrupaciones en casi todos los casos son aproximadamente equivalentes a las antiguas Unidades Hidrogeológicas y ha servido de base a la última revisión de isolíneas, antes de su integración en el conjunto de la Cuenca Hidrográfica.

En las zonas con una densidad significativa de puntos de medida de nivel, las isolíneas se han representado con trazo continuo. En las zonas con medidas muy dispersas o sin medidas, la isolínea interpolada se ha representado con líneas de puntos.

— Con las isolíneas ya integradas en este conjunto se procedió a una última revisión por contraste con el Modelo Digital del Terreno MDT 100x100 y al análisis de la relación entre acuíferos y ríos.
— El paso final fue el trazado de las líneas principales de flujo y la preparación de ficheros para su edición.

Se representa el mapa de España en condiciones no influenciadas y el correspondiente al año 2008.



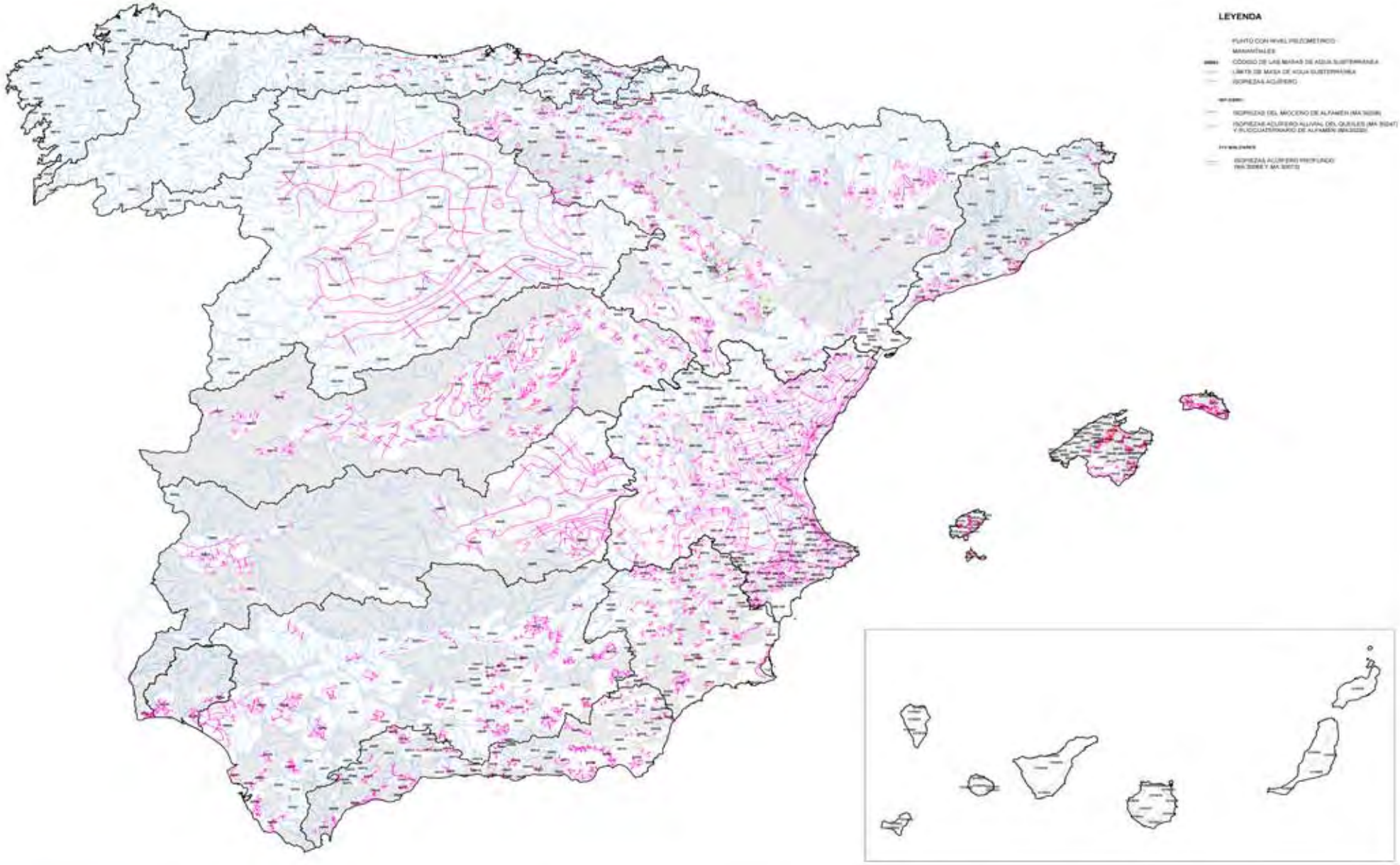
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

MAPA PIEZOMÉTRICO GENERAL
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_NAC_MAP_08

JULIO 2009



ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

MAPA PIEZOMÉTRICO GENERAL
PERIODO: MAYO 2008
CÓDIGO MAPA: EG05_NAC_MAP_08

JULIO 2009

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE GALICIA COSTA

Mapa de referencia (Periodo 1982-1991)

Para esta cuenca, que en su totalidad ha estado incluida tradicionalmente en las zonas sin acuíferos o con acuíferos aislados (UH 99), se han analizado todos los puntos que tienen datos de niveles registrados en dicha unidad hidrogeológica, según la división en unidades hidrogeológicas existente con anterioridad a la de las masas de agua y que es la asignada a cada punto de la Base de Datos de Aguas Subterráneas del IGME). Teniendo en cuenta que se trata de una zona sin acuíferos importantes, los datos disponibles son únicos puesto que corresponden a inventarios realizados en estudios locales y no a controles más o menos sistemáticos. Ello da lugar a que el periodo de representación esté determinado estrictamente por la disponibilidad de datos, sin que haya existido posibilidad de seleccionar un periodo más reducido: el período resultante para la cuenca es el 1982-1991. El total de puntos seleccionados es de 30.

De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, de forma que se han seleccionado todos los que disponía de alguna información correspondiente a los años 1982-1991, en total cuatro, que corresponden a descargas aisladas, sin representatividad de cara al trazado de isopiezas.

Solamente en dos masas de agua subterránea ha sido posible el trazado de una isopiezas y circunscritas a dos acuíferos aluviales de muy pequeña extensión.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

En la red piezométrica oficial de la Dirección General de Aguas, para el mes de mayo de 2008 no existe ningún punto de control localizado en esta cuenca.

Al no existir en la documentación consultada inventarios actuales de manantiales, no se han representado éstos en el mapa piezométrico.

Esquema de flujo y evolución

Las isopiezas trazadas corresponden en los dos casos a pequeños acuíferos aluviales con funcionamiento hidrodinámico ligado al río correspondiente. Se trata pues de flujos convergentes hacia los cauces según una directriz principal coincidente con las de los ríos respectivos.

Las áreas de recarga coinciden con toda la superficie de los acuíferos.

La mayor parte del territorio de la cuenca está ocupado por materiales considerados tradicionalmente como impermeables (granitoides y metasedimentos del Dominio Hercínico).

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL MIÑO-SIL

Mapa de referencia (Periodo 1986-1992)

Para la Cuenca Hidrográfica Miño-Sil, que ha estado incluida tradicionalmente en las zonas sin acuíferos o con acuíferos aislados, los datos disponibles son únicos y corresponden a inventarios realizados en estudios locales o regionales y no a controles más o menos sistemáticos. Ello da lugar a que el periodo de representación esté determinado estrictamente por la disponibilidad de datos, sin que haya existido posibilidad de seleccionar un periodo más reducido: el período seleccionado para la cuenca es el 1986-1992. El total de puntos seleccionados es de 216.

Se han seleccionado todos los manantiales con caudal superior a 20 L/s de los que se disponía de alguna información correspondiente a los años 1986-1992: en total tres, que corresponden a descargas aisladas, sin representatividad de cara al trazado de isopiezas.

Con los datos disponibles, únicamente ha sido posible el trazado de isopiezas en dos masas de agua subterránea, 30673 y 30678.

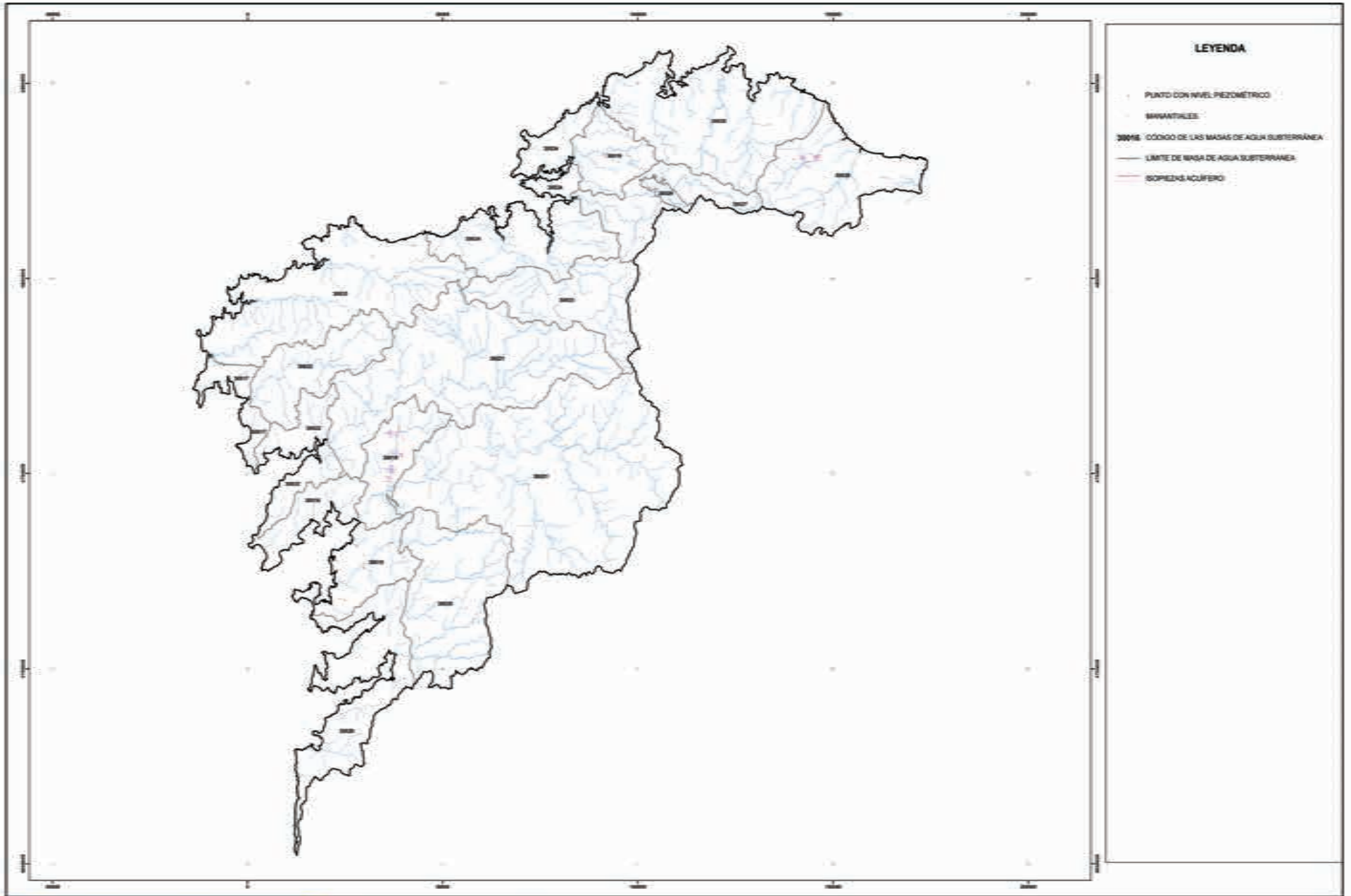
Mapa del estado actual (Mayo 2008)

El número de puntos de agua controlados en la red de la DGA para mayo de 2008 es de 8, repartidos entre las masas de agua subterránea 30673 (3 datos), 30674 (2 datos) y 30678 (3 datos). Es decir, aunque con muy escaso apoyo, se han dibujado isopiezas para tres masas de agua.

Al no existir en la documentación consultada inventarios actuales de manantiales, no se han representado éstos en el mapa piezométrico.

Esquema de flujo y evolución

Las isopiezas trazadas corresponden en todos los casos a acuíferos aluviales con funcionamiento hi-



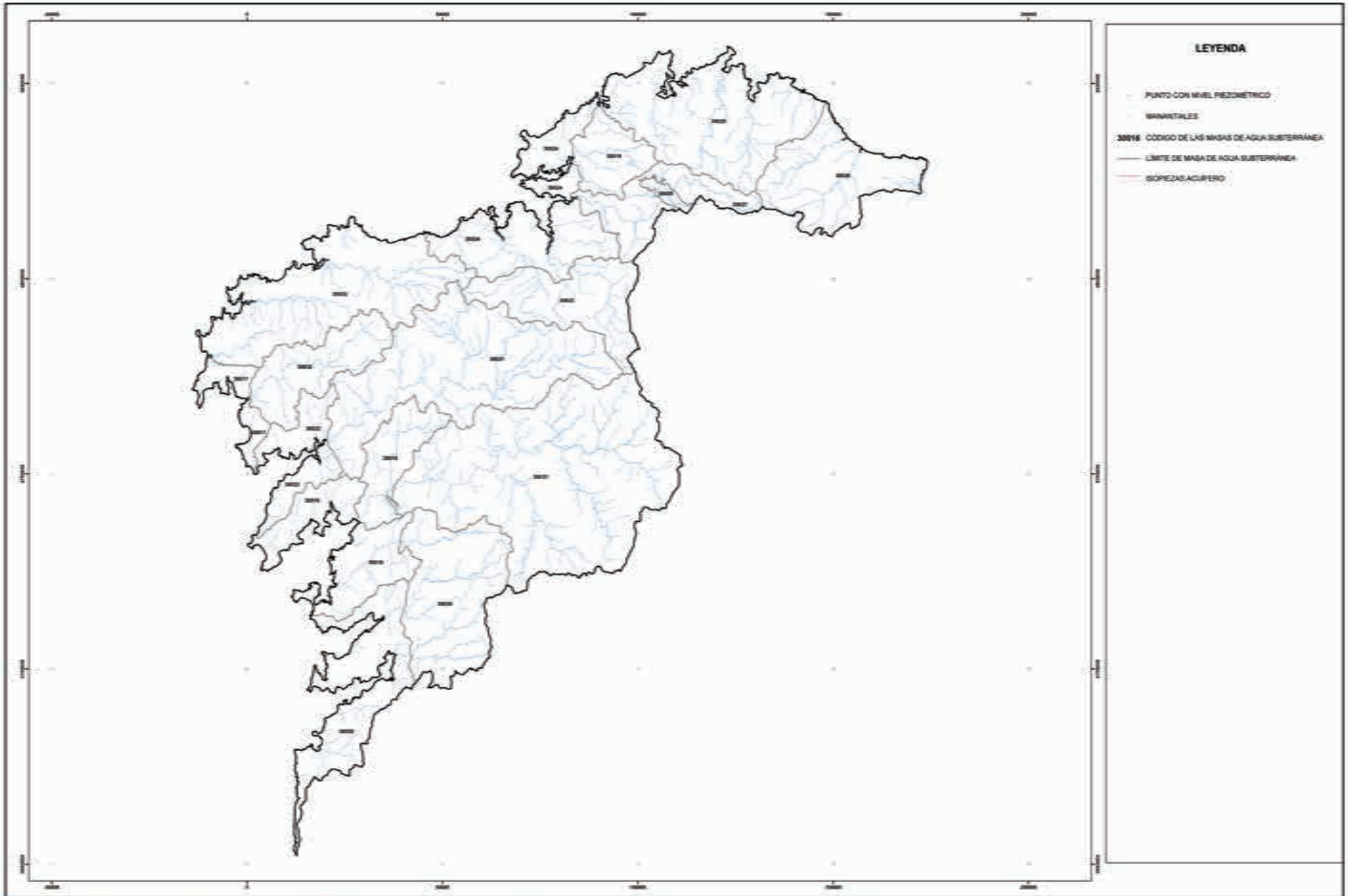
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA GALICIA COSTA
PERIODO: 1971-1993

CÓDIGO MAPA: EG05_014_MAP_71_93

JULIO 2009



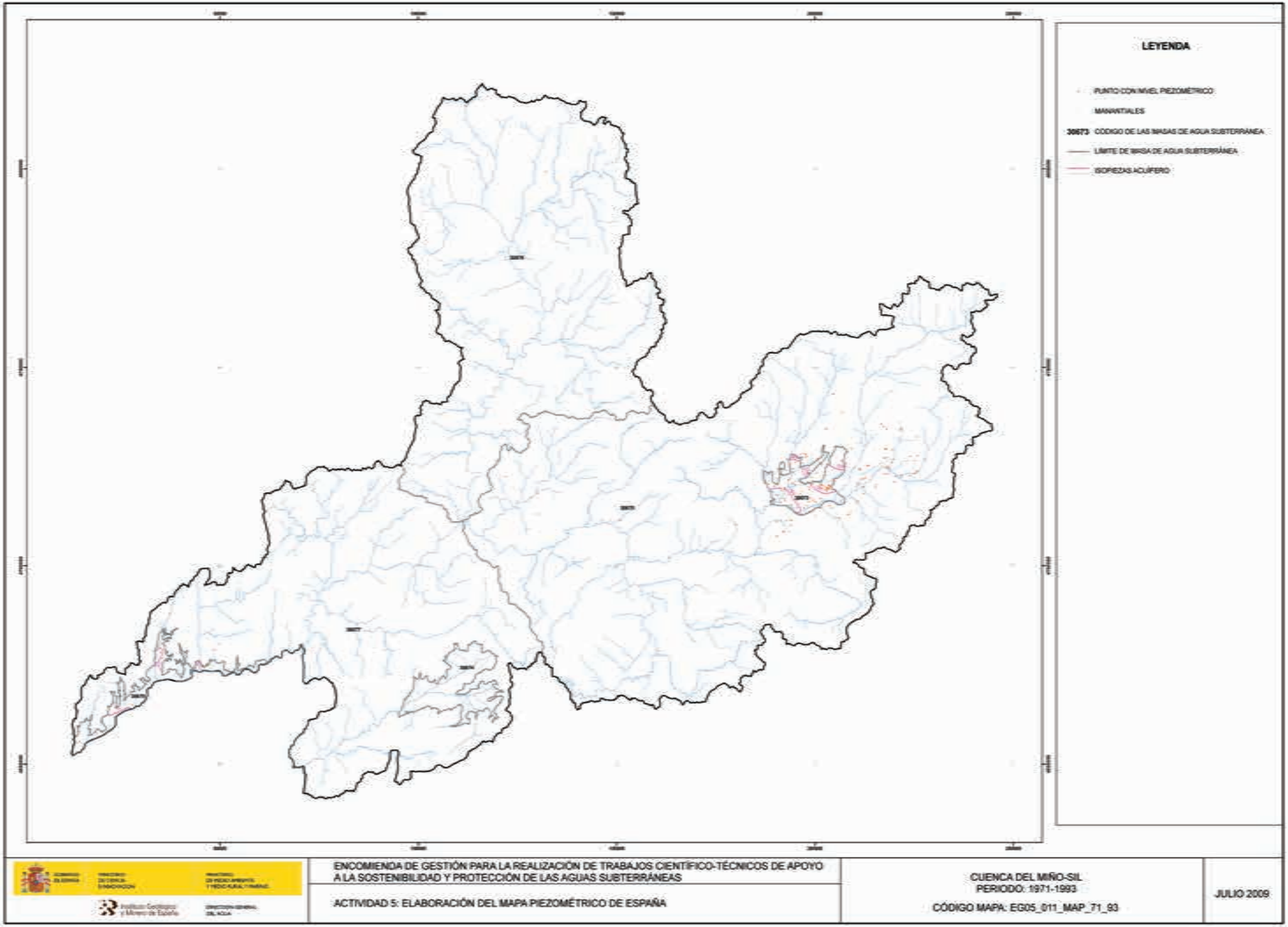
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA GALICIA COSTA
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_014_MAP_71_93

JULIO 2009



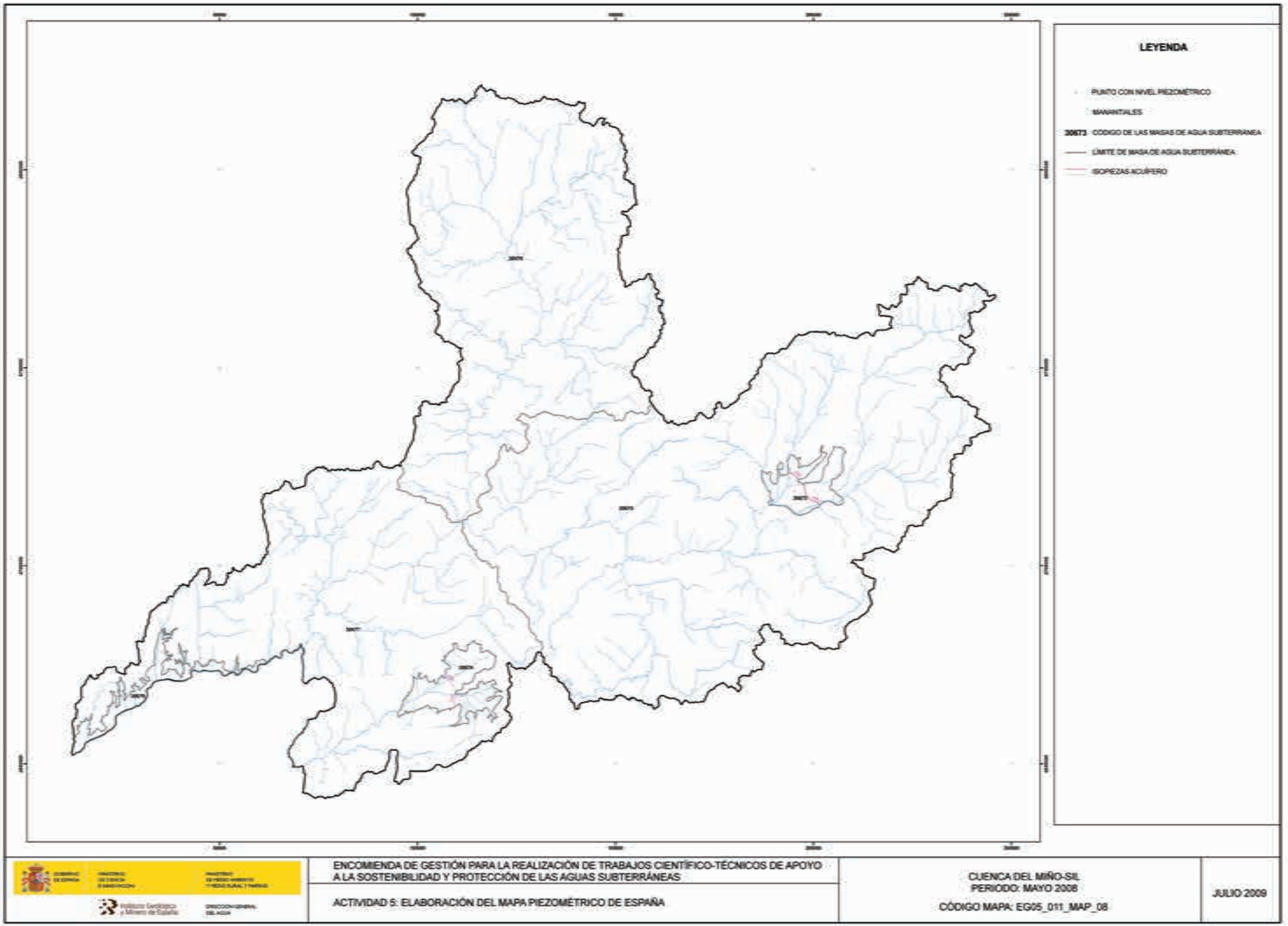
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL MIÑO-SIL
PERIODO: 1971-1993

CÓDIGO MAPA: EG05_011_MAP_71_93

JULIO 2009



ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL MIÑO-SIL
PERIODO: MAYO 2008
CÓDIGO MAPA: EG05_011_MAP_08

JULIO 2009

drodinámico ligado al río correspondiente. Se trata pues de flujos convergentes hacia los cauces según una directriz principal coincidente con las de los ríos respectivos.

Las áreas de recarga coinciden con toda la superficie de los acuíferos.

La mayor parte del territorio de la cuenca está ocupado por materiales considerados tradicionalmente como impermeables (granitoides y metasedimentos del Dominio Hercínico), con algún acuífero aislado en formaciones carbonatadas paleozoicas o en rellenos detríticos de fosas tectónicas terciaras, como es el caso de las masas 30673 y 30674, o en depósitos aluviales, caso de la masa 30678.

Salvo en la masa 30673 (Cubeta del Bierzo) no es posible analizar la variación del nivel piezométrico entre las isopiezas de los dos periodos seleccionados. Se observa un apreciable descenso de nivel en torno a los 50 m, si bien este valor debe ser tomado con reservas puesto que las isopiezas actuales se han trazado solamente con tres puntos de apoyo.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL CANTÁBRICO

Mapa de referencia (Período 1968-1989)

La clasificación de datos por unidades hidrogeológicas y su posterior análisis y filtrado han dado lugar a un periodo de referencia muy amplio, debido a la dispersión de los datos disponibles, que es consecuencia de que el PIAS no fue realizado de forma simultánea en todo el ámbito incluido en la antigua Cuenca Norte, en buena medida porque se trata de un territorio con abundantes recursos de agua superficial en el que la explotación de agua subterránea se ha centrado tradicionalmente en los manantiales. Los estudios generales de recursos hídricos subterráneos no comenzaron hasta finales de la década de 1970.

Es decir, el periodo de representación está determinado estrictamente por la disponibilidad de datos, sin que haya existido posibilidad de seleccionar un intervalo más reducido: el período seleccionado para la Cuenca del Cantábrico es el 1968-1989. El total de puntos disponibles en toda la cuenca es de 188, que se han reducido finalmente a 93 útiles después de un proceso de filtrado para eliminar los datos no representativos (normalmente pozos excavados de pequeña profundidad) o repetitivos (de puntos pertenecientes a redes de control piezométrico).

De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, a los que se han añadido los que forman parte de la red de control de la Agencia Vasca del Agua. Considerando como representativos los que tienen caudales de descarga registrados en el inventario superiores a 20 L/s, se ha seleccionado un total de 215 manantiales.

En parte, por la pequeña dimensión de las estructuras acuíferas y, de otro lado, por la escasa información piezométrica existente, el mapa elaborado contiene un número muy reducido de familias de isopiezas, pero en todo caso se puede considerar lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas en la Cuenca, ya que representa las primeras campañas generales de medidas, realizadas en su ámbito.

Las isopiezas se complementan con líneas de flujo en los sectores acuíferos en que existe información para su trazado.

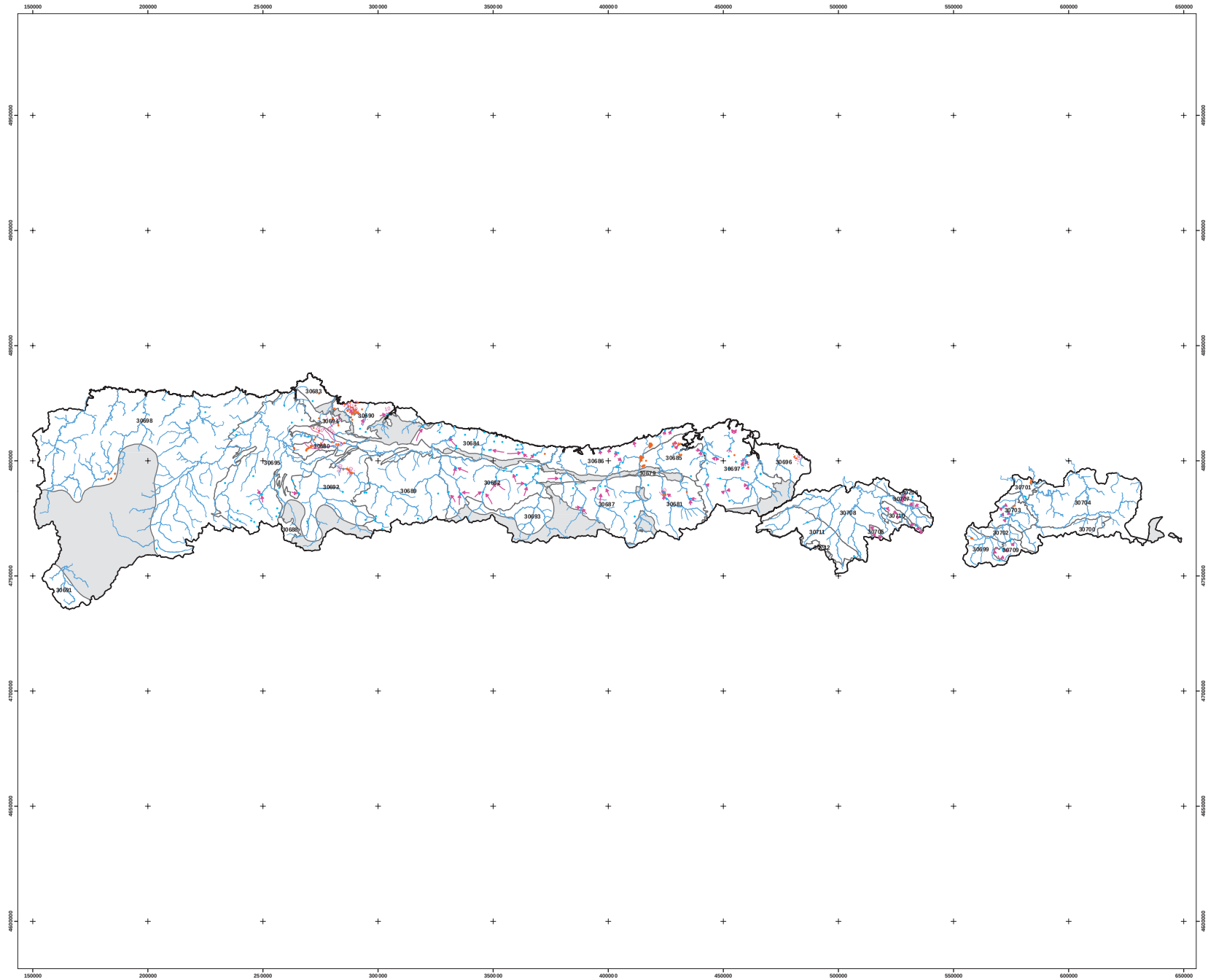
Mapa del estado actual (Mayo 2008) figura 8

Como ya se ha indicado el mapa piezométrico representativo de la situación actual ha sido elaborado por indicación de la Dirección General de Aguas, para el mes de mayo de 2008, con los datos de la red de control piezométrico existentes en la Web de la Dirección General de Aguas, a los que se han añadido los puntos de la red de control piezométrico de la Agencia Vasca del Agua (AVA).

El número de puntos de agua de la red oficial de la DGA para mayo de 2008 es de 48, y el de la red oficial de la AVA es de 11. Es decir, en total existen 59 datos piezométricos para mayo de 2008.

En esta cuenca se han representado los mismos manantiales que para el periodo de referencia puesto que el escaso nivel de explotación determina que todos o la mayor parte sigan teniendo un régimen de funcionamiento poco diferente del natural.

La elaboración del mapa piezométrico de mayo de 2008 presenta las mismas limitaciones que el mapa de referencia, por lo que el trazado de isopiezas sólo ha podido ser realizado en cinco sectores aislados de cinco masas de agua.



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- **30679** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

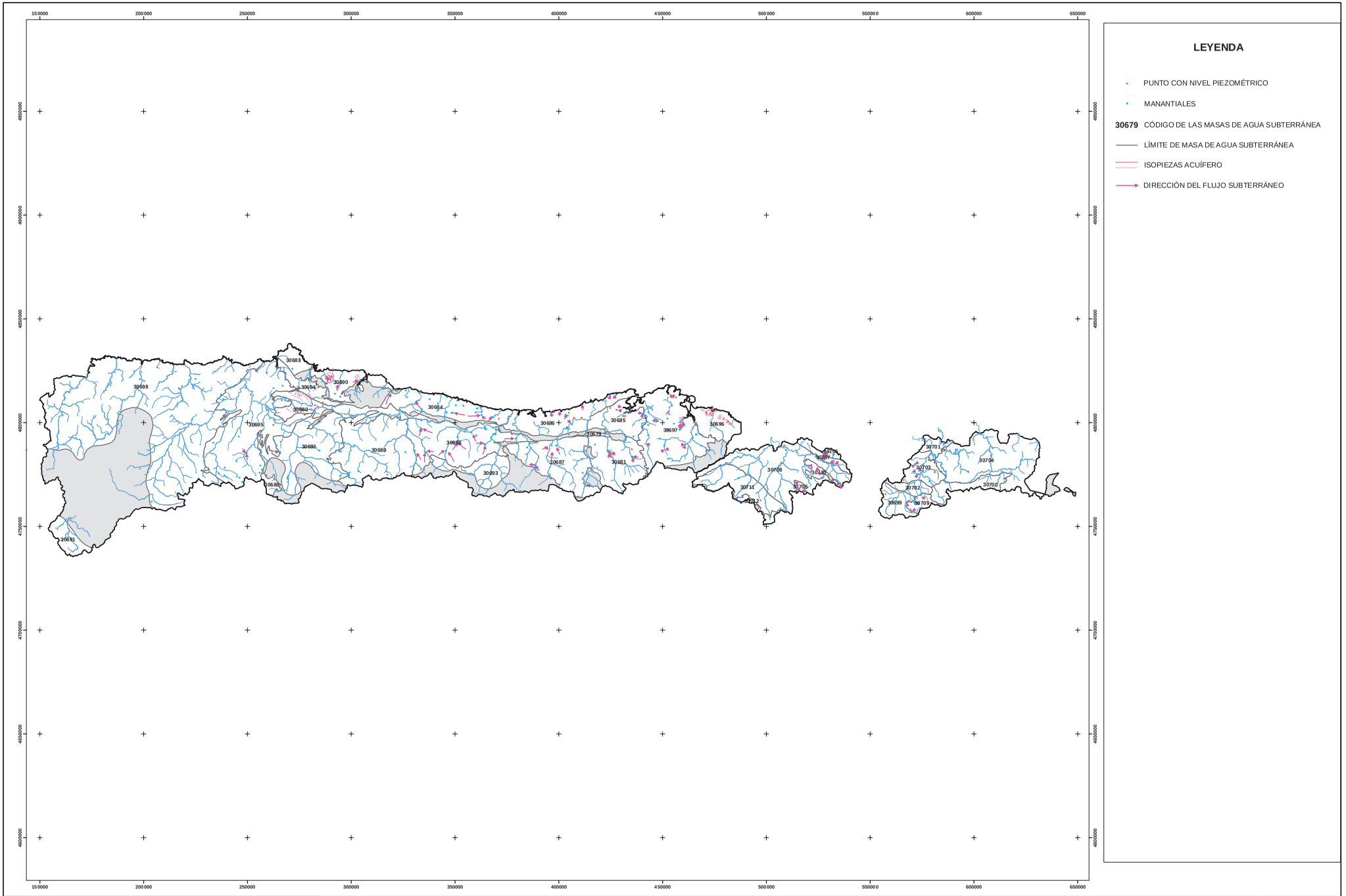
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL CANTÁBRICO
PERIODO: 1968-1989

CÓDIGO MAPA: EG05_016_MAP_68_89

JULIO 2009



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- **30679** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL CANTÁBRICO
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_016_MAP_08

JULIO 2009

Esquema de flujo y evolución

Teniendo en cuenta la compartimentación hidrogeológica de la cuenca, y tal como se observa en los mapas, es imposible identificar un sentido general de los flujos subterráneos: en algunos casos son convergentes hacia un cauce (caso de la masa 30680), pero lo más general es que los acuíferos principales (normalmente albergados en formaciones carbonatadas) tengan descargas individualizadas a través de manantiales localizados a cotas diversas en función de su relación con estructuras tectónicas o kársticas.

Las principales áreas impermeables de la Cuenca están localizadas en su extremo SO y corresponden a materiales metamórficos del Dominio Hercínico. En el resto de la Cuenca los materiales de baja permeabilidad, del Mesozoico y Terciario, se intercalan entre las estructuras acuíferas, independizándolas. En algunas zonas, la oficina de Planificación Hidrogeológica ha asignado masa de agua subterránea a zonas ocupadas mayoritariamente por materiales de baja permeabilidad con algún pequeño acuífero aislado en formaciones carbonatadas paleozoicas, tal es el caso de la masa Eo-Navia-Narcea.

Por la escasa información disponible, no es posible analizar la variación del nivel piezométrico entre las isopiezas de los dos periodos seleccionados a escala de cuenca. En los casos en que se dispone de isopiezas no se aprecian diferencias sensibles entre los estados piezométricos representados por los dos mapas.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL PAIS VASCO

Mapa de referencia (Periodo 1983-1990)

Como en el caso de la cuenca del Cantábrico, el análisis de todos los puntos que tienen datos de niveles registrados, clasificándolos por unidades hidrogeológicas y año, da lugar a un periodo de referencia muy amplio, debido a la dispersión de los datos disponibles, que es consecuencia de que el PIAS no fue realizado de forma simultánea en todo el ámbito incluido en la antigua Cuenca Norte, en buena medida porque se trata de un territorio con abundantes recursos de agua superficial en el que la explotación de agua subterránea se ha centrado tradicionalmente en los manantiales. Los estudios generales de recursos hídricos subterráneos no comenzaron hasta finales de la década de 1970.

Es decir, el periodo de representación está determinado estrictamente por la disponibilidad de datos, de cualquier forma muy escasos, sin que haya existido posibilidad de seleccionar un intervalo más reducido: el período seleccionado para la Cuenca Hidrográfica de las Cuencas Internas del País Vasco es el 1983-1990. El total de puntos disponibles en toda la cuenca es de 10.

De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, a los que se han añadido los que forman parte de la red de control de la Agencia Vasca del Agua (AVA).

Considerando como representativos los que tienen caudales de descarga registrados en el inventario superiores a 20 L/s, se ha seleccionado un total de 31 manantiales.

En parte, por la pequeña dimensión de las estructuras acuíferas y, de otro lado, por la escasa información piezométrica existente, no es posible elaborar isopiezas, salvo en una zona aislada de la masa 3001. Las isopiezas se complementan con líneas de flujo en los sectores acuíferos en que existe información para su trazado, de modo que la representación se puede considerar aproximada a un estado natural de las aguas subterráneas en la Cuenca.

Dada la escasez de puntos, la elaboración de isopiezas ha sido manual, aplicando los criterios hidrogeológicos propios de la naturaleza de las masas.

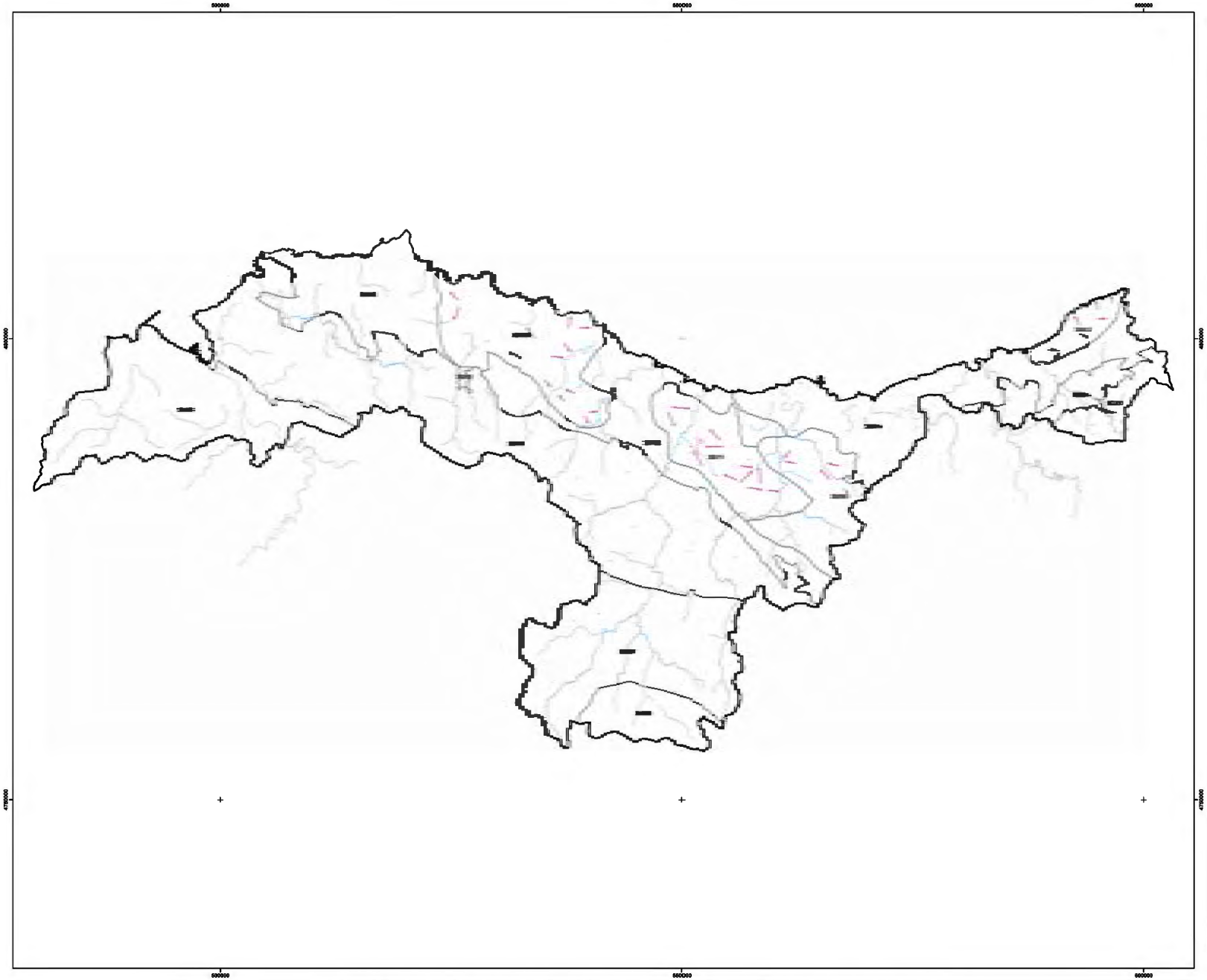
Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Como ya se ha indicado el mapa piezométrico representativo de la situación actual ha sido elaborado por indicación de la Dirección General de Aguas, para el mes de mayo de 2008, con los datos de la red de control piezométrico de la Agencia Vasca del Agua.

El número de puntos de agua de la red oficial de la AVA para mayo de 2008 es solamente de cinco.

En esta cuenca se han representado los mismos manantiales que para el periodo de referencia puesto que el escaso nivel de explotación determina que todos o la mayor parte sigan teniendo un régimen de funcionamiento poco diferente del natural.

Dado el mínimo número de datos disponible, la elaboración del mapa piezométrico de mayo de 2008 presenta aún más limitaciones que el mapa de referencia: es imposible el trazado de isopiezas.



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- 30001 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España · DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

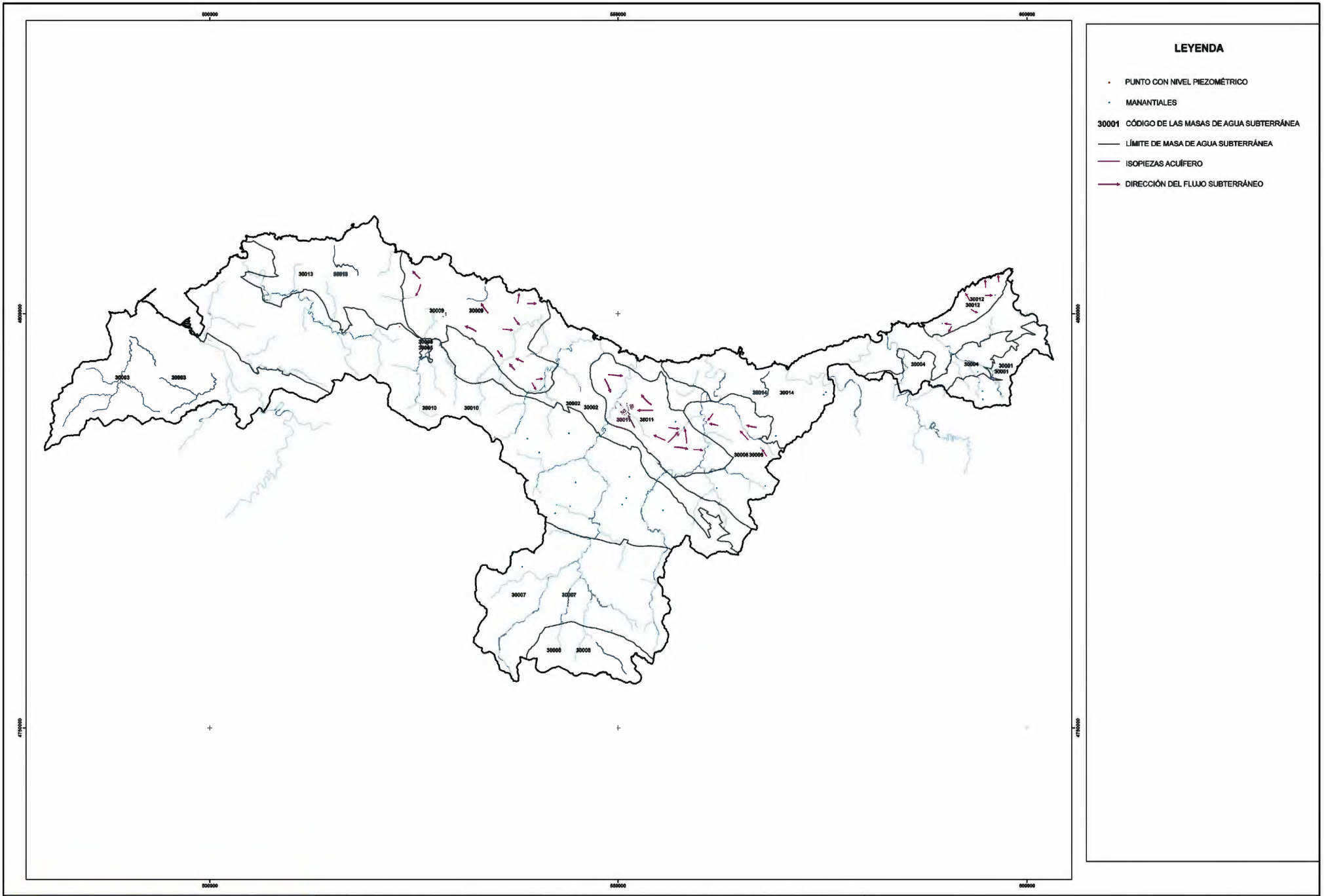
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCAS INTERNAS DEL PAÍS VASCO
PERIODO: 1983-1990

CÓDIGO MAPA: EG05_015_MAP_83_90

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA | MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN | MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España | DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCAS INTERNAS DEL PAÍS VASCO
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_015_MAP_08

JULIO 2009

Esquema de flujo y evolución

Teniendo en cuenta la compartimentación hidrogeológica de la cuenca, y tal como se observa en los mapas, es imposible identificar un sentido general de los flujos subterráneos: en algunos casos son convergentes hacia un cauce, pero lo más general es que los acuíferos principales (normalmente albergados en formaciones carbonatadas) tengan descargas individualizadas a través de manantiales localizados a cotas diversas en función de su relación con estructuras tectónicas o kársticas.

Las áreas con materiales de baja permeabilidad de la Cuenca se intercalan entre las estructuras acuíferas, independizándolas. Están incluidas dentro de las masas de agua subterránea.

Por la escasa información disponible, no es posible analizar la variación del nivel piezométrico entre las isopiezas de los dos periodos seleccionados a escala de cuenca.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO

Mapa de referencia (Período 1969-1972)

El proceso de clasificación de datos ha permitido seleccionar para cada unidad el año en que existía un mayor número de medidas, de forma que para el conjunto de la demarcación el período no excediera de 3-4 años. El período seleccionado para la Demarcación Hidrográfica del Duero es el 1969-1972. Al no existir redes de control en estas fechas, al menos de rango regional, los datos son, en su gran mayoría, procedentes de los inventarios realizados en el PIAS (Programa de Investigación de Aguas Subterráneas). El total de puntos seleccionados en toda la demarcación es de 1545.

De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, de forma que se han seleccionado todos los que disponía de alguna información correspondiente a los años 1969-1972. Debido a la escasez de manantiales registrados en la base de datos para este período, se amplió el rango de años hasta 1980. Con ello se consiguió una mayor representatividad, alcanzando un número total de 559 manantiales.

En la corrección manual de las isopiezas se pudo comprobar una fuerte distorsión en su trazado, que tras su análisis se pudo atribuir al gran número de puntos de agua de muy poca profundidad, cuyo nivel no es representativo de la masa de agua. Siguiendo un criterio ya establecido en los primeros estudios regionales realizados por el IGME en la zona, se decidió prescindir de los puntos con profundidad menor de 40 metros, que suman un total de 1.230 puntos (de los que 1.200 tienen menos de 30 metros y 1.160 menos de 20 metros).

Tres este filtrado de profundidad, han quedado un total de 297 puntos para la representación de isopiezas, de los que unos 80 tienen una profundidad mayor de 200 metros, considerado a nivel regional como acuífero profundo o inferior, y que ha sido representado separadamente de los puntos de profundidad de 40 a 150 metros (un total de unos 200 puntos) que se consideran a nivel regional como acuífero superior.

De esta manera se mantiene el mismo criterio seguido tradicionalmente en esta Demarcación Hidrográfica.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

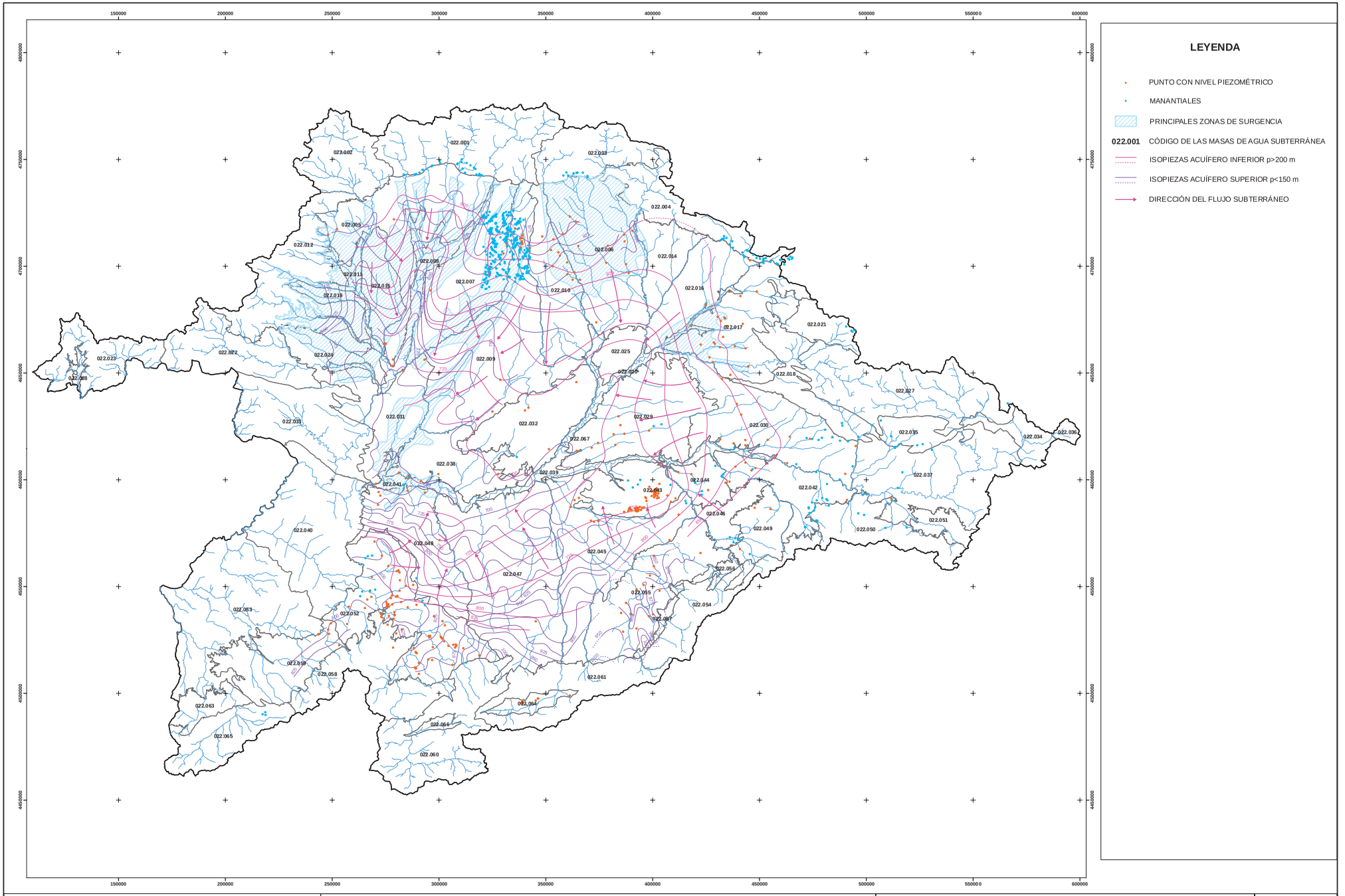
El número de puntos de agua en la red piezométrica oficial de la DGA para mayo de 2008 es de 206 y en una gran mayoría con profundidades superiores a 150 metros por lo que el mapa elaborado es representativo del denominado acuífero profundo o inferior. Algunos puntos de esta red de control no presentaban, en la documentación analizada, la cota de su emplazamiento, que ha sido estimada a partir del modelo digital del terreno (MDT) 10x100 utilizado en el proyecto.

Al no existir en la documentación consultada inventarios actuales de manantiales, no se han representado éstos en el mapa piezométrico.

Esquema de flujo y evolución

Las isopiezas de la Demarcación Hidrográfica del Duero presentan en general en su trazado una morfología típica de Cuenca Terciaria Detrítica con un contraste claro entre los valles de los ríos donde la isolínea se adapta al mismo y las áreas de interfluvio donde la isolínea se eleva. La isolínea más baja en el mapa piezométrico de Mayo de 2008 –650 metros– se presenta como era de esperar en las zonas más bajas de la cuenca Duero zona próxima a Zamora, mientras que las cotas más elevadas de las isolíneas es de 1.100 metros en la zona de la Sierra de la Demanda.

En la vertiente nordeste del Sistema Central la superficie piezométrica alcanza los 1.000 metros.



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

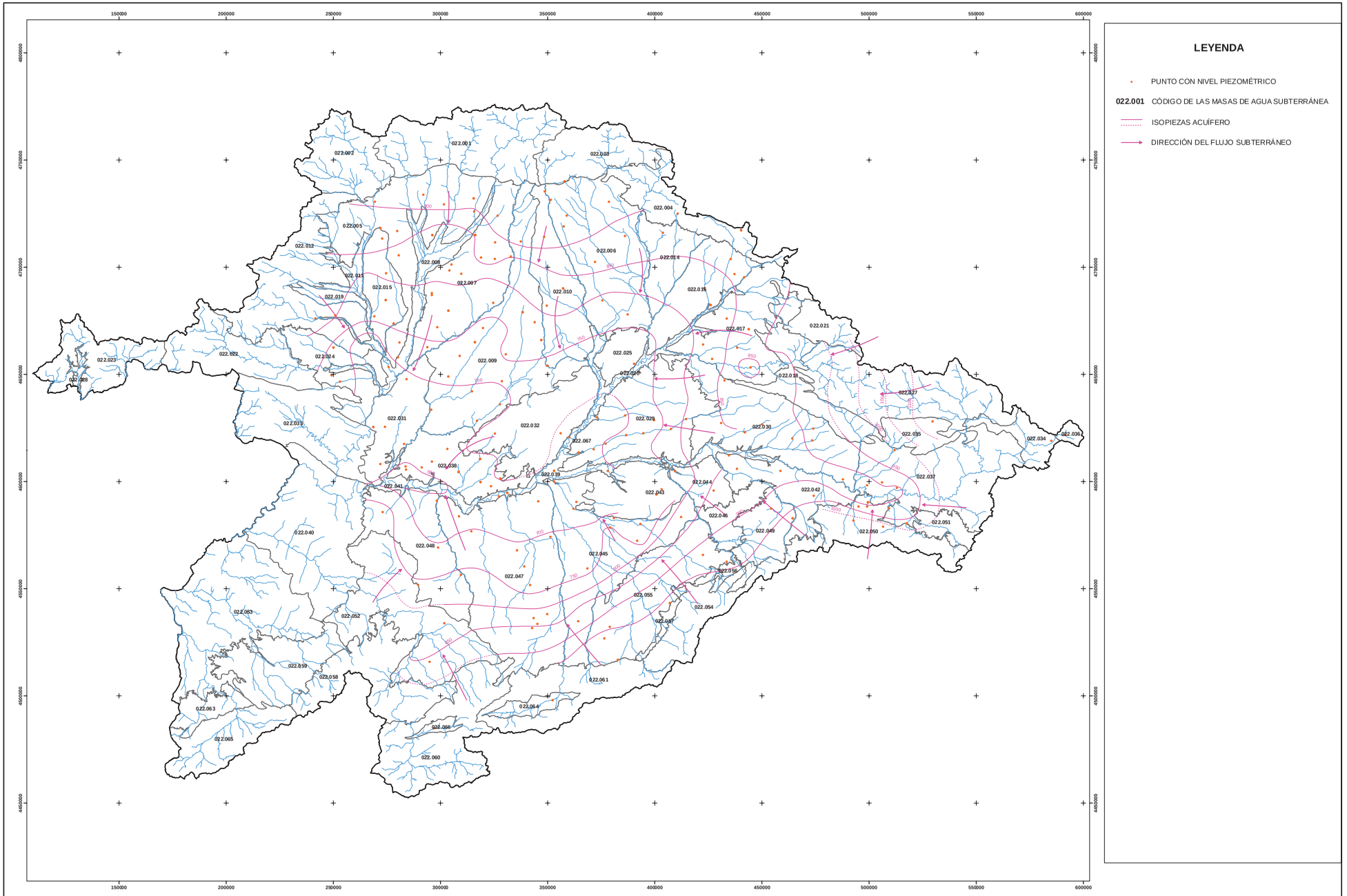
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL DUERO
PERIODO 1969-1972

CÓDIGO MAPA: EG05_021_MAP_69_72

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL DUERO
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_021_MAP_08

JULIO 2009

En el mapa de 1969-1972, la isopieza más baja, también de 650 metros, coincide sensiblemente en su trazado con el mapa de 2008. Las cotas más elevadas pertenecen al acuífero superior (40-150 metros de profundidad) en el área más próxima al Sistema Central —límite Sur de la Demarcación en la provincia de Segovia— donde la superficie piezométrica se eleva hasta los 1.000 metros.

En el área norte de la Demarcación Hidrográfica las direcciones predominantes del flujo subterráneo son en general N-S y en las proximidades de los ríos con dirección hacia el mismo. Al Este del Pisuerga la dirección predominante es E-W, que se transforma en NE-SW en su límite oriental –Sierra de la Demanda–. En el área sur de la Demarcación el flujo tiene como dirección predominante la S-N (con las mismas salvedades en las inmediaciones de los ríos) que hacia el Este se convierte en SENW.

Este marco hidrodinámico permite delimitar como áreas de recarga general el límite norte de la cuenca en la Sierra Cantábrica, el límite nororiental y oriental, con las Sierra de la Demanda y Sistema Ibérico, y finalmente, el límite sur y suroriental con el Sistema Central. En estas áreas afloran los materiales permeables presentes en el subsuelo de la cuenca del Duero. Sin embargo, también existen zonas de recarga de mucha menor importancia cuantitativa en las áreas de interfluvio desde donde se recargan los acuíferos detríticos terciarios, especialmente el acuífero superior.

En la Demarcación Hidrográfica del Duero existen numerosas áreas de surgencia en donde la concentración de manantiales puede llegar a ser muy importante. El mapa de 1969-1972 revela una gran abundancia de manantiales —el número total inventariado supera los 550—, distribuidos por todas las zonas altas de la cuenca: Suroeste —provincia de Salamanca en las proximidades de los afloramientos paleozóicos—, este —provincia de Soria en los bordes norte y sur de la cuenca de Almazán—, noreste —Sierra de la Demanda— y norte. Pero la mayor concentración de estos manantiales se produce en las zonas más septentrionales de los ríos Órbigo, Esla, Cea y Valderaduey, en el Noroeste de la cuenca y zonas altas de los ríos Carrión, Valdivia, Arlanzón y Arlanza en el noreste de la cuenca. En estas áreas existían en el periodo representado 1969-1972 importantes áreas de surgencia donde la superficie piezométrica interceptaba la superficie del terreno, o era cortada por la erosión de los ríos mencionados dando lugar a extensas zonas húmedas.

Las principales áreas impermeables de la cuenca se encuentran en los límites Sur, Oeste y Norte –Sistema Central, Dominio Hercínico y Sistema Cantábrico–.

La variación del nivel piezométrico entre las fechas seleccionadas para cada uno de los mapas, es muy heterogénea en toda la Demarcación. El descenso de nivel es prácticamente generalizado, si bien su valor, en general poco relevante, es muy variable desde menos de una decena de metros hasta 20 metros en algunas áreas puntuales.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO

Mapa de referencia (Período 1972-1986)

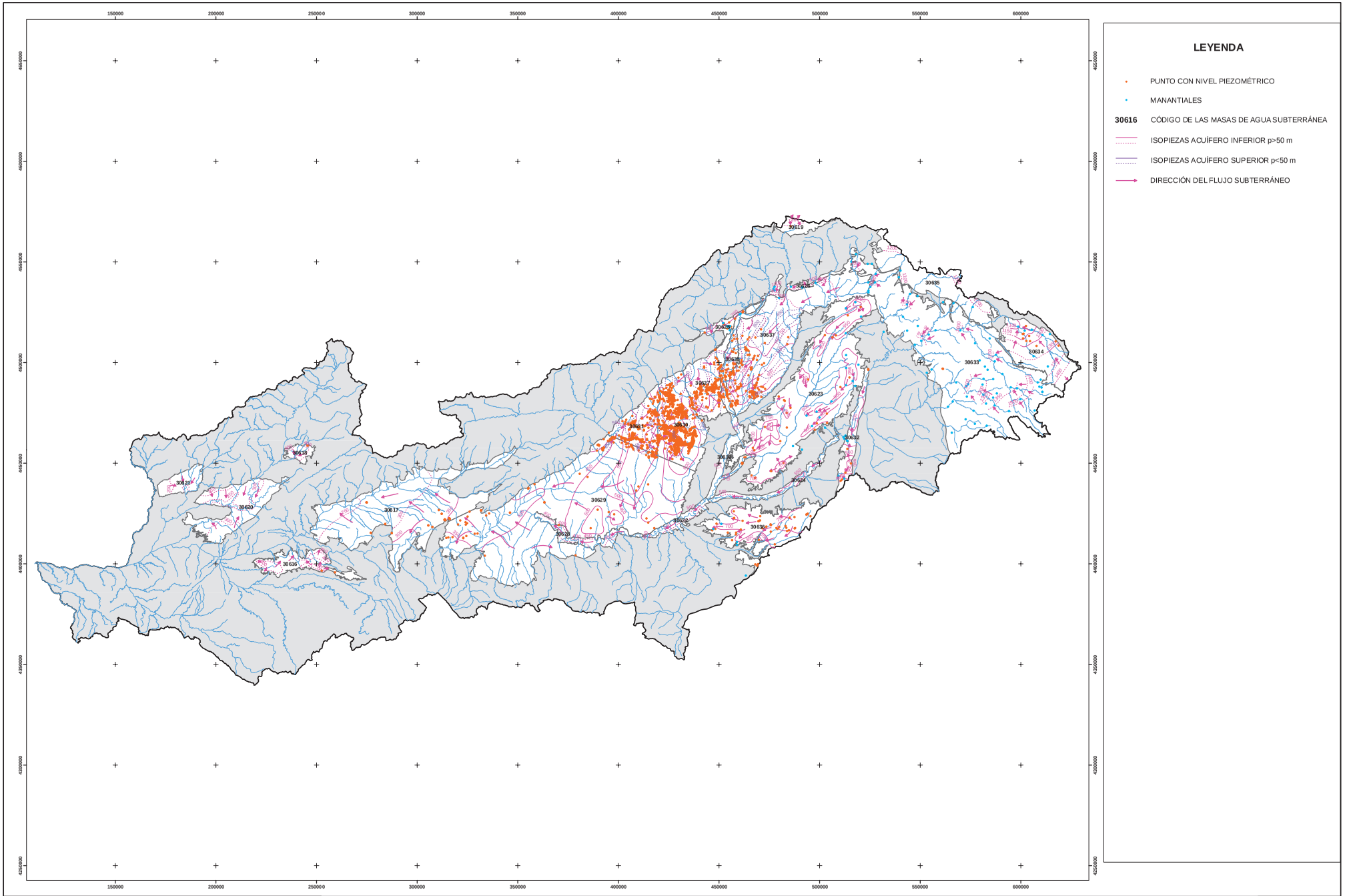
Para las isopiezas de referencia se ha seleccionado un periodo de años centrado en 1981, pero con tres excepciones que lo extienden desde 1972 a 1986: en las MASb correspondientes al Acuífero Terciario Detrítico de Madrid, cuyo año de referencia es 1972, por cantidad de información y por menor grado de presiones e impactos sobre los acuíferos; la MASb de Ocaña, cuya serie de datos más extensa, y única representativa, es del año 1986, y la MASb Albarracín-Cella-Molina de Aragón, en la que únicamente existen datos en 1979.

De la misma forma que para puntos de agua con nivel, se ha procedido con los manantiales registrados en la base de datos del IGME, de forma que se han seleccionado todos los que disponía de alguna información correspondiente al periodo.

Para el trazado de las isopiezas de referencia se ha utilizado un total de 2.196 medidas piezométricas y 121 cotas de descarga de manantiales.

El mapa elaborado se puede considerar lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Tajo, ya que representan las primeras campañas generales de medidas, realizadas en el ámbito de cuenca, con independencia de que en zonas concretas existan datos más antiguos.

Como caso particular, es preciso señalar las MASb 30627, 30630, 30631, 30637 y 30638, en las que, siguiendo los criterios aplicados en los trabajos realizadas a finales de la década de 1970, se han representado 2 familias de isopiezas: por un lado, las correspondientes a los niveles registrados en captaciones de profundidad igual o menor de 50 m, que reflejan el esquema de flujo en los tramos



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

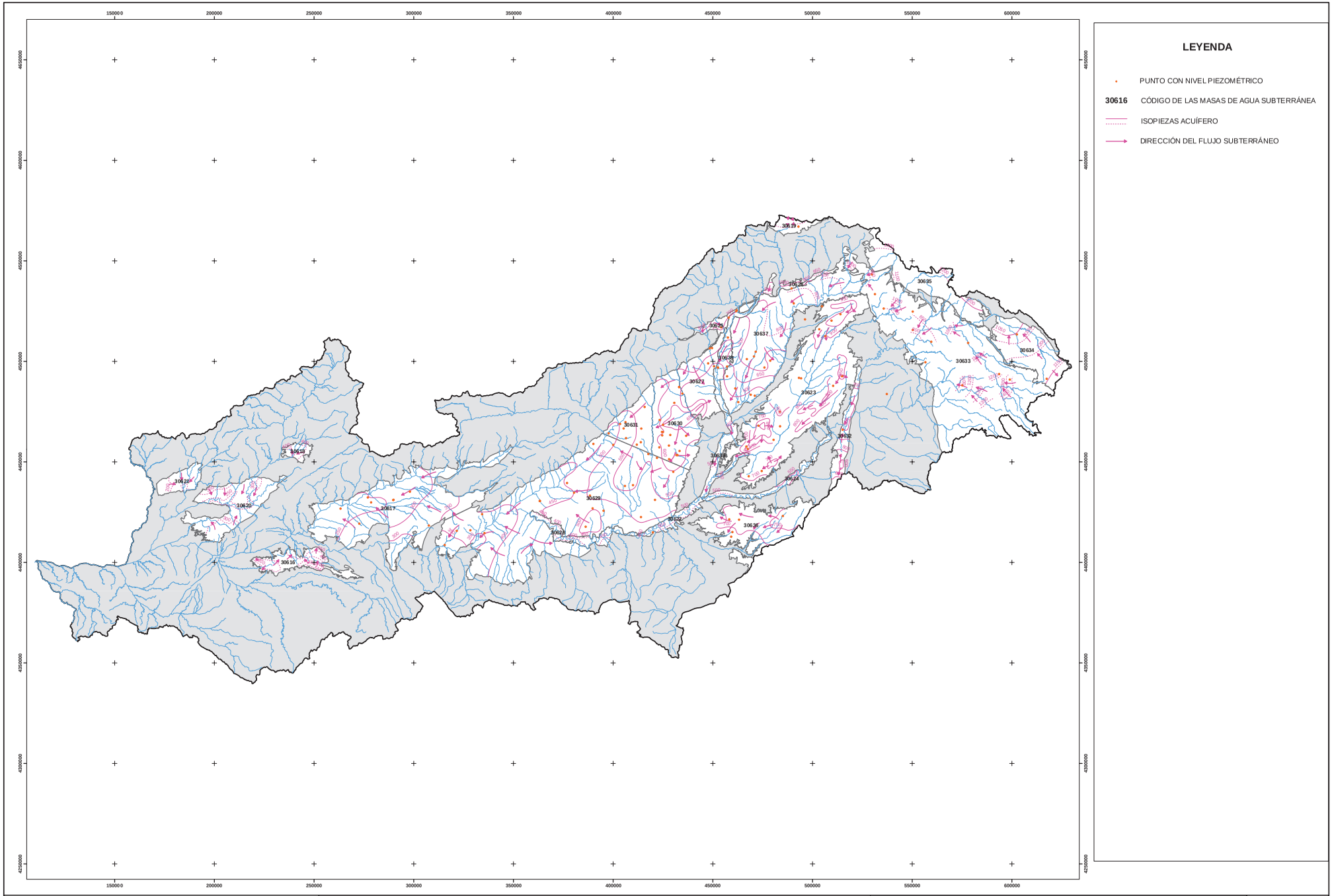
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL TAJO
PERIODO: 1972-1986

CÓDIGO MAPA: EG05_031_MAP_72_86

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL TAJO
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_031_MAP_08

JULIO 2009

más someros del acuífero Terciario, y por otra parte, las obtenidas a partir de los registros piezométricos de las captaciones de profundidad superior a 50 m, representativas del funcionamiento hidrodinámico de los niveles acuíferos más profundos.

Las masas de agua subterránea del Alto Tajo, donde las formaciones acuíferas presentan un apreciable grado de compartimentación y en muchos casos están colgadas, se han representado los puntos de surgencia de los principales manantiales.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Para el trazado de las isopiezas representativas del régimen hidrodinámico actual se ha utilizado un total de 122 medidas piezométricas. En las MASb 30627, 30630, 30631, 30637 y 30638 no se han diferenciado las captaciones por su profundidad, ya que todos los puntos de la red de control corresponden a los niveles profundos del Acuífero Terciario Detrítico.

Al no existir en la documentación consultada inventarios actuales de manantiales, no se han representado éstos en el mapa piezométrico.

Esquema de flujo y evolución

En las masas de agua subterránea correspondientes a los rellenos detríticos de las fosas terciarias del Tajo y sus afluentes en el tramo bajo de la cuenca, los acuíferos, muy potentes y de moderada a baja difusividad hidrodinámica, albergan circulaciones subterráneas tridimensionales convergentes desde los bordes de las cuencas y los interfluvios internos hacia los cauces de los ríos, con directrices predominantes NE-SO y SE-NO. Los impermeables de los acuíferos terciarios corresponden a los metasedimentos y granitoides de los sistemas Central y de los Montes de Toledo, que flanquean los tramos medio y bajo de la cuenca del Tajo por el norte y sur, respectivamente. La posición de los impermeables de borde limita las áreas de recarga corresponden a los afloramientos de los acuíferos, que ocupan prácticamente toda la extensión de los mismos.

En los acuíferos carbonatados del Alto Tajo las direcciones del flujo subterráneo, siempre dentro de un sentido general coincidente con los ejes principales de drenaje superficial, son diversas porque dependen de la fracturación y karstificación de las formaciones acuíferas y de la posición relativa de los impermeables de base. En estas masas de agua, los impermeables están constituidos por las formaciones semipermeables mesozoicas (compuestas por yesos, arcillas y margas) intercaladas entre los diferentes niveles acuíferos. Las áreas de recarga corresponden a los afloramientos de los acuíferos.

La comparación de los dos mapas de isopiezas indica un régimen de funcionamiento hidrodinámico muy similar en los periodos de referencia y actual, como corresponde a un territorio con moderado desarrollo de los bombeos de agua subterránea. Las únicas diferencias se observan en las MASb correspondientes a los sectores del Acuífero Terciario Detrítico de Madrid en las cuencas de los ríos Guadarrama y Manzanares: se aprecian áreas de descensos moderados, entre 10 y 20 metros, con modificaciones en el esquema de flujo tridimensional regional ya que algunos tramos de los ríos citados ya no recibe la descarga subterránea, tal como ocurría siempre en régimen no influenciado por las extracciones.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA

Mapa de referencia (Período 1972-1975)

El análisis estadístico y proceso de clasificación de datos descrito en el apartado metodológico ha permitido seleccionar para cada una de las antiguas unidades hidrogeológicas el año en que existía mayor número de datos de medida de nivel. El conjunto de la cuenca hidrográfica presenta la mayor concentración de datos en el periodo 1972-75, coincidiendo con la realización de los primeros inventarios de puntos de agua llevados a cabo en el PIAS (Programa de Investigación de Aguas Subterráneas). En este periodo no existen, al menos de rango regional, redes de control piezométrico, por lo que no pudieron ser usadas como fuente de datos.

Este periodo seleccionado para la cuenca en general tiene una excepción en el caso de las masas de aguas del Bajo Guadiana, en la provincia de Huelva, donde las medidas seleccionadas corresponden a los años 1966-68, coincidiendo con la realización de los estudios hidrogeológicos englobados en el proyecto conocido como "FAO-Guadalquivir".

El número total de puntos seleccionados en estos periodos de tiempo en toda la cuenca ha sido de 2.041.

De la misma forma que para puntos de agua con medida de nivel, se ha procedido a un análisis estadístico de

los datos de manantiales registrados en la Base de Datos de Aguas del IGME, seleccionando todos los que presentaban alguna información en el periodo 1972-1975, añadiendo algunos puntos de años anteriores y algún año posterior. El número total de manantiales situados ha sido de 137.

La distribución de puntos de agua con dato de nivel registrado en el periodo estudiado puede considerarse suficientemente buena en toda la Cuenca Hidrográfica, siendo especialmente significativa la densidad en la cuenca alta, lo que ha permitido un buen trazado de todas las isolíneas, incluyendo en el rango 600-700 las isolíneas cada 25 metros. Como excepción a lo anterior se debe mencionar el área centro-occidental de la masa —Mancha Occidental II—, en la que existe una zona con escasa densidad de puntos, entre las cotas del nivel piezométrico 625 y 650, en las confluencias de los ríos Córcoles, Záncara y Guadiana.

En la zona de la cuenca correspondiente a Extremadura la densidad de puntos es menor, especialmente en las dos masas de Vegas Altas y Vegas Bajas, donde no obstante el nivel del aluvial del Guadiana es prácticamente coincidentes con el nivel del propio rio, estando muy influenciado por el régimen de descargas de los grandes embalses existentes en sus proximidades.

Siguiendo instrucciones concretas de los técnicos de la Confederación del Guadiana en Ciudad Real, en el tratamiento de los datos de nivel correspondiente a la Cuenca Alta, se ha intentado diferenciar entre un nivel profundo y un nivel más superficial.

Finalmente ello no ha sido posible debido a la estadística del rango de profundidades de los puntos de aguas registradas para el periodo 1972-75. De todos los puntos incluidos en el análisis solo el 7% superaba los 100 metros, teniendo el 85% de los puntos una profundidad menor de 50 metros. Los niveles registrados en ambos grupos de puntos eran prácticamente coincidentes con escasas diferencias no representables a la escala de cuenca en la que se ha elaborado el mapa. Quizás un análisis específico hidrogeológico de algunas masas de aguas, pudiera finalizar con una diferenciación de niveles en función de la profundidad de los sondeos, pero este no era un objetivo del presente estudio.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

El número de puntos de agua de la red piezométrica oficial de la DGA encontrada en la consulta de la Web era muy escaso, del orden de 90. Con posterioridad la oficina de la Confederación en Ciudad Real ha facilitado los datos de algunas redes particulares (Campos de Montiel, Mancha Occidental y Huelva) en las que algunos puntos ya habían sido controlados en la red oficial pero otros no, lo que permitió aumentar el número total de puntos hasta los 113.

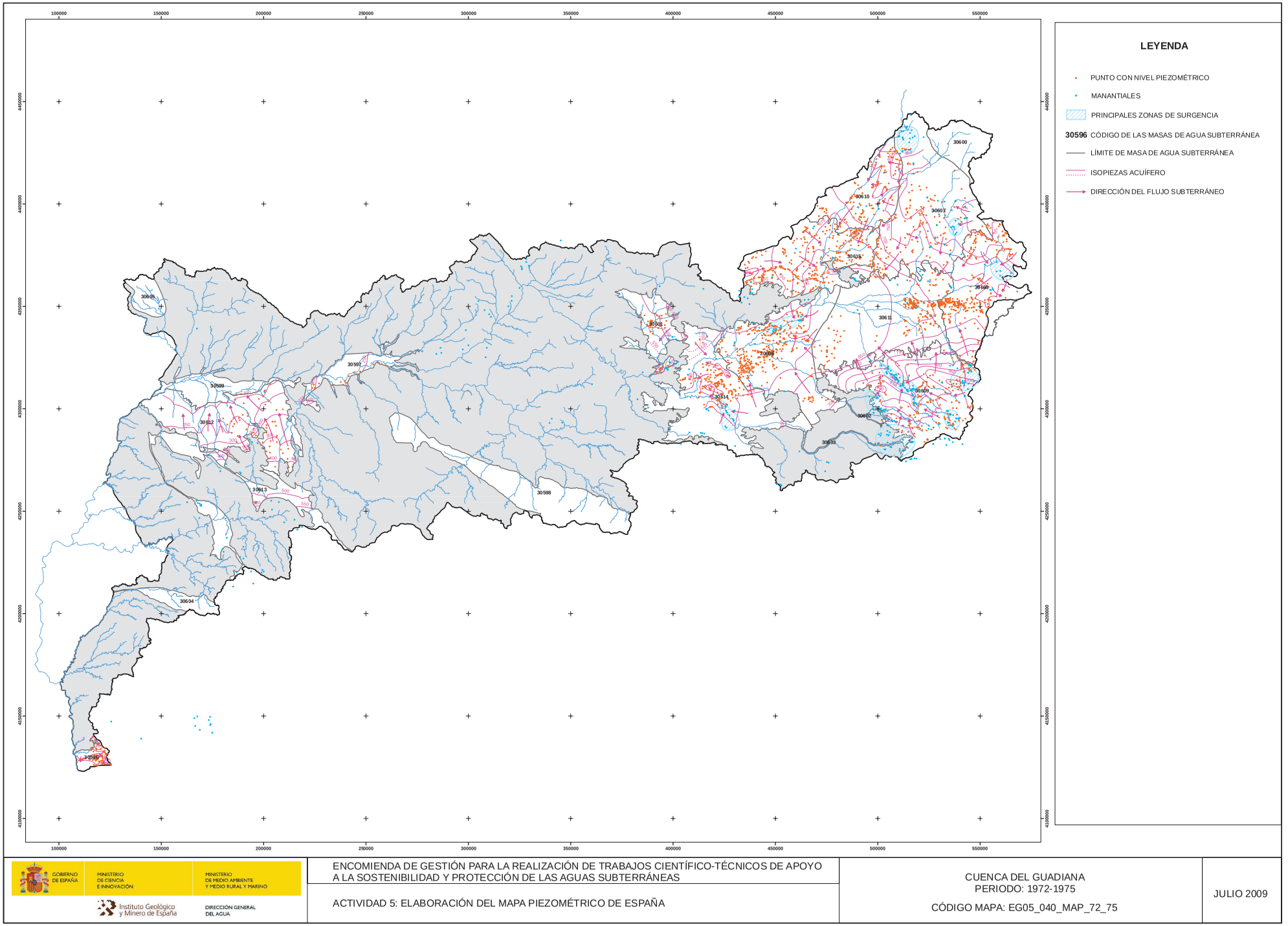
La distribución geográfica e hidrogeológica de la red es muy desigual, siendo especialmente escasa la densidad de puntos en masas de la zona de cabecera —Obispalia, Sierra de Altomira, Rus-Valdelobos, Lillo, Quintanar y Consuegra Villacañas— así como en la zona intermedia de Bullaque y Villacañas. En las zonas de Extremadura y Huelva la red de control piezométrico actual parece suficientemente representativa.

Esquema de flujo y evolución

Las isopiezas de la Cuenca Hidrográfica del Guadiana presentan en general en su trazado una morfología típica de una Cuenca Mesozoico-Terciaria drenada por una densa red de ríos afluentes del cauce principal de la misma y con un contraste significativo entre las zonas elevadas y las zonas de llanura. En las proximidades de los ríos las isolíneas se adaptan al mismo, elevándose en las áreas del interfluvio.

En el mapa correspondiente al periodo 1972-75, considerado a todos los efectos como el más aproximado posible al un estado natural o no influenciado, para la zona del Guadiana comprendida en la Comunidad de Castilla La Mancha, las cotas del nivel de agua varían entre un mínimo correspondiente a menos de 600 msnm en la salida del Guadiana de la MASb Campo de Calatrava, hasta un máximo ligeramente superior a los 1.000 msnm en el sureste de la cuenca, en la MASb Campos de Montiel en la zona limítrofe con la Cuenca del Júcar o los 850 metros que alcanza al nordeste de la cuenca, en la MASb Sierra de Altomira, en su límite con la misma cuenca del Júcar. En el periodo considerado no se aprecian, al menos con las isopiezas que se han podido trazar, trasvases entre ambas cuencas, por lo que cabe pensar que el límite superficial entre ambas era entonces también un límite subterráneo.

En el área de Extremadura las cotas del nivel de agua subterránea varían entre un mínimo de menos de 200 msnm a lo largo del aluvial entre Mérida y Badajoz MASb Vegas Bajas, hasta un máximo del orden de 550 msnm en el área más sureste de la MASb Zafra -Olivenza.



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

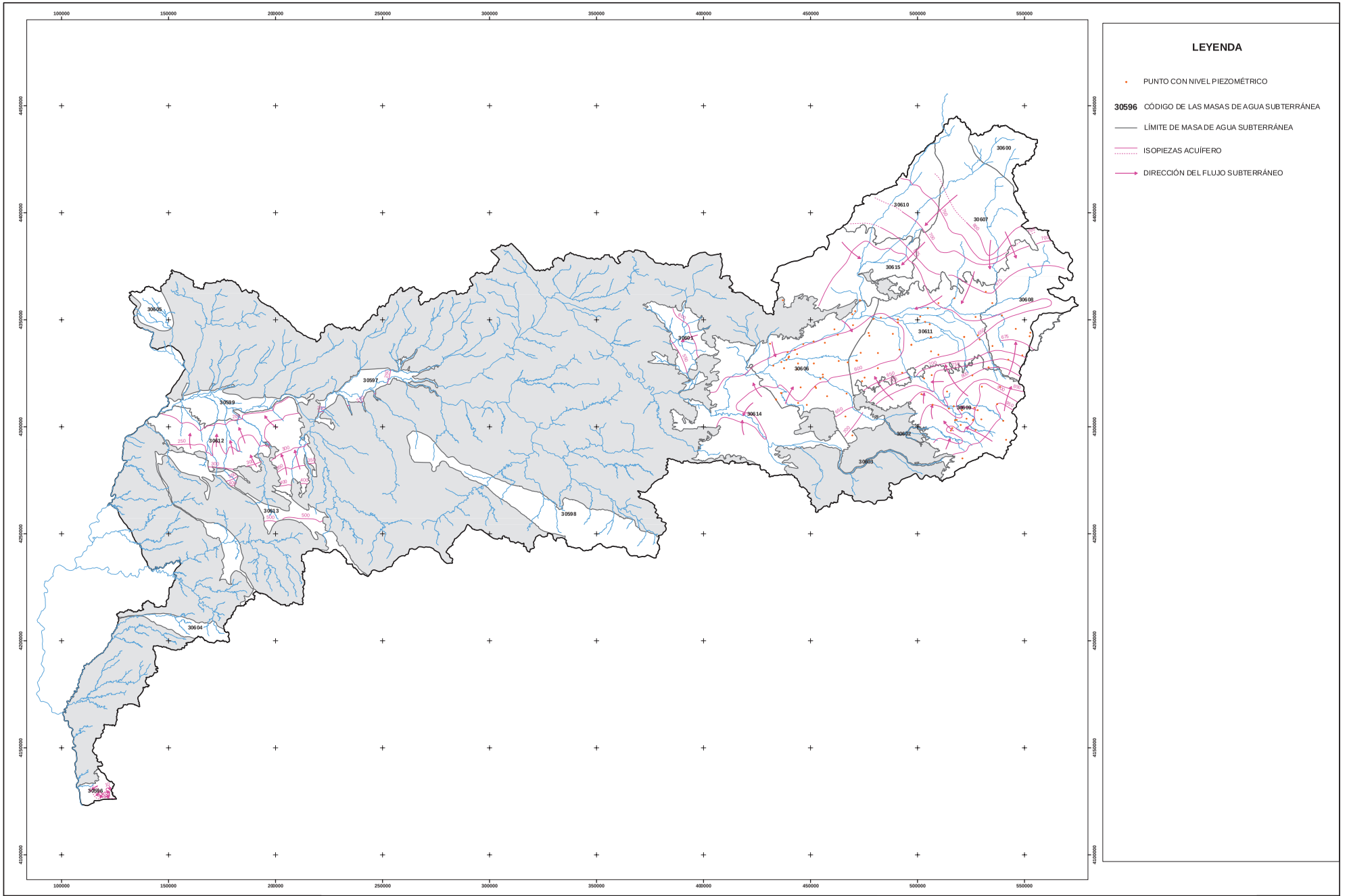
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL GUADIANA
PERIODO: 1972-1975

CÓDIGO MAPA: EG05_040_MAP_72_75

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL GUADIANA
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_040_MAP_08

JULIO 2009

Para la zona del Bajo Guadiana, en Huelva, MASb Ayamonte, la cota del nivel piezométrico varía entre 1 msnm en las zonas próximas a la costa hasta los 75 msnm en el límite norte de la misma.

Para el mapa de mayo de 2008, representativo de la situación actual de la piezometría de la cuenca, existen notables diferencias en la piezometría que evidencian la fuerte explotación de las aguas subterráneas entre la década de los setenta y la actualidad.

En el área de Castilla La Mancha la cota mínima, a la salida de la masa subterránea de Campo de Calatrava, del nivel piezométrico, se mantiene claramente por debajo de los 600 msnm, sin poder precisar por falta de puntos de control. Las cotas máximas en el sureste de la masa de Campos de Montiel alcanzan los 950 m.snm., prácticamente 50 metros menos que en la década de los setenta. En el área norte de la masa de Sierra de Altomira, aunque se carece de datos por falta de puntos de control, puede estimarse un descenso ligeramente inferior. En el área central de esta parte de la Cuenca del Guadiana —MASB Mancha Occidental I y II—, se pueden constatar descensos del orden de 50 metros que alcanzan también a la MASb Rus-Valdelobos.

En el área de Extremadura, la cota del nivel piezométrico ha variado menos que en la Cuenca Alta del Rio Guadiana. La cota mínima sigue siendo la misma –no hay que olvidar que el nivel piezométrico en el aluvial viene marcado por el nivel del rio entre Mérida y Badajoz, que a su vez depende del funcionamiento de los embalses próximos–, mientras que la cota máxima en cabecera de la masa del agua subterránea de Zafra Olivenza es de 500 msnm, inferior a la existente en el periodo de 1972-75, en 50 metros, lo que parece evidenciar una mayor explotación de esta última masa. La MASb Tierra de Barros, presenta muy poca variación en su nivel piezométrico que se sitúa entre 200 y 400 m.snm.

Finalmente, en el área de Huelva, el acuífero ha sufrido un significativo descenso, en su zona costera, presentando algunos puntos con cota por debajo del nivel del mar.

La piezometría descrita anteriormente, da lugar en ambos casos —mapa de 1972-1975 y mapa de mayo de 2008— a un esquema de flujo subterráneo muy similar, marcado en general por el eje de drenaje Este-Oeste que marca el río Guadiana en sus zonas alta y media. De esta forma al norte del rio los flujos tienen un componente principal N-S a NNE-SSO que localmente varía en función de la presencia de los afluentes que lo condicionan. Al sur del río Guadiana la componente principal del flujo es de dirección S-N a SSE-NNO, con las mismas excepciones locales debida al drenaje de los afluentes existentes en esta zona de la cuenca. Este comportamiento se reproduce en el área de la cuenca correspondiente a la Comunidad de Extremadura.

En la zona de Huelva, MASb Ayamonte, el flujo tiene claramente dirección perpendicular a la costa y hacia el mar.

El marco hidrodinámico descrito permite delimitar como áreas de recarga general los límites montañosos de la cuenca situada tanto al norte y noreste como al sur y sureste, así como en mucha menor medida las áreas de inferfluvio de los diferentes afluentes y del propio rio Guadiana.

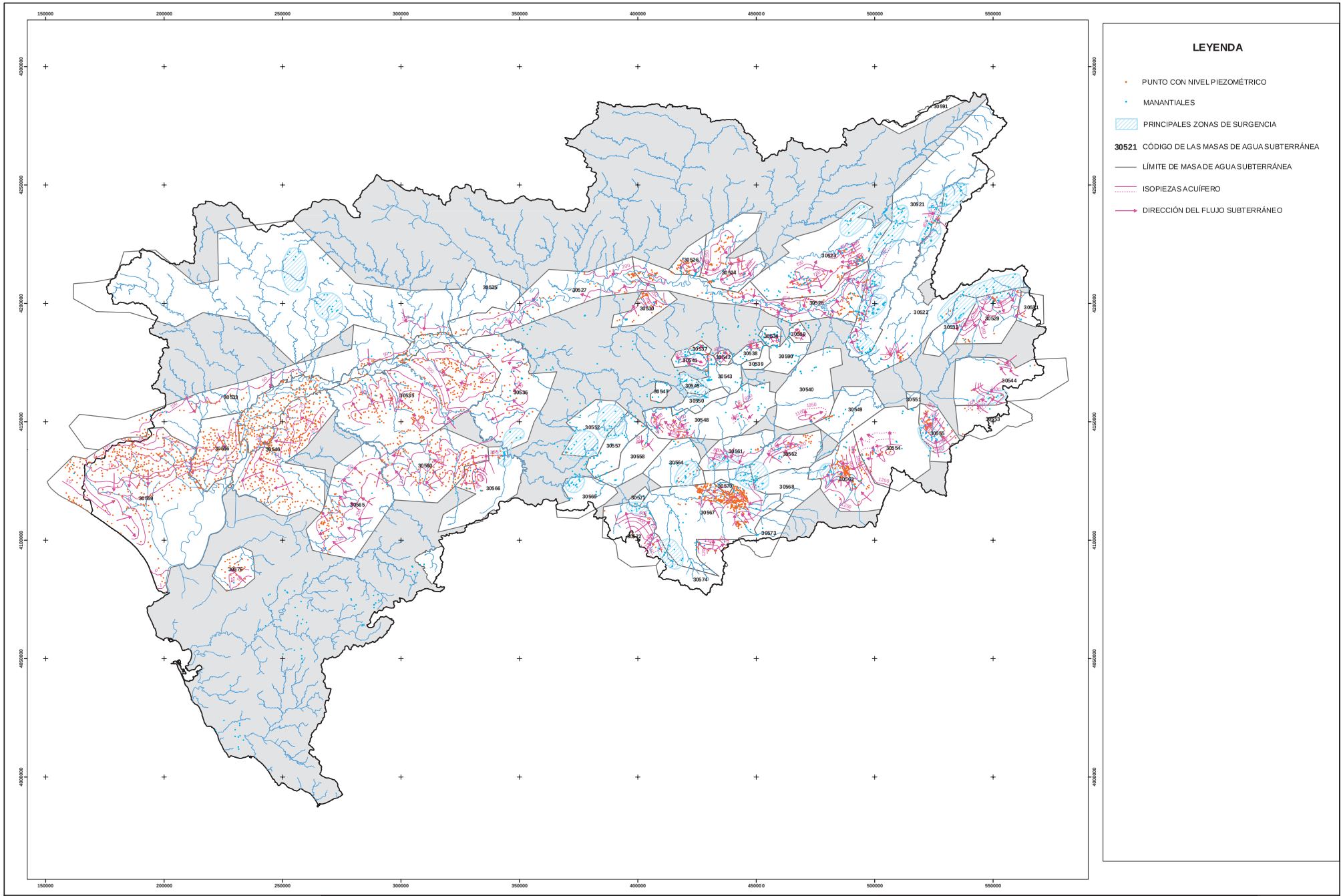
En el mapa correspondiente al periodo 1972-1975 se han situado los principales manantiales inventariados, que en algunas zonas se concentran dando lugar en dicho periodo, a áreas de surgencia próximas en general a los nacimientos de los ríos y a zonas elevadas. Especial relevancia tiene la gran concentración de surgencias existentes en el tramo del río Guadiana que forma las Lagunas de Ruidera. Otras áreas de abundancia de surgencia son los contactos de las masas de aguas subterráneas con los materiales impermeables que la delimitan, como ocurre con el límite suroeste de la MASb Campos de Montiel.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

Mapa de referencia (Período 1966-1968)

El análisis estadístico y el proceso de clasificación de datos descritos en el apartado metodológico han permitido seleccionar para cada una de las antiguas Unidades Hidrogeológicas el año en que existía un mayor número de datos de medida de nivel.

La existencia en la década de los sesenta del proyecto "FAO-Guadalquivir", con una intensa labor de inventario en una parte muy importante de la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir ha permitido que el periodo seleccionado se concentre en los años 66-68, para la elaboración del mapa de referencia. En dicho periodo se concentraron los estudios en determinadas áreas de la cuenca por lo que la distribución de puntos a lo ancho de toda ella es muy heterogénea con densidades de



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

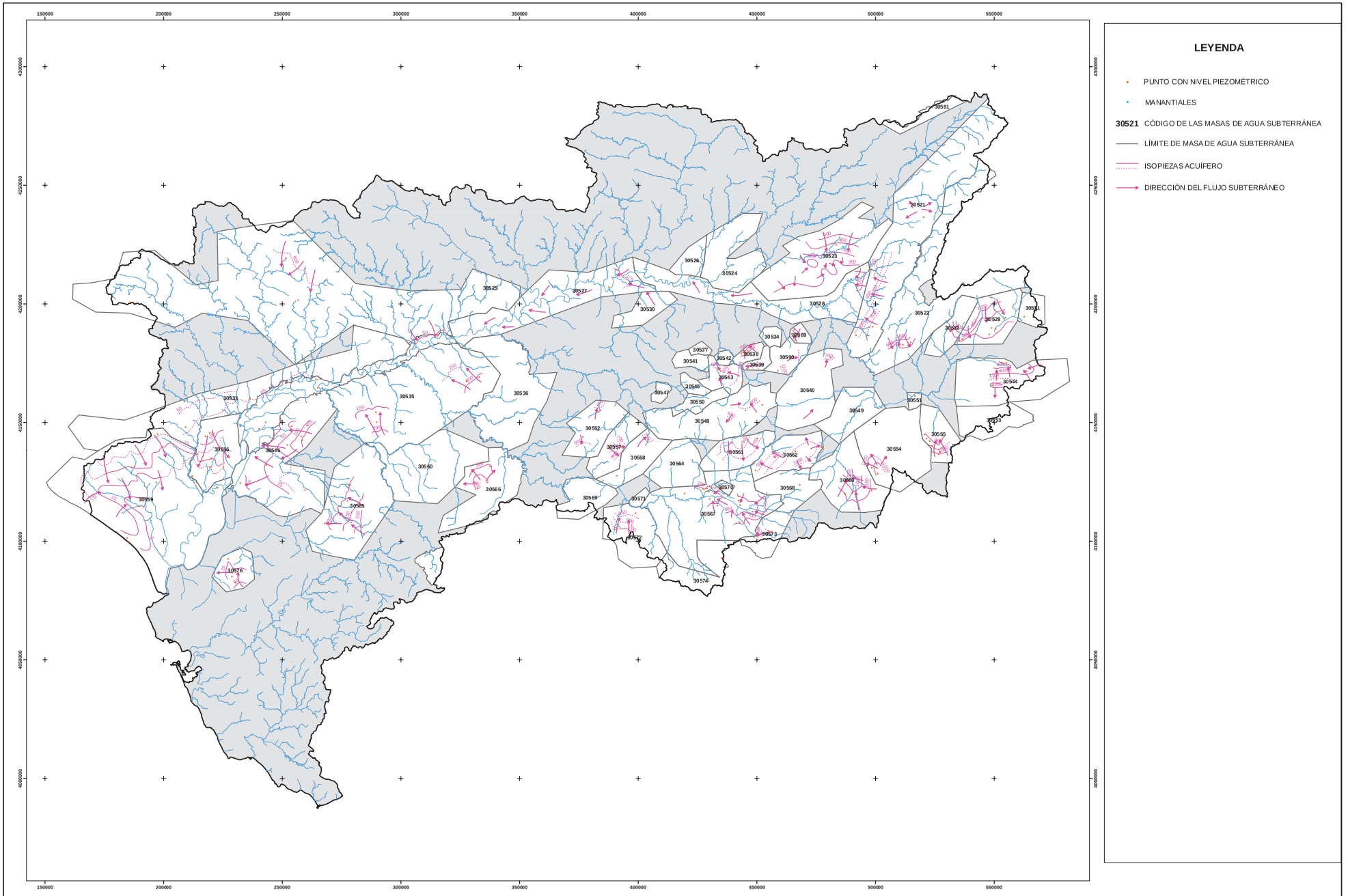
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL GUADALQUIVIR
PERIODO: 1966-1968

CÓDIGO MAPA: EG05_051_MAP_66_68

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL GUADALQUIVIR
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_051_MAP_08

JULIO 2009

puntos muy diferentes de unas a otras zonas, pudiendo definirse áreas con una gran densidad de puntos (producto de un exhaustivo inventario), otras áreas con una densidad más baja y cubiertos solo parcialmente y finalmente un tercer grupo en que por su localización montañosa y escasa explotación de las aguas subterráneas en aquellas fechas, no tiene apenas puntos de medida o lo tienen solo puntualmente.

En el primer grupo cabria incluir fundamentalmente las zonas más occidentales de la Cuenca Hidrográfica del río Guadalquivir: todos los acuíferos de las provincias de Huelva, Sevilla y Córdoba. A las que habría que añadir algunas del norte de Jaén en la margen derecha del río Guadalquivir, y otros en la provincia de Granada. A continuación se enumeran las masas que pueden considerarse muy cubiertas para la piezometría del período 1966-1968.

— Bailén-Guarromán-Linares
— Rumblar
— Aluvial del Guadalquivir bajo y medio
— Aluvial del Guadalquivir alto
— Porcuna
— Altiplanos de Écija
— Puente Genil-La Rambla
— Sevilla-Carmona
— Baza Caniles
— Aljarafe
— Almonte-Marismas
— Osuna-Lentejuela
— Guadix Marquesado
— Arahal-Coronil-Morón
— Depresión de Granada
— Lebrija

En el segundo grupo de acuíferos parcialmente cubiertos de puntos con registro de nivel en el periodo considerado y con menor densidad, se incluyen un conjunto muy heterogéneo de masas dispersas por toda la cuenca y que se enumeran a continuación:

— Úbeda
— Puebla de D. Fabrique
— Niebla-Posadas
— Orce-María-Cúllar
— Montes Orientales
— Sierra de Baza
— Sierra Colomera
— Sierra Arana
— Sierra de Estepa
— Sierra Gorda-Zafarraya

El tercer grupo está constituido por todo el conjunto de masas de aguas subterráneas en terrenos carbonatados y montañosos, situados en Jaén —área de la Sierra de Cazorla y Segura—, unidades carbonatadas del Subbético del sur de Jaén, o bien en Granada y sur de Córdoba. Todas estas masas eran explotadas a través de las surgencias naturales cuya localización permite en algunos casos fijar la dirección del flujo subterráneo, pero que sin apoyo de otro dato piezométrico no permiten el trazado de isolíneas.

El número total de puntos utilizados en el mapa piezométrico de referencia en la Cuenca Hidrográfica del Rio Guadalquivir, con la distribución tan heterogénea que se acaba de comentar es de 2.951 puntos.

Siguiendo igual criterio metodológico que para los puntos de agua con nivel registrado, se ha procedido a un análisis estadístico de los datos de manantiales incluidos en la Base de Datos de Aguas del IGME, procediendo a la selección de aquellos en los que se tenía constancia en el periodo 1966-68. El número total de manantiales seleccionados y representados en la masa es de 1 556. Todas las áreas en las que existe una elevado concentración de manantiales se han marcado como zonas de surgencia. La mayor parte de estas áreas de surgencia se localizan en las unidades carbonatadas mencionadas anteriormente por su escasez de datos piezométricos.

Estas zonas de surgencias constituían en aquel período el drenaje natural y sistema de explotación de todas esas masas de agua subterránea.

Los niveles piezométricos reflejados en el mapa de referencia (1966-1968) varían desde valores muy próximos a cero, o incluso bajo el nivel del mar en las MASb localizadas en las costas de Huelva (Almonte-Marismas), hasta las máximas registradas en las sierras existentes al sur de la Depresión de Granada (Sierra de Tejeda) o al este de Sierra Nevada (Guadix-Marquesado y Sierra de Baza) donde se alcanza los 1 200 msnm de cota del nivel piezométrico. En general existe una relación muy directa entre la cota del nivel piezométrico y la cota topográfica de la zona.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

El número de puntos registrados con datos de nivel en la red de control piezométrico de la DGA, que ha sido la fuente de información utilizada, es como en la mayoría de las cuencas muy escaso. En caso de la Cuenca Hi-

drográfica del Guadalquivir, el número de puntos total considerados es de 160. A este respecto es conveniente poner de relieve un aspecto importante de las redes de control piezométrico: no entra en los objetivos de las redes de control, la elaboración de mapas piezométricos. Su objetivo principal es conocer la evolución temporal de niveles piezométricos en las masas de agua subterránea.

Así, este objetivo puede ser perfectamente conseguido con un número pequeño pero representativo de puntos de cada masa. Mientras que para la elaboración de mapas piezométricos significativos, habitualmente se necesita un mayor número de puntos.

Esquema de flujo y evolución

Las isopiezas representadas en el Mapa Piezométrico de la Cuenca Hidrográficas del Rio Guadalquivir presentan en conjunto dos tipos de trazados. Por una parte aquellas que se adapta en las proximidades de los ríos y arroyos a la topografía de ambos, mientras que en zonas de interfluvios se elevan. Este tipo de isopiezas es la habitual en los materiales terciarios o pliocuaternarios y se presentan en todo el área occidental de la cuenca y en las depresiones internas de las Cordilleras Béticas —Depresión de Granada, Guadix-Baza, etc. En estas zonas el flujo de agua subterránea queda claramente identificado en dirección a los ejes de drenaje que representan los ríos.

El segundo tipo de isopiezas se produce en las masas de agua de origen carbonatado en los que son escasos los ejes de drenaje importantes y en los que el movimiento del agua —flujo subterráneo— se produce hacia zonas de surgencias o drenaje de los macizos carbonatados, adaptándose en este caso las líneas isopiezas a la topografía.

Este tipo es el más abundante en todas las masas de agua de composición carbonatada existentes en las Sierras del Prebético y Subbético de Jaén y Granada.

De forma general, y salvando las excepciones, se puede decir que el flujo de agua subterránea representado en los mapas piezométricos tiene dirección predominante hacia el cauce principal de la cuenca —Guadalquivir— y sus grandes afluentes —Guadiana Menor, Guadalimar, Genil, Guadalbullón, etc.

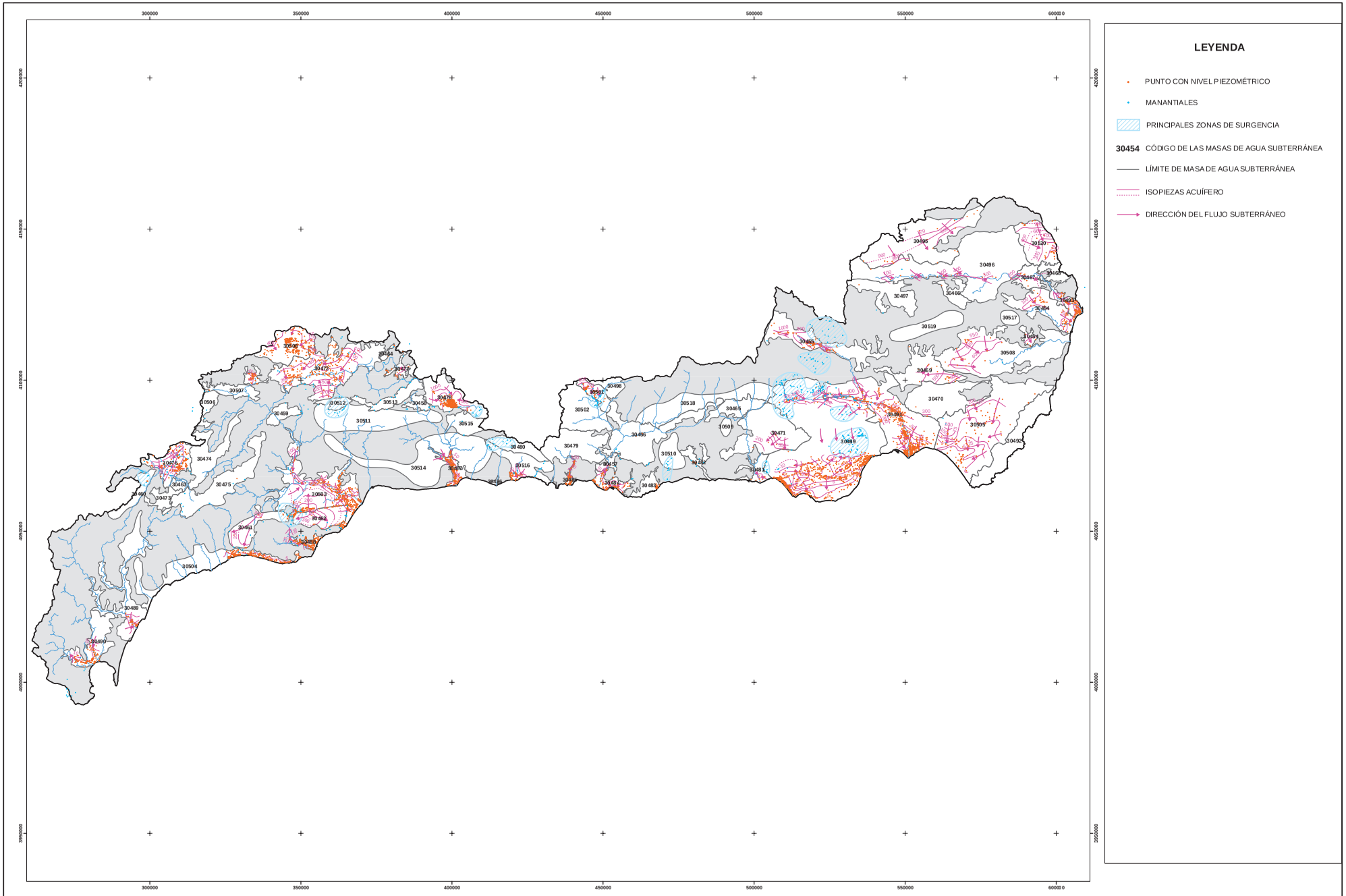
El marco hidrodinámico descrito permite delimitar como área de recarga potencial, todas las unidades geológicas carbonatadas de cabecera del río Guadalquivir y de sus afluentes, así como en menor medida los afloramientos neógenos de las depresiones y cuencas terciarias. Las áreas de descarga ya han sido descritas en un apartado anterior y vienen representadas tanto por los propios cauces de drenaje como por las zonas de concentración de surgencias en los macizos carbonatados de las provincias de Jaén y Granada.

La comparación entre las piezometrías de ambos mapas elaborados, no permite mucha precisión en la cuantificación del descenso de niveles que evidentemente se ha producido en el periodo de tiempo comprendido entre la década de los sesenta y la actual. Como cifras aproximadas se puede decir, por ejemplo, que en la zona baja y más occidental del Guadalquivir los descensos generales son del orden de 20-30 metros salvo la zona costera del Almonte-Marismas en donde es bastante menor. En algunas partes de la Depresión de Granada se han producido descensos del nivel de cincuenta metros mientras que en otros puntos el descenso es inapreciable. En el grupo de masas de agua localizadas en macizos carbonatados estos descensos son muy variables dependiendo del grado de explotación al que se han visto sometido en estos años el acuífero. Entre los casos de mayor descenso se puede citar las masas de agua subterránea de zona de Úbeda (carbonatado), Huescar, Puebla de D. Fadrique, Guadix-Marquesado, Baza-Caniles, etc.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS

Mapa de referencia (Período 1972-1974)

El análisis estadístico y el proceso de clasificación de datos de nivel en puntos de agua descritos en el apartado anterior, ha permitido seleccionar para cada una de las antiguas Unidades Hidrogeológicas, los años en que existían mayor concentración de datos. Para la Cuenca Hidrográfica Mediterránea Andaluza el periodo seleccionado es el comprendido entre los años 1972 y 1974, ambos inclusive. Durante este periodo se llevó a cabo el estudio hidrogeológico de la mayor parte de las actuales masas de agua subterránea, si bien algunas se han definido y estudiado posteriormente. Esta sucesión en el tiempo de los diferentes estudios ha dado lugar que los puntos seleccionados en el periodo de referencia están diferentemente distribuidos en las masas de agua subterránea.



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

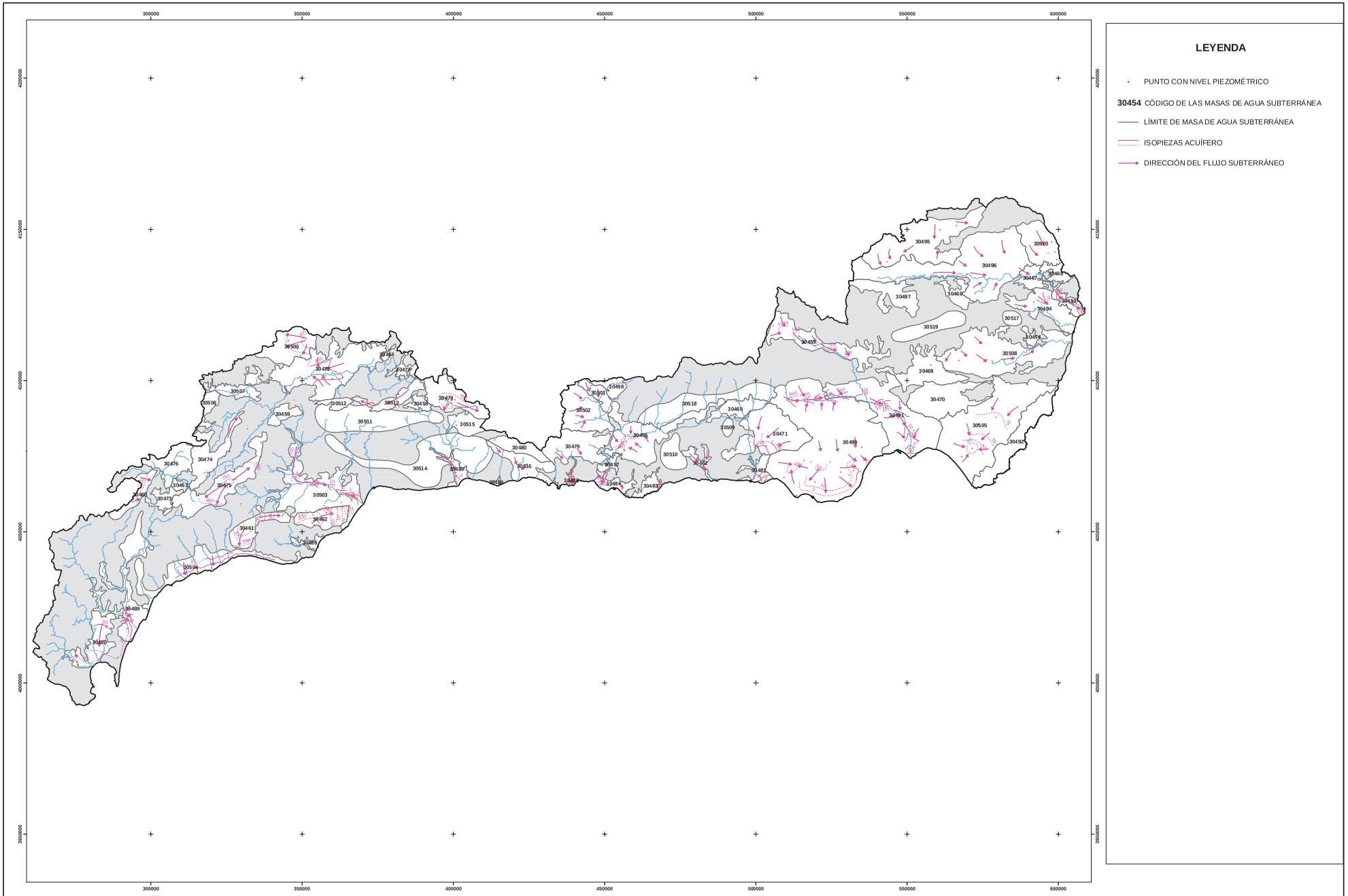
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA MEDITERRÀNEA ANDALUZA
PERIODO: 1972-1974

CÓDIGO MAPA: EG05_061_MAP_72_74

JULIO 2009



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- **30454** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA MEDITERRÀNEA ANDALUZA
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_061_MAP_08

JULIO 2009

Así existe un número elevado de ellos, especialmente aluviales y planicies costeras, depresiones neógenas costeras y depresiones neógenas internas, con una gran densidad de puntos en el período indicado. Por el contrario, existe un elevado número de masas de aguas subterráneas de constitución geológica carbonatada con una intensa estructuración y fragmentación para las que la densidad de puntos es muy baja o inexistente lo que ha impedido la elaboración de una piezometría adecuada.

Esta baja o nula densidad de puntos se debe casi siempre al hecho de que en el periodo 1972-74 dichas masas no eran explotadas mediante sondeos, siendo el aprovechamiento de los recursos hídricos realizados mediante las surgencias naturales que la drenaban.

Entre las masas del primer grupo, alguna de las cuales ya en este periodo no podían considerarse en estado natural debido a su explotación anterior, cabe citar las siguientes:

— Llanos de Antequera
— Depresión de Ronda
— Sierra Gorda-Zafarraya
— Motril-Salobreña
— Río Verde
— Río Vélez
— Río Fuengirola
— Guadarranque-Palmones
— Medio y Bajo Andarax
— Bajo Almanzora
— Campo de Dalías-Sierra Gádor
— Fuente Piedra
— Bajo Guadalhorce
— Campo de Níjar

Entre las segundas, que suponen un elevado número de masas, se pueden citar como representativas las siguientes:

— Lanjarón-Sierra Lújar
— Sierra del Valle Abdalajis
— Sierra Alhamilla
— Sierra Hidalga-Merinas
— Sierra de las Nieves-Prieta
— Sierra de las Guájaras
— Sierra de Albuñuelas
— Metapelitas de Sierra Tejeda-Almijara
— Sierra Tejeda
— Puerto de la Virgen

El número total de puntos utilizados en el mapa de referencia 1972-74 en la Cuenca Mediterránea asciende a 5.082 puntos.

Siguiendo igual criterio metodológico de selección de puntos de agua con nivel se ha procedido a la selección de manantiales de cuya existencia se tenía información en el periodo 1972-74. El número total seleccionado asciende al orden de 500, la mayor parte de los cuales se concentran en las áreas de drenaje de las unidades carbonatadas.

La variabilidad de niveles en la cuenca es como cabe suponer muy amplia, desde cotas negativas en algunos acuíferos costeros, como en el Campo de Dalias, hasta los 1.000 msnm alcanzados en algunas MASb intramontañosas como Rio Nacimiento, Sierra de las Estancias o Sierra Gorda.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Para la elaboración del mapa del estado actual se ha utilizado la información de niveles procedente de la red de control piezométrico, localizados en la Web de la DGA, a la que se ha sumado información puntual suministrada por los técnicos de la Agencia Andaluza del Agua destinados en la Cuenca Mediterránea. Con ello el número de puntos utilizados ha ascendido a 475, que puede considerarse muy elevado en comparación con otras cuencas, pero que en definitiva es escaso para las 67 MASb delimitadas en esta cuenca hidrográfica, al menos para la elaboración de mapas piezométricos. Si bien parece más que suficiente para el seguimiento del estado cuantitativo de las masas que es el objetivo real de las redes.

Esquema de flujo y evolución

Al no existir en esta cuenca hidrográfica un cauce o rio principal que marque la hidrología superficial, el sentido del flujo subterráneo en cada masa viene marcado por sus características específicas de localización geográfica y topográfica.

Por otra parte hay que considerar la gran complejidad tectónica que caracteriza la estructura geológica general de la cuenca que se encuentra en la zona más interna de las Cordilleras Béticas. Ello da lugar a una elevada fragmentación y compartimentación de las estructuras acuíferas asimiladas a las masas de agua subterránea.

No obstante, dentro de esta complejidad se puede advertir determinados comportamientos hidrodinámicos

comunes. Así, en las masas de agua subterráneas costeras o relacionadas con cauces próximos a la costa, se advierte un flujo subterráneo en general perpendicular a la costa y en dirección hacia el cauce superficial. Por ello desde Cádiz a la costa sur de Almería las direcciones predominantes son N-S, NO-SE ó NE-SO, mientras que en la costa este de Almería la dirección predominante es O-E.

En las masas de agua del interior el flujo siempre tiene como dirección predominante la de afluencia al cauce de drenaje correspondiente, y la del mismo cauce. En este grupo cabría citar como excepción aquellas masas de agua subterránea de constitución carbonatada en las que existen algunas surgencias importantes que constituyen el drenaje natural de la masa en cuestión.

La comparación de los dos mapas de isopiezas indica en general poca variación entre ambos, con excepción de una serie de masas costeras en las que se ha producido un descenso de 5-10 metros, y alguna masa de constitución carbonatada interior, como Sierra Gorda-Zafarraya en la que se han producido descensos cercanos a los cincuenta metros.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA ATLÁNTICAS ANDALUZAS

Mapa de referencia (Período 1966-1968)

Al ser esta Cuenca Hidrográfica derivada en parte de la Cuenca del Guadalquivir y en parte de la Cuenca Baja del Guadiana, el tratamiento de datos para el proceso de clasificación de registro es muy parecido al de ambas, y como en ambas la base de los datos históricos se encuentran en los inventarios realizados dentro del proyecto "FAO Guadalquivir".

Ello ha permitido que todos los datos de niveles para el mapa de referencia se concentren en el periodo 1966-1968.

Como para el caso de la Cuenca del Río Guadalquivir, existen algunas áreas que fueron estudiadas en mayor detalle que otras y por lo tanto cuentan con inventarios de puntos de agua más extensos y una densidad de puntos mayor. En las masas de agua subterránea correspondientes a estas áreas ha sido posible un trazado más preciso de las isopiezas. En otras zonas la escasez de puntos o práctica ausencia de ellos, ha sido imposible el trazado de las mismas. Ejemplo de estas masas son:

— 30577 Sierra de Grazalema
— 30578 Llanos de Villamartín
— 30582 Sierra de Libar
— 30583 Aluvial del Guadalete
— 30587 Aluvial del Barbate
— 30588 Vejer-Barbate

Las restantes masas de esta Cuenca Atlántica Andaluza cuentan con suficientes datos para la elaboración de las isopiezas. El número total de puntos utilizados en este mapa es de 818.

Los manantiales seleccionados para esta Cuenca en el periodo de referencia se encuentran situados en su mayor parte en las masas de agua de constitución carbonatada del Nordeste de la Cuenca: Setenil-Ronda, Grazalema y Sierra de Libar, constituyendo el drenaje natural de estas masas de agua subterráneas.

La variación de los niveles piezométricos en las MASbs de esta cuenca varía desde prácticamente cero en zonas costeras hasta los 800 msnm de cota que se registra en la masa de Setenil-Ronda.

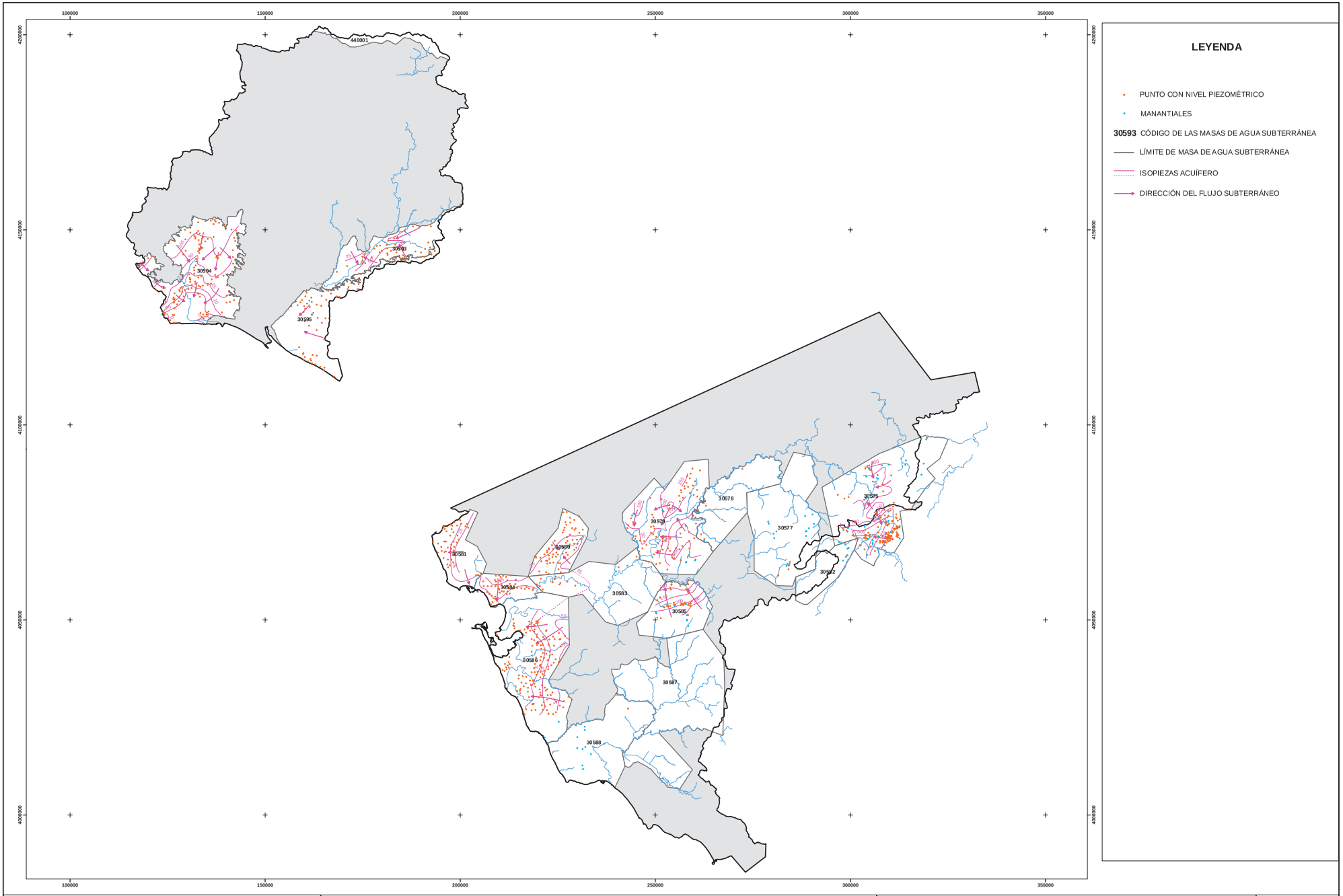
Mapa del estado actual (Mayo 2008)

El número de puntos registrados con datos de nivel en la red de control piezométrico de la DGA en las masas de esta cuenca, en total 70, es muy escaso, de manera que en 7 de las 16 masas de agua subterránea incluidas en la misma no se dispone de datos para elaborar el mapa piezométrico:

— 30575 Setenil-Ronda
— 30577 Sierra de Grazalema
— 30578 Llanos de Villamartín
— 30582 Sierra de Libar
— 30583 Aluvial del Guadalete
— 30585 Sierra de las Cabras
— 30587 Aluvial del Barbate

Esquema de flujo y evolución

Las isolíneas del nivel piezométricos trazadas en ambos mapas descritos anteriormente presentan siempre un mismo tipo de comportamiento, ajustándose en las proximidades de los ríos a su cota y elevándose en los interfluvios, mostrando en ello claramente los ejes de drenajes asociados a los cauces naturales. En las áreas costeras muestran un trazado paralelo a las mismas, con las inflexiones propias ligadas a los cauces costeros.



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- **30593** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

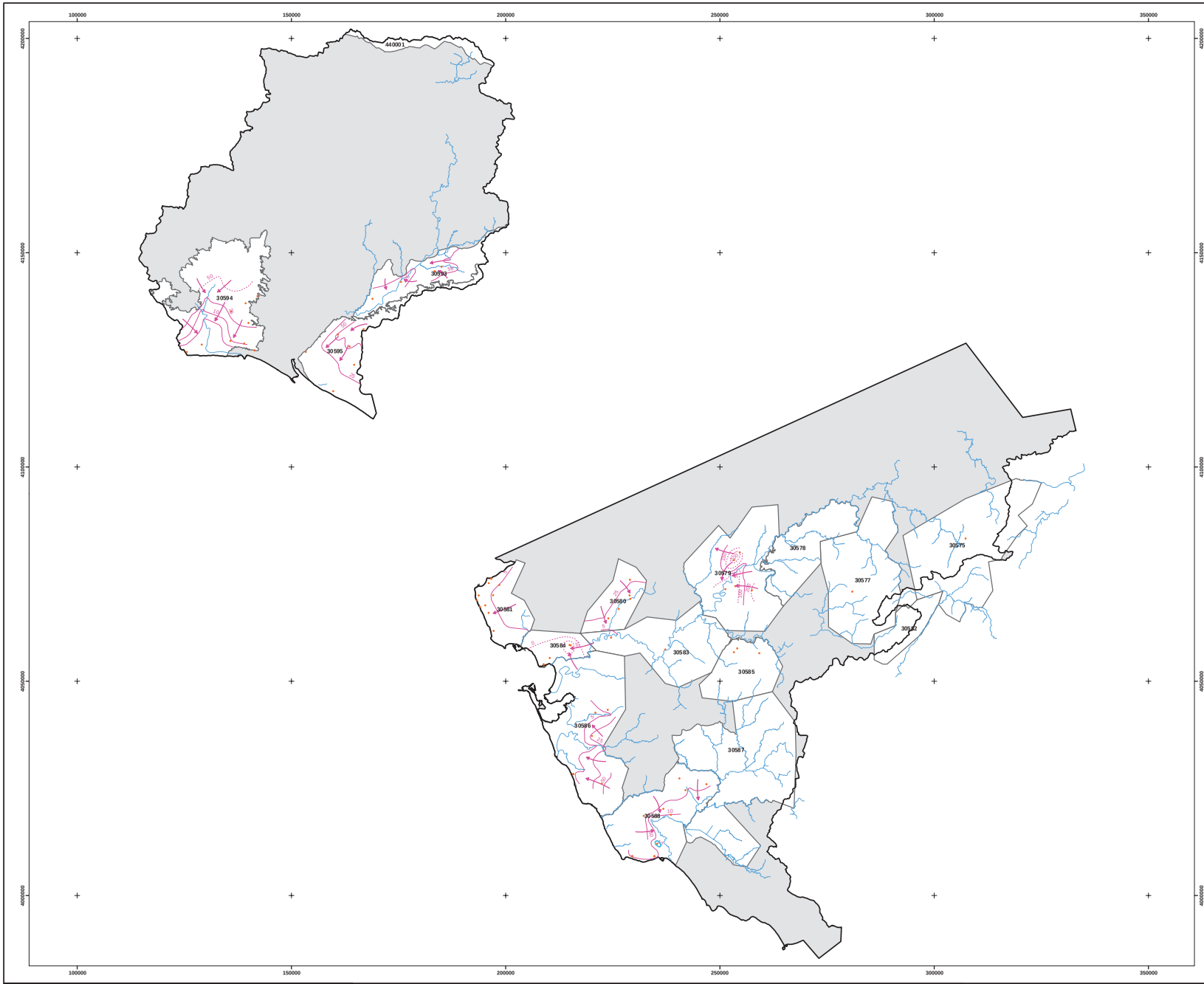
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA ATLÁNTICA ANDALUZA
PERIODO: 1966-1988

CÓDIGO MAPA: EG05_062_MAP_66_68

JULIO 2009



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- **30593** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA ATLÁNTICA ANDALUZA
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_062_MAP_08

JULIO 2009

Este tipo de superficie piezométrica da lugar a un flujo subterráneo típico con direcciones hacia los cauces en las áreas interiores y perpendiculares a la costa en las áreas limítrofes con el mar.

Guadalete y Barbate constituyen los cauces que marcan la dirección de flujo en el área oriental de la cuenca, mientras que Tinto, Odiel y Piedras las marcan en el área occidental.

Las comparaciones de isolíneas entre ambos mapas permiten extraer algunas conclusiones en cuanto a evolución de los niveles en esta cuenca en las últimas décadas. En el área occidental no existen apenas variaciones en los niveles, mientras en el área oriental se produce un descenso de niveles significativo en algunas áreas concretas de las masas de agua subterráneas costeras de Puerto de Santa María y Puerto Real-Conil. Especialmente importante es el descenso producido en la primera de las masas, del orden de 20 metros, habiéndose creado en las proximidades del río Guadalete un cono de depresión de hasta -10 metros. En el resto de las masas de esta zona no se aprecian variaciones significativas.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA

Mapa de referencia (Periodo 1970-1988)

El periodo resultante para las isopiezas de referencia, 1970-1988, es muy amplio porque también lo es el de identificación, definición y control de los acuíferos, de tal modo que la gran mayoría de los acuíferos más importantes fueron identificados, caracterizados y controlados ya en los primeros años 70 del siglo XX, mientras que otros de menor importancia no fueron definidos hasta bien avanzada la década de 1980. Como excepción al periodo general debe señalarse la Sierra de Crevillente, que en la vertiente del Segura sólo tiene un dato en 1995.

El mapa elaborado se puede considerar lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Segura, ya que representa las primeras campañas generales de medidas, realizadas en el ámbito de cuenca, con independencia de que en zonas concretas existan datos más antiguos.

Sin embargo, en varias MASb los primeros datos representativos de que se ha dispuesto no corresponden a un estado natural o de no afección de los acuíferos. Los casos más significativos son los de las MASb (Ascoy-Sopalmo), (Alto Guadalentín), (Mazarrón), (Quibas), (Jumilla-Yecla), (Serral-Salinas), (Triásico de las Victorias), (Campo de Cartagena), (Santa Yéchar), que ya presentaban un apreciable grado de explotación.

En las masas de agua subterránea del Alto Segura, donde las formaciones acuíferas en muchos casos están colgadas, se han representado los puntos de surgencia de los principales manantiales.

Para el trazado de las isopiezas de referencia se ha utilizado un total de 3.375 medidas piezométricas y 200 cotas de descarga de manantiales.

Como caso particular, es preciso señalar la MASb 30442 (Campo de Cartagena), en la que existen 3 acuíferos superpuestos e hidrodinámicamente independientes, aunque pueden estar conectados puntualmente a través de sondeos que capten uno, dos o los tres niveles. Citados de inferior a superior son: Andaluciense (Mioceno), Plioceno y Cuaternario. Para la representación de isopiezas de referencia se han utilizado tres colores diferentes. Por el contrario, no ha sido posible trazar las isopiezas correspondientes a mayo de 2008 por la excesivamente baja densidad de puntos de apoyo.

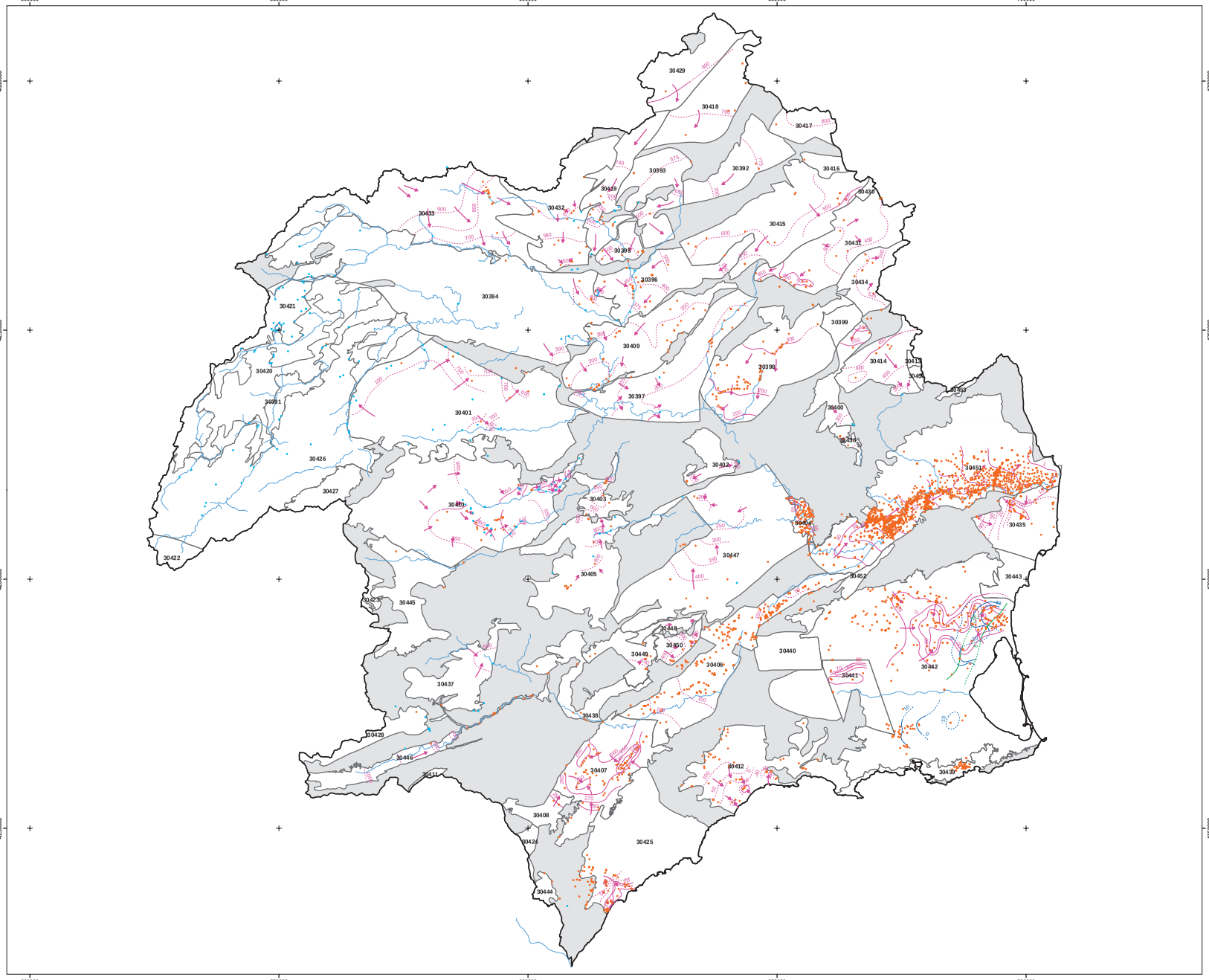
Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Además de los datos de la red oficial de la DGA, para Alcadozo, se ha contado con información piezométrica complementaria de 20 puntos de agua facilitada por la Oficina del IGME en Murcia. En total, para el trazado de las isopiezas representativas del régimen hidrodinámico actual en la Cuenca del Segura se ha utilizado un total de 113 medidas piezométricas.

Esquema de flujo y evolución

Como consecuencia de una estructura geológica de gran complejidad tectónica, en la Cuenca del Segura las formaciones permeables presentan un alto grado de fragmentación que da lugar a la existencia de un gran número de estructuras acuíferas, generalmente asimiladas a masas de agua, independientes entre sí.

En las masas de agua subterránea de la Cuenca del Segura las direcciones del flujo, siempre dentro de un sentido general coincidente con los ejes principales de drenaje superficial, que determinan los sectores de menor altitud topográfica, son diversas porque el régimen de circulación y descarga del agua subterránea



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- **30391** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- ISOPIEZAS DEL ACUÍFERO PLIOCENO (MA 30442)
- ISOPIEZAS DEL ACUÍFERO CUATERNARIO (MA 30442)
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España · DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

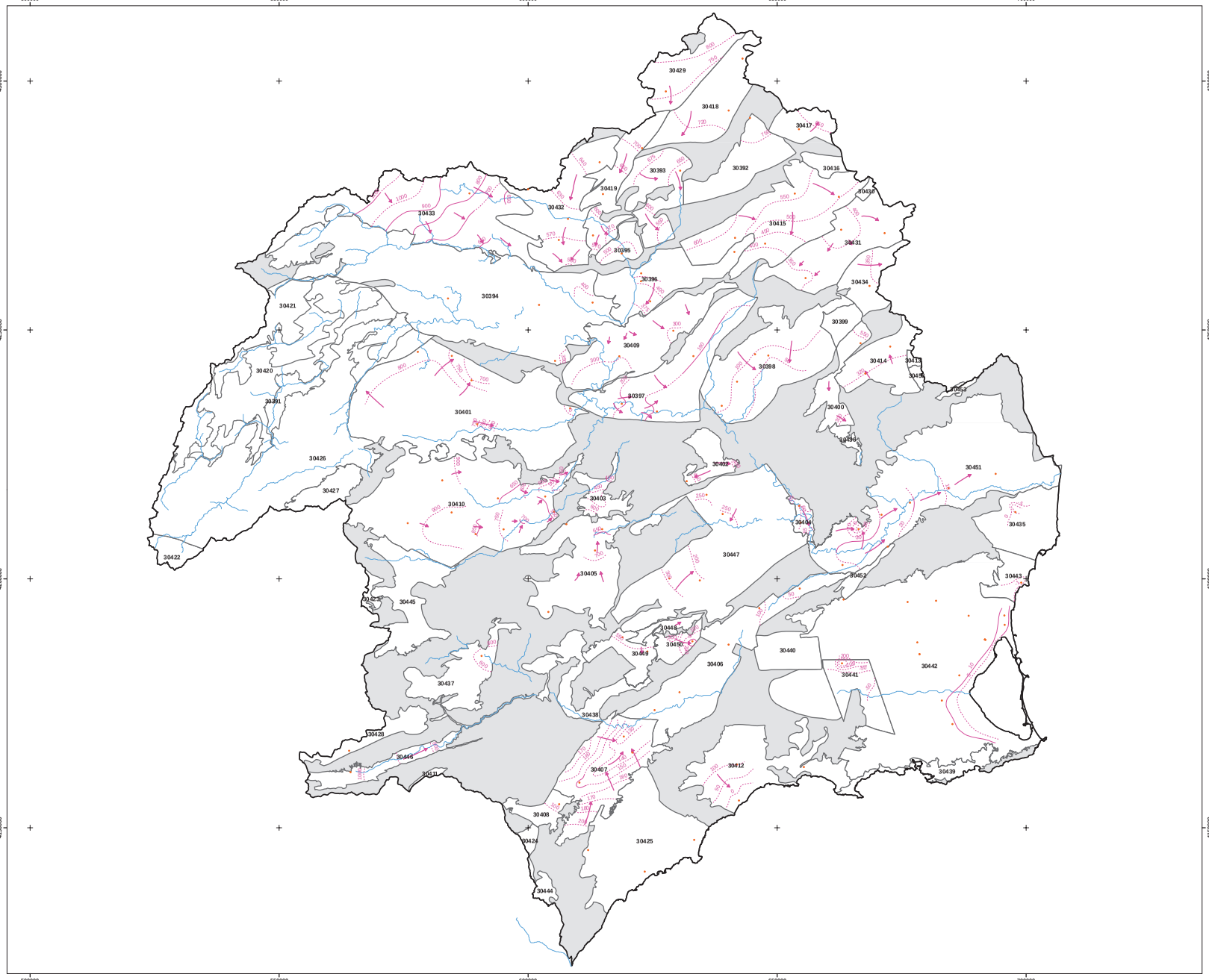
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL SEGURA
PERIODO: 1974-1988

CÓDIGO MAPA: EG05_071_MAP_74_88

JULIO 2009



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- **30391** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL SEGURA
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_071_MAP_08

JULIO 2009

en los diferentes acuíferos depende de la fracturación y karstificación de las formaciones acuíferas y de la posición relativa de los impermeables de base. En estas masas de agua, los impermeables (representados con un sombreado gris en los mapas) están constituidos por las formaciones semipermeables mesozoicas y terciarias (compuestas por yesos, arcillas y margas) intercaladas entre los diferentes niveles acuíferos. Las áreas de mayor presencia de materiales de baja permeabilidad es una franja SO-NE, correspondiente al Subbético, que ocupa buena parte del centro y sur de la cuenca.

Las áreas de recarga principales corresponden a los afloramientos de los acuíferos en los tercios NO y SE de la cuenca.

En los tramos alto y medio del Segura las direcciones de flujo predominantes son N-S a NO-SE, en su margen izquierda, y SO-NE a S-N, en su margen derecha. En la parte baja de la cuenca, donde más desarrollo tienen los acuíferos aluviales asociados al Segura y su tributario Guadalentín, la circulación subterránea es convergente hacia los cauces, con una directriz principal ESE-ONO.

En algunas masas de agua del borde NE de la cuenca, los acuíferos tienen continuidad hacia la cuenca del Júcar y se producen transferencias de agua subterránea hacia esta última.

Por su parte, en los acuíferos costeros del sector sur de la cuenca, los flujos son siempre hacia el mar, con direcciones predominantes O-E en la zona del Campo de Cartagena, que pasan a NO-SE en la zona Mazarrón-Águilas.

Las cotas piezométricas van desde un máximo en torno a los 1.000 m.snm., en las áreas de cabecera del Segura, hasta valores inferiores al nivel del mar en algunas masas de agua costeras o próximas a la costa, con valores mínimos que llegan a superar localmente los 100 m b.n.m.

La comparación de los dos mapas de isopiezas indica un descenso generalizado del nivel piezométrico en prácticamente toda la cuenca del Segura, como consecuencia de las extracciones de agua subterránea por bombeo y de la disminución de las aportaciones de agua superficial, en los casos de las vegas del Segura. Constituyen excepción las masas de agua subterránea correspondientes a las sierras del Alto Segura, donde apenas se observan descensos piezométricos. Los fuertes bombeos han provocado la sobreexplotación de varios acuíferos, con descensos acumulados que llegan a superar el centenar de metros.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

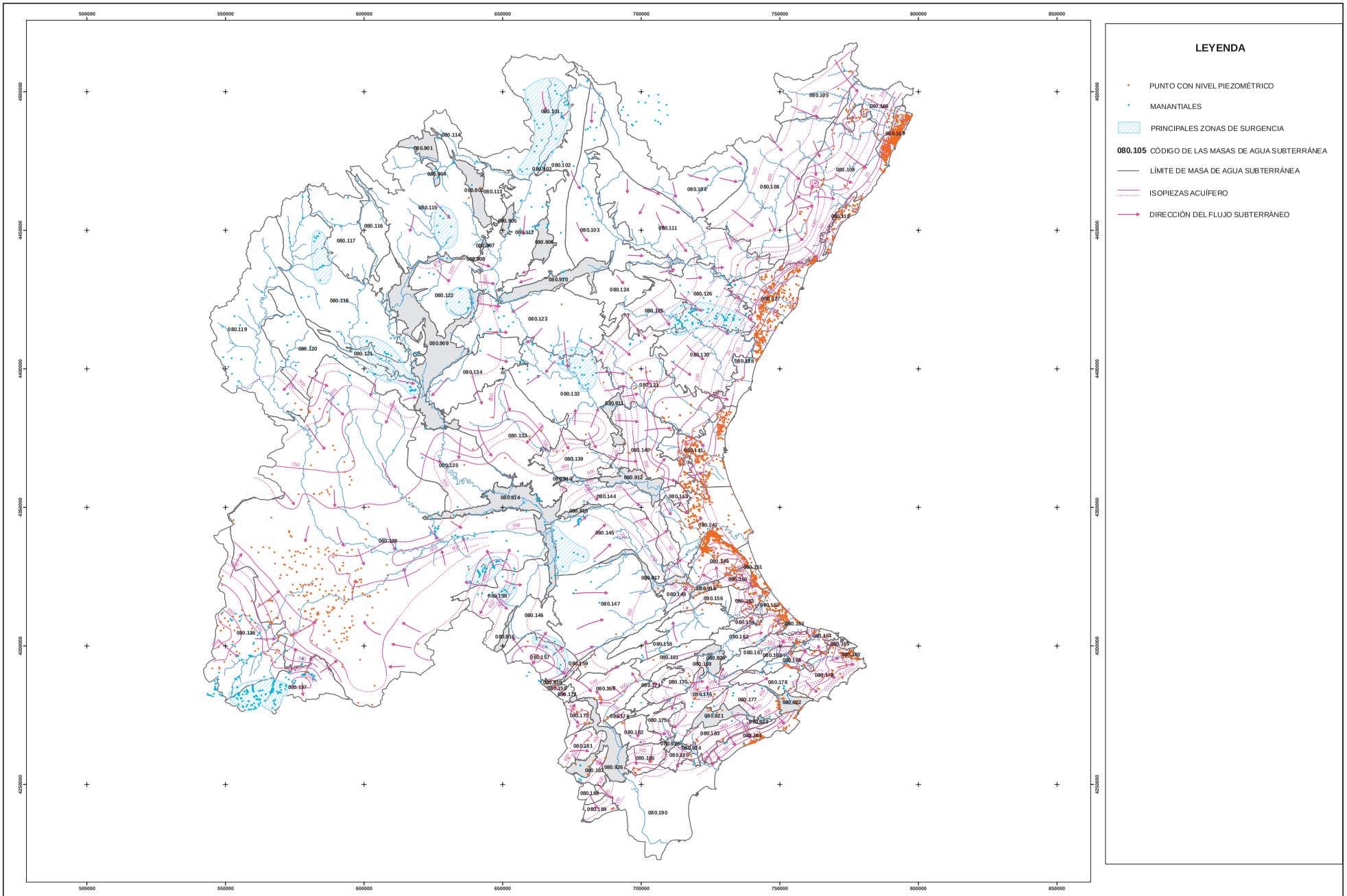
Mapa de referencia (Período 1970-1974)

El análisis estadístico y el proceso de clasificación de datos han permitido seleccionar para cada una de las antiguas Unidades Hidrogeológicas el año en que existía un mayor número de datos de medidas de nivel. El período finalmente seleccionado como de referencia para las isopiezas es el comprendido entre 1970 y 1974 ambos inclusive, coincidente con la elaboración de estudios dentro del Programa de Investigación de las Aguas Subterráneas (PIAS) en la Cuenca Hidrográfica del río Júcar, dentro de los cuales se llevaron a cabo inventarios extensivos de puntos de aguas en todos los acuíferos considerados entonces. Aunque en términos generales el mapa que de ellos se deduzca se va a considerar lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas, ya que representan las primeras campañas generales de medida, hay que señalar que en el caso de numerosas masas de agua subterráneas en la Cuenca del Júcar, sobre todo las costeras, ya en dicha fecha se había producido una fuerte explotación de las mismas, por lo que su estado no puede asimilarse a un estado natural no influenciado. Sin embargo, la ausencia de medidas generalizadas anteriores, obliga a aceptar este mapa como lo más parecido que se puede elaborar hoy como mapa del estado natural de las aguas subterráneas en la Cuenca. El número total de puntos con medidas de nivel considerado en este mapa, se eleva a 2.825, con una distribución muy desigual a lo ancho de la Cuenca Hidrográfica.

La mayor densidad de puntos se produce, como cabía esperar, a lo largo de la franja costera en las sucesivas Planas de las provincias de Castellón, Valencia y Alicante, así con algunas masas interiores con importante explotación en la década de los setenta como es el caso de la masa de agua subterránea de La Mancha Oriental.

Hay que señalar que en una parte importante de la cuenca las isolíneas trazadas lo son de trazo discontinuo al no existir suficiente información para garantizar un trazo más continuo de la línea de nivel.

Este mapa piezométrico se ha completado con la situación de un total de 861 manantiales de los que se dis-



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

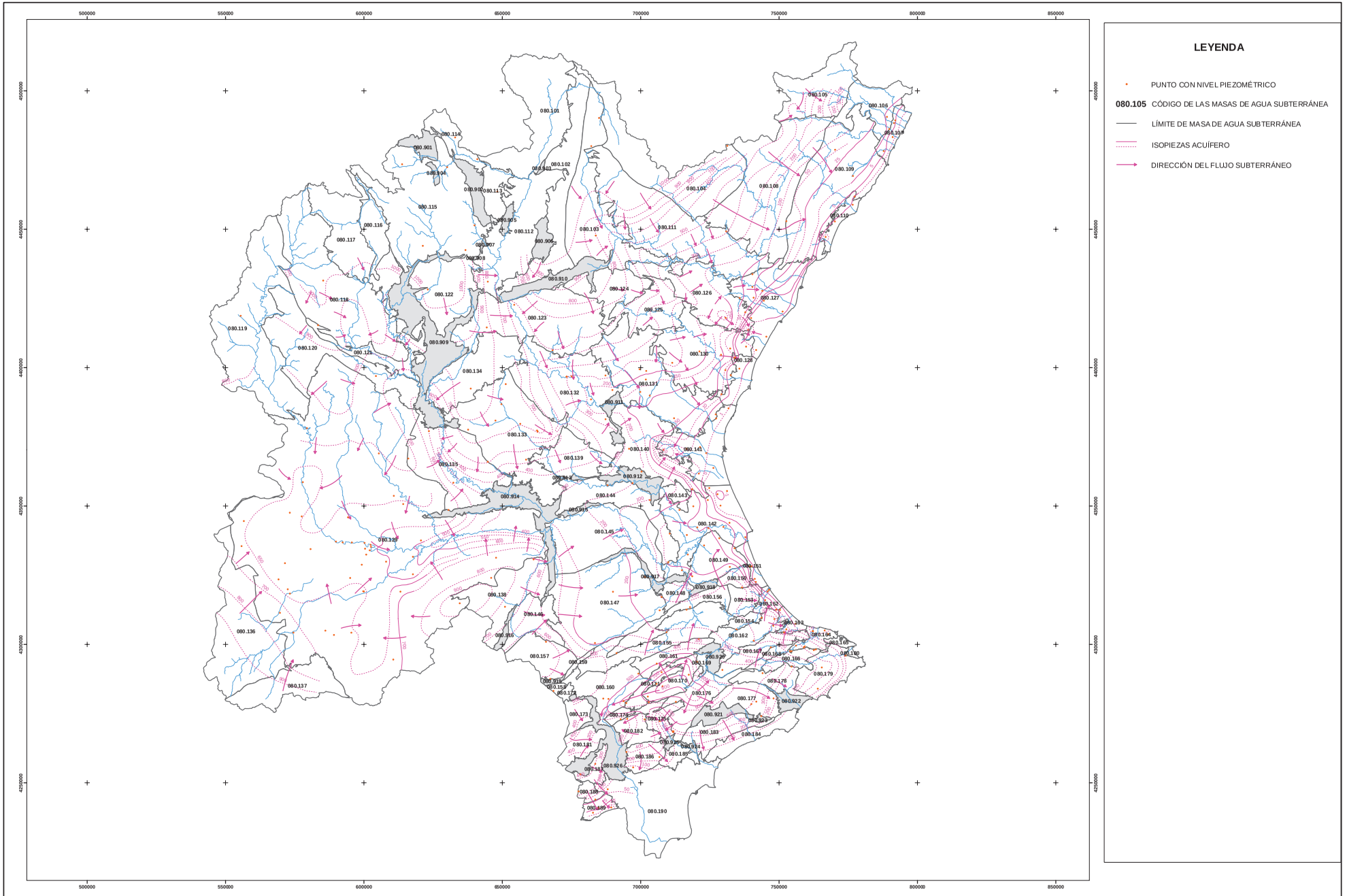
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL JÚCAR
PERIODO: 1970-1974

CÓDIGO MAPA: EG05_081_MAP_70_74

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL JÚCAR
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_081_MAP_08

JULIO 2009

ponen información en el periodo 1970-74. En general, y salvo algunas excepciones, estos manantiales se localizan en las masas de agua subterráneas de mayor cota y de constitución carbonatada confirmando un conjunto de áreas de surgencia que constituyen la descarga natural de dichas masas. En el mapa elaborado se han marcado como la envolvente de las principales agrupaciones, que en bastantes casos están asociadas a los tramos altos de los cauces principales de la cuenca, siendo habitualmente una de las principales aportaciones al caudal del rio.

Existe una amplia zona al norte de la Cuenca Hidrográfica en la que no ha sido posible el trazado de isolíneas, si bien como se expondrá más adelante es posible marcar las direcciones de flujo por la localización de las surgencias naturales.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

El número de puntos registrado con dato de nivel a partir de la información suministrada por la red de control piezométrico de la DGA, que ha sido la fuente utilizada a nivel de todo el territorio de España, se eleva en esta cuenca a 255 puntos, lo que evidentemente ha dificultado la elaboración final del mapa.

No obstante, para este caso se ha contado con la inestimable ayuda de un mapa piezométrico general elaborado por la Confederación Hidrográfica del Júcar en 2005 que ha servido de guía en las áreas con menor densidad de datos.

Sin embargo la mayor cobertura espacial de la red de control piezométrico, respecto del inventario de puntos del período 1970-74, ha permitido que el trazado de isolíneas se extienda a zonas, a las que no alcanzaba el mapa de referencia anterior.

Esquema de flujo y evolución

Como consecuencia de la elevada complejidad tectónica que afecta la geología de la Cuenca del Júcar, las formaciones permeables que constituyen las masas de agua subterránea sufren un alto grado de compartimentación y fragmentación, lo que sin duda se refleja en la complejidad del flujo subterráneo del agua.

Sin embargo, esta complejidad en el detalle queda enmascarada en una visión a nivel de cuenca. En las zonas costeras, como es lógico, los flujos subterráneos se dirigen en general hacia la costa, salvo los casos de depresiones hidrodinámicas, ligadas a fuertes explotaciones en las que el flujo puede tener dirección contraria.

En las zonas internas, los cuatro grandes cauces de la cuenca: Júcar, Cabriel, Turia y Mijares se constituyen en ejes de drenaje principal, teniendo siempre el flujo subterráneo dirección desde los interfluvios hacia los cauces.

Las isopiezas en los cauces se ajustan a las cotas de los mismos de forma que estos actúan a veces de recarga del acuífero y otros de drenaje de los mismo.

La comparación de las isopiezas de ambos mapas pone en evidencia un importante descenso de niveles desde la década de los setenta, especialmente apreciable en las masas subterráneas del interior.

Estos descensos pueden superar en numerosas ocasiones los 100 metros y muy habitualmente los 50 metros.

A este respecto hay que señalar que la comparación entre el mapa elaborado por la Confederación Hidrográfica del Júcar en 2005, y el que aquí se presenta para 2008 no presentan diferencias notables en los niveles piezométrico lo que puede hacer suponer que actualmente se ha llegado a un estado de equilibrio. No obstante esta hipótesis debe ser confirmada con el análisis de la evolución de la red de control piezométrico.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO

Mapa de referencia (Período 1967-1998)

Por ser significativamente mayoritarios los datos procedentes de los inventarios realizados por el IGME en el PIAS, para las isopiezas de referencia se ha seleccionado un periodo de años necesariamente centrado años en los que se desarrollaron en la cuenca del Ebro los planes de investigación de aguas subterráneas, que tuvieron diferente incidencia e intensidad según las características e importancia de los diferentes sistemas acuíferos en relación con las áreas de demanda. Ello ha dado lugar a una clara dispersión de los datos disponibles que tiene como consecuencia un periodo de referencia muy amplio, entre 1967 y 1998, aunque centrado en el intervalo 1978-1985.

El mapa elaborado se puede considerar lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas

en la cuenca hidrográfica del Ebro, ya que representan las campañas generales de medidas más representativas realizadas en el ámbito de cuenca, con independencia de que en zonas concretas existan datos más antiguos.

Las masas de agua subterránea de las zonas del Alto Ebro y Pirineos, donde las formaciones acuíferas presentan un apreciable grado de compartimentación y en muchos casos están colgadas, se han representado los puntos de surgencia de los principales manantiales.

Para el trazado de las isopiezas de referencia se ha utilizado un total de 1393 medidas piezométricas y 510 cotas de descarga de manantiales.

Existen varios casos particulares en los que coinciden diferentes familias de isopiezas correspondientes a acuíferos superpuestos. Son los siguientes:

- MASb Somontano del Moncayo, en la que se da una ligera superposición entre las isopiezas del acuífero aluvial del río Queiles (de ámbito local por su reducida extensión), en color verde, y las del acuífero jurásico, en color magenta.
- MASb Mesozoico de la Galera y Plana de la Galera, en las que se superponen los acuíferos mesozoico (de la primera), en color magenta, y cuaternario de la Plana de la Galera (de la segunda), en color verde.
- MASb Fosa de Mora, en la que se han representado isopiezas de los acuíferos cuaternario (aluvial del Ebro y formaciones de piedemonte, en verde) y mesozoico de borde (magenta).
- MASb Mioceno de Alfamén, Campo de Cariñena y Pliocuaternario de Alfamén. Se han trazado dos familias de isopiezas: una, para el Jurásico del Campo de Cariñena (en magenta), y otra, para el conjunto Pliocuaternario-Mioceno (en violeta) porque en el año elegido como representativo (1980) la explotación por bombeo era aún incipiente y los niveles de los dos acuíferos son prácticamente coincidentes.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Los datos de la red oficial se han completado con los de la red piezométrica complementaria de la CHE se han utilizado datos de 28 puntos: y los obtenidos en el estudio "Establecimiento de las normas de otorgamiento de concesiones de las unidades hidrogeológicas del Bajo Jalón" (CHE, 2008).

Para el trazado de las isopiezas representativas del régimen hidrodinámico actual se ha utilizado un total de 276 medidas piezométricas.

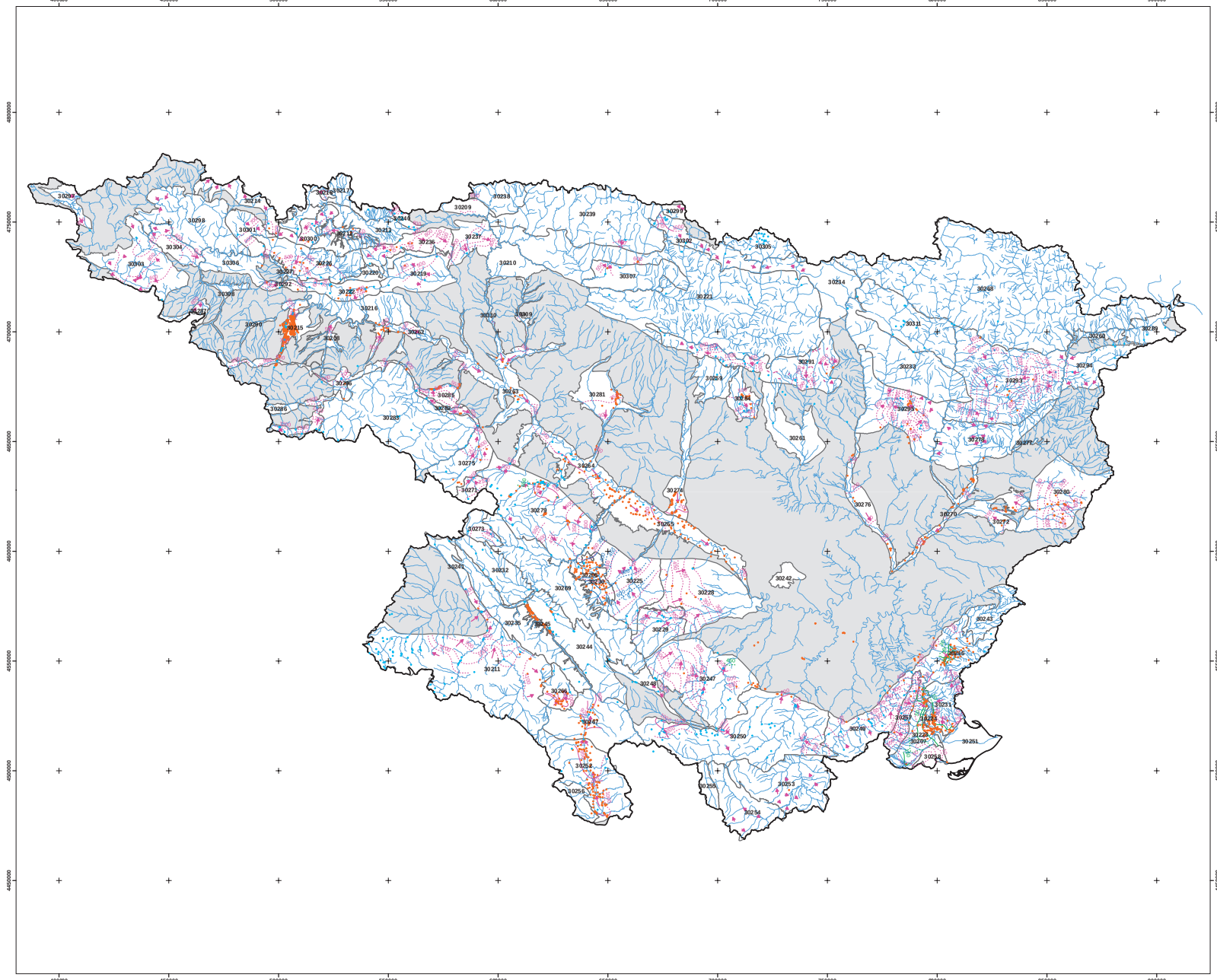
Los casos particulares de superposición de familias de isopiezas se han reducido porque existen MASb a las que no es posible dibujar isolíneas por falta de puntos de apoyo.

Se mantiene la diferenciación entre los acuíferos aluvial del río Queiles, en color verde, y jurásico, en color magenta, en la MASb Somontano del Moncayo. En las tres MASb superpuestas de la margen derecha del río Jalón (Mioceno de Alfamén, Campo de Cariñena y Pliocuaternario de Alfamén) se han trazado tres familias de isopiezas porque el proceso de fuertes extracciones por bombeo que han experimentado los acuíferos Pliocuaternario y Mioceno ha modificado sustancialmente su régimen de funcionamiento hidrodinámico: se ha individualizado, incluso descolgado, la piezometría en cada uno de ellos.

Esquema de flujo y evolución

En la cuenca del Ebro no existen grandes impermeables de borde que aíslen hidrogeológicamente los acuíferos, de modo que varias masas de agua están "a caballo" con las cuencas vecinas: Internas del País Vasco, Duero, Tajo, Júcar e Internas de Cataluña. Los impermeables (representados con un sombreado gris en los mapas) están constituidos por las formaciones semipermeables mesozoicas y, especialmente, terciarias (compuestas por yesos, arcillas y margas) intercaladas entre los diferentes niveles acuíferos. Los materiales impermeables predominan en el tercio central de la cuenca, mientras que los afloramientos de formaciones permeables se sitúan al norte y sur de dicha franja. Las áreas de recarga corresponden a los afloramientos de los acuíferos.

Salvo las masas de agua localizadas en los aluviales del Ebro, con acuíferos de tipo longitudinal en los que el flujo es convergente al río siguiendo una directriz principal NO-SE, coincidente con el sentido de la escorrentía superficial, la gran compartimentación y complejidad estructural de la cuenca determina la existencia de numerosos acuíferos con direcciones de flujo diversas, aunque como norma general se puede decir que los acuíferos acaban descargándose hacia los afluentes principales, de modo que en la margen izquierda del río el sentido preferente del flujo subterráneo es N-S, mientras que en los de la margen derecha es a la inversa, es decir, S-N.



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- **30442** CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- ISOPIEZAS DEL CONJUNTO MIOCENO-PLIOCUATERNARIO DE ALFAMÉN (MA 30230-30206)
- ISOPIEZAS ACUÍFERO ALUVIAL DEL QUEILES (MA 30247). CUATERNARIO DE LA PLANA DE LA GALERA (MA30223) Y CONJUNTO TERCIARIO-CUATERNARIO DE LA FOSA DE MORA (MA30246).
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España · DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

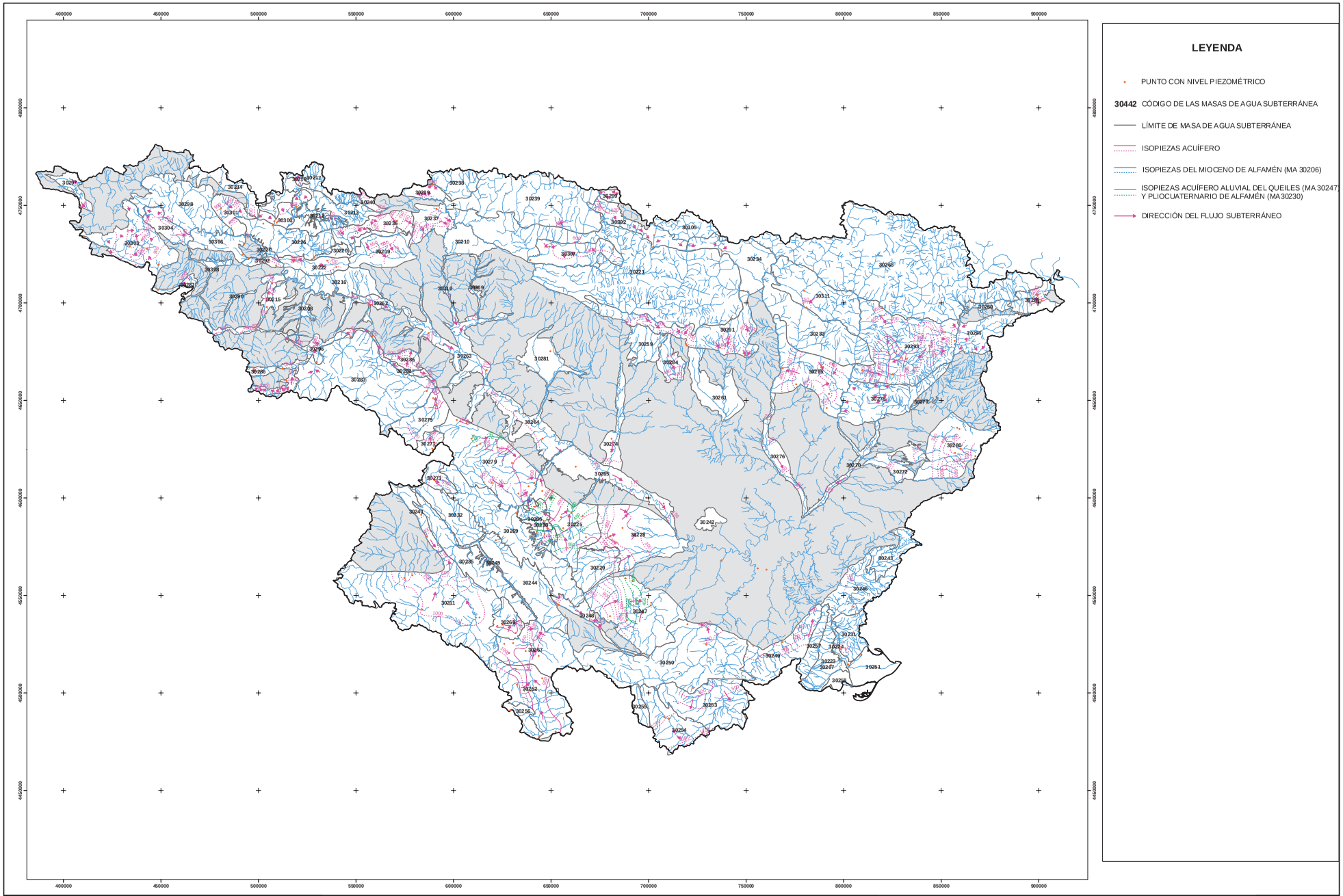
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL EBRO
PERIODO: 1967-1998

CÓDIGO MAPA: EG05_091_MAP_67_98

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España · DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA DEL EBRO
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_091_MAP_08

JULIO 2009

Las cotas piezométricas van desde un máximo en torno a los 1.000 m.snm., en las áreas de cabecera correspondientes al Pirineo y al Sistema Ibérico, hasta valores próximos al nivel del mar en algunas masas de agua costeras o próximas a la costa.

La comparación de los dos mapas de isopiezas permite dividir la cuenca del Ebro en dos sectores según su evolución hidrodinámica en el tiempo. En prácticamente toda la mitad norte, el régimen de funcionamiento es muy similar en los periodos de referencia y actual, como corresponde a un territorio montañoso con acuíferos colgados o difíciles de captar mediante sondeos; en toda esta zona es muy moderado el desarrollo de explotaciones de agua subterránea, que en buena medida se limitan a la captación de manantiales. En la mitad sur, la mayor accesibilidad de los acuíferos y la existencia de zonas de desarrollo de agricultura de regadío ha tenido como consecuencia una mayor utilización de las aguas subterráneas, que ha llegado a ser muy intensa en algunos acuíferos, como es el caso del Campo de Cariñena.

Otras MASb afectadas por las extracciones de agua subterránea, aunque de forma más moderada que las anteriores, son: Plana de la Galera, Mesozoico de la Galera, Campo de Cariñena, Cella-Ojos de Monreal, Gallocanta, Campo de Belchite, Cubeta de Azuara y Fosa de Mora.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA

Mapa de referencia (período 1969-1992)

El periodo resultante para las isopiezas de referencia, 1969-1992, es muy amplio porque también lo es el de identificación, definición y control de los acuíferos, de tal modo que la gran mayoría de los acuíferos más importantes fueron identificados, caracterizados y controlados ya en 1969, mientras que otros de menor importancia no fueron definidos o controlados hasta bien avanzadas las décadas de 1980 y 1990.

El mapa elaborado se puede considerar aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas en la Cuenca Hidrográfica de las Cuencas Internas de Cataluña, ya que prácticamente representan las primeras campañas generales de medidas con independencia de que en zonas concretas existan datos más antiguos.

No obstante, en algunos sectores próximos a la costa los primeros datos representativos de que se ha dispuesto no corresponden a un estado natural o de no afección de los acuíferos. Los casos más significativos son los de las masas Deltaic Fluvià-Muga, Delta Llobregat y borde costero de Baix Francolí, donde ya existían cotas piezométricas inferiores al nivel del mar en los años de referencia seleccionados.

Para el trazado de las isopiezas de referencia se ha utilizado un total de 1 394 medidas piezométricas y 88 cotas de descarga de manantiales.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Para el trazado de las isolíneas actuales se ha utilizado un total de 191 medidas piezométricas correspondientes a los puntos de la red de control oficial de la ACA.

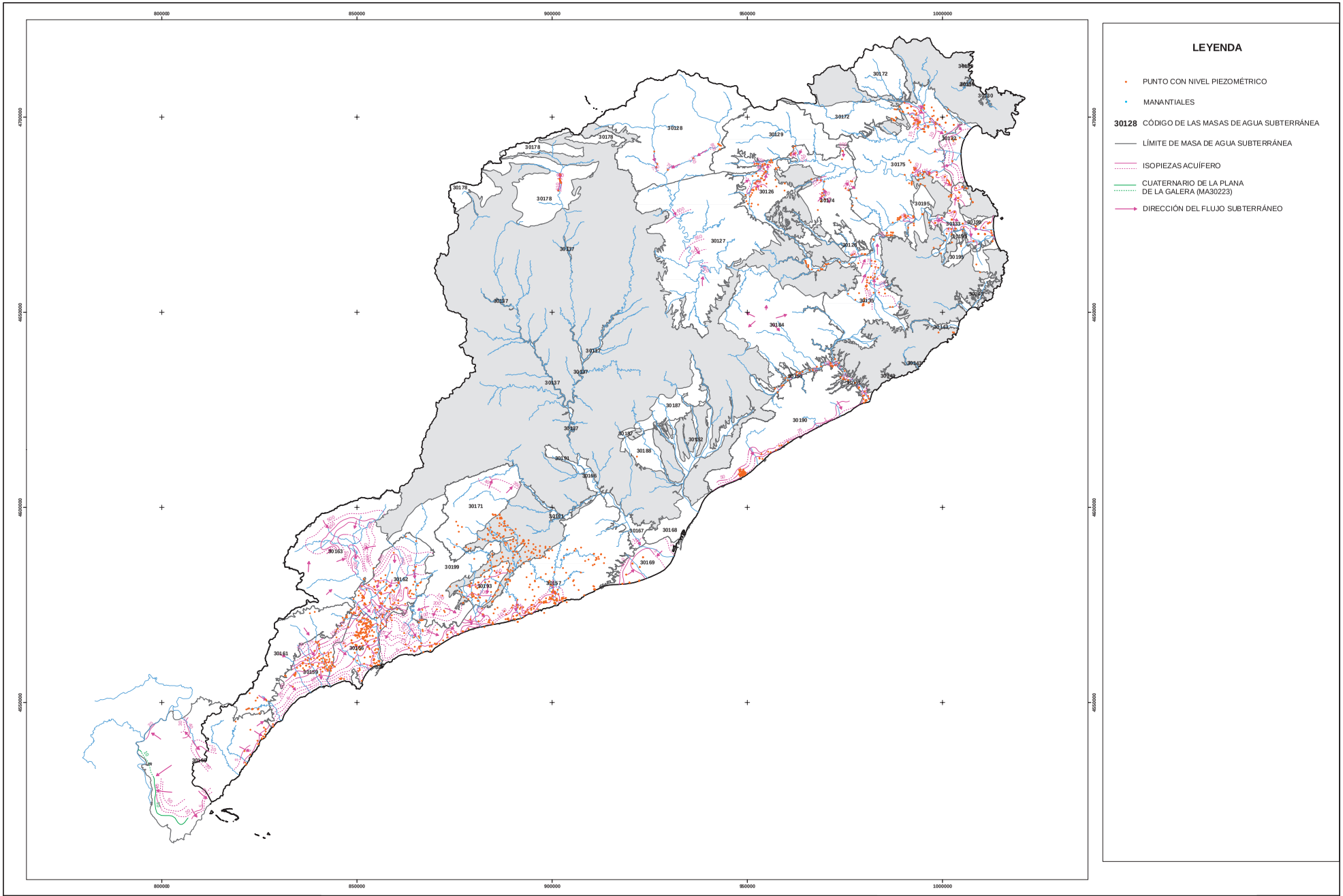
Esquema de flujo y evolución

Desde el punto de vista hidrogeológico, el territorio de las Cuencas Internas de Cataluña está dividido en dos partes por una franja de gran anchura (más de 50 Km) y dirección norte-sur formada por materiales de muy baja permeabilidad (formaciones arcillosas terciarias, pizarras y esquistos del Paleozoico y granitos), salvo en un pasillo costero en el que existen formaciones acuíferas. En esta franja, que coincide *grosso modo* con la cuenca vertiente del río Llobregat, no se han definido masas de agua, salvo las correspondientes a los pequeños acuíferos aluviales de dicho río y sus afluentes.

En las masas de agua subterránea situadas al este de la franja, los flujos subterráneos tienen lugar hacia los ríos o la costa, con directrices principales que van de N-S a O-E.

En esta zona, los impermeables generales (representados con un sombreado gris en los mapas) están formados por materiales paleozoicos y graníticos de las cordilleras costeras y ocupan una buena parte del litoral y del área central. Las áreas de recarga corresponden a los afloramientos de los acuíferos. Las cotas piezométricas controladas van desde un máximo en torno a los 800 m .snm., en las áreas de cabecera correspondientes al Pirineo, hasta el nivel del mar en la masas de agua costeras.

En las masas de agua localizadas en el borde costero al SE de la franja, los flujos subterráneos se producen hacia la costa, con sentido general NO-SE o NE-SO, según la dirección de los cauces superficiales, y se hacen



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- 30128 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- CUATERNARIO DE LA PLANA DE LA GALERA (MA30223)
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

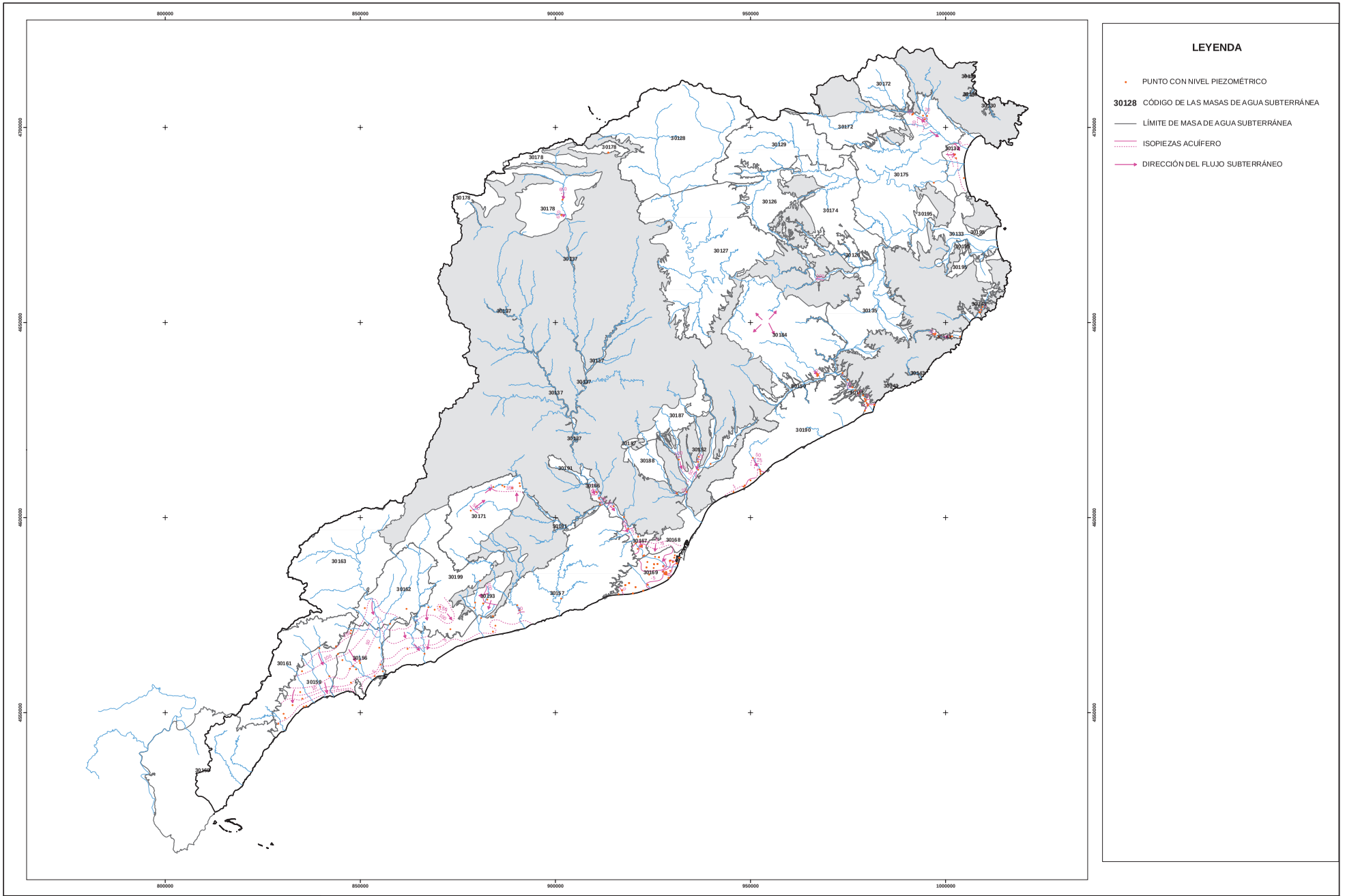
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCAS INTERNAS CATALANAS
PERIODO: 1969-1992

CÓDIGO MAPA: EG05_101_MAP_69_92

JULIO 2009



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- 30128 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCAS INTERNAS CATALANAS
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_101_MAP_08

JULIO 2009

localmente convergentes en el entorno de los mismos. Las cotas piezométricas toman valores moderados debido a la proximidad a la costa: los máximos observados alcanzan los 50 m.snm. y los mínimos llegan a situarse a cotas inferiores al nivel de mar, especialmente en la masa Baix Llobregat.

Al oeste de la franja impermeable central, la circulación del agua subterránea se produce desde el interior hacia la costa, con sentido de flujo variable por adaptación a los ejes de drenaje superficial, desde NO-SE a NE-SO. La masa 30160 supone una excepción a la regla general porque los flujos subterráneos en ella tienen una configuración centrífuga desde las zonas de relieve elevado central. En estas masas de agua, los impermeables (representados con un sombreado gris en los mapas) están constituidos por las formaciones semipermeables mesozoicas y terciarias (compuestas por yesos, arcillas y margas) intercaladas entre los diferentes niveles acuíferos. La recarga se produce en los afloramientos de las formaciones acuíferas, que presentan un fuerte grado de compartimentación por la complejidad estructural de la zona. Las cotas piezométricas descienden desde altitudes de 500 m.snm. en las zonas de cabecera de la masa Prades-Alt Francolí, hasta el nivel del mar en la costa.

La comparación de los dos mapas de isopiezas, reducido a un número escaso de masas de agua subterránea por la ausencia o por la existencia de puntos de control en número insuficiente para el trazado de isopiezas, muestra un régimen de funcionamiento hidrodinámico similar en los dos periodos de trabajo, no hay ninguna MASb en la que se observe una evolución negativa en su estado cuantitativo:

— En la masa Delta Llobregat se mantiene el estado de sobrebombeo que determina una posición de la superficie libre del acuífero a cotas inferiores a -5 m. snm.
— En las Baix Francolí y Baix Camp la situación piezométrica es similar en los dos periodos representados. El estado hidrodinámico de referencia (1969-1971) es anterior al periodo de fuertes extracciones de agua subterránea en las décadas de 1970 y 1980 motivadas por el desarrollo industrial, urbano y turístico del Camp de Tarragona, al que puso fin el denominado Minitrasvase del Ebro que dotó de agua a las principales poblaciones de la zona, y el estado hidrodinámico actual (2008) indica que las afecciones indicadas ya han sido asimiladas por el acuífero, que ha recuperado un régimen de funcionamiento similar al de referencia.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE LAS ISLAS BALEARES

Mapa de referencia (periodo 1972-1975)

El periodo resultante para las isopiezas de referencia, 1972-1975, es muy reducido porque coincide con el desarrollo de los trabajos del Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de Baleares en el que se efectuó una caracterización hidrogeológica general de las islas, aunque la definición de acuíferos y la agrupación en unidades hidrogeológicas fue posterior.

Después del proceso de selección y filtrado, para el trazado de las isopiezas de referencia se ha utilizado un total de 4.162 medidas piezométricas que tras un primer filtrado se redujo a 3.548 y 24 cotas de descarga de manantiales. El sorprendentemente elevado número de medidas disponibles se debe a la extraordinaria proliferación de captaciones de pequeña profundidad en las zonas de llanura muy concretas, de manera que no supone una cobertura homogénea del territorio ni un especial apoyo para el trazado de las isopiezas de referencia (en ocasiones supone más bien un inconveniente la excesiva densidad de puntos).

El mapa elaborado se puede considerar, en general, lo más aproximado a un estado natural de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica de las Baleares, ya que los datos de partida corresponden a las primeras campañas generales de medidas, realizadas en el ámbito de la islas, con independencia de que en zonas concretas existan datos más antiguos.

Sin embargo, los primeros datos representativos de que se ha dispuesto no corresponden a un estado natural o de no afección de los acuíferos en varias MASb localizadas en las zonas costeras, debido a que la insularidad determina un papel primordial de las aguas subterráneas en la satisfacción de demandas, tanto de abastecimiento a la población como para agricultura e industria:

— En Mallorca, el caso más significativo es el de la Plá de Campos, en la que se aprecian cotas piezométricas negativas a considerable distancia de la costa). También aparecen áreas localizadas de depresión piezométrica en las Son Real, Portocristo, Son Maciá, Santanyí.

LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- 30034 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPIEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO
Instituto Geológico y Minero de España
DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

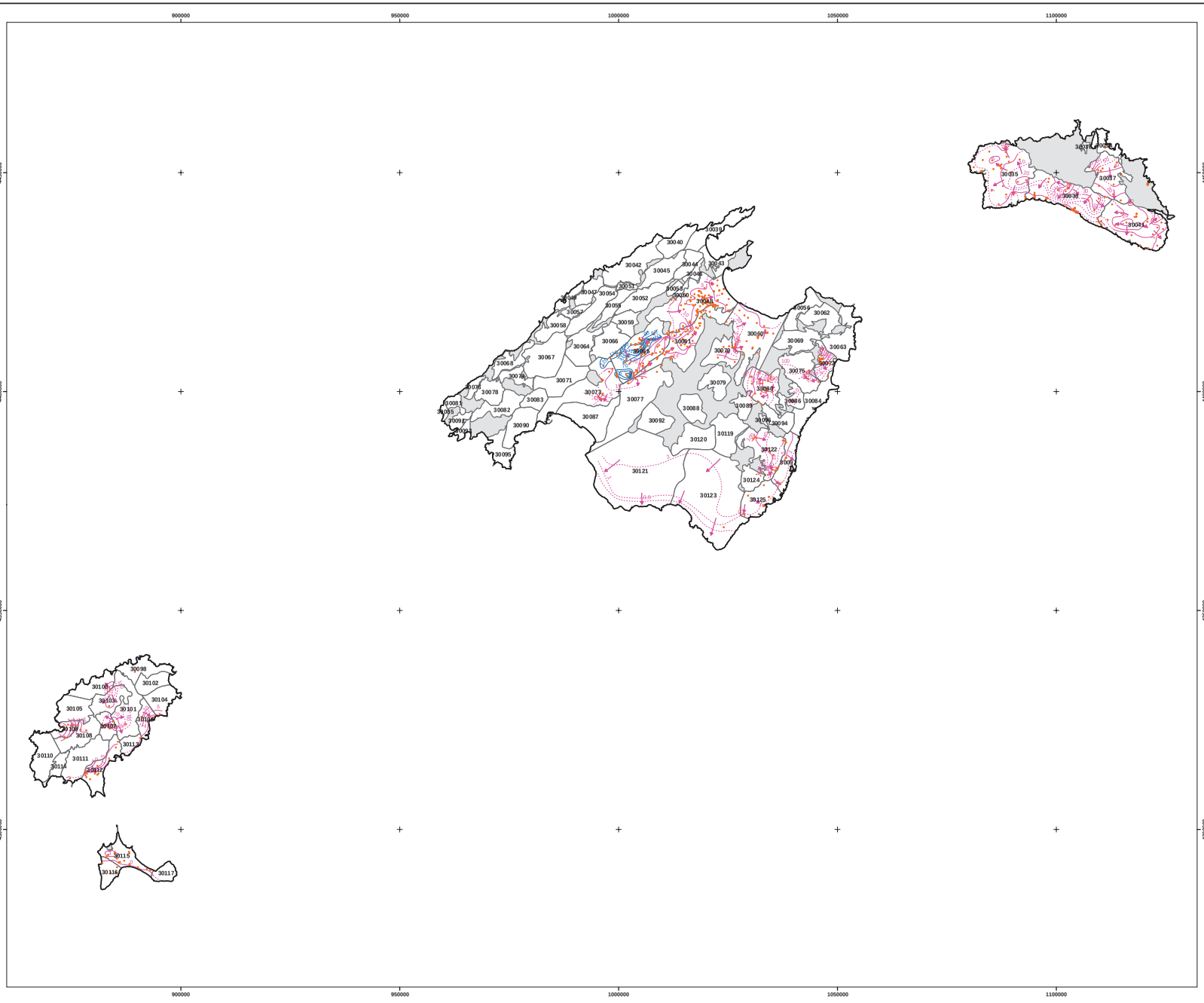
ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA BALEARES
PERIODO: 1969-1992

CÓDIGO MAPA: EG05_111_MAP_69_92

JULIO 2009



GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Instituto Geológico y Minero de España · DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS DE APOYO A LA SOSTENIBILIDAD Y PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA

CUENCA BALEARES
PERIODO: MAYO 2008

CÓDIGO MAPA: EG05_111_MAP_08

JULIO 2009

— En Menorca se aprecia influencia de bombeos en Es Migjorn Gran.
— En Ibiza, se observan sectores deprimidos en la Plá de San Antoni y Jesús.

Mapa del estado actual (Mayo 2008)

Para las isopiezas representativas del régimen hidrodinámico actual se han tomado los datos de las campañas de abril (general) y mayo (parcial) en la red oficial de control de la DGOH del Govern Balear.

Se ha utilizado un total de 468 medidas piezométricas, con la siguiente distribución por islas: 311 en Mallorca, 105 en Menoría, 33 en Ibiza y 19 en Formentera.

Esquema de flujo y evolución

Como consecuencia de una estructura geológica de gran complejidad tectónica, en las Islas Baleares las formaciones permeables presentan un alto grado de fragmentación que da lugar a la existencia de un gran número de estructuras acuíferas, generalmente asimiladas a masas de agua, independientes entre sí.

Los impermeables hidrogeológicos (representados con un sombreado gris en los mapas) están constituidos por las formaciones semipermeables mesozoicas y terciarias (compuestas por yesos, arcillas y margas) intercaladas entre las diferentes estructuras acuíferas. Las áreas de mayor presencia de materiales de baja permeabilidad son la mitad NE de Menorca y el cuadrante SE de Mallorca. Las áreas de recarga se sitúan en los afloramientos de los acuíferos.

Como corresponde a islas, el flujo subterráneo se produce en general de forma divergente desde las áreas de mayor altitud hacia la costa, aunque las direcciones principales son diversas porque el régimen de circulación y descarga del agua subterránea en los diferentes acuíferos depende de la fracturación y karstificación de las formaciones acuíferas y de la posición relativa de los impermeables de base:

— En Menorca, los mayores relieves están localizados en el sector NE de la isla, de manera que los flujos subterráneos se producen en abanico con directrices principales que pasan de O-E a N-S y E-O.
— En Mallorca, los flujos presentan una configuración divergente hacia el mar y la depresión central, desde los sectores más elevados correspondientes a las sierras de Tramontana y Levante.
— En Ibiza, los flujos tienen lugar hacia el norte y el sur de un eje virtual SO-NE, de manera que predominan las directrices subterráneas SE-NO y NO-SE.

Las cotas piezométricas van desde un máximo en torno a los 100 m.snm, en las áreas de cabecera de las sierras, hasta el nivel del mar en las masas de agua costeras, con algunos sectores de cota piezométrica negativa asociados a las áreas de mayor extracción por bombeo en los acuíferos detríticos costeros.

La comparación de los dos mapas de isopiezas, reducido a un número escaso de masas de agua subterránea por la ausencia o por la existencia de puntos de control en número insuficiente para el trazado de isopiezas, muestra un régimen de funcionamiento hidrodinámico similar en los dos periodos de trabajo, con algunas MASb en las que se aprecia una evolución negativa en su estado cuantitativo:

— En Mallorca, se observa una mejora de la situación piezométrica en las Son Real y Pla de Campos, y un ligero empeoramiento en San Llorenç, en la que se ha formado una pequeña área deprimida a cotas negativas, y Sant Salvador, con descensos generalizados en torno a 10 m.
— En Menorca se aprecian descensos de hasta 30 m en lCiutadella y Es Migjorn Gran.
— En Ibiza se observan descensos piezométricos en Sant Agustí, en torno a 20 m, Pla de San Antoni, con formación de un área costera deprimida bajo el nivel del mar, y Jesús.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DGA-IGME (2009). Elaboración del mapa piezométrico de España Encomienda de gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME (MCIN) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

INDICADORES DE INTRUSIÓN MARINA Y CÁLCULO DE DESCARGAS AMBIENTALES AL MAR EN MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COSTERAS

Juan de Dios Gómez Gómez

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 7 *Establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de los volúmenes ambientales al mar* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas

Director de la actividad:

Juan de Dios Gómez Gómez. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España (por orden alfabético):

Bruno J. Ballesteros Navarro
Jose Ángel Díaz Muñoz
Jose Luis García Aróstegui
Dolores Haro Ruiz
Juan Antonio López Geta
Mónica Meléndez Asensio
David Pulido Velázquez

Dirección General del Agua
Manuel Varela Sánchez
Isaac Sánchez Navarro

Universitat Jaume I
Ignacio Morell Evangelista
Arianna Renau Pruñonosa
Jorge Mateu Mahiques

Empresa colaboradora
EPTISA

INDICADORES DE INTRUSIÓN MARINA Y CÁLCULO DE DESCARGAS AMBIENTALES AL MAR EN MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA COSTERAS

INTRODUCCIÓN

El planteamiento de esta actividad surge a raíz del requerimiento de la planificación hidrológca para determinar las restricciones ambientales de las masas de agua subterránea costeras, el cual a su vez es consecuencia de la incorporación de la Directiva Marco del Agua a la normativa nacional.

Teniendo en cuenta esos requerimientos iniciales se fijaron para el desarrollo de la actividad tres objetivos esenciales:

- Realización de un estudio piloto para determinar las descargas ambientales al mar en tres masas de agua seleccionadas, de las que se tuviera suficiente información hidrogeológica, aplicando modelos matemáticos de flujo. Las tres masas seleccionadas fueron las Planas de Castellón, Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola en la Demarcación del Júcar.
- Cálculo de las descargas ambientales al mar en el resto de masas costeras intercomunitarias aplicando diferentes metodologías más sencillas en función de la información hidrogeológica disponible.
- Desarrollo de un indicador del estado de las masas de agua subterránea (MASb) costeras respecto de la intrusión marina, y su aplicación a las tres masas seleccionadas.

La consecución de cada uno de estos objetivos viene recogida en otros tantos informes y su metodología y resultados se resumen a continuación, agrupando el cálculo de las descargas al mar en un capítulo único.

DESARROLLO DE UN INDICADOR DE INTRUSIÓN MARINA

Generalmente, los índices ambientales de estado de las masas de agua subterránea están enfocados a describir con algoritmos sencillos su situación actual, ya sea en aspectos parciales o de situación general.

Quizás sea un buen ejemplo el índice de explotación, que se calcula mediante el cociente entre el volumen de extracciones de agua subterránea y el volumen de recursos subterráneos disponibles. Este índice se expresa con una cifra mayor o menor de la unidad que indica respectivamente, sobreexplotación en sentido general o situación de superávit de recursos.

En la Instrucción de Planificación Hidrológica (orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre), en su punto 5.2.3.1. se hace referencia a este índice: "Se considerará que una masa o grupo de masas se encuentra en mal estado cuando el índice de explotación sea mayor de 0,8 y además exista una tendencia clara de disminución de los niveles piezométricos en una zona relevante de la masa de agua subterránea".

En los acuíferos costeros, el índice de explotación presenta una notable correlación con el grado de salinización por intrusión marina, de manera que, en primera aproximación, el índice de explotación podría utilizarse para informar cualitativamente sobre dicho grado de salinización o, más precisamente, para informar sobre el riesgo de intrusión.

En la mayor parte de los casos, el proceso de intrusión marina evoluciona con relativa lentitud de forma que el grado de afección no es una situación coyuntural sino que depende, entre otros factores, de la historia más o menos reciente del acuífero, en particular de la relación recarga-explotación. Sin embargo, esta relación puede presentar desfases temporales significativos y, además, no manifestarse de manera espacialmente homogénea.

Con algunas excepciones y a efectos prácticos, se puede asumir que la intrusión marina progresa desde la costa hacia el interior y que el resultado es una cierta zonación hidroquímica, con aguas menos salinas cuanto más lejos de la costa se considere. El estudio de las variaciones de esa zonación puede proporcionar información de interés sobre el proceso evolutivo de la intrusión.

Con estas premisas, un índice de intrusión no sólo debe proporcionar información sobre la situación actual de la intrusión marina sino que además debe ilustrar sobre el grado de afección, su distribución espacial, su evolución temporal y, en cierto modo, sobre la vulnerabilidad intrínseca del acuífero frente a dicho proceso.

Indicador propuesto: Índice SITE

Para el desarrollo del índice propuesto se partió del inicialmente diseñado por B.J. Ballesteros (2008), quien en un documento interno denominado "Tipología y caracterización de la intrusión marina en acuíferos litorales. Método SITE", estableció las bases esenciales del mismo. En los trabajos contemplados en este proyecto se han redefinido o terminado de perfilar los procedimientos de estimación de algunos de los parámetros que lo conforman, como resultado de la aplicación de diversas formas de cálculo.

El acrónimo SITE responde a los siguientes parámetros o criterios relacionados con el proceso intrusivo:

S = Superficie afectada
I = Intensidad
T = Temporalidad o estacionalidad
E = Evolución a medio-largo plazo

Para la confección del índice se ha procurado utilizar información de fácil manejo y habitualmente disponible. No se trata de caracterizar con detalle el proceso sino de ofrecer información básica que permita, por un lado, evaluar la situación general de un acuífero y, por otro, discriminar entre acuíferos distintos.

El índice que se propone está basado en los datos proporcionados por las redes de control de intrusión que desde hace más de treinta años se han mantenido en los acuíferos costeros españoles. Concretamente, se utilizan los datos de concentración de cloruros.

Se requiere disponer de una serie histórica suficientemente larga que permita evaluar el comportamiento del acuífero. Las redes de control implantadas por el Instituto Geológico y Minero de España a principios de los años setenta y regularmente mantenidas hasta el año 2001, fueron interrumpidas hasta el 2005 en que se reanudaron, a cargo de las Confederaciones Hidrográficas, aunque con un número de puntos de observación muy reducido. Esta laguna de información en el periodo 2001-2005 y la escasa información obtenida en los últimos cuatro años (2005-2008) plantea algunas dificultades para evaluar la situación actual de los acuíferos. Sin embargo, se considera que el adecuado manejo de la base de datos existente proporciona información valiosa que permite caracterizar el proceso.

El tratamiento que se hace de estos datos es básicamente bidimensional. Quiere esto decir que se ha obviado el parámetro profundidad (cota de fondo) que se refiere al grado de penetración de los pozos de observación ya que en la mayoría de los casos no se tiene información suficiente sobre sus características constructivas.

Asimismo, es conveniente disponer de dos medidas anuales por punto que correspondan a situaciones respectivas de aguas altas y bajas (invierno-verano o primavera-otoño).

Por otra parte, es necesario depurar los datos existentes. La depuración debe hacerse con criterios objetivos de acuerdo a los siguientes principios:

- Se parte de la matriz completa que recoja todos los datos de la red de cloruros de la serie histórica disponible
- Se eliminan los datos que puedan ser claramente anómalos. Para ello es útil representar gráficamente la evolución de cloruros en cada punto de observación. Estos datos suelen corresponder a errores de trascripción y se detectan con facilidad.
- Se eliminan los datos de puntos de observación que tengan numerosas lagunas
- Se eliminan las fechas en las que existan numerosas lagunas

Este proceso debe ser realizado para el conjunto de los datos y, separadamente, para los últimos cuatro años disponibles porque en estos últimos se basa la determinación de los parámetros S, I y E.

Criterio superficie (S)

Este criterio tiene por objeto ofrecer una visión bidimensional de la afección de la intrusión marina. Se trata de definir la superficie del acuífero afectada por el fenómeno intrusivo. Se acepta que la información proporcionada por la superficie afectada es suficientemente representativa del grado de intrusión y que la consideración de la profundidad no necesariamente aporta información manejable y fiable, ya que no siempre se conocen las características constructivas de los piezómetros o pozos de observación.

Desde un punto de vista espacial el desarrollo alcanzado por los procesos de salinización da lugar a diferentes tipos o grados de intrusión, que pueden quedar definidos en los siguientes.

Intrusión puntual: cuando se detectan salinidades elevadas en algunos sondeos de forma aislada. Normalmente tiene que ver con una inadecuada construcción de las perforaciones (elevada profundidad), extracciones puntuales excepcionalmente altas o estar localizadas muy próximas a la línea costera. La superficie afectada (S) no debe superar el 10 % de la extensión total del acuífero

Intrusión local: se da cuando el área afectada se restringe a las inmediaciones de un conjunto de pozos con una explotación intensiva, en la que descensos del nivel piezométrico permiten el ascenso de domos salinos (up-coning). La superficie afectada (S) ocuparía entre un 10 y un 30% de la extensión total del acuífero. Como se comentará más adelante, en el caso de acuíferos de cierta extensión este porcentaje estaría referido solamente a la zona litoral del acuífero.

Intrusión zonal: corresponde a aquélla en la que un sector completo de acuífero se ve afectado, bien por la confluencia de varios domos salinos o por el avance general de la interfase agua dulce-agua marina. El conjunto de estas zonas no debe superar un determinado porcentaje de la superficie total del acuífero (30>S<70%).

Intrusión general: es aquélla en la que la una gran parte del acuífero (S>70%) se encuentra afectada por intrusión y en la que se produce un avance de la interfase, tierra adentro, a lo largo de la totalidad del frente costero del acuífero.

Valores de referencia

Se trata de caracterizar la superficie del acuífero que puede considerarse que está afectada por la intrusión marina, independientemente de su intensidad. El valor de referencia debería ser el fondo geoquímico de cloruros en ese acuífero. La caracterización del fondo geoquímico no es trivial y puede requerir un esfuerzo investigador considerable. En primera aproximación podría considerarse como fondo geoquímico de cloruros la concentración más baja de cloruros encontrada en un cierto acuífero, que podría corresponder en muchos casos con la concentración del agua de alimentación subterránea desde acuíferos de borde, pero pueden existir otros mecanismos que alteren este fondo, tanto naturales, como pueden ser infiltraciones de aguas superficiales, procesos de evaporación en acuíferos someros o de disolución de sales, como inducidos (recirculación de agua de riego, por ejemplo). En cualquier caso, el fondo geoquímico puede variar en un cierto rango en acuíferos de cierta complejidad. Para simplificar el método se propone utilizar como valor de referencia 150 mg/L de cloruros. Se acepta que este valor no se alcanza en ningún sector de los acuíferos estudiados en este informe si no es a causa del proceso de intrusión marina, y se acepta también que este mismo hecho se puede esperar en otros muchos acuíferos costeros.

En otras situaciones, como puede ocurrir por ejemplo en acuíferos de la Cuenca del Segura, pueden encontrarse concentraciones muy superiores a 150 mg/L sin que se relacionen con procesos actuales de intrusión marina. En estos casos, la utilización de este valor de referencia puede seguir siendo eficaz para caracterizar procesos de salinización pero no de intrusión marina. Probablemente, sea más indicado en estas situaciones utilizar como valor de referencia los valores umbral que han sido determinados por la Dirección General del Agua siguiendo los criterios del Documento Guía de la Comisión Europea 18 "Guidance on Groundwater Chemical Status and Trend Assessment". Estos valores umbral han sido también aplicados a los tres acuíferos analizados en este estudio.

Corrección de superficie

En el parámetro interviene también el tamaño y la geometría del acuífero. Para los acuíferos con una gran extensión, o con una morfología alargada perpendicular a la costa, será necesario realizar una conversión de manera que sólo se considere la zona más litoral, y no la totalidad del acuífero, equivalente a la localizada a menos de una cierta distancia de la línea de costa. En principio dicha distancia se establece en 10 km ya que, al menos en la cuenca del Júcar, raramente la denominada "cuña salina" progresa tierra adentro a esa distancia. No obstante, esta distancia se podría modificar si fuera necesario en función de las características de cada masa de agua.

Datos necesarios

Los datos de partida serán las concentraciones de cloruros en los puntos de la red de intrusión, o de una red de observación establecida al efecto. El número de puntos dependerá de la extensión del acuífero pero, en todo caso, deberá ser suficiente para poder elaborar un mapa de isocloruros con adecuado grado de información.

Se propone que el periodo considerado para reflejar la "situación actual" corresponda a los últimos cuatro años y que los valores utilizados para los cálculos sean la media de los valores de esos cuatro años, con al menos dos datos anuales por punto correspondientes a aguas altas y bajas respectivamente.

Aunque se considera conveniente tener en cuenta la información de cuatro años, independientemente de la inercia del acuífero estudiado, cuando los datos disponibles sean antiguos podrían reemplazarse por el estudio de la última campaña, si esta es reciente. En este caso, debe tenerse en consideración la variabilidad del proceso.

A efectos prácticos, las redes de intrusión estuvieron vigentes desde 1977 hasta 2001 con dos medidas anuales, normalmente en mayo y octubre, aunque con algunas desviaciones. Desde 2001 hasta 2005 las redes no estuvieron operativas. A partir de 2005 se volvieron a activar pero con un número de puntos de observación muy reducido, lo que permite conocer la evolución del proceso pero no confeccionar mapas de isocloruros. Ya en 2008 se amplió esta red en la Demarcación del Júcar a un mayor número de puntos, que permiten un mejor seguimiento del proceso. Este es el caso de los tres acuíferos seleccionados para aplicar el índice propuesto y, por ello, el periodo seleccionado ha sido 1998-2001.

Al margen de las redes específicas de intrusión se dispone actualmente de la Red de Seguimiento del Estado Químico como otra fuente de datos de cloruros, aunque con menor densidad de puntos.

Procedimiento de cálculo

El procedimiento propuesto para calcular el parámetro S (superficie afectada) es el siguiente:

— Elaboración del mapa de la línea de isocloruros de 150 mg/L para la situación actual. Se puede elaborar al mismo tiempo el mapa con las siguientes isolíneas: 150, 500, 1000, 2000 y 4000 mg/L, ya que servirá para el cálculo del próximo parámetro
— Medir la superficie ocupada por contenidos de ion cloruro superiores a 150 mg/L (S>150)
— Calcular S, según $S_u = \frac{S_{>150}}{S_{total}}$

Alternativamente, se puede utilizar otro parámetro, S_u, que tiene el mismo significado que S si en vez de utilizar para su cálculo la superficie del acuífero en la que la concentración de cloruros es mayor de 150 mg/L, se utiliza la superficie de mayor concentración que el valor umbral determinado por la Dirección General del Agua siguiendo los criterios de la Comisión Europea (CE, 2009). En este caso, el parámetro indicador de este criterio sería:

$$S_u = \frac{S_{<Cl_u}}{S_{total}}$$

Siendo Cl_u el valor umbral definido para cada masa de agua.

Asignación de códigos

A cada rango de valores de S se asigna un valor numérico comprendido entre 0 y 4, y un código de identificación (W, L, M. H, E) que se corresponde con las iniciales de Without, Low, Medium, High y Extreme, respectivamente (tabla 1).

Valor de S	Valor de Su	Caracterización	Valor	Código
0,00-0,05	0,00-0,01	Sin intrusión	0	W
0,05-0,10	0,01-0,05	Puntual	1	L
0,10-0,30	0,05-0,10	Local	2	M
0,30-0,70	0,10-0,30	Zonal	3	H
0,70-1,00	0,30-1,00	General	4	E

Tabla 1. Caracterización, valores y códigos de los parámetros S y Su

Criterio intensidad (I)

El parámetro "intensidad" se refiere a la evaluación de la salinidad media del acuífero referida a la "situación actual" o a los datos más recientes disponibles. Debe entenderse que se trata de una aproximación que no tiene en cuenta de manera explícita variaciones espaciales ni tendencias aunque, en cualquier caso, su valor depende de dichas variaciones y tendencias.

Este criterio permitiría diferenciar cuatro tipos de acuíferos de intensidad de intrusión baja, media, alta y extrema.

La obtención de este parámetro se basa en el mapa de isocloruros que ya se ha obtenido para el parámetro S.

Procedimiento de cálculo

Se parte del mapa de isocloruros de los últimos cuatro años disponibles, con isolíneas de 150, 500, 1000, 2000 y 4000 mg/L.
El índice se obtiene de la siguiente manera: Se calculan las superficies comprendidas entre las isolíneas (Si) y a cada superficie se le asigna el valor medio de los cloruros de las isolíneas que la limitan (Cli). A la superficie de menos de 150 mg/L se le asigna, por convención, un valor medio de 75 mg/L. A las superficies de concentraciones máximas se les debe asignar, cuando sea el caso, las siguientes medias (tabla 2).

Superficie	Valor asignado
> 500 mg/L	750 mg/L
> 1000 mg/L	1500 mg/L
> 2000 mg/L	3000 mg/L
> 4000 mg/L	5000 mg/L
> 6000 mg/L	7000 mg/L

Tabla 2. Valor medio de la concentración de cloruros (mg/L) asignado al intervalo mayor de los mapas de isocontenidos.

El índice será: $I = \frac{\sum S_1 \cdot Cl_1}{S_{total}}$

Asignación de códigos

Para cada rango de valores de I se asigna un valor numérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 3).

Valor de I	Caracterización	Valor	Código
0-150	Nula	0	W
150-500	Baja	1	L
500-1000	Media	2	M
1000-2000	Alta	3	H
> 2000	Extrema	4	E

Tabla 3. Caracterización, valores y códigos del parámetro I

Criterio temporalidad (T)

La evolución temporal del proceso de intrusión marina es, en primera aproximación, dependiente de las variaciones en la relación recarga-explotación. Durante los periodos secos debe esperarse el avance tierra adentro del "frente salino" no sólo como consecuencia de una disminución de la recarga, que puede llegar incluso a anularse si no se producen eventos de lluvias que superen cierto umbral, sino también del incremento de las extracciones en zonas agrícolas para compensar el déficit hídrico de los cultivos. Por el contrario, en épocas húmedas la recarga se incrementa y las extracciones se reducen, por lo que se puede esperar cierto retroceso de la interfase, entendida esta en sentido amplio.

Con esta aproximación, debe existir una razonable relación entre la sucesión de periodos secos y húmedos y la secuencialidad del proceso intrusivo; sin embargo, pueden existir otros factores que afecten de manera determinante a esa relación, como puede ser el progresivo descenso de la demanda agrícola a causa de la disminución de las superficies cultivadas o de cambios sustanciales en los sistemas de riego.

Debe tenerse en cuenta, además, que la dinámica de la intrusión no sólo depende de factores externos sino que viene impuesta por los parámetros hidráulicos del acuífero que le confieren mayor o menor inercia, o lo que es lo mismo, mayor o menor tiempo de respuesta a los cambios externos.

Procedimiento de cálculo

Se requiere la serie temporal de la concentración anual media de cloruros en el acuífero, que se obtiene a partir de la matriz de datos de calidad depurada.

Para obtener este parámetro se calcula el error cuadrático medio de la serie temporal, que se define como:

$$T = \frac{1}{n}\sum_{x=1}^{n}\left|f(x) - f\right|$$

que corresponde a la media de los valores absolutos de las diferencias entre los valores de la serie temporal de cloruros y la media de dichos valores.

El significado de este índice es cuantificar las desviaciones respecto de la media, de manera que cuanto mayor sea el índice más alta es la variabilidad. No expresa tendencias sino sensibilidad.

Asignación de códigos

Para cada rango de valores de T se asigna un valor nu-

mérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 4).

Valor de T	Caracterización	Valor	Código
0-25	Sin variación	0	W
25-50	Poco variable	1	L
50-75	Variable	2	M
75-100	Moderadamente variable	3	H
> 100	Muy variable	4	E

Tabla 4. Caracterización, valores y códigos del parámetro T.

Criterio evolución (E)

Este parámetro tiene por objeto describir de manera simple la tendencia actual del proceso de intrusión.

Según este criterio se distinguen tres tipos.

—Intrusión estable: Corresponde a aquellos acuíferos en los que no se observa tendencia clara a medio-largo plazo
—Intrusión decreciente o en retroceso: Se puede definir en aquellos acuíferos donde se observa una recuperación continua de calidad de sus aguas, normalmente ligada al descenso de las explotaciones. Esta evolución puede ser moderada o fuerte.
—Intrusión en progreso: Se observa una tendencia a medio-largo plazo al incremento de la salinidad de las aguas del acuífero, independientemente de la existencia de estacionalidad o secuencialidad. Al igual que en el caso anterior, esta evolución puede ser moderada o fuerte.

Se requiere la serie temporal de la concentración anual media de cloruros en el acuífero, que se obtiene a partir de la matriz de datos de calidad depurada.

Procedimiento de cálculo

El parámetro E se calcula mediante la fórmula:

$$E = \frac{Cl_n}{Cl_{n-1}}$$

Siendo Cl_n la media de la concentración de cloruros de la situación actual o de los últimos cuatro años disponibles y Cl_{n-1} la media de la concentración de cloruros de los cuatro años inmediatamente anteriores.

Asignación de códigos

Para cada rango de valores de E se asigna un valor numérico y un código de identificación, según el baremo siguiente (tabla 5).

Valor de E	Caracterización	Valor	Código
> 1,05	Fuerte incremento	2	2
1,01-1,05	Incremento moderado	1	1
0,99-1,01	Estable	0	0
0,99-0,95	Descenso moderado	-1	-1
< 0,95	Fuerte descenso	-2	-2

Tabla 5. Caracterización, valores y códigos del parámetro E.

Confección del índice SITE

En la tabla 6 se sintetizan las categorías o rangos establecidos para cada uno de los criterios considerados.

En los parámetros S, I y T se diferencian cinco rangos a los que se asigna un valor numérico comprendido entre 0 y 4. El valor 0 corresponde a la situación más favorable en casa caso y el valor 4 a la más desfavorable. Los códigos correspondientes a estos valores son W (without), L (low), M (medium), H (high) y E (extreme).

El parámetro E expresa la evolución de la situación general en los cuatro últimos años, que puede ser positiva (incremento de la salinidad), negativa (descenso de la salinidad) o nula (sin variaciones significativas). Estas situaciones se expresan con un código numérico.

El índice SITE tiene dos formas de representación, una alfanumérica, que da una información detallada de cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de salinización, y otra exclusivamente numérica, cuya resultante es una única cifra. Según el fin que se quiera dar al índice, podrá ser utilizada una forma u otra de expresión.

Indice SITE alfanumérico

La composición del código SITE alfanumérico se realiza mediante la agregación de los cuatro códigos correspondientes a cada parámetro. Así, un acuífero en la situación más favorable tendría un código WWW-2 y un acuífero en la situación más desfavorable respondería al código EEE2.

Párámetro	Rango	Caracterización	Valor	Código
S	0,00-0,05	Sin intrusión	0	W
	0,05-0,10	Puntual	1	L
	0,10-0,30	Local	2	M
	0,30-0,70	Zonal	3	H
	0,70-1,00	General	4	E
S_u	0,00-0,01	Sin intrusión	0	W
	0,01-0,05	Puntual	1	L
	0,05-0,10	Local	2	M
	0,10-0,30	Zonal	3	H
	0,30-1,00	General	4	E
I	0-150	Nula	0	W
	150-500	Baja	1	L
	500-1000	Media	2	M
	1000-2000	Alta	3	H
	> 2000	Extrema	4	E
T	0-25	Sin variación	0	W
	25-50	Poco variable	1	L
	50-75	Variable	2	M
	75-100	Moderadamente variable	3	H
	> 100	Muy variable	4	E
E	> 1,05	Fuerte incremento	2	2
	1,01 – 1,05	Incremento moderado	1	1
	0,99 – 1,01	Estable	0	0
	0,99 – 0,95	Descenso moderado	-1	-1
	< 0,95	Fuerte descenso	-2	-2

Tabla 6. Síntesis de valores y códigos establecidos para cada uno de los criterios

Índice SITE numérico

Los criterios superficie (S) e intensidad (I) son los que mejor definen el estado general del acuífero ya que dan una idea sobre la salinidad general y su afección espacial. Probablemente por sí mismos podrían ser suficientes para establecer un índice cuantitativo simplificado y manejable. Sin embargo, la inclusión de datos sobre la variabilidad del proceso (T) y su evolución reciente (E) puede suministrar información valiosa para la catalogación del estado de la intrusión y el alcance de la presión sufrida.

Por ello, se considera conveniente ponderar estos criterios de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{ValorSITE} = \frac{3S + 3I + T + E}{30}$$

El cociente 30 es el máximo valor posible del algoritmo del numerador, por lo que un cierto acuífero totalmente salinizado tendría un valor SITE de 1 mientras que un acuífero sin afección alguna tendría un valor SITE de 0 (a los posibles valores negativos se les haría corresponder igualmente el valor 0). Esto permite, en función de la expresión numérica del valor SITE establecer categorías de estado de la intrusión o de presión debida a intrusión marina, de acuerdo al siguiente baremo (tabla 7):

Valor SITE	Estado de la intrusión
0,00-0,20	Leve
0,20-0,40	Moderada
0,40-0,60	Alta
0,60-0,80	Severa
0,80-1,00	Extrema

Tabla 7. Estado de la intrusión o presión debida a la intrusión

Índice SITE general

El índice SITE es el resultado de unir el código y el valor SITE.

Así, por ejemplo, un acuífero cuyo índice SITE sea MHL1(0,5) correspondería a un acuífero con intrusión marina local, de intensidad alta y variaciones poco significativas en el que se ha registrado un moderado incremento de la salinidad en el periodo más reciente. La presión debida a intrusión marina es alta.

Aplicación del índice SITE a tres acuíferos costeros de Castellón

Para probar la validez del índice desarrollado se llevó a cabo la aplicación del mismo a tres masas de agua de las que se tenía suficiente información de partida (series de cloruros suficientemente extensas y representativas). Se eligieron las masas costeras de la provincia de Castellón: Plana de Vinaroz-Peñíscola, Plana de Oropesa-Torreblanca y Plana de Castellón.

Las figuras 1,2 y 3 muestran los mapas de isocloruros confeccionados, como paso inicial para el cálculo de los

diferentes parámetros, según el procedimiento indicado en apartados anteriores.

Parámetro S

Los valores del parámetro S en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 8:

Acuífero	S	Carácter	Valor	Código
Vinaroz - Peñíscola	0,27	Local	2	M
Oropesa-Torreblanca	1,00	General	4	E
Castellón	0,85	General	4	E

Tabla 8. Códigos y valores del parámetro *S* en los acuíferos estudiados

Parámetro Su

Los valores del parámetro Su en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 9:

Acuífero	Su	Carácter	Valor	Código
Vinaroz-Peñíscola	0,014	Puntual	1	L
Oropesa-Torreblanca	0,29	Zonal	3	H
Castellón	0,098	Local	2	M

Tabla 9. Códigos y valores del parámetro S_u en los acuíferos estudiados.

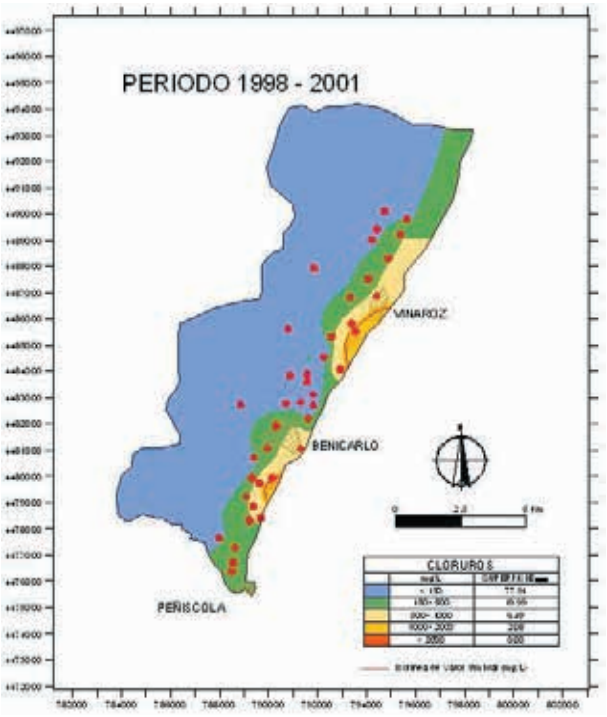


Figura 1. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en el acuífero de Vinaroz.

Parámetro I

Los valores del parámetro *I* en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 10:

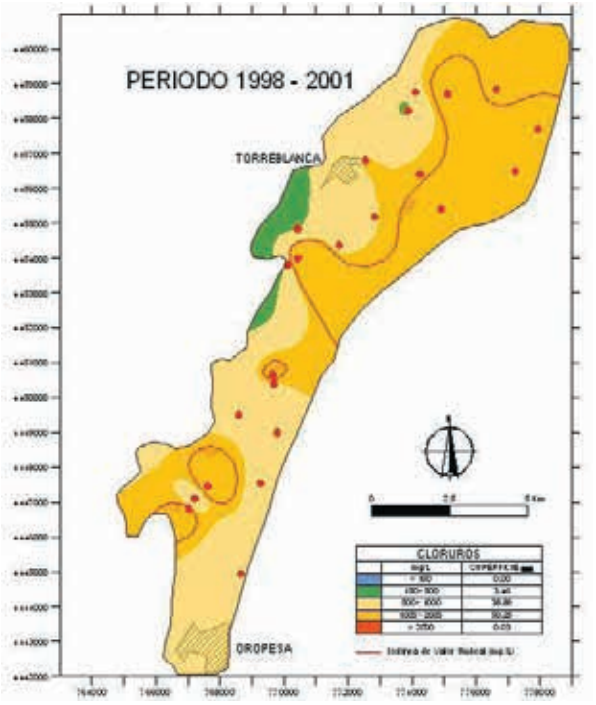


Figura 2. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en el acuífero de Oropesa - Torreblanca.

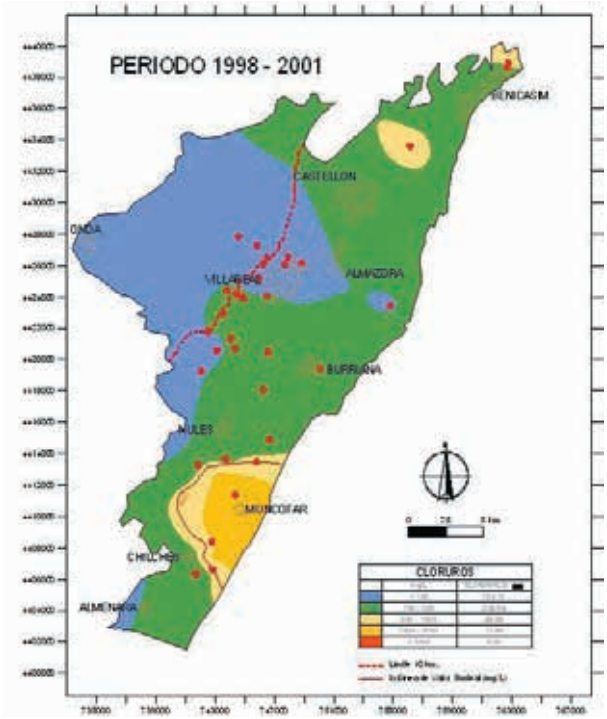


Figura 3. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en la Plana de Castellón

Acuífero	I	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	246	Baja	1	L
Oropesa-Torreblanca	1.141	Alta	3	H
Castellón	405	Baja	1	L

Tabla 10. Códigos y valores del parámetro I en los acuíferos estudiados

Parámetro T

Los valores del parámetro T en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 11:

Acuífero	T	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	53,8	Variable	2	M
Oropesa-Torreblanca	81	Moderadamente variable	3	H
Castellón	28	Poco variable	1	L

Tabla 11. Códigos y valores del parámetro T en los acuíferos estudiados

Parámetro E

Los valores del parámetro E en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 12:

Acuífero	E	Carácter	Valor	Código
Vinaroz	0,97	Descenso moderado	-1	-1
Oropesa-Torreblanca	1,01	Incremento moderado	1	1
Castellón	1,02	Incremento moderado	1	1

Tabla 12. Códigos y valores del parámetro E en los acuíferos estudiados

En la figura 4 se sintetizan las variaciones de las concentraciones medias de cloruros en periodos discretos de cuatro años en los tres acuíferos estudiados.

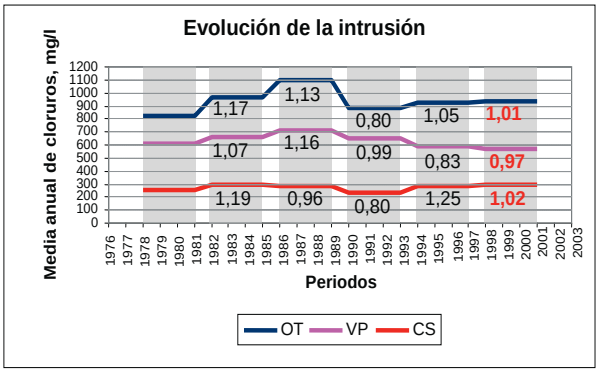


Figura 4. Valores del parámetro E en los tres acuíferos estudiados.

Resultados finales

En la tabla 13 se resumen los resultados obtenidos para los diferentes criterios considerados:

Los valores del índice SITE calculados para cada una de las masas de agua consideradas se resumen en la tabla 14.

CÁLCULO DE DESCARGAS AMBIENTALES AL MAR

Los trabajos que se describen en este apartado corresponden a la segunda parte de la actividad y constituyen el objetivo principal de la misma. Se pueden agrupar en los objetivos fundamentales:

— Desarrollo de un estudio piloto para determinar las

Tabla 13. Resultados finales

	Plana de Vinaroz			Plana de Oropesa			Plana de Castellón		
Criterio	Indice	Valor	Código	Indice	Valor	Código	Indice	Valor	Código
S	0,27	2	M	1,00	4	E	0,85	4	E
Su	0,014	1	L	0,29	3	H	0,098	2	M
I	246	1	L	1.141	3	H	405	1	L
T	53,8	2	M	81	3	H	28	1	L
E	0,97	-1	-1	1,01	1	1	1,02	1	1

Tabla 14. Valores del índice SITE

Criterio		Plana de Vinaroz	Plana de Oropesa	Plana de Castellón
S	Valor SITE	0,33	0,83	0,57
	Presión	MODERADA	EXTREMA	ALTA
	Ind. SITE	M L M -1 (0,3)	E H H 1 (0,8)	E L L 1 (0,6)
Su	Valor SITE	0,23	0,73	0,37
	Presión	MODERADA	SEVERA	MODERADA
	Ind. SITE	L L M -1 (0,2)	H H H 1 (0,7)	M L L 1 (0,4)

descargas ambientales al mar en tres masas de agua subterránea, de las que se tuviera suficiente información hidrogeológica, aplicando modelos matemáticos de flujo. Las tres masas seleccionadas fueron las Planas de Castellón, Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola en la Demarcación del Júcar.

— Cálculo de las descargas ambientales al mar en el resto de masas costeras intercomunitarias aplicando diferentes metodologías más sencillas en función de la información hidrogeológica disponible.

En primer lugar hay que poner de manifiesto la dificultad que entraña la propia definición de descarga ambiental al mar, puesto que es un concepto nuevo (o un nuevo enfoque) que surge a raíz de la necesidad de aplicación de la Directiva Marco del Agua (DMA), en lo referente al mantenimiento o recuperación del buen estado químico y cuantitativo de las masas de agua subterránea costeras.

A partir de ahí se ha considerado conceptualmente como descarga ambiental al mar el flujo de agua dulce saliente hacia el mar que es necesario mantener para estabilizar la posición de la interfase agua dulce-salada e impedir su avance en el acuífero.

Los acuíferos costeros presentan con frecuencia grados de explotación muy elevados que, en muchos casos, han dado lugar a la presencia de procesos de salinización por intrusión marina de muy diferente intensidad (Gómez Gómez et al, 2003; López Geta & Gómez Gómez, 2006).

Con algunas excepciones, la geometría de los acuíferos costeros no es bien conocida y la información disponible sobre sus parámetros hidráulicos es reducida. Como consecuencia de ello, los balances hídricos realizados presentan algunas incertidumbres que pueden llegar a ser notables y que no facilitan la gestión de los recursos.

Si bien el proceso de intrusión marina puede ser hidrodinámicamente muy complejo, puede asumirse que debe existir relación directa entre los caudales de descarga subterránea al mar y la intrusión marina. En consecuencia, la determinación de los caudales ambientales de descarga al mar, entendidos éstos como el flujo que es necesario mantener para que la intrusión marina no progrese, es una actividad imprescindible para establecer criterios de gestión.

Con los trabajos realizados para este estudio se persigue determinar los caudales ambientales de descarga al mar de los acuíferos costeros integrados en algunas de las masas de agua subterránea de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias (Júcar, Segura, Cantábrico, Ebro, Guadalquivir y Guadiana), de acuerdo a los siguientes objetivos:

— Revisión de los modelos hidrogeológicos conceptuales de esas masas de agua subterránea (MASb), para mejorar el detalle de funcionamiento hidráulico, litoestratigrafía y características geométricas.

— Actualización de los balances hídricos de las MASb estudiadas.

— Definición de las situaciones de explotación sostenible en cada una de las MASb teniendo en cuenta las variaciones anuales de la recarga natural (años tipo seco, medio y húmedo, media hiperanual), que permita cumplir los requerimientos de la DMA de consecución del buen estado químico y cuantitativo. Para ello se han tenido en cuenta los datos históricos de las redes de control de intrusión, calidad y piezometría del IGME y otros organismos, junto con los datos históricos de explotación.

— Cálculo de los volúmenes ambientales de descarga al mar en situación de explotación sostenible, para la contención de la intrusión marina y el mantenimiento de los ecosistemas asociados, a partir de la determinación de todos los términos del balance hídrico en las MASb costeras consideradas.

Necesidad de preservar las descargas al mar

Se admite con demasiada resignación que muchos acuíferos costeros estén sometidos a fuertes presiones cuyo resultado es la degradación de la calidad de las aguas que albergan, especialmente por salinización y por contaminación agraria difusa, en muchos casos, y la progresiva disminución de sus reservas, en otros (Cabezas, Cabrera y Morell, 2008).

En pocos años se ha pasado de un cierto grado de resignación que asumía que ese era el destino fatal de los acuíferos ("los pozos, o se salinizan o se secan") a enunciar que uno de los objetivos de la planificación hidrológica es la regeneración (remediación, en la nomenclatura anglosajona) de los acuíferos. Si se admite que el concepto "regeneración" significa recuperar el almacenamiento (restituir la situación piezométrica) y recuperar la calidad original del agua subterránea, es necesario manifestar que este objetivo está muy lejos de ser alcanzado y que con las líneas previstas de actuación difícilmente se va a conseguir.

Los acuíferos costeros de naturaleza detrítica suelen tener elevada inercia. Por esta razón, los procesos contaminantes que les afectan han progresado de manera

muy lenta, tanto en lo que se refiere a las modificaciones hidrodinámicas (relación agua dulce-agua salada, fundamentalmente) como a las alteraciones hidroquímicas, que están mediatizadas por el elevado tiempo de tránsito de los contaminantes a través de la zona no saturada. La regeneración de estos acuíferos requiere actuaciones drásticas que van más allá del simple respeto a los volúmenes medioambientales.

En los acuíferos costeros es necesario permitir que el agua salga al mar. En contra de la creencia de que es "agua perdida" se trata realmente de recursos ganados, al menos a medio plazo. En las áreas más intensamente afectadas por intrusión marina es necesario reducir los volúmenes de explotación, no se debe permitir la existencia de niveles por debajo del nivel del mar y se debe evitar la extracción de aguas salobres procedentes de la zona de mezcla agua dulce-salada para su desalinización.

Naturalmente, si la demanda no se reduce es necesario disponer de nuevos recursos para compensar el cierre de captaciones. El incremento de la reutilización de aguas residuales regeneradas es una buena opción si la demanda es eminentemente agrícola y la desalación de agua de mar o agua subterránea salada captada de la cuña salina por debajo de la interfase o zona de mezcla, lo puede ser si la demanda mayoritaria es de tipo urbano. Sea cual fuere la fuente de nuevos recursos es necesario, además, reducir las extracciones de agua subterránea, al menos en la misma cuantía de los nuevos recursos. De no hacerse así, la regeneración de acuíferos será un mero precepto.

Metodologías aplicadas

Las salidas subterráneas al mar constituyen una partida del balance hídrico de los acuíferos costeros. Habitualmente, esta partida se calcula directamente mediante la simple aplicación de la fórmula de Darcy, o indirectamente por diferencias compensadas entre las entradas y las salidas.

El cálculo directo requiere el conocimiento de la geometría del acuífero en la franja costera -que permite determinar el espesor saturado- la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico en diferentes condiciones.

La estimación indirecta a través del balance hídrico requiere abundante información sobre todas las partidas que componen el balance y sobre las variaciones de almacenamiento del acuífero.

En ambos casos, es posible determinar un rango de caudales de surgencia al mar razonablemente aceptable. Sin embargo, también existen notables grados de incertidumbre que impiden precisiones rigurosas. En general, si se considera un periodo de tiempo suficientemente largo, la variación del almacenamiento puede considerarse de rango menor, pero en acuíferos sujetos a sobreexplotación, por la propia naturaleza de ésta, la variación de almacenamiento hiperanual puede ser relevante. Si, además, se trata de acuíferos situados en áreas de régimen pluviométrico poco uniforme, como puede ser el caso del litoral mediterráneo, la recarga puede variar mucho de unos periodos a otros. En estas condiciones, los balances hídricos realizados para largos periodos de tiempo son simplemente indicativos, con coeficientes de variación muy elevados.

Parte de este problema puede resolverse si el balance se establece para cortos periodos de tiempo, más o menos homogéneos, pero la notable inercia de muchos de los acuíferos costeros puede distorsionar la relación causa - efecto entre los eventos de recarga, la explotación y las salidas al mar.

Por otra parte, los mecanismos de flujo no son homogéneos en el espacio. La alimentación lateral subterránea no es uniforme, y puede estar ausente en algunos sectores, los parámetros hidráulicos que rigen el flujo (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) son variables regionalizadas, y la explotación del acuífero puede ser de muy diferente intensidad entre unos sectores y otros. En estas condiciones, los balances hídricos deberían ser considerados con criterios sectoriales pero ello introduce una mayor dificultad en la obtención de datos.

La aplicación de la ley de Darcy para estimar los caudales de salida al mar también presenta escollos de difícil superación. En primer lugar, no todo el espesor saturado es activo para el flujo de agua dulce sino que tiene lugar una progresiva reducción de la sección de flujo que depende de la situación y geometría de la interfase teórica. La determinación de la posición de la interfase puede ser aceptable si se dispone de acceso directo hasta la misma pero presenta serias dudas si se calcula a partir de medidas piezométricas. Por otro lado, y como consecuencia de lo anterior, el flujo en la franja costera no es radial, que es una restricción de uso de la formulación de Darcy.

Si se tiene conciencia de estos problemas metodológicos, la estimación de caudales de salida subterránea al mar puede hacerse en primera aproximación y permite establecer rangos más o menos amplios en función de

la calidad de los datos de partida y de las variaciones naturales o forzadas inherentes al acuífero considerado. Realmente, el objetivo de este trabajo no es determinar los caudales de surgencia al mar sino los que deberían respetarse para mantener el proceso de intrusión en régimen quasi-estacionario. Ello requiere "restituir" la situación piezométrica que propicie el flujo adecuado mediante la reducción de los bombeos y la eliminación de niveles por debajo del nivel del mar.

En definitiva, se trata de reproducir el funcionamiento hidrogeológico en periodos en los que se suponga que no existe avance del frente salino, que pueden ser asimilados a periodos húmedos en los que, además, los índices de salinidad desciendan o, cuando menos, se estabilicen.

Para determinar el régimen adecuado de explotación se considera actualmente que la implementación de modelos matemáticos, en especial de densidad variable, sea la herramienta más adecuada. Conviene, no obstante, apuntar que la construcción del modelo requiere en todo caso el manejo de la misma información hidrogeológica necesaria para establecer balances y que, por tanto, la fiabilidad de los resultados es función de la calidad de los datos suministrados.

En primera aproximación, la simulación del flujo se puede llevar a cabo en régimen estacionario o en régimen transitorio. El enfoque estacionario es más sencillo porque supone la simplificación de variaciones hidrodinámicas mientras que la consideración del régimen transitorio permite una mejor aproximación a las respuestas, rápidas o diferidas, del acuífero a los estímulos externos.

En este trabajo se sintetizan los resultados obtenidos con las diferentes metodologías aplicadas en cada masa de agua subterránea, con especial atención a los modelos realizados en régimen estacionario, y se discute la conveniencia de profundizar en el conocimiento del proceso mediante modelos en régimen transitorio y, en última instancia, de modelos de densidad variable.

Estado actual de las masas de agua respecto a la intrusión marina

Con objeto de obtener una visión del estado actual de las masas de agua subterránea, se han llevado a cabo controles de campo en masas seleccionadas de las demarcaciones del Júcar, Segura y Norte, con diferente alcance en función de la problemática específica de cada cuenca, en los que se han medido simultáneamente piezometría, cloruros, conductividad y temperatura. Asimismo, se ha revisado la información procedente de las redes de piezometría, calidad o intrusión que actualmente mantienen las confederaciones, como es el caso de la red para el control de la intrusión que gestiona la CH del Júcar (hasta octubre de 2008) y, de este modo, mostrar una visión más amplia de la situación en la que se encuentran las masas estudiadas.

Para la realización de las campañas de campo se han realizado las siguientes tareas:

— Se estudiaron y delimitaron las zonas en las que era de interés el muestreo.
— Se revisaron los puntos de inventarios y redes conocidos (IGME, DGA, Confederaciones y Diputaciones provinciales). Se analizó la localización de los puntos, las características de los mismos, columnas litoestratigráficas, hidrogeología de la zona, etc.
— Una vez revisados y definidos en gabinete los puntos apropiados para su control por su localización y características, así como potencialmente viables para su medición, se realizó una visita de campo de comprobación.
— Tras ser visitados y comprobada su viabilidad, se realizaron los controles y, en caso necesario, se incorporaron puntos alternativos siempre que fue posible.

Los resultados obtenidos se han comparado con los rangos contemplados por el *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45 de 21 de febrero)* o bien, como es el caso de la Demarcación del Júcar, con un rango específico definido en el documento *Seguimiento del Plan Hidrológico de la cuenca del Júcar* (CHJ, 2004) que establece el grado de intrusión (*intrusión localizada* o *fuerte intrusión*) según el nivel de cloruros y conductividad en las aguas.

Revisión de los modelos hidrogeológicos de las masas

En cada demarcación hidrográfica se ha llevado a cabo una revisión y análisis de la bibliografía existente acerca de las MASb objeto de estudio con el propósito de recopilar información sobre hidrogeología en general, modelos de flujo, columnas estratigráficas, geometría, balances hidrogeológicos, sobre la localización y distribución histórica de la intrusión, etc.

Gracias a ello, se ha conseguido tener una idea del funcionamiento hidrogeológico de cada una de las masas de agua subterránea estudiadas y del grado de afección his-

tórica de los acuíferos por efecto de la intrusión marina relacionada. Asimismo, la información recabada ha servido de base para la aplicación de modelos matemáticos de flujo para el cálculo de los balances hídricos y las descargas ambientales al mar en los periodos considerados como de explotación sostenible para cada masa.

Determinación de la situación de explotación sostenible

Para la determinación del periodo de explotación sostenible se han consultado y revisado todos los informes referentes a las redes históricas de seguimiento del IGME (piezometría, calidad e intrusión), así como de la red actual de intrusión en los casos en que se dispone de ella.

Con toda la información recogida por las redes históricas y la red actual de intrusión se han trazado gráficas con objeto de observar la evolución de los cloruros espacial y temporalmente en las masas consideradas, y se ha establecido una correlación con la piezometría existente, en la medida de lo posible.

En resumen, el análisis de los datos que ofrecen estas fuentes de información ha permitido:

— diferenciar zonas en las que históricamente se ha producido intrusión;
— localizar periodos en los que los contenidos en cloruros han sido máximos y zonas en las que se han producido,
— definir el periodo de explotación sostenible para cada MASb, como el correspondiente a un periodo en el que se refleja una estabilidad o ligera mejoría en el contenido en cloruros a partir de los datos disponibles.

Cálculo de las descargas ambientales al mar. Modelización

Con carácter general, para la determinación del *balance hídrico de referencia* de cada MASb, se ha realizado una revisión bibliográfica y se ha optado por aquél que ha resultado más apropiado por extensión y periodo de tiempo que abarca, de modo que incluya algún periodo considerado como de explotación sostenible según se describe anteriormente.

Una vez precisado el balance de referencia, se han aplicado diferentes metodologías para la obtención de las descargas ambientales al mar, en función del conocimiento hidrogeológico y de la información disponible de cada MASb.

Como metodología más adecuada en el marco de este proyecto se ha considerado la realización de modelos matemáticos de flujo, no siendo abordables en este contexto los modelos de densidad variable, ya que aún siendo los más apropiados para representar la interacción agua dulce-agua salada, se escapan por sus exigencias a los objetivos del proyecto.

En este sentido se han realizado modelos numéricos de flujo de seis masas de la Demarcación del Júcar, seleccionadas por la disponibilidad de información hidrogeológica de las mismas. Para la realización de los modelos se ha empleado el paquete informático Visual MODFLOW. Dicho programa es el sistema de modelización más completo y fácil de usar para aplicaciones prácticas de flujo tridimensional de aguas subterráneas y para simulaciones de transporte de contaminantes. MODFLOW es capaz de representar el flujo del agua subterránea en una, dos o tres dimensiones, en acuíferos mono o multicapa, con funcionamiento confinado o libre, y bajo condiciones permanentes o transitorias.

La realización de los modelos matemáticos se ha abordado en varios pasos que, de forma sucesiva, son los siguientes:

— El establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento que parte del conocimiento de los aspectos que influyen en el comportamiento del acuífero.
— La realización de un modelo numérico de flujo que reprodujese y comprobase el modelo conceptual de funcionamiento.
— La obtención del balance hídrico para el periodo sostenible y las descargas ambientales al mar.

Desde un punto de vista general, el movimiento del agua en un acuífero depende de las características intrínsecas de los distintos materiales geológicos que lo constituyen (geometría, permeabilidad, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y de la influencia de una serie de factores que se pueden considerar externos al mismo (recarga, drenajes, extracciones, etc.). Un modelo de flujo de aguas subterráneas es la representación de un acuífero real, del que se puede obtener una predicción de la distribución de la piezometría a partir de la definición y cuantificación de los factores internos y externos que regulan su comportamiento. El modelo también obtiene como resultado un balance hídrico en el que quedan reflejados los volúmenes de agua correspondientes a los distintos tipos de flujos de entrada y de salida.

Los modelos realizados se han llevado a cabo en régimen permanente, representación de la situación del

acuífero cuando se considera que tanto los distintos factores externos como las características propias de los mismos permanecen constantes durante la simulación. Por tanto, se ha alcanzado una situación de equilibrio dinámico en el que no se produce variación de la piezometría a lo largo del tiempo. En la realización de los modelos se han considerado inicialmente algunos datos del balance en el periodo de explotación sostenible que se ha calculado previamente y que posteriormente se han matizado en la calibración de los mismos.

El procedimiento utilizado para seleccionar el periodo de simulación ha sido el siguiente:

A partir de los datos de la red de intrusión se ha elaborado la evolución media de cloruros en el acuífero. Se considera que los periodos en que se existe aumento de la concentración corresponden a situaciones activas de intrusión en las que existe déficit de salidas de agua dulce al mar; los periodos en los que se registran descensos de salinidad corresponden a periodos húmedos en los que puede estar produciéndose un retroceso del frente salino, consecuente a mayores caudales de salidas al mar. En cualquiera de los dos casos, se considera que a lo largo de esos periodos se están registrando variaciones positivas o negativas de los caudales de surgencia. El periodo de simulación se ha hecho coincidir con un periodo en el cual las concentraciones medias de cloruros no varían significativamente, lo que se interpreta como indicador de una cierta situación de equilibrio en la que las salidas anuales al mar son aproximadamente constantes, y suficientes para impedir el progreso de la intrusión marina.

En otras masas se disponía de modelos matemáticos realizados recientemente cuyos resultados han podido ser analizados y utilizados para este proyecto.

Por otra parte hay muchas otras masas costeras en las que no se han podido implementar los modelos de flujo por falta de infraestructura e información hidrogeológica suficiente, por lo que se les ha aplicado métodos más sencillos basados en el ajuste de los balances para los periodos determinados con la información disponible.
A algunas de estas masas se les han aplicado unos coeficientes correctores para obtener el *balance en el periodo de explotación sostenible*, habiendo definido dicho periodo con anterioridad, a partir de un balance de referencia previamente seleccionado. Con estos coeficientes se trata por tanto de ajustar el balance de referencia (balance medio para un periodo normalmente más amplio) al periodo de explotación sostenible.

Para calcular estos coeficientes de corrección se han empleado los balances obtenidos con el modelo PATRICAL (Pérez, 2005) en el caso de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, desarrollado en régimen alterado, o bien mediante los balances resultantes del modelo SIMPA en el resto de las demarcaciones. Dichos coeficientes se han calculado comparando los datos (fundamentalmente de recarga) obtenidos mediante los modelos (bien PATRICAL, bien SIMPA) en el periodo de explotación sostenible frente al periodo que comprende el balance de referencia.

Resultados obtenidos

Estudio piloto

Se ha realizado un estudio piloto para determinar los caudales ambientales de tres acuíferos costeros en la provincia de Castellón (Planas de Castellón, Oropesa–Torreblanca y Vinaroz). Para ello se han realizado modelos de flujo calibrados en régimen permanente para unos periodos previamente determinados como de explotación sostenible (figuras 5,6 y 7

La modelación de estos tres acuíferos se ha realizado en régimen estacionario para un periodo definido como estable o de ligera recuperación, de acuerdo a los datos piezométricos y de calidad.

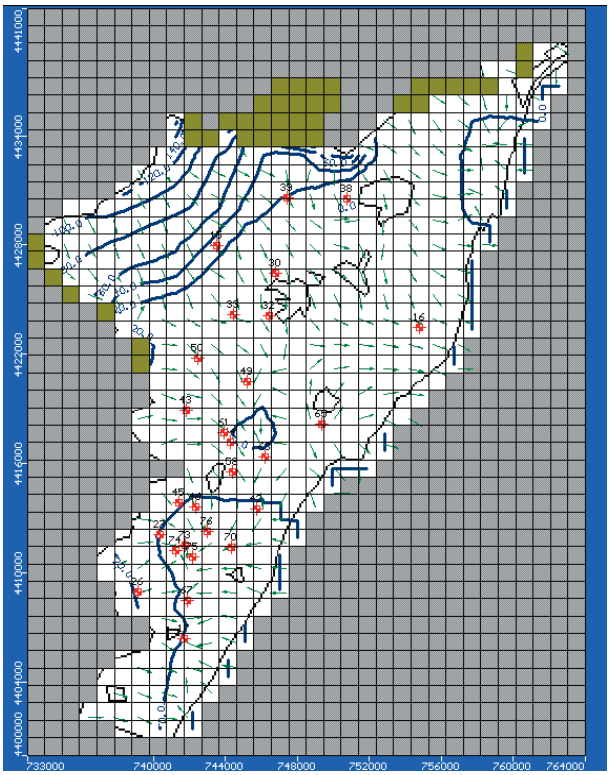


Figura 5. Plana de Castellón. Simulación del modelo en régimen estacionario

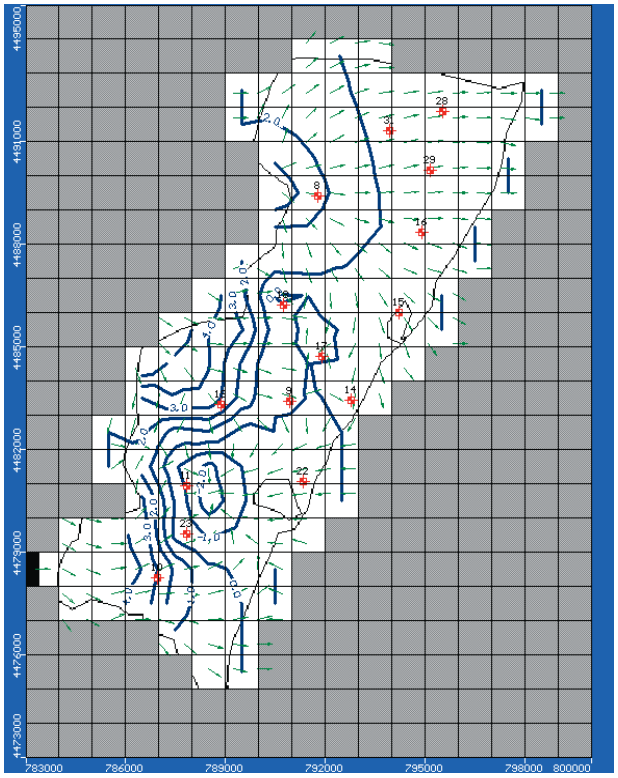


Figura 6. Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Vinaroz

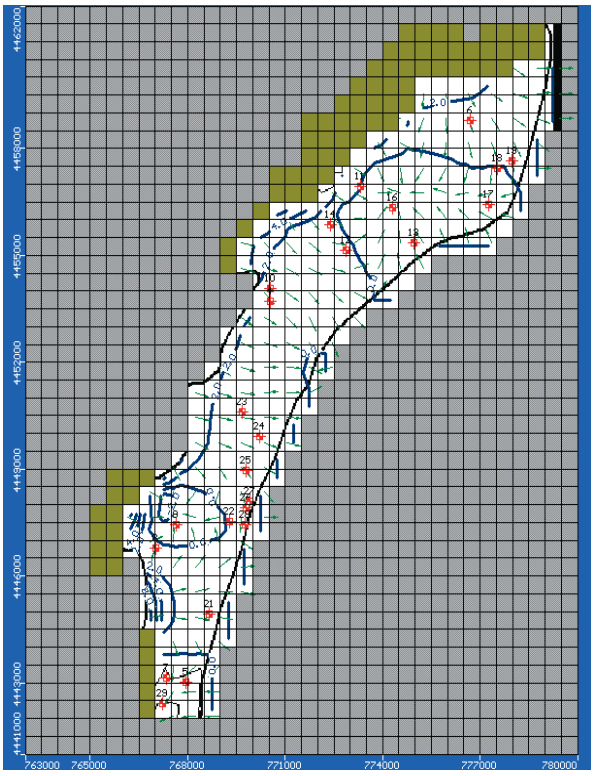


Figura 7. Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Oropesa

En cada caso, se ha obtenido el balance hídrico en el que se diferencian, entre otras partidas, las salidas al mar, las salidas a zonas húmedas y las entradas de agua de mar. Se asume que la suma de las salidas al mar y a las zonas húmedas constituye el caudal ambiental y que este deber ser tal que minimice las entradas de aguas de mar subterráneas. Quiere esto decir que en la situación simulada, que pretende ser de equilibrio, se asegura la no progresión del proceso de intrusión pero persiste el desequilibrio agua dulce-agua salada.

La determinación del volumen ambiental depende del alcance del concepto. Así pues, el correspondiente a una situación en la que el frente salino está en equilibrio debe ser considerado como "volumen ambiental mínimo" que equivale a los caudales de surgencia necesarios para impedir el avance salino. Si el objetivo de mantener los caudales ambientales es recuperar el buen estado ecológico de las masas de agua, dichos caudales deben ser suficientes no sólo para impedir el avance sino para favorecer el retroceso del frente y reducir el volumen de acuífero afectado. Esta recuperación requiere anular las situaciones de inversión de flujo o, lo que es lo mismo, las situaciones piezométricas bajo el nivel del mar. Los caudales de surgencia necesarios para eliminar depresiones piezométricas, asegurar el flujo de agua dulce hacia el mar y recuperar el equilibrio original del acuífero serán los "volúmenes ambientales".

En la práctica, y debido tanto a la heterogeneidad de los acuíferos y sus propiedades como a la gran variedad de condiciones de contorno, el proceso de intrusión marina no es homogéneo ni uniforme sino que puede manifestarse con muy diferente intensidad en sectores de un mismo acuífero. Por esta razón, el volumen ambiental, que se expresa por una cifra, debe tener también un referente espacial y distribuirse adecuadamente según las condiciones hidrodinámicas del proceso.

Con esta filosofía se han elaborado los modelos de las tres planas del litoral de Castellón. La situación modelizada se asocia a estados de quasi-equilibrio, es decir, a un periodo discreto en el que el grado de salinidad del acuífero ha sido más o menos uniforme. En esta situación estacionaria, la suma del volumen de salidas al mar y de salidas a zonas húmedas, en su caso, se considera como el "volumen ambiental mínimo". El balance general para este periodo se ha detallado por sectores que se han diferenciado en función de la geometría de la superficie piezométrica obtenida. Así, se han obtenido los balances hídricos para cada uno de dichos sectores.

La recuperación piezométrica de esos sectores y, por tanto, la tendencia hacia la regeneración de la calidad original del agua subterránea en las zonas afectadas sólo se puede conseguir mediante la reducción de los bombeos, mediante la instalaciones de sistema de recarga artificial o mediante la aplicación combinada de ambas posibilidades.

Se han simulado escenarios basados en la disminución de los bombeos hasta conseguir una situación en la que las entradas de agua de mar se anulen y no existan depresiones piezométricas. Las salidas al mar y a las zonas húmedas en los escenarios en los que se consiguen esas condiciones se han considerado los "volúmenes ambientales".

El volumen ambiental calculado para la plana de Oropesa-Torreblanca es de 21,6 hm³/año, que corresponde a la suma de los 4,1 hm³/año de salidas a la zona húmeda del Prat de Cabanes y 17,5 hm³/año de salidas subterráneas al mar. Para conseguirlo es necesario reducir el 20% de los bombeos en el sector septentrional y la totalidad de los bombeos en el sector meridional. El volumen ambiental calculado para la plana de Vinaroz es de 16,2 hm³/año. Para conseguirlo es necesario disminuir el 40% de los bombeos del acuífero.

El volumen ambiental calculado para la plana de Castellón es de 39,3 hm³/año, que corresponde a la suma de los 17,6 hm³/año de salidas subterráneas la mar y los 21,7 hm³/año de surgencias a las zonas húmedas. Para conseguir estas salidas es necesario reducir el 40% de los bombeos en el sector meridional del acuífero.

En la tabla 15 se comparan los volúmenes ambientales calculados y los estimados por la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Masa de Agua		Oropesa Torreblanca	Vinaroz	Castellón
Volumen ambiental	CHJ, 2007	8,0	40,0	74,0
	Calculado	21.6	16.2	39.3

Tabla 15. Volúmenes ambientales calculados y estimados por la CHJ (2007)

Cálculo de descargas al mar por demarcaciones

Demarcación Hidrográfica del Júcar

En la cuenca del Júcar se han realizado los siguientes trabajos:

- Actualización de la situación respecto a la intrusión marina mediante la toma de datos en campañas de campo y análisis de la información procedente de la red oficial de intrusión de la CHJ.
- Revisión y análisis bibliográfico para la mejora del conocimiento de las MASb costeras y recopilación de balances hídricos según distintas fuentes.
- Determinación de la situación de explotación sostenible en función de los datos históricos y actuales en contenidos en cloruros y conductividades en las redes de control existentes.
- Ajuste de balances anuales mediante la determinación actualizada de cada uno de los términos de estos balances para cada masa de agua.
- Cálculo de las descargas ambientales al mar en situación de explotación sostenible a partir del ajuste de los balances hídricos. Elaboración de modelos de flujo en las masas de Plana de Gandía, Plana de Jaraco y Jávea.

Figura 8. Isopiezas y líneas de flujo para el modelo calibrado en la Plana de Gandía

Demarcación Hidrográfica del Segura

Los trabajos realizados han consistido en una primera fase de estudio y análisis de la información antecedente para seleccionar aquellos datos válidos para los objetivos del Proyecto, sobre todo los referentes a calidad del agua, redes de control y balances hidrogeológicos.

Secuencialmente se han realizado trabajos de campo. Para ello se ha seleccionado una red "ad hoc" (puesto que en la cuenca del Segura no existe red de control de la intrusión marina), para realizar medidas in situ y toma de muestras de agua.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

Un aspecto destacable de una de las metodologías empleadas ha sido el cálculo del porcentaje de infiltración respecto de la precipitación en acuíferos piloto mediante la aplicación del código VISUAL BALAN (Samper et al., 1999). El dato obtenido se ha considerado válido para acuíferos de características similares. En algunos acuíferos la escasez de datos ha sido resuelta mediante la aplicación teórica simplificada de la Ley de Darcy estimando un valor de transmisividad en función de los conocimientos geológicos, considerando la longitud de contacto de las formaciones permeables con el mar y estimando un gradiente hidráulico a partir de los datos piezométricos disponibles. Para conocer el estado de intrusión la investigación se ha complementado con labores de campo entre las que se incluyen perfiles de conductividad y análisis de cloruros a diferentes profundidades (figura 9).

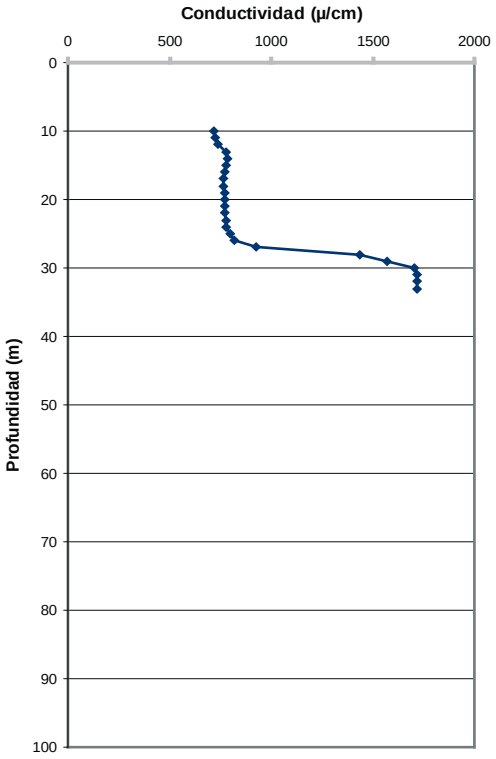


Figura 9. Perfil de conductividad en la masa de Villaviciosa (pto. 1403-6-0028)

Otras demarcaciones

Se han calculado también las descargas al mar de otras tres masas costeras correspondientes a las demarcaciones del Guadalquivir, Guadiana y Ebro, a partir de los balances obtenidos utilizando en cada caso la documentación disponible de cada masa.

Resumen de resultados

A continuación, recogidos en sendas tablas, se observan los resultados obtenidos para cada una de las MASb estudiadas en todas las demarcaciones hidrográficas, en cuanto al estado actual que presentan y las descargas al mar calculadas en el periodo denominado de explotación sostenible.

En la primera de ellas (tabla 16) se resume la situación actual de cada una de estas masas respecto de la afección por intrusión marina. En la misma, se han emplea-

CÓDIGO DE MASb	NOMBRE	DEMARCACIÓN	Estado actual	Fuente de información	Control de la intrusión	Observaciones
ES016MSBT0001	EO-NAVIA-NARCEA	CANTÁBRICO	Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0002	SOMIEDO-TRUBIA-PRAVIA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0003	CANDAS		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0004	LLANTONES-PINZALES-NOREÐA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0005	VILLAVICIOSA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0007	LLANES-RIBADE-SELLA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	

Tabla 16. Estado actual de las MASb en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias

CÓDIGO DE MASb	NOMBRE	DEMARCACIÓN	Estado actual	Fuente de información	Control de la intrusión	Observaciones
ES016MSBT0008	SANTILLANA-SAN VICENTE DE LA BARQUERA	CANTÁBRICO	Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0009	SANTANDER-CAMARGO		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0010	ALISAS-RAMALES		Posible intrusión puntual junto a las rias de Quejo y Ajo	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0011	CASTRO URDIALES		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES091MSBT0105	DELTA DEL EBRO	EBRO	Salinización congénita	Antecedentes IGME, CHE	Red calidad CHE, ACA	
ES081MSBT0086	PLANA DE VINAROZ	JÚCAR	Intrusión local en entornos de Vinaroz y Benicarló	Presente proyecto y antecedentes	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0088	MAESTRAZGO ORIENTAL		Intrusión puntual junto a las planas	Antecedentes IGME, CHJ	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0089	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA		Intrusión general, de fuerte intensidad	Presente proyecto y antecedentes	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0106	PLANA DE CASTELLÓN		Intrusión general, más intensa en Moncófar y Benicásim	Presente proyecto y antecedentes	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0107	PLANA DE SAGUNTO		Intrusión fuerte entre Pto. Sagunto y Puzol, y moderada al N del Palancia	Antecedentes IGME, CHJ	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0120	PLANA DE VALENCIA NORTE		Intrusión moderada en zona sur, hacia interior, y en zona norte próxima a la costa.	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (13 puntos)	
ES081MSBT0121	PLANA DE VALENCIA SUR		Intrusión moderada en Sueca, fuerte intrusión en Cullera y al N de la Plana	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (8 puntos)	
ES081MSBT0130	PLANA DE JARACO		Intrusión moderada en zona de Favara, fuerte intrusión en zona central, hacia la costa.	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (7 puntos)	
ES081MSBT0131	PLANA DE GANDÍA		Sin intrusión.	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (5 puntos)	
ES081MSBT0142	OLIVA-PEGO		Intrusión fuerte en Oliva y Molinell	Antecedentes IGME, CHJ	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0143	ONDARA-DENIA		Intrusión fuerte y moderada en sectores próximos a la costa, al Montgó y a la Depresión de Benisa.	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (3 puntos)	
ES081MSBT0144	MONTGÓ		Sin controles		No	Históricamente intrusión en zonas próximas a Ondara-Denia y Jávea.

Tabla 16. Estado actual de las MASb en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias

CÓDIGO DE MASb	NOMBRE	DEMARCACIÓN	Estado actual	Fuente de información	Control de la intrusión	Observaciones
ES081MSBT0158	DEPRESION DE BENISA	JÚCAR	Intrusión fuerte y moderada al N de Benitachell y en sectores próximos a la masa de Javea	Antecedentes IGME, CHJ	Red oficial intrusión CHJ	
ES081MSBT0159	JÁVEA		Fuerte intrusión en zona central	Campañas de campo y red de intrusión (CHJ)	Red oficial intrusión CHJ (2 puntos)	
ES081MSBT0163	SAN JUAN-BENIDORM		Intrusión moderada en acuífero de Benidorm. Resto acuíferos sin controles.	Campañas de campo	No	
ES081MSBT0169	BAJO VINALOPÓ		Sin controles		No	Históricamente altos contenidos en zonas amplias
ES071MSBT0036	VEGA MEDIA Y BAJA DEL SEGURA	SEGURA	Puede existir intrusión en la desembocadura con poca penetración	Antecedentes	No	
ES071MSBT0042	TERCIARIO DE TORREVIEJA		Fuerte salinización por intrusión actual y congénita	Antecedentes	No	
ES071MSBT0052	CAMPO DE CARTAGENA		No existe intrusión marina	Presente proyecto y antecedentes	No	
ES071MSBT0053	CABO ROIG		Fuerte intrusión con mayor avance en zona central	Antecedentes	No	
ES071MSBT0058	MAZARRÓN (acuífero Los Vaqueros)		Intrusión por elevadas extracciones para riego	Presente proyecto y antecedentes	No	
	MAZARRÓN (acuífero Cabezo de Los Pájaros)		Intrusión por elevadas extracciones para desaladora	Presente proyecto y antecedentes	No	
	MAZARRÓN (acuífero Vértice Horno)		No existe intrusión marina	Presente proyecto y antecedentes	No	
	MAZARRÓN (acuífero La Azohía)		No existe intrusión marina	Presente proyecto y antecedentes	No	
ES071MSBT0061	ÁGUILAS (acuífero ÁGUILAS-Cala Reona)	SEGURA	Intrusión por elevadas extracciones para desaladora	Presente proyecto y antecedentes	No	
	ÁGUILAS (acuífero Cabo Cope-Cala Blanca)		Puede existir intrusuión en la parte septentrional	Presente proyecto y antecedentes	No	
ES071MSBT0063	SIERRA DE CARTAGENA		No existe intrusión marina	Presente proyecto y antecedentes	No	
ES051MSBT0051	ALMONTE-MARISMAS DEL GUADALQUIVIR	GUADALQUIVIR	No existe intrusión marina	Antecedentes	Red calidad CHG	
ES040MSBT0020	AYAMONTE	GUADIANA	Intrusión moderada en recuperación en zona central	Antecedentes IGME, CHG	Red calidad CHG	

Tabla 16. Estado actual de las MASb en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias

do los rangos establecidos por el documento de la CHJ (2004) para calificar el grado de intrusión. De este modo, se ha calificado como:

— sin intrusión, aquellas zonas en las que los cloruros se encuentran en contenidos inferiores a 200 mg/L o bien la conductividad no supera los 2 mS/cm;
— moderada, en aquellas áreas en las que los cloruros se encuentran entre 200 y 500 mg/L, o la conductividad entre 2-5 mS/cm;

CUENCA	CÓDIGO DE MASb	NOMBRE	Periodo sostenible	Descargas ambientales al mar (hm^3/año)	Método de obtención
CANTÁBRICO	ES016MSBT0001	EO-NAVIA-NARCEA	1989-90 (año más seco)	0.5	Aplicación simplificada Darcy
	ES016MSBT0002	SOMIEDO-TRUBIA-PRAVIA	1989-90 (año más seco)	0.12	Aplicación simplificada Darcy
	ES016MSBT0003	CANDÁS	1989-90 (año más seco)	0.73	Aplicación simplificada Darcy
	ES016MSBT0004	LLANTONES-PINZALES-NOREÐA	1989-90 (año más seco)	0.14	Aplicación simplificada Darcy
	ES016MSBT0005	VILLAVICIOSA	1989-90 (año más seco)	23.8	Balance corregido con series SIMPA. Coef. infiltr. VBalan
	ES016MSBT0007	LLANES-RIBADESELLA	1989-90 (año más seco)	53.8	Balance corregido con series SIMPA. Coef. infiltr. VBalan
	ES016MSBT0008	SANTILLANA-SAN VICENTE DE LA BARQUERA	1988-89 (año más seco)	78.1	Balance corregido con series SIMPA. Coef. infiltr. VBalan
	ES016MSBT0009	SANTANDER-CAMARGO	1988-89 (año más seco)	0.05	Aplicación simplificada Darcy
	ES016MSBT0010	ALISAS-RAMALES	1988-89 (año más seco)	9.3	Balance corregido con series SIMPA
	ES016MSBT0011	CASTRO URDIALES	1989-90 (año más seco)	6.1	Balance corregido con series SIMPA
EBRO	ES091MSBT0105	DELTA DEL EBRO	1997 - 2000	34 (mar, río y lagunas)	Balances previos CHE
JÚCAR	ES081MSBT0086	PLANA DE VINAROZ	1995 - 2001	16.2	Modelo matemático
	ES081MSBT0088	MAESTRAZGO ORIENTAL	2004 (año más seco)	164	Balance corregido para el período de referencia
	ES081MSBT0089	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA	1995 - 2000	17.5	Modelo matemático
	ES081MSBT0106	PLANA DE CASTELLÓN	1996 - 2001	17.6	Modelo matemático
	ES081MSBT0107	PLANA DE SAGUNTO	1992 - 1993	16.8	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
	ES081MSBT0120	PLANA DE VALENCIA NORTE	1997-2000	109.54	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
	ES081MSBT0121	PLANA DE VALENCIA SUR	1995-1997	31.22	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
	ES081MSBT0130	PLANA DE JARACO	1989-1994	3.09	Modelo matemático
	ES081MSBT0131	PLANA DE GANDÍA	1993-2000	11.23	Modelo matemático
	ES081MSBT0142	OLIVA - PEGO	2004-2005	10.05	Balance corregido para el período de referencia
	ES081MSBT0143	ONDARA - DENIA	1989-1993	11.03	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
	ES081MSBT0144	MONTGÓ	1990-1994	2.03	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
	ES081MSBT0158	DEPRESION DE BENISA	2001-2002	10.6	Balance corregido para el período de referencia
	ES081MSBT0159	JÁVEA	1989-1993	3.71	Modelo matemático
	ES081MSBT0163	SAN JUAN - BENIDORM	1970-1975	1.31	Coef. corrección aplicado a balance hídrico
JÚCAR	ES081MSBT0169	BAJO VINALOPÓ	1970-1975	8.11	Coef. corrección aplicado a balance hídrico

Tabla 17. Descargas ambientales al mar en masas de agua subterránea costeras intercomunitarias

CUENCA	CÓDIGO DE MASb	NOMBRE	Periodo sostenible	Descargas ambientales al mar (hm^3/año)	Método de obtención
SEGURA	ES071MSBT0036	VEGA MEDIA Y BAJA DEL SEGURA	2000-2001	4.2	Modelo matemático
	ES071MSBT0042	TERCIARIO DE TORREVIEJA	1980-1981	0.42	Corrección de balances previos CHS
	ES071MSBT0052	CAMPO DE CARTAGENA (acuífero Plioceno)	1988-1989	0	Período de referencia para descargas ambientales
		CAMPO DE CARTAGENA (acuífero Cuaternario)	1988-1989	5	Período de referencia para descargas ambientales
	ES071MSBT0053	CABO ROIG	--	0.3	Balances previos y modelo matemático
	ES071MSBT0058	MAZARRÓN (acuífero Los Vaqueros)	1981/86 - 1993/97	0	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuífero Cabezo de Los Pájaros)	Anterior a 1995/96	0.1	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuífero Vértice Horno)	1988-actualidad	0.09	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuífero La Azohía)	1988-2004	0.1	Período de referencia para descargas ambientales
	ES071MSBT0061	ÁGUILAS (acuífero Águilas-Cala Reona)	Finales años 90	1.73	Balance corregido para el período de referencia
		ÁGUILAS (acuífero Cabo Cope-Cala Blanca)	1980-1993	0.25	Balance corregido para el período de referencia
	ES071MSBT0063	SIERRA DE CARTAGENA	1997-2003	1.23	Balance corregido para el período de referencia
GUADALQUIVIR	ES051MSBT0051	ALMONTE-MARISMAS DEL GUADALQUIVIR	1994-1997	26.6	Modelo matemático
GUADIANA	ES040MSBT0020	AYAMONTE	1997-2000	1.6	Corrección de balance de antigua UH

Tabla 17. (Cont.) Descargas ambientales al mar en masas de agua subterránea costeras intercomunitarias

— fuerte intrusión, en las que los cloruros superan los 500 mg/L, o bien la conductividad es superior a 5 mS/cm.

En la tabla 17 se recogen los volúmenes descargados al mar calculados en el periodo de explotación sostenible para cada masa de agua subterránea, con indicación del método aplicado.

CONSIDERACIONES FINALES

En los acuíferos costeros es necesario permitir que el agua salga al mar. En contra de la creencia de que es "agua perdida" se trata realmente de recursos ganados, al menos a medio plazo. En las áreas más intensamente afectadas por intrusión marina es necesario reducir los volúmenes de explotación, de modo que no se debe permitir la existencia de niveles por debajo del nivel del mar.

Las salidas subterráneas al mar constituyen una partida del balance hídrico de los acuíferos costeros. Habitualmente, esta partida se calcula directamente mediante la simple aplicación de la fórmula de Darcy, o indirectamente por diferencias compensadas entre las entradas y las salidas.

El cálculo directo requiere el conocimiento de la geometría del acuífero en la franja costera —que permite determinar el espesor saturado— la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico en diferentes condiciones.

La estimación indirecta a través del balance hídrico requiere abundante información sobre todas las partidas que componen el balance y sobre las variaciones de almacenamiento del acuífero.

En ambos casos, es posible determinar un rango de caudales de surgencia al mar razonablemente aceptable. Sin embargo, también existen notables grados de incertidumbre que impiden precisiones rigurosas.

Realmente, el objetivo de este trabajo no es determinar los caudales de surgencia al mar sino los que deberían respetarse para mantener el proceso de intrusión en régimen quasi-estacionario. Ello requiere "restituir" la situación piezométrica que propicie el flujo adecuado mediante la reducción de los bombeos y la eliminación de niveles por debajo del nivel del mar.

En definitiva, se trata de reproducir el funcionamiento hidrogeológico en periodos en los que se suponga que no existe avance del frente salino, que pueden ser asimilados a periodos húmedos en los que, además, los índices de salinidad desciendan o, cuando menos, se estabilicen.

Para determinar el régimen adecuado de explotación se considera actualmente que la implementación de modelos matemáticos, en especial de densidad variable, sea la herramienta más adecuada. Conviene, no obstante, apuntar que la construcción del modelo requiere en todo caso el manejo de la misma información hidrogeológica necesaria para establecer balances y que, por tanto, la fiabilidad de los resultados es función de la calidad de los datos suministrados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballesteros (2008). Tipología y caracterización de la intrusión marina en acuíferos litorales. Método SITE. (primeras bases). Informe inédito. Instituto Geológico y Minero de España.

Cabezas, F., Cabrera, E. y Morell, I. (2008). El agua, una cuestión de Estado: perspectiva desde la Comunidad Valenciana. Asociación Valenciana de Empresarios. 156 pp.

CHJ, (2004). Seguimiento del Plan Hirológico de la cuenca del Júcar. Documento de síntesis. Oficina de Planificación Hidrológica. Diembre de 2004.

Comisión Europea, (2009). Documento Guía de la Comisión Europea n.º 18 "Guidance on Groundwater Chemical Status and Trend Assessment".

Estrela Monreal T., Cabezas Calvo-Rubio F y Estrada Lorenzo F., (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. Ingeniería del Agua. Vol.6 Num.2 (junio 1999), páginas 125-138.

Gómez Gómez, J.D., López Geta, J.A. & Garrido Schneider, E. (2003). The state of seawater intrusion in Spain. En: Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Estado de la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros del Mediterráneo y técnicas de evaluación. Tomo II. ISBN: 84-7840-471-6. Madrid: IGME.

López Geta, J.A. & Gómez Gómez, J.D. (2006). The problem of saltwater intrusion into coastal aquifers, their protection and remediation. Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS). Alicante, January, 2006. ISBN: 84-7840-617-4. IGME-Universidad de Alicante. Cd-rom.

Pérez, M. A. (2005) Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Agua.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y Garcia Vera, M.A. (1999). "Manual del usuario del programa Visual BALAN v.1.0". ENRESA, Publicación Técnica n.º 05/99. 132 pp.

PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EMPLEADAS PARA CONSUMO HUMANO

Carlos Martínez Navarrete

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 9 *Protección de las aguas subterráneas empleadas para consumo humano según los requerimientos de la Directiva Marco del Agua* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas

Director de la actividad:

Carlos Martínez Navarrete. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España
Alberto Jiménez Madrid
Luís Moreno Merino
Juan de Dios Gómez Gómez
José Ángel Díaz Muñoz
Juan Antonio Luque Espinar

Dirección General del Agua

Manuel Varela Sánchez
Isaac Sánchez Navarro

Universidad de Málaga

Francisco Carrasco Cantos
Bartolomé Andreo Navarro
Jesús Mª Vías Martínez
Isaac Pérez Ramos
Darío Gutiérrez Lara
Cristian Sicilia Vertedor
Ana Isabel Marín Guerrero
Francisco José Cantarero Prado
Juan Antonio Barberá Fornell
Jesús Abraham Rosell Bernal

Empresa colaboradora

CRN, S.A.

PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EMPLEADAS PARA CONSUMO HUMANO

INTRODUCCIÓN

La protección del agua es un objetivo prioritario en la política medioambiental europea, reflejado específicamente en la Directiva Marco del Agua, DMA, Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Unión Europea, 2000), la cual establece un marco comunitario de actuación para garantizar la protección de sus aguas (superficiales, subterráneas, de transición y costeras).

La Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Unión Europea, 2006), relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, establece medidas específicas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas subterráneas. Destaca, entre otros aspectos, la importancia de las aguas subterráneas como fuente principal del suministro de agua potable y la necesidad de proteger estas en las masas de agua utilizadas para la extracción de agua potable.

La DMA, en su artículo 6, obliga a que todas las masas de agua utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano que proporcionen un promedio de más de 10 m^3 diarios o que abastezcan a más de 50 personas y las masas de agua destinadas a tal uso en el futuro estén incluidas en un registro de zonas protegidas, constituyendo las denominadas *Drinking Water Protected Areas* (DWPAs). Debido a estas rigurosas exigencias, en numerosos Estados la mayoría de las masas de agua subterránea deben ser consideradas bajo dicha protección abarcando así a gran parte de su territorio. Las aguas destinadas al consumo humano incluyen las empleadas para abastecimiento a la población, tanto públicas como privadas y las empleadas directamente en la elaboración de alimentos (conservas).

Es importante resaltar que aunque las áreas protegidas para aguas de consumo humano deban comprender la totalidad de la masa de agua subterránea en la que se ubican, esto no implica que las medidas para alcanzar los objetivos del artículo 7.2 deban ser aplicadas en toda la extensión de las DWPAs. Estos requisitos de la Directiva 98/83/CE, aguas potables, deben cumplirse en el punto en que el agua es suministrada al consumidor.

El artículo 7.3 de la DMA obliga a que los Estados velen por la necesaria protección de los DWPAs "con objeto de evitar el deterioro de su calidad, contribuyendo así a reducir el nivel de tratamiento de purificación necesario para la producción de agua potable". Aunque evitar el deterioro de la calidad de las masas de agua no produzca necesariamente una reducción en los niveles de purificación si parece claro que este artículo indica una clara intención de evitar el deterioro de la calidad del agua. Para ello, los Estados deben tomar las medidas para proteger la calidad del agua de tal modo que en su punto de extracción, previamente a los tratamientos de purificación, no se produzca un deterioro significativo en la calidad del agua que requiera incrementar dicho tratamiento. El control debe efectuarse individualmente para cada parámetro que se estime que está en riesgo.

En la práctica no es posible, ni apropiado, aplicar con igual intensidad las medidas restrictivas que pueden ser necesarias para cumplir los requerimientos del artículo 7.3 en toda la DWPAs. Para subsanarlo la DMA contempla (artículo 7.3) la posibilidad de emplear "zonas de salvaguarda" en las que focalizar las restricciones y medidas de control.

Sería necesario además efectuar una monitorización (European Commission, 2006) que demuestre que existe una tendencia de mejora sostenible en el tiempo. Ésta debe iniciarse al menos desde 2007, cuando se dispone de los primeros resultados de los programas de seguimiento implementados bajo la DMA y requeriría un cierto periodo hasta ser evaluable.

La mayoría de los objetivos de la DMA se aplican a sustancias excluyendo los parámetros biológicos. Sin em-

bargo el artículo 7.3 no se refiere a contaminantes y en su lugar considera calidad y el "nivel de tratamiento de purificación" con la intención de que los parámetros biológicos, las sustancias químicas y las radiactivas puedan ser contemplados.

Las zonas de salvaguarda ("safeguard zones") son áreas (que la DMA contempla establecer opcionalmente) en cuyo ámbito se centran las medidas para proteger las aguas subterráneas con el objetivo de limitar el deterioro de su calidad y reducir el nivel de tratamiento de purificación requerido en el agua de consumo humano, opción muy recomendable especialmente dado el tamaño con que han sido delimitadas numerosas masas de agua en diversos Estados. Equivalen por tanto a "perímetros de protección" de masas de agua subterránea destinada al consumo humano según el artículo 7.3. de la DMA

En la tabla 1 se muestra una síntesis de las principales referencias en la legislación de las zonas de salvaguarda, registro de zonas protegidas por emplearse para consumo humano y perímetros de protección de captaciones y su contenido.

El tamaño de las zonas de salvaguarda podrá ser muy variable, en muchos casos serán menores que la masa de agua subterránea, incluyendo en ellas las zonas de vulnerabilidad alta y a las presiones que puedan afectar a las aguas de la captación. Podrán existir varias zonas de salvaguarda en una misma masa de agua así como extenderse fuera de la misma, como puede ocurrir a los medios kársticos debido sus particularidades y diferentes zonas de alimentación. Por otra parte las zonas de salvaguarda pueden corresponder a la totalidad de la extensión de la masa de agua subterránea o ser una envolvente de los perímetros de protección de las captaciones existentes.

Para poder aplicar estas consideraciones a un amplio número de masas de agua subterránea, como es el caso de España, es muy conveniente efectuar una metodología que considere específicamente el riesgo de contaminación al delimitar las zonas de salvaguarda junto con otros factores que se considere significativos.

Tabla 1. Síntesis de las principales referencias en la legislación de las zonas de salvaguarda, registro de zonas protegidas por emplearse para consumo humano y perímetros de protección de captaciones.

Legislación	Artículo	Tema que legisla
RD 1514/2009, que regula la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro	Art. 4 y Anexo III.C	Evaluación del Estado químico de las aguas subterráneas en DWPAS
Orden ARM/2656, de 10 de septiembre de 2008, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica.	Art. 4	Zonas protegidas
	Art. 4.1.d.	Qué compone la zona protegida en captaciones de agua subterránea, y qué abarca.
	Art. 4.2.	Zona futura captación de agua para abastecimiento.
	Art. 4.8.	Inclusión perímetros de protección de aguas minerales y termales en zonas protegidas.
	Art. 6.1.4.	Objetivos medioambientales para las zonas protegidas.
	Art. 8	Programa de medidas de autoridades y su integración
RD 907/2007, aprueba Reglamento Planificación Hidrológica.	Art. 4	Contenido de los planes hidrológicos de cuenca respecto a zonas protegidas.
	Art. 24	Qué debe incluir el registro de zonas protegidas.
	Art. 35	Objetivos medioambientales para las zonas protegidas.
	Art. 57	Inclusión de perímetros de protección del artículo 97 y 56 del texto refundido Ley de Aguas en el Plan Hidrológico.
Ley 62/2003, modificación texto refundido Ley de Aguas. Incorpora Directiva 2000/60/CE (artículo 129)	Art. 42	Contenido de planes hidrológicos respecto a zonas protegidas.
	Art. 99 bis	Registro de zonas protegidas. Qué incluir.
RD 1/2001, aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.	Art. 56.3.	Perímetros de protección del acuífero, regulen actividades para proteger frente a riesgos de contaminación.
	Ar. 97	Regulación de actividades prohibidas en los perímetros de protección
Directiva 2000/60/CE (DMA)	Art. 4	zonas protegidas: Objetivos medioambientales, prorrogas, objetivos medioambientales menos rigurosos
	Art. 6	Registro de zonas protegidas.
	Art. 7	Prevenir deterioro calidad para reducir el tratamiento de purificación necesario. Posibilidad de establecer "perímetros de protección" (NOTA: Safeguard zones)
	Art. 11.3.	Programa de medidas, preservar calidad, reducir nivel tratamiento purificación necesario.
	Anexo IV.1.	Registro de zonas protegidas.
RD 849/1986, aprueba Reglamento Dominio Público Hidráulico.	Art.173	Perímetros de protección del acuífero, regular actividades objetivo proteger captaciones abastecimiento a poblaciones en cantidad o calidad

METODOLOGÍA

En este trabajo se muestra la metodología desarrollada para delimitar zonas de salvaguarda dividida en tres fases secuenciales de trabajos, aumentando la complejidad y precisión en cada una de ellas. Para ello primero se han analizado las diferentes capas de información a considerar y luego se han definido las fases de trabajo. La metodología propuesta contempla:

DEFINICIÓN DE CRITERIOS A CONSIDERAR

Para la delimitación de las zonas de salvaguarda se ha considerado necesario tener en cuenta las siguientes capas de información:

Localización y características de las captaciones de aguas subterráneas empleadas para consumo humano

La Directiva Marco del Agua (DMA), establece en su artículo 6 que "Los Estados miembros velarán por que se establezca uno o más registros de todas las zonas incluidas en cada demarcación hidrográfica que hayan sido declaradas objeto de una protección especial en virtud de una norma comunitaria específica relativa a la protección de sus aguas superficiales o subterráneas o a la conservación de los hábitats y las especies que dependen directamente del agua. En el registro se incluirán necesariamente:

—Las zonas en las que se realiza una captación de agua destinada a consumo humano, siempre que proporcione un volumen medio de al menos 10 metros cúbicos diarios o abastezca a más de cincuenta personas, así como, en su caso, los perímetros de protección delimitados.
—Las zonas que, de acuerdo con el respectivo plan hidrológico, se vayan a destinar en un futuro a la captación de aguas para consumo humano.
—Los perímetros de protección de aguas minerales y termales aprobados de acuerdo con la legislación específica.

Los trabajos realizados para realizar el Registro de captaciones y de perímetros de protección a abastecimientos para consumo humano y aguas minerales en las masas de agua subterránea intercomunitarias, que será empleado como una de las capas de información requerida, se esquematizan en la figura 1.

Las fuentes de información, de las que se ha creado una base de datos, pueden ser generales o específicas de cada Demarcación, y proceden de las siguientes entidades:

—Fuentes generales: IGME, MARM, M. Sanidad y consumo (Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo, SINAC)

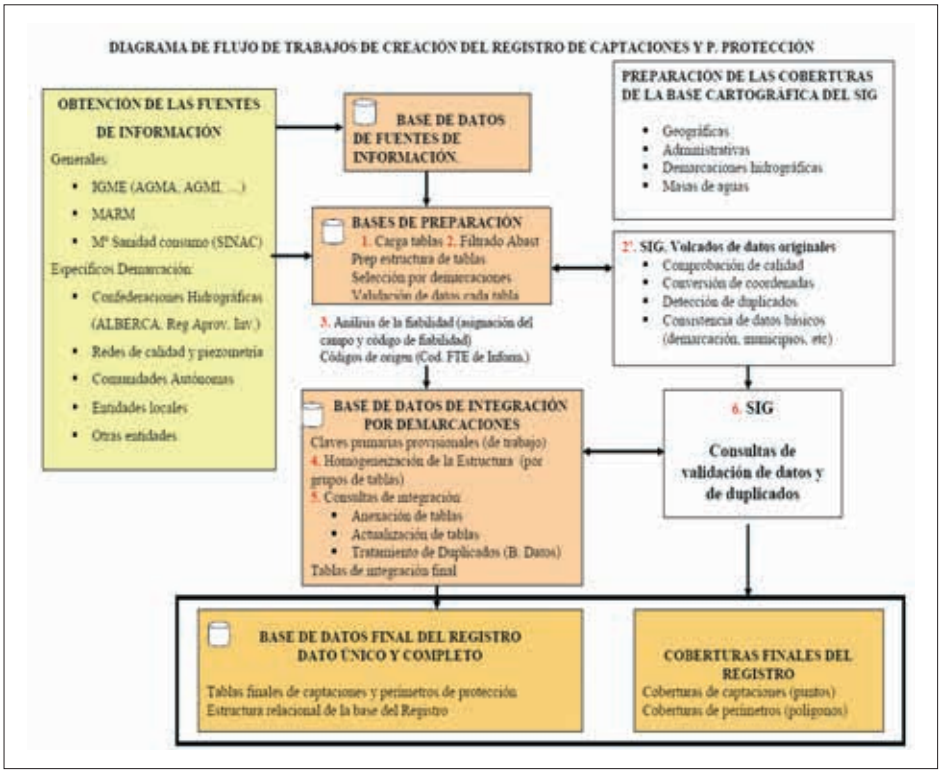


Figura 1. Diagrama de flujo de los trabajos de creación del registro de captaciones y perímetros de protección.

—Fuentes específicas de cada demarcación: Confederaciones Hidrográficas (Registro de aprovechamiento, ALBERCA, inventarios de captaciones y revisiones de abastecimientos a población); Comunidades Autónomas; Entidades locales; Otras entidades (Canal de Isabel II, Consejerías de Medio Ambiente, Diputaciones provinciales, empresas de gestión, etc.)-

Los trabajos efectuados han sido:

—Bases de preparación de datos. En ellas se han realizado:
  * Filtrados de captaciones, seleccionando las captaciones de agua subterránea, las captaciones del ámbito del registro (masas de agua intercomunitarias) y el Control de duplicados dentro de cada fuente
  * Consultas de selección de abastecimiento. Filtro para desechar todas aquellas captaciones que no correspondan a abastecimientos a núcleos urbanos. Se ha seleccionado el uso correspondiente a abastecimiento a población por campos relativos al uso, que indiquen destino a núcleos de población, o bien otros campos relacionados con uso de abastecimiento a población, tales como el titular, el ayuntamiento, mancomunidades y empresas de abastecimiento.
  * Tratamiento geográfico. Se ha efectuado respecto a las captaciones (puntos) la conversión de coordenadas a sistema UTM Huso 30, el Filtrado de puntos fuera del ámbito de estudio, demarcaciones y términos municipales, así como la revisión de duplicados en GIS. En los perímetros (polígonos) se han revisado sus vértices (revisión del orden de secuencia y geometría) y la adecuación geométrica de perímetros y su zonificación.
—Proceso de integración. Realizado sobre las tablas preparadas de cada fuente de información ha dado lugar a la selección del "registro" único de cada captación. Ha requerido:
  * Carga de las tablas
  * Filtrado de abastecimientos de población. Consultas de filtrado por: Usos (principal y secundario); Número de habitantes: < 50 habitantes (filtro con <40); Volumen anual: < 3.650 m3 (filtro con <3.500); Titular (Ayuntamientos, urbanizaciones, mancomunidades...); Observaciones
  * Códigos de registros: Cod. Fuente de Información; Cod. Único de trabajo por grupo de tablas (Cod. interna proyecto); Cod. de Fiabilidad/Prioridad
  * Homogeneización de la estructura por grupo de tablas: Para cada tabla, se añaden los campos que faltan y están presentes en la estructura final, para obtener una tabla única que luego será dividida para su incorporación a la estructura final mediante consultas.
  * Consultas de integración: Anexación de tablas (consultas de anexación de las diferentes tablas para formar unas tablas de grupo y posteriormente estas tablas de grupo han sido anexadas para completar las tablas de la base de datos finales); actualización de tablas; localización (GIS) y filtrado de duplicados (bdatos); análisis en GIS de proximidad y localización.

—Bases finales del registro. La estructura final de las bases de integración está formada por las siguientes tablas:

  – Tabla principal
  – Tabla de características
  – Tabla de usos
  – Tabla de titulares
  – Tabla de relación de puntos y perímetros
  – Tabla general de perímetros

La relación entre las tablas de abastecimientos y perímetros se realiza mediante la tabla "puntos_perimetros". Así, hay cuatro tablas de captaciones integración_demarcación_principal, caracteristicas, usos y titulares, que se relacionan con las tablas de perímetros datos_generales_perimetros y zonificacion_perimetros, tal y como se muestra en la figura 2.

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las masas de agua subterránea

La vulnerabilidad a la contaminación es la susceptibilidad de un acuífero a que se contamine el agua subterránea debido al impacto de las actividades humanas. Se puede distinguir entre vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica (Foster, 1987; Margat and Suais-Parascandola, 1987; Vrba and Civita, 1994).

La vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas e hidrogeológicas de un área, pero independientemente de la naturaleza de los contaminantes mientras que la vulnerabilidad específica es la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes concreto en función de las características de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Zwahlen, 2004).

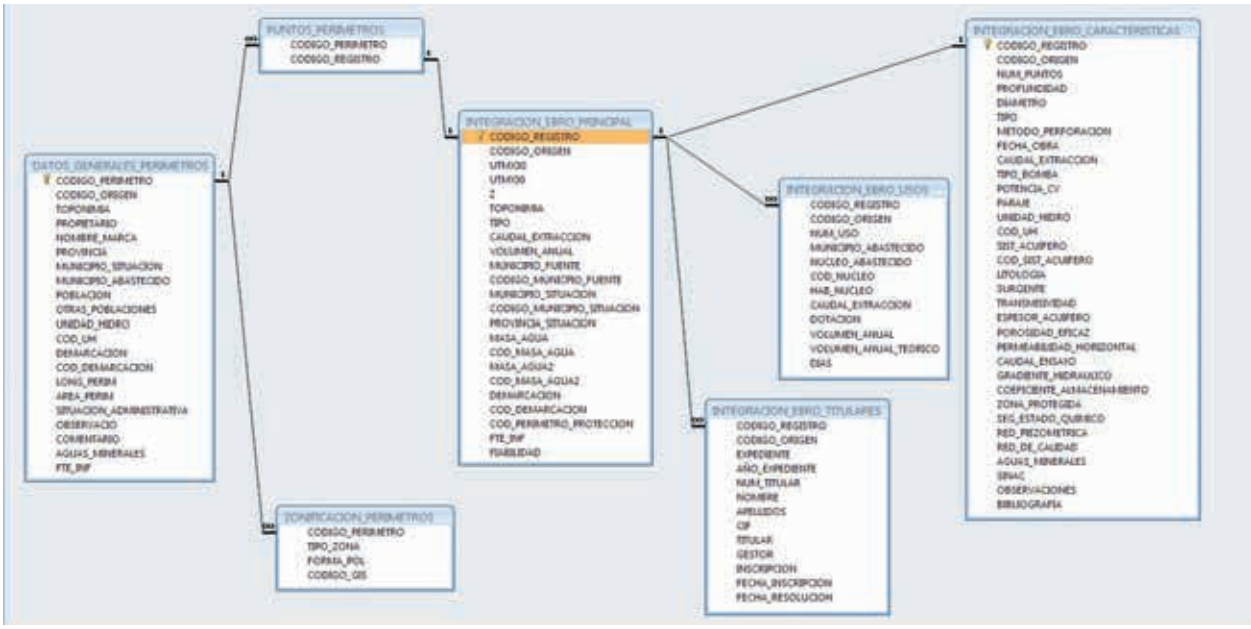


Figura 2: Estructura de tablas de las bases de datos finales

En este trabajo se efectuará la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Los mapas obtenidos son instrumentos muy útiles para la toma de acciones preventivas o correctoras, con respecto al uso del suelo y explotación de los recursos hídricos. Su objetivo es la subdivisión del área en categorías según la capacidad que tiene el medio subsuperficial para proteger el agua subterránea.

En los últimos años se han desarrollado varios métodos para su determinación siguiendo diferentes enfoques (Aller et al., 1987; Foster, 1987; Dörfliger, 1996; Civita and De Maio, 1997; Goldscheider et al., 2000; Zwahlen, 2004; Vias et al., 2006a). Tras su análisis se ha considerado como los mas adecuados para llevar a cabo este estudio seleccionar el COP (Vías et al., 2006a) y el DRASTIC Reducido (DGOHCA e IGME, 2002; DGOHCA y CEDEX, 2002) para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos carbonatados y detríticos/mixtos respectivamente.

El método COP

El método COP fue desarrollado por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (Vías et al. 2002, 2006) para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos carbonatados, a partir de los tres factores indicados por la Acción COST 620 para la cartografía de vulnerabilidad del agua subterránea en acuíferos kársticos:

—factor C (*flow* ***C****oncentration*), relativo a las condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan al acuífero,
—factor O (***O****verlying layers*), que contempla las capas de protección del agua subterránea,
—factor P (***P****recipitation*), relativo a las características de la precipitación.

El método se basa en dos premisas: el contaminante se mueve con el agua a través de la zona no saturada y el contaminante se infiltra en el acuífero desde la superficie. Ha sido aplicado con éxito en varios acuíferos carbonáticos del sur de España (Andreo et al., 2006, Vías, 2005; Vías et al., 2006a). También se ha utilizado en otros paises (Vías et al., 2006b; Ravbar, 2007; Baldi et al., 2009) comprobándose su idoneidad para este tipo de medio en comparación con otros métodos específicos de los acuíferos carbonáticos.

(O) Capas de protección del agua subterránea

El factor O tiene en cuenta la protección que ejerce la zona no saturada del acuífero, de acuerdo con las características de las dos principales capas que se pueden diferenciar en ella: suelo (variable Os) y litología (variable OL).

La variable suelos (OS) hace referencia a la capa biológicamente activa de la zona no saturada. En el suelo tienen lugar la mayoría de los procesos de autodepuración de la carga tóxica de las aguas contaminadas. La variable litología (OL) refleja la capacidad de atenuación de los contaminantes en cada capa litológica de la zona no saturada. El factor O considera la textura y espesor de suelo, la

litología, el espesor de la zona no saturada y el grado de confinamiento del acuífero, (tabla 2).

En la figura 3 se muestra el procedimiento a seguir y las fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor O.

Piezometria: Información del MARM, Confederaciones hidrográficas e IGME, Mapa litoestratigráfico y de permeabilidad de España 1:200.000 (digitalizado) y Mapa geológico MAGNA (1:50000)

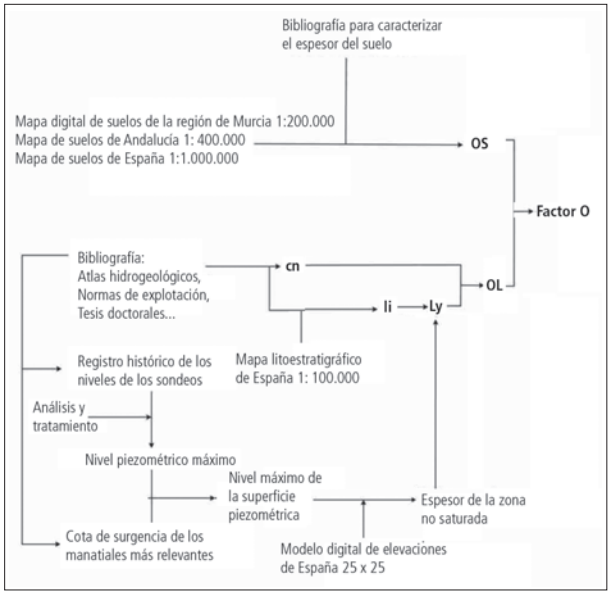


Figura 3. Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas para obtener el factor O del método COP.

(C) Condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan al acuífero

El factor C permite estimar el modo en que se produce la recarga al acuífero y cómo ésta modifica la protección natural dada por el factor O. Así, en zonas donde se produce una recarga concentrada, la protección del acuífero queda más reducida que donde tiene lugar de forma difusa. Las características superficiales del acuífero influyen en como se producen la recarga.

Se diferencian dos tipos de escenarios:

—Escenario 1: incluye las áreas que forman la cuenca que vierte a un sumidero. Son áreas donde la vulnerabilidad del recurso aumenta debido a que pasa directamente a la zona saturada sin estar expuestas a los procesos que en la zona no saturada se puedan dar.

—Escenario 2: son incluidas aquellas áreas donde la recarga se realizan de forma difusa

El factor C (tabla 3) presenta valores que varían entre 0 y 1 y se agrupan en diferentes clases, según la reducción de protección. El valor 0 indica que se reduce toda la protección natural dada por el factor

Rangos del parámetro Iy	Valor de (Iy)
Arcillas	1500
Limos	1200
Margas y rocas ígneas y metamórficas no fisuradas	1000
Margocalizas	500
Roas ígneas y metamórficas fisuradas	400
Brechas y conglomerados no fisurados o cementados	100
Areniscas	60
Brechas y conglomerados fisurados o escasamente cementados	40
Arenas y gravas	10
Basaltos permeables	5
Rocas carbonáticas fisuradas	3
Rocas Karstificadas	1

Rangos del parámetro cn	Valor de cn
Confinado	2
Semi-confinado	1,5
No confinado	1

$Li = \Sigma (Ly.m)$ $O_1 = Li \cdot cn$
Variable O: Litología

Rangos del parámetro ly.m	Valor de protección Li
=250	1
8250-1.000	2
(1000-2500)	3
(2500-10.000	4
>10.000	5

m= espesor

Espesor \ Textura	Arcillosa	Limosa	Franca	Arenosa
> 1m	5	4	3	2
> 0,5 my =1m	4	3	2	1
= 0,5 m	3	2	1	0

Factor O $= O_s + O_s$

Valores factor O	Capacidad de protección en la zona no deseada
1	Muy baja
2	Baja
(2-4)	Moderada
(4-8)	Alta
(8-15)	Muy alta

Factor O: Capas de protección del agua subterránea

Tabla 2. Método COP. Cálculo del factor O.

Tabla 3. Método COP. Cálculo del factor C.

Escenario 1: Áreas vertientes a sumidero

Rangos del parámetro d_1: distancia al arroyo vertiente	Valor de d_1
= 10	0
(10-100)	0,5
> 100	1

Rangos del parámetro d_2: distancia del sumidero	Valor de d_2
= 500 m	0
(500-1 000)	0,1
(1 000-1 500)	0,2
(1 500-2 000)	0,3
(2 000-2 500)	0,4
(2 500-3 000)	0,5
(3 000-3 500)	0,6
(3 500-4 000)	0,7
(4 000-4 500)	0,8
(4 500-5 000)	0,9
> 5 500	1

Factor C = $d_1 \cdot d_1 \cdot sv$

Vegetación (v) \ Pendiente (s)	= 8%	(8-31%]	(31-76%]	>76-31%
Presente	1	0,95	0,85	0,75
Ausente	1	0,90	0,80	0,75

Escenario 2: Áreas no vertientes a sumidero

Vegetación (v) \ Pendiente (s)	= 8%	(8-31%]	(31-76%]	>76-31%
Presente	0,75	0,80	0,90	1
Ausente	0,75	0,85	0,95	1

Geoformas \ Capa superficial	Ausente	Permeable	Impermeable
Karst desarrollado presencia de dolinas, torcas, lapiaces, etc.	0,25	0,5	0,75
Karst desarrollado o afloramiento superficial afectado por disolución	0,5	0,75	1
Karst por fisuración	0,75		
Ausencia formas karsticas	1	1	1

Factor C = sl sv

Factor C: Condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan el acuífero.

Valor del factor C	Redución de la protección
(0-0,2]	Muy alta
(0,2-0,4]	Alta
(0,4-0,6]	Moderada
(0,6-0,8]	Baja
(0,8-1]	Muy baja

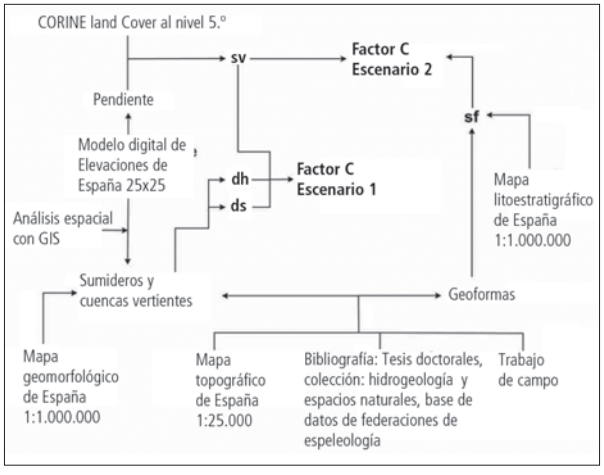


Figura 4. Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor C del método COP.

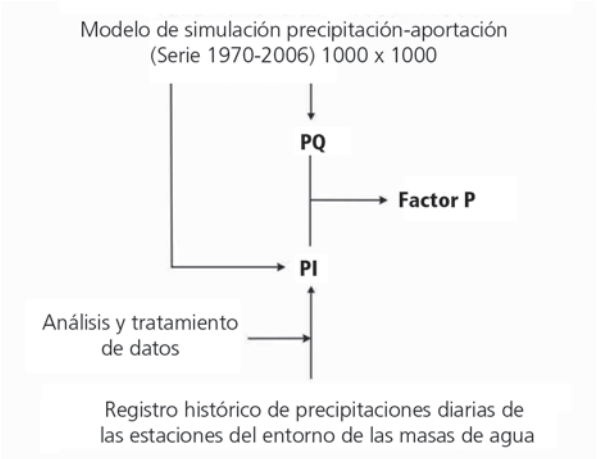


Figura 5 Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor P del método COP.

O, mientras que el valor 1 indica que las características de la infiltración (C) no afectan a la protección natural ejercidas por las variables contempladas por el factor O.

En la figura 4 se muestra el procedimiento a seguir y las fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor C.

(P) Características de la precipitación

El agua de la precipitación es el agente que transporta el

Intérvalos de precipitación (mm)	Valo P_o
> 1 600	0,4
(1 200-1 600)	0,3
(800-1 200)	0,2
(400-800)	0,3
= 400	0,4

Valores de factor P	Reducción de la protección
(0,4-0,5]	Muy alta
0,6	Alta
0,7	Moderada
0,8	Baja
(0,9-1]	Muy baja

Intervalos de intensidad de precipitación (mm/día)	Valor P_1
=10	0,5
(10-20]	0,4
>20	0,2

P_1= Precipitación media anual, número de dias con lluvia
Factor = P_0 +P_1 **Factor P:** Características de precipitación

Tabla 4: Método COP. Cálculo del factor P.

contaminante hacia el acuífero. A diferencia de los factores C y O que tienen en cuenta características intrínsecas, el factor P contempla aspectos extrínsecos al acuífero, la lluvia. Tanto la cantidad de agua de precipitación como la intensidad son factores influyentes en la protección del acuífero. La cantidad de contaminante que entra al acuífero y la posible dilución antes de alcanzar el nivel piezométrico varía en función de la cantidad de agua de lluvia que produce recarga. Precipitaciones inferiores a 800-1200 mm/año influyen de forma negativa en la vulnerabilidad, ya que la infiltración del contaminante se ve favorecida. Por el contrario, cuando las precipitaciones son superiores a 800-1200 mm/año, se producen procesos importantes de dilución del contaminante potencial y, por tanto, disminuye la vulnerabilidad. La variable PQ (cantidad de lluvia) es la precipitación media de los años húmedos

La variable PI (intensidad de la precipitación) representa la proporción escorrentía/infiltración. Precipitaciones muy intensas favorecen la escorrentía y disminuyen la infiltración. La intensidad (PI) se estima a partir de la precipitación media de los años húmedos y del número de días con lluvia
El valor del factor P es el resultado de la suma de los dos parámetros anteriores:

Índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP

Del producto de los tres factores anteriores, C, O, y P resulta el índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP. Este índice que varía entre 0 y 15, valores próximos a cero indican vulnerabilidad máxima mientras que los valores cercanos a 15 indican mínima vulnerabilidad.

Intérvalos del Índice COP	Clases de vulnerabilidad del acuífero
(0-0,5]	Muy alta
(0,5-1]	Alta
(1-2]	Moderada
(2-4]	Baja
(4-15]	Muy baja

Índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP
Índice COP = C.O.P

Tabla 5: Índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP.

Método DRASTIC reducido

El método DRASTIC (Aller *et al*., 1987), ha sido ampliamente utilizado para la confección de mapas de vulnerabilidad. Considera como premisas: el contaminante se introduce desde la superficie, por infiltración del agua de lluvia, se diluye en el agua y adquiere su misma movilidad, viscosidad y densidad; el área evaluada ocupa una extensión mínima de unas 40 ha (0,4 km^2); los acuíferos son considerados libres o confinados. El método utiliza siete parámetros y su nombre es un acrónimo que responde a las iniciales, en inglés, de las variables utilizadas:

- profundidad del agua subterránea (***D**epth groundwater*);
- recarga del acuífero (*net **R**echarge*)
- material de la zona saturada (*media **A**quifer*)
- tipo de suelo (***S**oil media*)
- pendiente (***T**opography*)
- material de la zona no saturada (***I**mpact of the vadose zone media*)
- conductividad hidráulica del acuífero (*hydraulic **C**onductivity of the aquifer*)

Cada parámetro está dividido en rangos a los cuales se les asigna una puntuación (en una escala del 1 al 10) determinada por su capacidad de atenuar la contaminación. Las variables están ponderadas en función de

su peso en relación con la protección de las aguas subterráneas. El resultado es un índice numérico que varía entre los valores 23 y 226, pero no determina las clases de vulnerabilidad del acuífero sino que realiza una agrupación del índice en 8 intervalos regulares (salvo los extremos).

El método DRASTIC Reducido ha sido desarrollado como resultado de los estudios: "Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir" (DGOHCA e IGME, 2002) y "Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Duero" (DGOHCA y CEDEX, 2002). Simplifica los factores del método original (DRASTIC, Aller *et al.,* 1987) a cuatro: suelo vegetal (S), litología de la zona no saturada (L), espesor de la zona no saturada (E) y recarga neta (R).

La reducción de los siete parámetros originales en DRASTIC a cuatro (método DRASTIC Reducido) permite evitar la redundancia derivada de la utilización de información común para la elaboración de los distintos mapas temáticos, por ejemplo, entre el factor naturaleza del acuífero y litología de la zona no saturada. Esta reducción y simplificación del número de factores considerados resulta aconsejable, no sólo para evitar la redundancia sino también para proporcionar mayor sencillez al método, cuando se trata de estudiar cuencas de gran tamaño, donde una parte importante de la información no está generalmente disponible o no es fácilmente estimable. Por otro lado, la utilización de un SIG en la creación de los mapas de vulnerabilidad permite crear mapas agregados según la combinación de capas temáticas representativas de los factores elegidos, así como actualizar o modificar los datos de dichos factores.

En el método existen parámetros que están condicionados por elementos externos al acuífero, como la recarga y el espesor de la zona no saturada que dependen de la precipitación, incluso el segundo de ellos depende de la explotación del acuífero. Se considera que la vulnerabilidad de las masas de agua subterránea debe estar referida al periodo de condiciones más desfavorables, es decir, de mayor vulnerabilidad. De esta manera, las medidas de protección a adoptar por parte de los gestores del territorio serán más adecuadas porque estarían destinadas a la protección del agua en las condiciones más desfavorables. Otra simplificación adoptada es la consideración, únicamente, de los acuíferos superiores a los que se les puede atribuir un régimen hidráulico libre.

La determinación del valor de vulnerabilidad en los distintos ámbitos hidrogeológicos, mediante la aplicación de un índice ponderado, precisa de la asignación de rangos, valores e índices de ponderación.

—Rangos: A cada factor se le ha asignado una serie de intervalos numéricos o rangos, —por ejemplo, tramos de profundidades del nivel piezométrico— o tipos significativos –p.ej. litologías diferentes.
—Valores: Para cada rango se fija un valor, o banda de valores, representativo del ambiente hidrogeológico. El valor está comprendido entre 1 y 10, siendo este último el que indica mayor vulnerabilidad.
—Índice de ponderación o peso: Cada factor se ha evaluado con respecto a la importancia relativa que tiene frente a los otros factores, asignándose finalmente un peso o índice de ponderación comprendido entre 1 y 5, para el cálculo del valor agregado de vulnerabilidad.

(S) Suelo vegetal

Define la porción superior de la zona no saturada, caracterizada por una significativa actividad biológica. A efectos prácticos, pueden considerarse espesores de hasta dos metros. Los aspectos de mayor influencia son: contenido y tipo de arcilla, granulometría y cantidad de materia orgánica. Para valorar su vulnerabilidad en primer lugar hay que considerar las características esenciales de los diferentes tipos de suelos asignando a cada uno de los perfiles un valor (tabla 6).

TIPO DE SUELO	VALOR
Arcilla no expansiva y desagregada	1
Suelo orgánico: Franco-arcillosa	2 3
Franco-limosa Franco	4 5
Franco-arenosa Arcilla expansiva y/o agregada	6 7
Turba Arena	8 9
Grava	10
Delgado o ausente	10

Tabla 6. Método DRASTIC Reducido: Factor S. Tipos de suelos.

Cuando los tipos de suelos se deben valorar en función de su textura, se ha tenido en cuenta el tipo de textura dominante que se describe en las leyendas de los mapas de suelos utilizados en cada Demarcación Hidrográfica y, cuando no se dispone de este dato, se ha considerado la textura dominante de los suelos representados en los diferentes mapas de suelos.

La información que se ha empleado es:

— Cuenca Guadalquivir: Mapa de suelos de Andalucía 1:400.000 publicado en 1989, por la Consejería de Agricultura y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas
— Cuenca Segura: Mapa de suelos de Murcia 1:100.000 (LUCDEME) y Mapa de suelos del IGN 1:1.000.000.
— Cuencas Ebro, Duero, Tajo, Guadiana, Miño-Sil, Cantábrico, Júcar: Mapa de suelos del IGN 1:1.000.000.

En la tabla 7 se indica un ejemplo de las valoraciones DRASTIC efectuadas de los diferentes suelos de los mapas utilizados.

Código	Descripción	Valor
1	ALFISOL, UDALF, HAPLUDALF, EUTRUPT, DYSTRUDEPT	3
40	ARIDISOL, CALCIO, HAPLOCALCID, HAPLARGID	4
42	ARIDISOL, CALCIO, HAPLOCALCID, HAPLARGID	5
62	ENTISOL, AQUENT, EPIAQUENT, EPIAQUEPT	10
83	ENTISOL, ORTHENT,TORRIORTHENT	8
89	ENTISOL, ORTHENT, TORRIORTHENT, HAPLARGID	7
90	ENTISOL, ORTHENT, TORRIORTHENT, HAPLOCALCID	8
180	INCEPTISOL, XEREPT, CALCIXEREPT	5

Tabla 7. Método DRASTIC Reducido: Ejemplo de valoración de suelos.

(L) Litología de la zona no saturada

Refleja, por una parte, las condiciones de flujo que influyen en el tiempo disponible para que los procesos atenuantes actúen, adsorción, reactividad y dispersión, y, por otra, las características del terreno en el cual se producen las modificaciones más importantes del contaminante.

La capa correspondiente a la Litología de la zona no saturada se ha obtenido del Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España a escala 1:200.000 elaborada en el año 2006 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). A partir de éste se aplicaron los siguientes tratamientos para obtener la correspondiente capa temática de vulnerabilidad.

En primer lugar se obtuvo la clasificación del factor Litología de la zona no saturada, basada en la adaptación que el IGME realizó del factor I de DRASTIC en el estudio MOPTMA-CE (1994), en 10 grupos designados con letras (A, B, C, D, E, F, G, H, I y J) y asignó un rango de valores de vulnerabilidad a cada uno de ellos como muestra la tabla 8.

LITOLOGIA DE LA ZNS		
Descripción	**Rango**	**Valor**
A. Arcillas., margas, y limos	1-2	2
B. Esquistos/pizarras	2-5	3
C. calizas y dolomias, yesos	2-7	6
D. Areniscas	4-8	5
E. Alternancia de calizas, areniscas, arcillas, margas, calizas margosas	4-8	5
F. Arenas y gravas con contenido en arcilla	4-8	5
G. Metamo´rficas/ígneas	2-8	4
H. arenas, gravas y conglomerados	6-9	8
I. Basaltos	2-10	9
J. calizas karstificadas	8-10	10

Tabla 8. Método DRASTIC Reducido: Factor L. Asignación de rango y valor a litologías.

Se clasificaron todas las litologías del mapa en los 10 grupos (designados con letras A a la J) por lo que a cada litología se la asignó un rango de vulnerabilidad. La puntuación DRASTIC (valor) para cada litología, dentro del rango de su tipología, se efectuó a partir de los datos de permeabilidad del citado mapa base del IGME.

(E) Espesor de la zona no saturada

Corresponde a la porción de terreno que tendrá que atravesar el contaminante antes de alcanzar la superficie piezométrica en los acuíferos no confinados. En caso de acuíferos multicapa se ha considerado el nivel permeable más superficial, salvo que se traten de pequeños acuíferos colgados. Asimismo, si existe alguna

Tabla 9. Método DRASTIC Reducido: Factor L. Ejemplo de asignación de valores a litologías

FH	Descripcion	Permeabilidad	Grupo	Rango	Valor
1	Rocas básicas metamorfizadas (metabasitas, anfibolitas, serpentinitas	BAJA	G	2-8	3
16	Esquistos negros,pizarras, cuarcitas negras, migmatitas, anfibolitas, paragneises. Serie Negra	MUY BAJA	B	2-5	2
55	Calizas bioclásticas amarillentas (C.S. Pablo) y alternacias de calizas y pizarras	MEDIA	E	4-8	5
106	Pizarras, limonitas y cuarcitas	BAJA	B	2-5	3
100	Calizas, Caliza de Puentelles	MUY ALTA	J	9-10	9
703	Gravas, arenas, arcillas y limos (Depósitos de galacis, piedemonte y superficies)	ALTA	F	4-8	7
706	Gravas, arenas, limos (Depósitos de aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los ríos princ.)	MUY ALTA	H	6-9	8
710	Conglomerados, arenas y arcillas	MEDIA	F	4-8	5
1542	Margas	MUY BAJA	A	1-2	1

duda sobre la continuidad y/o naturaleza de los niveles confinantes, se considera el acuífero como libre.

A partir de la profundidad del nivel piezométrico y de la cota de los manantiales se obtiene el mapa de isopiezas. Se ha considerado el nivel piezométrico más alto, momento en que el espesor de la zona no saturada es menor y por lo tanto el acuífero es más vulnerable frente a la contaminación.

El mapa de isoespesores de la zona no saturada se obtiene mediante la diferencia entre el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y el mapa de isopiezas, asignando los valores de la tabla 10. En las zonas impermeables de la masa de agua se ha considerado un espesor de la zona no saturada máximo, equivalente a mínima vulnerabilidad.

Rango	Valor
< 15	10
15-45	9
4,5-9	7
9-15	5
15-23 23-30	3 2
>30	1

Tabla 10. Método DRASTIC Reducido: Factor E. Espesor de la zona no saturada

La información empleada en este estudio para su cálculo es: el Modelo Digital de Elevaciones de España (MDE tamaño de celda 25 × 25); Información sobre manantiales (IGME); Información de piezometría procedente de diferentes fuentes (MARM, IGME, Confederaciones Hidrográficas).

(R) Recarga neta

Contempla la cantidad de agua que podría transportar a los contaminantes hasta el acuífero. Depende de las características climáticas sobre la masa de agua, precipitación y evapotranspiración y de los materiales que constituyen el acuífero, particularmente su permeabilidad que determina la infiltración de la lluvia útil. La capa temática de Recarga se obtiene a partir del mapa de valores medios anuales de infiltración (mm), para toda la superficie de la masa de agua subterránea. La información empleada en el estudio ha sido:

— SIMPA (CEDEX). Se transforma a 25×25 (sin modificar la información), para tener todas las capas temáticas a la misma resolución.
— Se identifican, en la Recarga obtenida de SIMPA, zonas en las que no se ha evaluado la recarga, debido a los límites de las anteriores Unidades Hidrogeológicas. En esas zonas la Recarga se estimará mediante un % de la Lluvia Útil. Para ello en primer lugar calculamos la lluvia útil: LL.U.= PRECIPITACIÓN – ETR. Estos datos se obtienen de las capas previas de la

recarga SIMPA. Para saber qué porcentaje de lluvia útil será Recarga, se tendrá en cuenta la valoración DRASTIC de la litología (tabla 11).

Valor DRASTIC de Litología	RECARGA porcentaje lluvia útil
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
6	60
7	70
8	80
9	90
10	100

Tabla 11: Método DRASTIC Reducido: Factor R. Porcentaje de lluvia útil en cada litología

En las zonas a evaluar se multiplica la capa lluvia útil, por el porcentaje que corresponda a la litología DRASTIC en cada píxel, obteniendo así la "Recarga Calculada" en mm/año. Por último se suman las capas y se clasifican según los rangos de DRASTIC (tabla 12).

RANGO	VALOR
0-51	1
51-102	3
102-178	6
178-254	8
>254	9

Tabla 12: Método DRASTIC Reducido: Factor R.

Índice de vulnerabilidad intrínseca del método DRASTIC Reducido

Para la obtención de los mapas temáticos se utilizó el programa Arcgis 9.2. La elaboración del mapa de vulnerabilidad se realiza a partir de la superposición de distintos mapas o capas temáticas que participan en su cálculo, a cada una de las cuales se le asigna un índice de ponderación. Este tratamiento se realiza a partir de la discretización de las capas vectoriales, convirtiéndolas de ese modo en capas ráster, lo que permitirá aplicar el algoritmo de cálculo de vulnerabilidad a cada una de las celdas en que se ha dividido el territorio.

Finalmente el resultado será un mapa de vulnerabilidad en el que cada celda llevará asociado su índice de vulnerabilidad correspondiente a la suma de los valores de las celdas de cada capa superpuesta multiplicados por el índice de ponderación pertinente.

Los mapas de vulnerabilidad se obtienen mediante la aplicación de la fórmula

$$V = 3S + 4L + 5E + 4R$$

Se ponderan las 4 capas raster temáticas obteniendo una capa de vulnerabilidad cuyos valores están comprendidos entre 16 y 156. (tabla 13).

RANGO	VALOR
16-30	1
30-44	2
44-58	3
58-72	4
72-86	5
86-100	6
100-114	7
114-128	8
128-142	9
142-156	10

Tabla 13: Índice de vulnerabilidad intrínseca del método DRASTIC Reducido.

Presiones en las masas de agua subterránea

Las masas de agua subterránea están sometidas a distintas presiones originadas por fuentes de contaminación, tanto puntuales como difusas. Es preciso efectuar un inventario de estas que incluya la identificación sistematizada de cada actividad, su localización geográfica y su caracterización, lo cual permitirá identificar las zonas donde se encuentran las actividades que pueden producir un deterioro de la calidad de las aguas o determinar la causa de una degradación ya conocida. Cada una de las presiones debe ser evaluada para establecer su capacidad de alterar el estado de las aguas subterráneas.

En la tabla 14 se indican las presiones contempladas en el análisis efectuado en cada demarcación que han sido evaluadas cualitativamente (criterio de experto)

Etapa 1	Vulnerabilidad COP
	Vulnerabilidad DRASTIC reducido
Etapa 1 y Etapa 2 (Evaluación peligrosidad presiones)	Presiones Inf. Art. 5
	M.as. riesgo C. Adic.
	Presiones difusas
	Corine 2000
	SIA regadio
	SIA Difusa, cabezas de ganado (Comarcas)
	Presiones puntuales
	Balasa mineras
	Escombreras
	SIA-EDAR
	SIA Vertidos
	Vert. abast.
	IMPRESS-1 Datagua graveras
	IMPRESS-1 Datagua vertederos
	Industrias IPPC
	Aguas drenajes minas
	Piscifactorias
	Gasolineras
	Presiones planes control Guadalquivir
Etapa 2	Captaciones uso humano
	PP abastecimiento (Aprobados y propuestos)
	PP aguas minerales
	Redes art. 8 MMA
	Piezometría
Etapa 3	Masb con intrusión marina
	Zonas de salvaguarda

Tabla 14. Presiones contempladas en el análisis efectuado en cada demarcación

Criterios hidrogeológicos

Estudio detallado del comportamiento de las masas de agua subterránea mediante análisis de la piezometría y direcciones de flujo. Los mapas de isopiezas permiten conocer la dirección del flujo subterráneo y su relación con respecto a las captaciones de agua subterránea para consumo humano. Como resultado de esta fase se delimitan áreas de influencia a captaciones, con su correspondiente zonificación, con objeto de realizar una mejor caracterización de la masa de agua y centralizar las medidas de protección a establecer.

Hay además otros factores a considerar en una fase posterior de trabajo (figura 6).

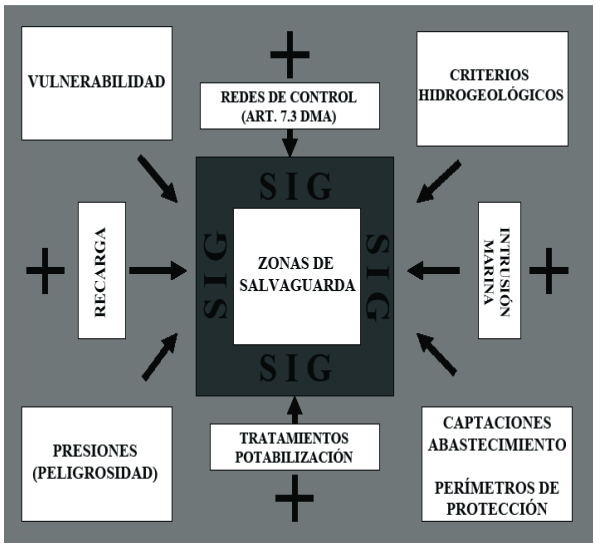


Figura 6. Marco conceptual para la delimitación de zonas de salvaguarda

FASES DEL ESTUDIO

El análisis de los parámetros descritos anteriormente y su tratamiento conjunto mediante la utilización de herramientas de Sistemas de Información Geográfica permitirá establecer una metodología de delimitación de zonas de salvaguarda como figura de protección global de las masas de agua subterráneas empleadas para consumo humano. La metodología propuesta (Martínez-Navarrete *et al*., 2011) consta de tres fases de trabajo sucesivas (figura 7).

En la *primera fase* se analizará, en toda su extensión, cada masa de agua subterránea empleada para consumo humano para identificar qué tipo de zonas, de las cuatro que se propone contemplar (A, B, C, D), pueden diferenciarse en las mismas según el análisis de la vulnerabilidad y las presiones.

Para su delimitación en esta primera fase se emplean los siguientes criterios:

—Zona A: Vulnerabilidad elevada y presiones significativas.
—Zona B: Vulnerabilidad elevada y presiones no significativas
—Zona C: Vulnerabilidad reducida y presiones no significativas
—Zona D: Vulnerabilidad reducida y presiones significativas

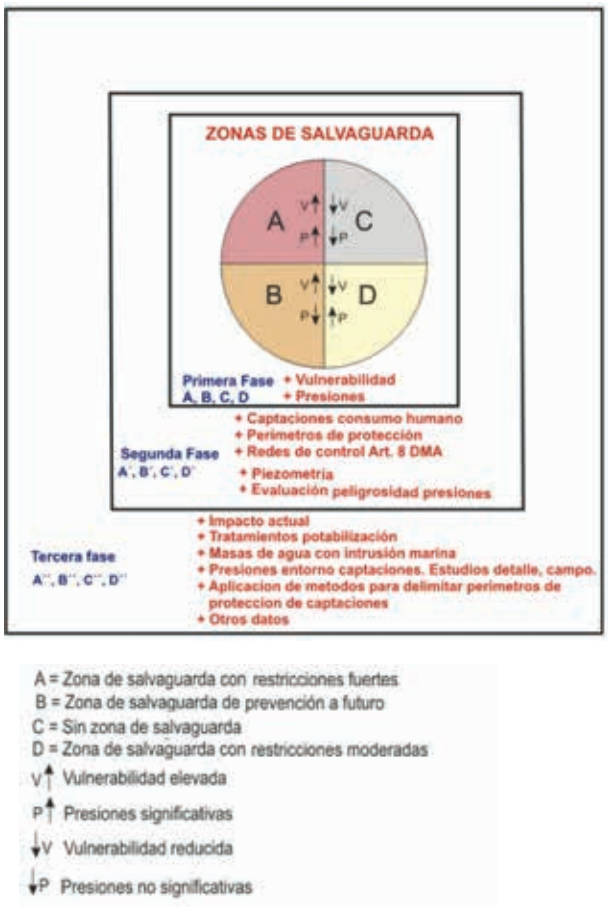


Figura 7. Fases de trabajo para la delimitación de zonas de salvaguarda y regulaciones asociadas en las masas de agua subterránea empleadas para consumo humano para su protección.

Para la delimitación de las zonas de salvaguarda en la primera fase, se agrupan las clases de vulnerabilidad obtenidas por los métodos aplicados en dos grupos de alta y baja vulnerabilidad a los que se les asigna una puntuación de 2 y 1 respectivamente. Esta agrupación se combina con la presencia o ausencia de presiones significativas (tabla 15).

En la *segunda fase* se consideran además, la existencia de captaciones de abastecimiento humano, perímetros de protección tanto de aguas de abastecimiento como de minerales, piezometría y flujos de agua subterránea así como la peligrosidad de las presiones. Esta se evaluará cuantitativamente o cualitativamente (criterio de experto).

El análisis de estos criterios modificará eventualmente las zonas de salvaguarda delimitadas en la primera fase (A, B, C, D) aumentando o reduciendo su extensión o incluso cambiando su catalogación previa (figura 8).

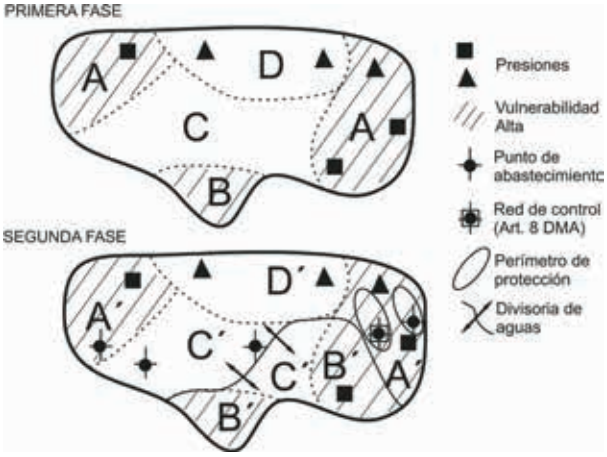


Figura 8. Ejemplos de delimitación de zonas de salvaguarda (Primera y segunda fase)

CRITERIOS PARA LA DELIMITACIÓN INICIAL DE ZONAS DE SALVAGUARDA (PRIMERA FASE)			
VULNERABILIDAD (V)		**PRESIONES (P)**	
Agrupación	Puntuación	Agrupación	Puntuación
COP: Rango entre 0-1 = Vulnerabilidad ALTA	2	Existencia de presiones en el ámbito de la masa de agua subterránea	4
COP: Rango entre 1-15 = Vulnerabilidad BAJA	1		
DRASTIC Reducido: Rango entre 72-156 Vulnerabilidad ALTA	2	No existencia de presiones en el ámbito de la masa de agua subterránea	2
DRASTIC Reducido: Rango entre 16-72 Vulnerabilidad BAJA	1		
Zona A (V + P = 6): Vulnerabilidad elevada y presiones significativas. Zona B (V + P = 5): Vulnerabilidad elevada y presiones no significativas. Zona C (V + P = 4): Vulnerabilidad reducida y presiones no significativas. Zona D (V + P = 3): Vulnerabilidad reducida y presiones significativas.			

Tabla 15. Criterios para la delimitación inicial de zonas de salvaguarda (primera fase)

En el marco de esta Encomienda se han efectuado los trabajos correspondientes a la 1ª y 2ª fase delimitando las zonas A y D de la metodología expuesta e integrándose las B y C en una misma zona (el resto del ámbito de la masa). En trabajos futuros cabe abordar el análisis de los factores indicados en la tercera fase así como una posible diferenciación de las zonas B y C.

En la *tercera fase* se necesita un estudio de detalle en campo de la piezometría y de las presiones en las cercanías de las captaciones. También se debe considerar los fenómenos de intrusión marina en aquellas masas de agua donde se produzcan.

Como validación es necesario analizar el impacto actual en la calidad del agua de consumo humano así como los tratamientos de potabilización existentes. Esta información permitirá contrastar o verificar la obtenida anteriormente respecto al riesgo de contaminación y demás factores empleados. Podrá así detectarse eventualmente zonas con contaminación, aunque el riesgo evaluado fuese bajo, por errores en la estimación de la vulnerabilidad o en el reconocimiento de presiones significativas actuales o producidas en el pasado.

En determinados casos la delimitación efectuada de estas zonas en las masas de agua subterránea debe complementarse con el resultado de la aplicación de otros métodos a escala más detallada o que requieran una información adicional, como estudios hidrogeológicos detallados, modelos matemáticos o métodos analíticos para delimitar perímetros de protección de captaciones.

En España el perímetro de protección de captaciones de agua para consumo humano es una figura ampliamente reflejada en la legislación. Se indican las actividades que pueden ser restringidas o prohibidas y que podrán imponerse condicionamientos en el ámbito del perímetro a las mismas que puedan afectar a las aguas subterráneas. Estos condicionamientos no tienen por qué ser similares en toda la extensión por lo que, aunque la legislación española no define qué zonas deben considerarse ni en base a qué criterios, sí admite en la práctica dividir el perímetro en diversas zonas alrededor de la captación, graduadas de mayor a menor importancia en cuanto a las restricciones de actividad impuesta. Esta zonación y las regulaciones a imponer en su ámbito deben proponerse en cada documento de delimitación del perímetro de protección.

Las características del acuífero captado son importantes para definir qué métodos son aplicables para delimitar las diferentes zonas en que se subdividen los perímetros de protección. En acuíferos con porosidad intergranular pueden utilizarse métodos hidrogeológicos, analíticos y modelos matemáticos cuyas características han sido analizadas en diversos trabajos (Environment Agency, 1998; Lallemand-Barrès y Roux, 1999; Martínez Navarrete y García García, 2003; MIMAM, 2002). En los medios kársticos y fisurados se restringe el número de métodos a aplicar: Los métodos hidrogeológicos (que se pueden complementar con el uso de trazadores) adquieren gran relevancia; los métodos analíticos y los modelos matemáticos deberían ser específicos para esos medios y es muy adecuado el considerar la evolución de vulnerabilidad mediante métodos específicos de estos medios.

La zonación establecida en la esta tercera fase modificará en su caso la previa conforme al análisis de los factores reseñados.

RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología indicada en las masas de agua subterránea de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

En la figura 9 se muestra la distribución espacial de las clases de vulnerabilidad de las masas de agua subterráneas carbonatadas de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España. Las áreas de vulnerabilidad Alta y Muy Alta coinciden, en la mayoría de los casos, con las áreas donde el factor O tiene valores de mayor vulnerabilidad y allí donde existen zonas de infiltración preferencial.

Estas zonas, aunque ocupan menor porcentaje de superficie, son las más importantes desde el punto de vista de la vulnerabilidad a la contaminación y en ellas debe centrarse, preferentemente, la actividad de prevención para evitar el deterioro de la calidad natural del agua.

En la figura 10 se muestra la distribución espacial de las clases de vulnerabilidad de las masas de agua subterráneas detríticas y mixtas aplicando el método DRASTIC Reducido en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

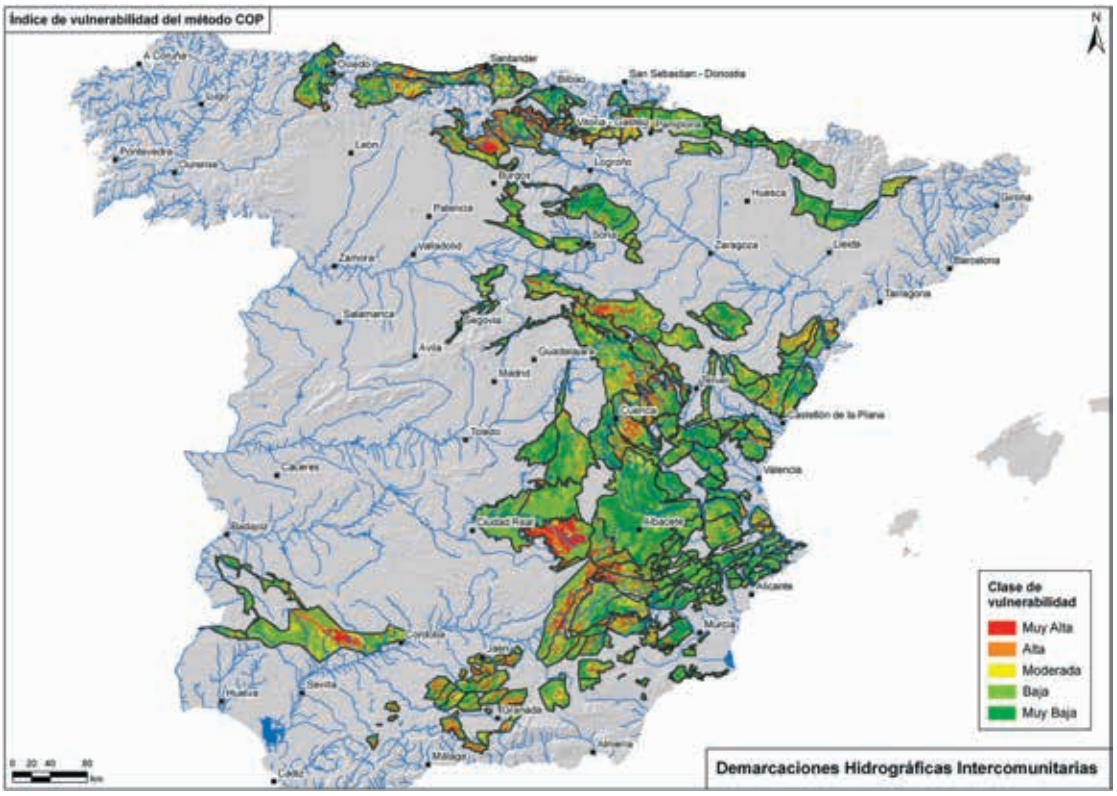


Figura 9: Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea carbonatadas empleando el método COP en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

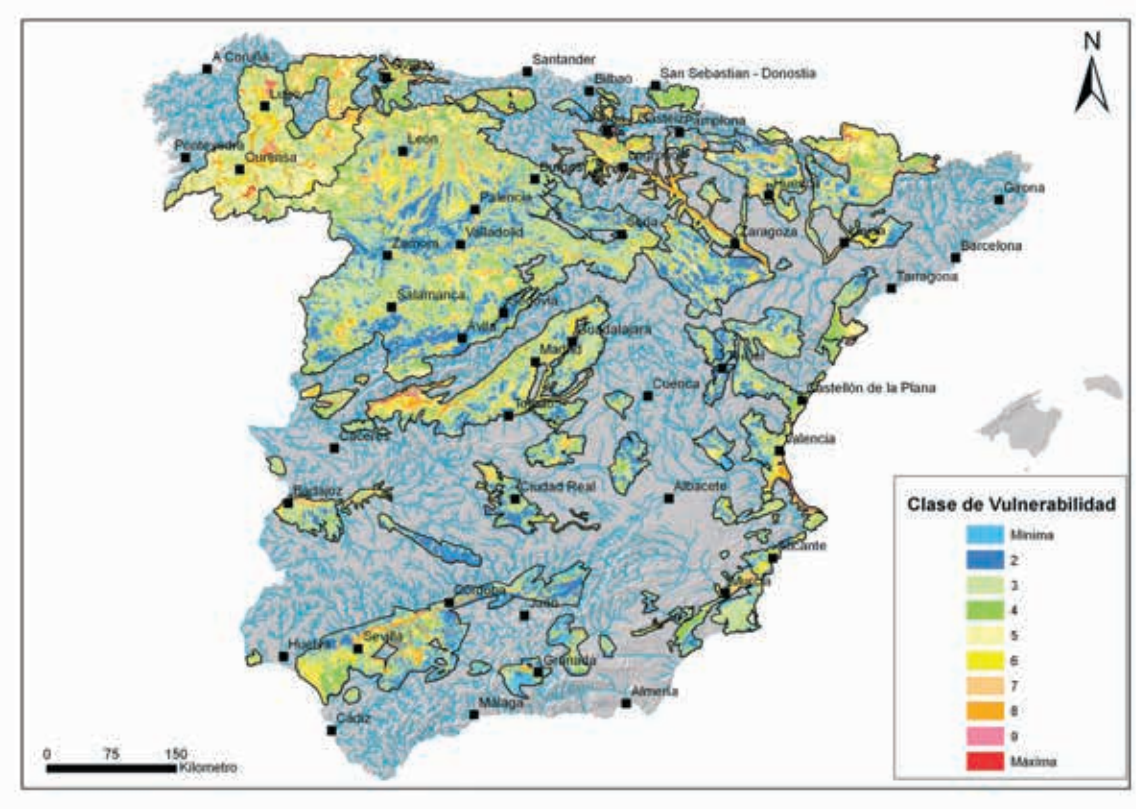


Figura 10: Vulnerabilidad de las masas de agua subterráneas detríticas y mixtas aplicando el método DRASTIC Reducido en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

Los resultados muestran como la mayoría de la extensión de las masas de agua muestran una vulnerabilidad baja-moderada a la contaminación. Allí donde existen marismas y zonas aluviales la vulnerabilidad es alta-muy alta debido al escaso espesor de la zona no saturada. Se observa como este factor junto con la litología ejercen un gran peso en el resultado final obtenido.

Las presiones existentes en las masas de agua subterránea han sido analizadas y evaluadas cualitativamente (criterio de experto), conforme se detalla en el apartado 2.1.3, contemplando la presencia o ausencia de presiones significativas empleando las fuentes de información recogidas en la tabla 14.

En la tabla 16 y figuras 11 y 12 se sintetizan los datos obtenidos en el registro de captaciones y de perímetros de protección siguiendo el procedimiento indicado en la figura 1 y las fuentes de información detalladas en el apartado 2.1.1.

En el mapa mostrado en la figura 11 se puede observar la gran cantidad de captaciones que cumplen con los requisitos establecidos por la DMA para estar en este registro. Debido a ello se hace prácticamente imposible delimitar perímetros de protección a cada una de ellas, mostrándose en la figura 12 los delimitados pendientes en gran parte de una implementación real en el territorio, por lo cual las zona de salvaguarda de la masa de agua es la figura de protección más adecuada para el caso de España**.**

DEMARCACIÓN	CAPTACIONES		PERÍMETROS DE PROTECCIÓN	
	Agua de consumo humano	Aguas minerales	Agua de consumo humano	Aguas minerales
CANTÁBRICO	2640	24	17	9
MIÑO-SIL	905	38	15	14
DUERO	4261	46	16	14
EBRO	4329	103	54	33
GUADALQUIVIR	2834	22	192	13
GUADIANA	2481	5	13	4
JÚCAR	2204	37	97	19
SEGURA	445	5	4	3
TAJO	3144	28	103	13

Tabla 16. Registro de captaciones y perímetros de protección.

En la figura 13 y tabla 17 se muestran las zonas de salvaguarda con restricciones fuertes (A´) y zonas de salvaguarda con restricciones moderadas (D´) obtenidas tras la aplicación de la primera y segunda fase de trabajo de la metodología propuesta integrándose las B y C en una misma zona (el resto del ámbito de la masa). En trabajos futuros cabe abordar el análisis de los factores indicados en la tercera fase así como efectuar una posible diferenciación de las zonas B y C.

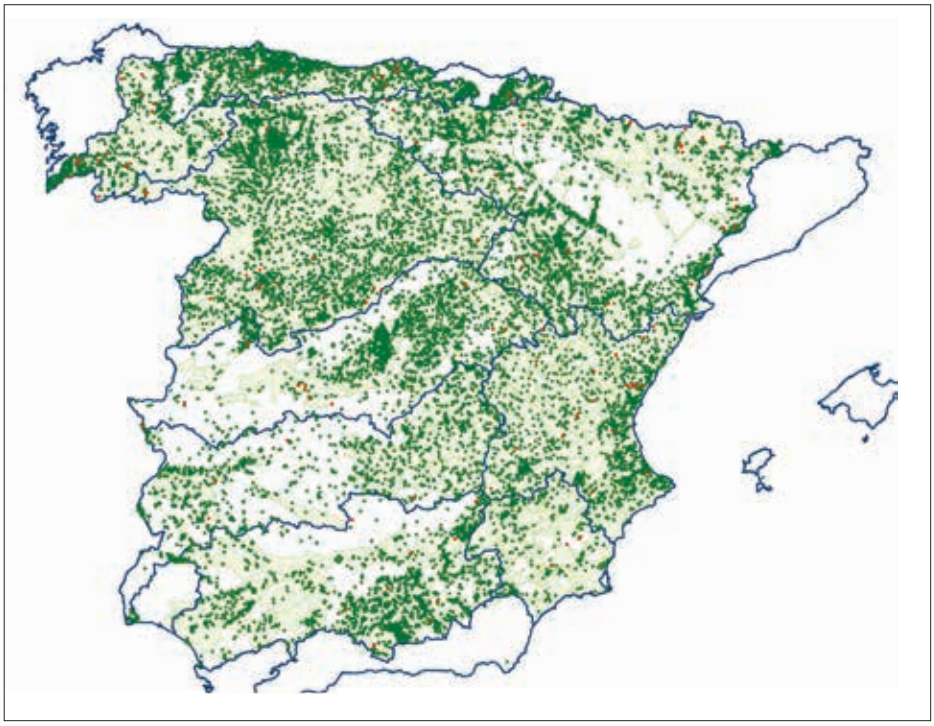


Figura 11. Distribución espacial de captaciones de abastecimiento en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

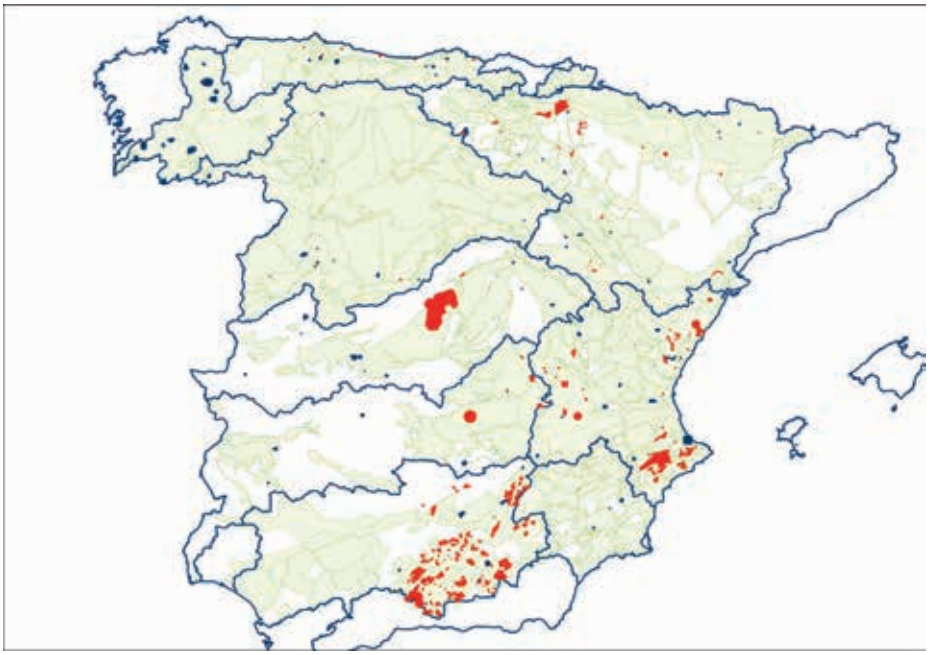


Figura 12. Distribución espacial de perímetros de protección de captaciones en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

DEMARCACIÓN	SUPERFICIE (km ^{2})	PORCENTAJE DE OCUPACIÓN DEL TERRITORIO DE LAS ZONAS DE SALVAGUARDA	
		Zonas de salvaguarda con restricciones fuertes (A´)	Zonas de salvaguarda con restricciones moderadas (D´)
CANTABRICO	20885	1	0,9
MIÑO-SIL	17592	3	0,2
DUERO	78859	9	3
EBRO	85566	6	1
GUADALQUIVIR	57228	8	3
GUADIANA	55388	3	3
JÚCAR	42957	6	5
SEGURA	18897	7	4
TAJO	55764	5	1

Tabla 17. Porcentaje de ocupación del territorio de las zonas de salvaguarda con restricciones fuertes (A´) y Zonas de salvaguarda con restricciones moderadas (D´)

Los resultados obtenidos permiten focalizar las medidas de protección haciendo compatible la salvaguarda de la calidad del agua subterránea destinada al consumo humano con la actividad socioeconómica. Cabe indicar que las demarcaciones del Duero y Guadalquivir son las que tienen mayor extensión de su territorio delimitado como de restricciones fuertes (Tipo A). En el Duero se debe a la influencia de los materiales aluviales con alta vulnerabilidad junto al efecto de los otros factores contemplados. En el caso del Guadalquivir al análisis general de riesgo de contaminación se le suma la existencia de un número significativo de estudios de detalle en el entorno de las captaciones en las que se han delimitado perímetros de protección.

CONSIDERACIONES FINALES

La protección del agua subterránea empleada para consumo humano es uno de los objetivos medio ambientales prioritarios de la DMA. Por ello, es necesario establecer medidas de protección adecuadas a los diferentes medios. Con esta finalidad se han delimitado en mucho países de la Unión Europea perímetros de protección

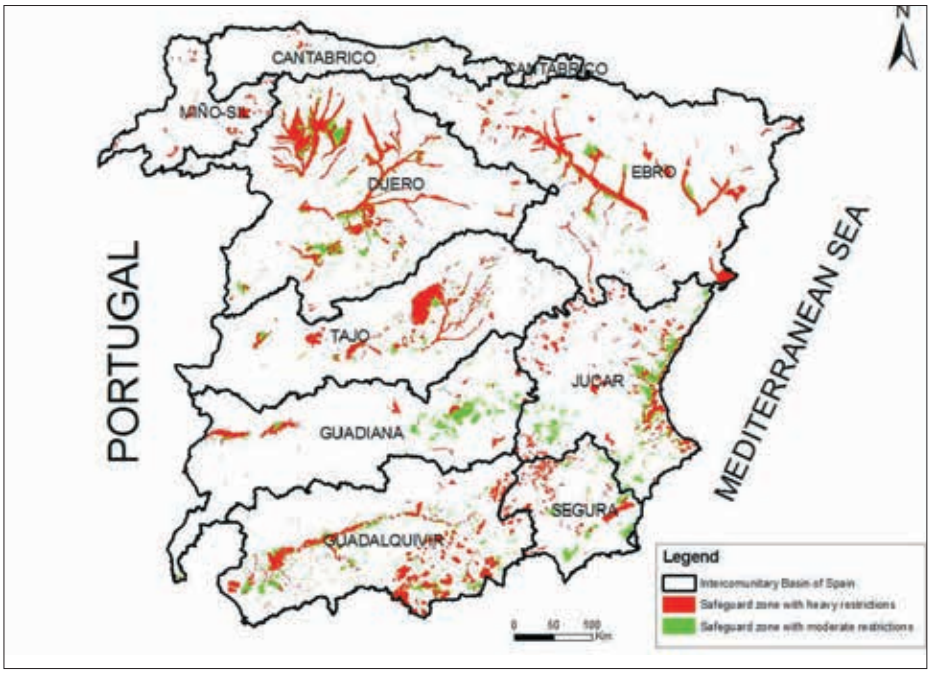


Figura 13. Zonas de salvaguarda con restricciones fuertes (A´), en color rojo y Zonas de salvaguarda con restricciones moderadas (D´), en color verde, en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

para proteger a las captaciones destinadas al consumo humano y se ha evaluado la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para proteger a las masas de agua subterránea.

Las zonas de salvaguarda son áreas dentro de las masas de agua subterráneas destinadas al consumo humano, que la DMA contempla establecer de modo opcional, donde se focalizan las medidas necesarias para conservar la calidad del agua subterránea según los requerimientos de la DMA, equivalen por tanto a perímetros de protección de masas de agua subterránea. Su delimitación es una medida muy recomendable para alcanzar los requerimientos de las aguas de consumo humano ya que permite centrar las medidas de protección, especialmente necesarias en masas de agua de gran tamaño.

En este trabajo definimos una metodología para la delimitación de zonas de salvaguarda en las masas de agua subterráneas intercomunitarias destinadas al consumo humano que considera específicamente el riesgo de contaminación. Para ello contempla, entre otros parámetros, la distribución de captaciones de agua para consumo humano, evaluación de la vulnerabilidad, evaluación de las presiones, criterios hidrogeológicos y los perímetros de protección de captaciones existentes.

La metodología propuesta está dividida en tres fases descritas en el apartado metodológico, de las cuales han sido desarrolladas en este trabajo las dos primeras.

En la primera fase se analiza en toda su extensión, cada masa de agua subterránea empleada para consumo humano para identificar qué tipo de zonas, de las cuatro que se propone contemplar (Zona A: Vulnerabilidad elevada y presiones significativas; Zona B: Vulnerabilidad elevada y presiones no significativas; Zona C: Vulnerabilidad reducida y presiones no significativas; Zona D: Vulnerabilidad reducida y presiones significativas), pueden diferenciarse en las mismas según el análisis de la vulnerabilidad y las presiones.

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para acuíferos por porosidad intergranular se ha obtenido empleando el método DRASTIC Reducido. En los acuíferos carbonatados, se ha utilizado el método COP específico de este medio. Se han obtenido en ambos casos los resultados requeridos respecto a la escala de trabajo empleada para definir las zonas de salvaguarda de todas las masas de agua subterránea intercomunitarias.

En relación a las presiones, los resultados presentados evalúan la existencia o ausencia de las mismas de un modo cualitativo, por lo que sería necesario cuantificar la peligrosidad de las presiones mediante trabajos de campo a detalle.

En la segunda fase se consideran además, la existencia de captaciones de abastecimiento humano, perímetros de protección tanto de aguas de abastecimiento como de minerales, piezometría y flujos de agua subterránea así como la peligrosidad de las presiones modificando en su caso las zonas delimitadas en la fase precedente.

De los resultados obtenidos es necesario destacar el carácter dinámico del registro de captaciones y de perímetros de protección, ya que lo que se presenta es un reflejo de la situación actual y debido a su incidencia en la delimitación de zonas de salvaguarda es mantener activo dicho registro.

Los resultados obtenidos permiten focalizar las medidas de protección en las zonas de salvaguarda con restricciones fuertes (A´) y zonas de salvaguarda con restricciones moderadas (D´), que ocupan una extensión reducida del territorio, haciendo así compatible la salvaguarda de la calidad del agua subterránea destinada al consumo humano con la actividad socioeconómica.

En la tercera fase se efectúan estudios de detalle en campo de la piezometría y de las presiones en las cercanías de las captaciones y fenómenos de intrusión marina en aquellas masas de agua donde se produzcan, se analiza el impacto actual en la calidad del agua de consumo humano así como los tratamientos de potabilización existentes. En determinados casos la delimitación efectuada de estas zonas en las masas de agua subterránea debe complementarse con el resultado de la aplicación de otros métodos a escala más detallada o que requieran una información adicional, como estudios hidrogeológicos detallados, modelos matemáticos o métodos analíticos para delimitar perímetros de protección de captaciones.

El uso de herramientas de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica ha permitido trabajar con los distintos factores a considerar en la metodología propuesta.

Las medidas de protección tienen que integrarse en el programa de medidas e incluirse en el Plan Hidrológico de cada demarcación. El traslado a la normativa urbanística de las restricciones a diversas actividades que conlleven se efectuará a través del Comité de Autoridades Competentes que incluye a las Confederaciones, Comunidades Autónomas y Diputaciones entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aller L., Bennett T., Leer J., Petty J. y Hacket G. (1987). DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Oklahoma, 455 p.

Andreo B., Goldscheider N., Vadillo I., Vías J.M., Neukum C., Brechenmacher, J. Carrasco F., Hötzl H., Jiménez P., Perles M.J. y M. Sinreich. (2006). Karst groundwater protection. Application of a Pan-European Approach in the pilot site of Sierra de Líbar (South Spain). Science of the Total Environment, 357(1-3), 54-73.

Baldi, E., Guastaldi, E. y Rossetto, R. (2009). Evaluation of intrinsic groundwater vulnerability to pollution: COP method for pilot area of Carrara hydrogeological system (Northern Tuscany, Italy). General Assembly 2009. European Geosciences Union, Vienna. Vol. 11, EGU2009-10405-2, 2009

Civita, M. and de Maio, M. (1997). SINTACS Un sistema paramétrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli all´inquinamento. Metodologia e automazione. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.

DGOHCA e IGME (2002). Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir, 120 pp..

DGOHCA y CEDEX (2002). Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Duero, 69 pp..

Doerfliger, N. (1996). Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis on a multiattribute vulnerability mapping (EPIK method). Tesis doctoral Univ. de Neuchâtel (Suiza), 308 pp

Environment Agency (1998). Policy and practice for the protection of groundwater. The Stationery Office, 57 pág.

European Commission. (2006). Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No 15. Guidance on Groundwater monitoring. European Communities, 50 p.

Foster S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W y Van Waegeningh H (Ed.). Vulnerability of soil and groundwater to pollution 38:69–86.

Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. and Höltz, H. (2000). The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift fur angewandte geologie., 46. 3: 157-166.

Lallemand–Barrès A. et Roux J.C. (1999). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée a la consommation humaine. Éditions du BRGM, 334 p.

Margat, J. and Suasis-Parascandola, M.F. (1987). Mapping the vulnerability of groundwater to pollution, some lessons from experience in Fracne.

I : W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutans, The Hague, 433-436.

Martínez Navarrete C. y García García A. (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. IGME, 282 p.

Martínez-Navarrete, C. , Jiménez-Madrid, A. , Sánchez-Navarro, I. , Carrasco-Cantos, F. and Moreno-Merino, L.(2011) 'Conceptual Framework for Protecting Groundwater Quality', International Journal of Water Resources Development, 27: 1, 227-243

MIMAM (2002). Guía para la delimitación e implantación de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento público, 112 pág.

MOPTMA-CE (1994): Inventario de recursos de agua subterránea en España. 2ª Fase: Vulnerabilidad de acuíferos. Cuenca del Guadalquivir.

Ravbar, N. (2007). The protection of karst waters : a comprehensive Slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping. ZRC Publishing, Ljubljana, 254 pp.

Vías J.M., Andreo B., Perles M.J., Carrasco F., Vadillo I. y Jiménez P. (2002). Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. In: Carrasco, F.; Durán, J. J. and Andreo, B. (ed). Karst and environment, 75-83.

Vías, J.M, Andreo, B. y Perles, M.J. (2005). A comparative study of tour schemes for groundwater vulnerability zapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology*, 47 (4), 586-595

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. y Jiménez, P. (2006a). Proposed method for groundwater vulnerability zapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14, 912-925.

Vías, J.M., Neukum, Ch., Hötzl, H. y Andreo, B. (2006b). Statistical comparison and control of different vulnerability mapping methods in Bauschlotter Platte aquifer (Germany). Proceedings of 8th Conference on Limestone Hydrogeology. Neuchatel, Sept 2006. 263-266.

Vrba, J. and Civita, M. (1994). Assessment of groundwater vulnerability. In: J. Vrba and A. Zaporozec (Editors), Guidebook on mapping Groundwater vulnerability. IAH, Verlag Heinz Heise, Hannover, 31-48.

Zwahlen F. (ed.) (2004). COST Action 620. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers. Informe final COST Action 620. Brüssel, Luxemburg, European Commission, 297 pág.

DETERMINACIÓN DE TENDENCIAS Y DE PUNTOS DE PARTIDA PARA LA INVERSIÓN DE TENDENCIAS

Juan Antonio Luque Espinar
Juan Grima Olmedo

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 10 *Apoyo a la implementación de la Directiva de protección de aguas subterráneas. Determinación de tendencias y de puntos de partida para la inversión de tendencias* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Director de la actividad

Juan Antonio Luque Espinar. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España

Juan Grima Olmedo
Jorge Jiménez Sánchez
María Cristina Jiménez Escamilla
Luis Miguel Hueso Quesada
María Dolores Gómez-Escalonilla Sánchez

Dirección General del Agua:

Manuel Varela Sánchez
Isaac Sánchez Navarro

DETERMINACIÓN DE TENDENCIAS Y DE PUNTOS DE PARTIDA PARA LA INVERSIÓN DE TENDENCIAS

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se muestra el análisis de los datos de las redes intercuenca con el fin de determinar las tendencias y su punto de inversión de acuerdo con las directrices europeas. En paralelo, se desarrolló una propuesta de análisis de las series temporales con el fin de proporcionar mayor robustez y rigor al análisis de la información proporcionada por las redes de observación debido a que, tras un análisis crítico de la metodología aconsejada por la Directiva de Aguas Subterráneas y del comportamiento de los parámetros registrados se concluyó que era necesario un nuevo enfoque. Como es conocido, la Directiva de Aguas Subterráneas 2006/118/CE se ha desarrollado en respuesta al artículo 17 de la Directiva Marco del Agua y su principal objetivo es proteger las aguas subterráneas mediante la prevención o la limitación de la entrada de sustancias contaminantes. Puesto que las aguas subterráneas son un elemento esencial del ciclo hidrológico, su deterioro afecta directamente a los ecosistemas acuáticos y terrestres. Es necesario, por lo tanto, evaluar el estado actual de las aguas subterráneas por medio de métodos científicos robustos que permitan obtener resultados comparables. Además, la Directiva sugiere que se aplique la regresión lineal como metodología estándar. No obstante, antes de aplicar cualquier técnica paramétrica, se deberían realizar una serie de comprobaciones para evitar resultados erróneos. Por otra parte, aunque los supuestos de aplicación de la regresión lineal se cumplan, se debe hacer un análisis previo de los datos para detectar comportamientos o tendencias en los mismos. Igualmente, según la Directiva, la determinación de tendencias debe comenzar con el cálculo del baseline, que se define como la media de los valores de los años 2007 y 2008. Este proceso comienza con la representación gráfica y el análisis exploratorio de los datos. Cuando se dispone de un período donde el comportamiento de las aguas subterráneas es homogéneo, éste se puede utilizar como referencia para la elaboración del Baseline actualizado. En el caso de que no haya datos históricos, habría que actualizar el Baseline. En la segunda etapa de este proceso, se debe realizar un control para detectar si está produciendo algún deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. En este sentido, el método que se utilice debería tener la capacidad suficiente para detectar pequeños cambios en la calidad, lo que dependerá del tamaño de la muestra de datos empleada para definir el baseline. Así, la elaboración de un límite de confianza o de los límites de predicción, en combinación con el análisis de tendencias, es el procedimiento recomendado para la gestión de masas de agua subterránea. Por último, si los resultados muestran un impacto estadísticamente significativo en la calidad de las aguas subterráneas, se deberán analizar los factores que puedan influir en la variabilidad natural antes de declarar una masa de agua subterránea en mal estado químico. Por tanto, teniendo en cuenta todos estos aspectos, se justifica la nueva propuesta que se presenta en este trabajo.

Desde el punto de vista de la información disponible, el problema fundamental que se ha presentado es la escasez general de datos en los puntos de control de calidad por lo que no se ha podido realizar un análisis robusto desde un punto de vista estadístico. Adicionalmente, desde el punto de vista de la Directiva, el periodo de referencia 2007-2008 es el punto de partida para la determinación de tendencias y su inversión. En este sentido, a la escasez general de datos (entre 2 y 4 por estación) se suma el hecho de que la información anterior al periodo citado tiene una validez relativa y en muchos casos, además, de escasa utilidad debido a la considerable discontinuidad temporal que tienen los datos.

El trabajo aquí expuesto se ha estructurado en dos partes. En la primera se expone la metodología desarrollada para el análisis de series y en segundo lugar el análisis de la información de acuerdo con la Directiva y el Documento Guía.

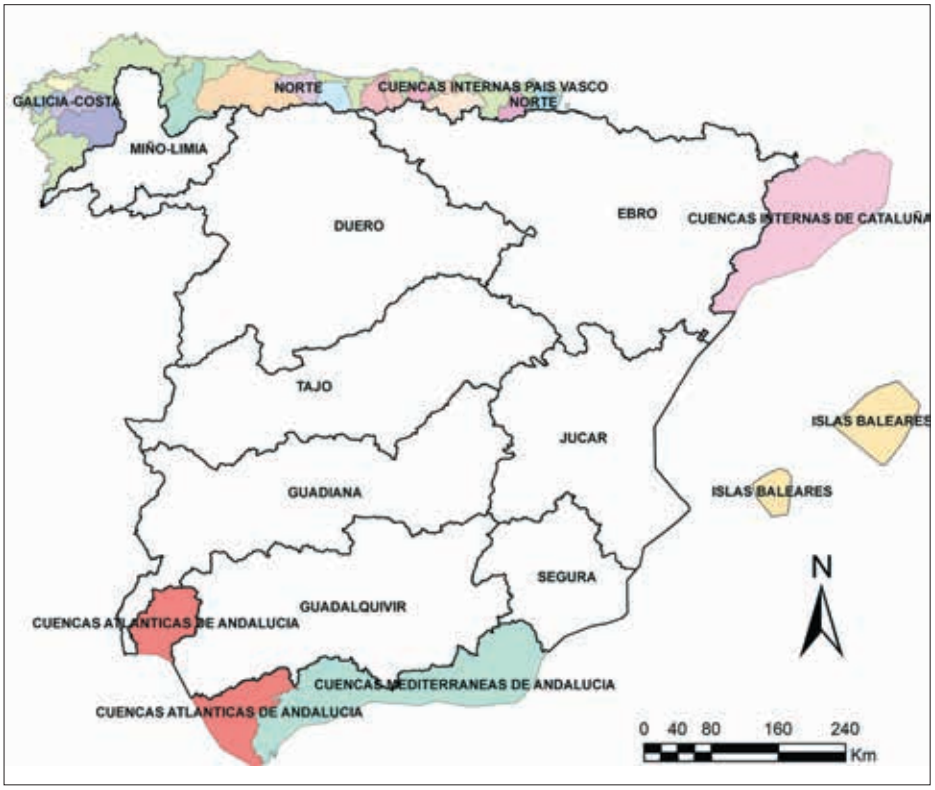


Figura 1. Cuencas analizadas en color blanco.

PROPUESTA METODOLÓGICA

El procedimiento seguido para la identificación de tendencias al aumento de la contaminación en las masas de agua subterráneas y de su inversión está basado en lo establecido por la Orden ARM/2656/2008 Instrucción de planificación hidrológica y Real Decreto 1514/2009, que transponen lo establecido en el artículo 5 y Anexo IV de la Directiva 2006/118/CE relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, así como en los criterios y procedimientos descritos en el Documento Guía de la Comisión Europea nº 18 "Guidance on Groundwater Chemical Status and Trend Assessment". La versión definitiva de dicha guía fue remitida por la Comisión Europea en febrero de 2009.

Las cuencas estudiadas han sido Duero, Ebro, Guadalquivir, Guadiana, Júcar, Miño-Sil, Segura y Tajo. La base de datos proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, presenta más de 50.000 registros, con 74 parámetros diferentes para su tratamiento y casi 1.300 estaciones de control repartidas entre las ocho cuencas estudiadas.

El trabajo se ha centrado en las estaciones que presentan parámetros que en algún momento han superado el 75% de la norma de calidad o del valor umbral definido, además de valorar su evolución temporal teniendo en cuenta para ello la representación gráfica de los datos. De esta manera se ha conseguido reducir la cantidad de información hasta los 13.774 registros.

De acuerdo con la Directiva de protección de aguas subterráneas, (apartado 2) el procedimiento para determinar tendencias deberá ser el siguiente:

— se elegirán frecuencias y puntos de control que sean suficientes para:

Proporcionar la información necesaria para garantizar que dichas tendencias al aumento puedan distinguirse de las variaciones naturales con un nivel adecuado de fiabilidad y precisión;

Permitir que dichas tendencias al aumento se determinen con tiempo suficiente para que puedan aplicarse medidas con objeto de impedir, o cuando menos mitigar en la medida de lo posible, cambios adversos en la calidad del agua que sean significativos para el medio ambiente. Esta determinación se llevará a cabo, en la medida de lo posible, y teniendo en cuenta los datos existentes, por primera vez en 2009 mediante la revisión de los planes hidrológicos de cuenca;

Tener en cuenta las características temporales, físicas y químicas, de la masa de agua subterránea, incluidas las condiciones de flujo y los índices de re-

carga del agua subterránea, así como el tiempo que ésta tarda en atravesar el suelo o el subsuelo;
- se utilizarán métodos de control y análisis acordes con los principios internacionales de control de la calidad, para garantizar que se proporcionen datos de calidad científica equivalente;
- la evaluación se basará en un método estadístico, como el análisis de regresión, para analizar las tendencias en series temporales en estaciones de control concretas;
- con el fin de evitar sesgos en la determinación de las tendencias, todas las mediciones por debajo del límite de cuantificación se cifrarán en la mitad del valor del límite de cuantificación más alto registrado durante el período, con excepción de la totalidad de los plaguicidas.

Además, en el apartado 3 indica que en la determinación de tendencias significativas y sostenidas al aumento en las concentraciones de sustancias en las masas de agua subterránea, de origen natural o como resultado de la actividad humana, se tendrán en cuenta los niveles básicos y, cuando se disponga de ellos, los datos recogidos con anterioridad al comienzo del programa de control, con objeto de informar acerca de la determinación de tendencias en el primer plan hidrológico de cuenca que se apruebe o revise.

De acuerdo con lo mencionado, en el análisis realizado se han tenido en cuenta todos los aspectos aludidos desde el punto de vista numérico. No se han valorado aspectos constructivos y localización de los puntos de control por que quedaban fuera del ámbito de este proyecto de acuerdo con las pautas marcadas.

PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO PROPUESTO

La Directiva 2006/118/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, establece criterios de calidad en cuanto a la evaluación del estado químico de las aguas subterráneas y la identificación e inversión de las tendencias significativas y sostenidas al aumento de las concentraciones de contaminantes. Los Estados miembros deben establecer las normas ("valores umbral") al nivel más adecuado y deberán tener en cuenta las condiciones locales o regionales.

Uno de los ejes fundamentales sobre los que bascula la normativa es el uso sostenible del recurso, lo cual, dado el incremento constante de la demanda, plantea una serie de nuevos retos tales como la gestión efectiva y sostenible de los acuíferos, la necesidad de conseguir un buen estado ecológico de todas las aguas a finales de 2015, la depuración de las aguas residuales y el mantenimiento de la funcionalidad de los ecosistemas con respecto al suelo y al agua subterránea entre otros.

En el Anexo IV (Parte A, apartado 3) de la Directiva 2006/118/CE se fijan los niveles básicos como el punto de partida para la determinación de tendencias significativas y sostenidas al aumento en las concentraciones de sustancias que se produzcan naturalmente y como resultado de actividades humanas. Dichos niveles básicos se definen como el valor medio medido por lo menos durante los años de referencia 2007 y 2008. Igualmente, se indica la posibilidad de utilización, cuando se disponga de ellos, de los datos recabados con anterioridad al comienzo del programa de control.

En cuanto a la metodología científica que debe ser utilizada para la determinación de tendencias en series temporales en puntos de control concretos, los únicos requerimientos se refieren a la necesidad de que la evaluación se base en métodos estadísticos, como el análisis de regresión, de forma que se proporcionen datos de calidad científica equivalente que puedan compararse.

Una de las primeras consideraciones a realizar de forma previa a la aplicación de métodos estandarizados es la influencia de la cantidad de información existente sobre el diseño de sistemas de toma de decisión referentes al estado químico de una masa de agua subterránea. En el caso de disponer de gran cantidad de información (registros históricos de datos) existe el riesgo de analizar series temporales en las que se haya producido más de una tendencia. En ese caso los resultados podrían verse afectados de forma significativa, por ejemplo, por los primeros años de la serie, lo cual entraría en contradicción con las disposiciones de la Directiva anteriormente citadas, mientras que en el caso de utilizar series demasiado cortas la potencia de las pruebas estadísticas para el análisis de tendencias podría verse seriamente comprometida.

Objetivos del análisis y metodología estadística

El objetivo fundamental consiste en el diseño y desarrollo de un procedimiento que sirva para la toma de decisiones sobre la clasificación del estado químico de una masa de agua subterránea y la existencia en la misma de incrementos significativos en la concentración de un parámetro químico determinado.

Dada la subjetividad del término "significativo", y con objeto de dotar al método de una base científica sólida, se aplicarán técnicas estadísticas basadas en contrastes de hipótesis, mediante los cuales se definirán de forma previa los incrementos estadísticamente significativos.

El resultado de un contraste estadístico de hipótesis puede implicar la clasificación de una masa de agua subterránea como en mal estado químico desde el punto de vista de la Directiva de Aguas Subterráneas. Por ello es conveniente conocer el significado de las pruebas que se realicen sobre los datos. Los dos resultados de interés en el análisis de una masa de agua subterránea son tanto el empeoramiento significativo de la calidad de la masa como la existencia de tendencias significativas al aumento (o al descenso en el caso de acciones de recuperación).

Para la detección de empeoramientos significativos es necesario que se produzca un aumento en la concentración del parámetro analizado. El aumento debe ser superior al que podría ocurrir por azar, para lo cual es necesario conocer la variabilidad de los datos. La comparación puede realizarse tanto con valores de fondo calculados a partir de los datos como con estándares de calidad (fijados a partir de un subconjunto de los datos o establecidos por las autoridades ambientales).

Por último, dada la potencia de los métodos paramétricos en comparación con los no paramétricos se propone la utilización de gráficos de Shewhart o CUSUM para la declaración de un empeoramiento significativo una vez que se superen sus respectivos límites de control. En el caso de que la población no siga una distribución normal, se utilizará un procedimiento de remuestreo o bootstrap para el cálculo de los límites de control.

Para aplicar cualquier análisis estadístico, incluida la regresión lineal, es necesario realizar una serie de comprobaciones, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Verificación de normalidad en la distribución de los residuos del ajuste de los datos de concentración del parámetro químico analizado. En caso contrario es necesario realizar una transformación de los mismos o bien utilizar métodos no paramétricos.
- Realizar las modificaciones necesarias en los tests de hipótesis para tomar en consideración los valores por debajo del límite de detección y/o cuantificación.
- Considerar las posibles causas de variaciones estacionales en los datos. Entre ellas se encuentran las fluctuaciones estacionales, la autocorrelación o la existencia de tendencias temporales. La eliminación de la variación estacional puede ser un requisito previo para la realización de un test de tendencia, que deberá ser realizado sobre los residuos del ajuste.

Los tests utilizados para la detección de tendencias al aumento implican generalmente la comparación de un único conjunto de datos con un valor fijado o una concentración de fondo. En cambio, cuando el objetivo del análisis es la verificación de inversión de tendencias, es necesario demostrar la existencia de una pendiente negativa en los valores de concentración.

Análisis exploratorio de datos

De forma previa a la realización de cualquier análisis estadístico es necesario examinar los datos con objeto de investigar la calidad de los mismos y buscar posibles estructuras o patrones sin realizar ninguna hipótesis matemática acerca de la estructura de las observaciones.

Los gráficos son una herramienta esencial para explorar y comprender pautas en cualquier conjunto de datos. La representación gráfica de los mismos proporciona información adicional a la que puede obtenerse mediante una prueba estadística formal. Por ejemplo, mediante la realización de un contraste de normalidad de Shapiro-Wilk puede concluirse que los datos no están normalmente distribuidos. Mediante la elaboración de un gráfico de probabilidad normal o de un histograma de los datos no sólo puede confirmarse esta conclusión sino que se obtiene información gráfica sobre los motivos por los cuales no puede aceptarse la hipótesis de normalidad (sesgo acusado, bimodalidad, un valor extremo aislado, etc.).

Entre las principales técnicas de análisis cabe destacar las siguientes:

Gráficos de series temporales

Se define una serie como un conjunto de datos, correspondientes a la evolución de concentraciones de un determinado parámetro, ordenados en el tiempo. Los datos son de la forma (yt, t) donde:

yt: Variable endógena o dependiente
t: Variable exógena o independiente

Sin embargo, sólo hay una variable a estudiar que es yt. En el análisis de regresión se analizan dos variables (se

explica una variable a partir de la otra). Aquí sólo hay una variable, la cual se explica a partir de su pasado histórico.

La escala del eje vertical puede influir sobre la apreciación de las tendencias. En ese sentido, las escalas amplias pueden ponen de manifiesto más fácilmente tendencias a largo plazo mientras que las escalas pequeñas enfatizan las tendencias a corto plazo.

Gráficos de caja

Este tipo de gráficos estadísticos no es más que una representación gráfica de un conjunto de datos que brinda una impresión visual de la localización, dispersión, grado y dirección del sesgo. En el caso de una distribución que se aproxima a la forma de campana de Gauss, el gráfico de caja también permite identificar los valores atípicos.

Histogramas

Es una representación visual de los datos clasificados en una serie de grupos. Proporciona una herramienta para identificar la distribución subyacente de los datos. La impresión visual obtenida depende del número de grupos seleccionado. A mayor número de grupos, mayor detalle, mientras que un número pequeño aumenta el suavizado. En el caso de medidas por debajo del límite de detección, deben utilizarse las cantidades indicadas por el laboratorio, ya que no pueden incluirse dichas medidas en el histograma.

Técnicas de suavizado de datos

Los cambios en la calidad del agua pueden producirse de forma abrupta o bien pueden realizarse de forma gradual en el tiempo. Por ello, el examen visual de la serie al que se añade un suavizado de los datos tipo LOESS proporciona una indicación de cambios de tendencia a corto plazo, que pueden enmascarar de alguna forma la tendencia total de la serie.

Ajuste de un modelo de regresión simple a los datos

Cuando se investiga el posible aumento en la concentración de un determinado contaminante en una masa de agua subterránea, es necesario estudiar la relación entre la variable independiente o predictora (tiempo) y la variable dependiente o respuesta (concentración). Dicha relación, caso de existir, puede ser de tipo lineal o no, por lo que la aplicación de técnicas de regresión lineal sin comprobaciones previas puede ser una herramienta inapropiada para su análisis.

Cuando la concentración aumenta o disminuye a medida que transcurre el tiempo, se dice que existe una relación monótona (creciente o decreciente) entre ambas variables. Existen varios procedimientos para la detección de tales correlaciones, entre los que cabe citar la *Tau de Kendall*. Al ser un procedimiento basado en rangos, es resistente a la existencia de valores anómalos y permite el manejo de valores por debajo del límite de detección.

En el caso de que la variable respuesta dependa linealmente de la variable predictora se dice que existe una relación lineal entre ambas variables. La medida de correlación más ampliamente empleada es la *r de Pearson*, para lo cual es necesario asumir que los datos siguen una distribución normal. Cuando existe correlación lineal puede iniciarse el estudio estadístico por medio de la regresión lineal. Consiste en la elaboración de un modelo de la relación entre una o más variables independientes y la variable dependiente por medio de una función de mínimos cuadrados.

Esta función es una combinación lineal de una serie de parámetros, denominados coeficientes de la regresión. El modelo es de la forma siguiente:

$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \ldots$, donde X_i son las *n* variables predictoras o explicativas e *Y* es la variable dependiente o respuesta.

En el caso particular de que sólo exista una variable independiente, la ecuación de regresión lineal es una línea recta que viene determinada por los dos primeros coeficientes, β_0 y β_1. El primero representa el punto de intersección de dicha recta con el eje de abscisas y el segundo representa la pendiente de la misma.

La estimación de los coeficientes de la regresión se realiza por el método de mínimos cuadrados, a través del cual se establecen los valores de los parámetros de la recta de regresión de la muestra, los cuales minimizan la suma de los cuadrados de los residuos.

Verificación de las hipótesis de normalidad y realización de contrastes no paramétricos en su caso

La mayor parte de los procedimientos de análisis esta-

dístico asumen que las muestras aleatorias se seleccionan de poblaciones normales. Tradicionalmente estos métodos se denominan como métodos paramétricos. Los métodos no paramétricos no suponen el conocimiento de ninguna distribución. También se les llama métodos de distribución libre.

Muchos de los métodos no paramétricos implican el análisis del rango de los datos por lo que no se utilizan los valores de la muestra. Cuando hay serias divergencias de la normalidad, los métodos no paramétricos son más eficientes que los métodos paramétricos.

Una de las hipótesis de partida de la regresión lineal es que los residuos sean variables aleatorias idénticamente distribuidas, lo que en la práctica significa que es necesaria la comprobación de normalidad de los residuos de la regresión lineal, especialmente en el caso de que se realicen contrastes de hipótesis sobre la pendiente de la recta de regresión.

En el caso de distribuciones no paramétricas se utilizará el método de Mann-Kendall para el análisis de los datos, ampliamente aceptado por la comunidad científica.

Análisis de la influencia de variables exógenas

Como se ha comentado con anterioridad, la declaración de un impacto significativo en la calidad de una masa de agua subterránea tiene una serie de implicaciones que obligan a realizar un análisis exhaustivo de las posibles causas que pueden incidir en su análisis, tales como la precipitación o las variaciones estacionales derivadas de los usos del suelo.

Entre los principales factores que pueden influir en la habilidad para detectar incrementos significativos desde el punto de vista estadístico deben citarse los hidrológicos, geoquímicos y debidos al muestreo y análisis en laboratorio.

En el caso de los nitratos, por ejemplo, se ha comprobado un aumento en la concentración de dicho ión tras una serie de precipitaciones. En realidad el proceso es más complejo, pues tras un aumento inicial, que disuelve los nitratos se produce un descenso, debido al efecto de dilución. Para comprobar en detalle dicha evolución sería necesario hacer un test de tendencias estacional, lo que requiere medidas mensuales. Las redes disponibles rara vez proporcionan un número tan grande de medidas, siendo la frecuencia de muestreo habitual de un par de veces al año. Para aprovechar al máximo los datos existentes es posible hacer una primera distribución de los datos en función de dos periodos principales, uno seco o de aguas bajas, y otro húmedo o de aguas altas.

En la estación seleccionada los meses más habituales de muestreo son mayo y noviembre, lo que concuerda a grandes rasgos con dichos periodos de aguas altas y bajas, dado que en la cuenca mediterránea las precipitaciones más torrenciales se producen en septiembre y octubre. Por tanto, el primer análisis que puede realizarse es la comparación entre los datos de concentración durante dichos periodos.

EJEMPLO

El abastecimiento es el principal uso del agua en la cuenca, mientras que las principales presiones sobre las masas de agua subterránea se derivan de las prácticas agrícolas.

Con objeto de aplicar el procedimiento diseñado y discutir las posibles alternativas se ha seleccionado la masa de agua subterránea 030.011 (Madrid: Guadarrama-Manzanares). Los parámetros analizados son la concentración de nitratos, puesto que presentan una serie de medidas desde el año 1984.

Información disponible

En la tabla 1 se adjuntan los valores disponibles en dicha estación agrupados en por columnas. La primera corresponde a la fecha mientras que la segunda contiene el valor de la concentración en nitratos del agua subterránea medido en mg/L.

Análisis exploratorio de datos

- Gráficos de la serie temporal. De la inspección visual de los datos se deduce que la serie presenta unos valores de concentración relativamente homogéneos durante los primeros años de medida de la serie, seguidos por un periodo en el que se aprecia una tendencia creciente aunque con mayor variabilidad de los datos.

  Como se observa en la figura 2, una regresión lineal sobre la totalidad de los datos proporciona una tendencia claramente creciente.

  Dicho análisis es corroborado por medio de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Tabla 2).

Serie temporal de valores de concentración de Nitrato (mg/F) en la estación TAIG000591					
Fecha	**Concentración mg/L**	**Fecha**	**Concentración mg/L**	**Fecha**	**Concentración mg/L**
01-feb-84	38	08-oct-96	49	29-jun-05	80
30-oct-84	40	28-nov-97	49	21-dic-05	92
13-may-85	34	27-feb-98	46	05-abr-06	209
01-jun-89	38	28-oct-98	62	31-may-06	192
29-abr-91	34	10-may-99	52	20-sep-06	151
27-mar-92	37	25-oct-99	76	18-dic-06	220
19-sep-92	36	13-abri-00	72	19-mar-07	203
23-sep-93	37	06-nov-00	76	25-jun-07	159
29-abr-94	43	19-abr-01	76	25-sep-07	54
27-oct-94	44	28-sep-01	92	27-nov-07	173
30-oct-95	48	04-mar-02	64	26-may-08	110
22-abr-96	50	16-ene-05	74	17-nov-08	167

Tabla 1. Datos utilizados.

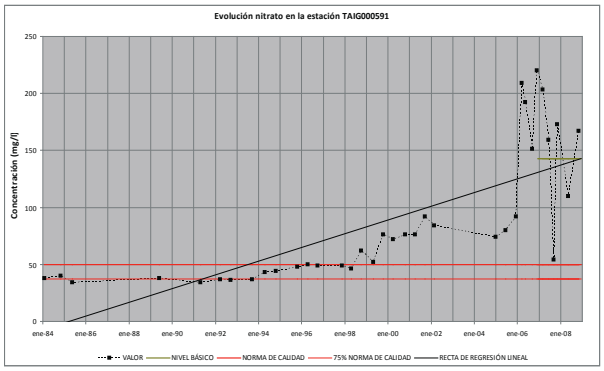


Figura 2. Gráfico de evolución del ión nitrato y su ajuste a una regresión lineal en la hoja de cálculo Excel.

Test Mann-Kendal tendencias	
Valor del estadístico	p-valor
tau = 0.76	9.47e-11

Tabla 2. Resultados del test de Mann-Kendal.

El p-valor indica la existencia de una tendencia estadísticamente significativa al 95% de probabilidad.

- Gráfico de caja. En la figura 3 puede observarse que la distribución es aproximadamente simétrica, aunque la existencia de valores anómalos hace dudar de la hipótesis de normalidad y de la posibilidad, por tanto, de aplicar estadística paramétrica.

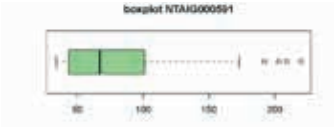


Figura 3. Gráfico de caja.

- Técnicas de suavizado de datos. Como se ha comentado anteriormente existe una oscilación durante la totalidad de las medidas de la serie, aunque el test de Mann-Kendall proporciona indicios estadísticamente significativos de la existencia de una tendencia creciente. Mediante la aplicación de las técnicas de suavizado (figura 4) se constata la existencia de dos periodos, ambos con tendencia creciente, por lo que se descarta la eliminación de ningún valor

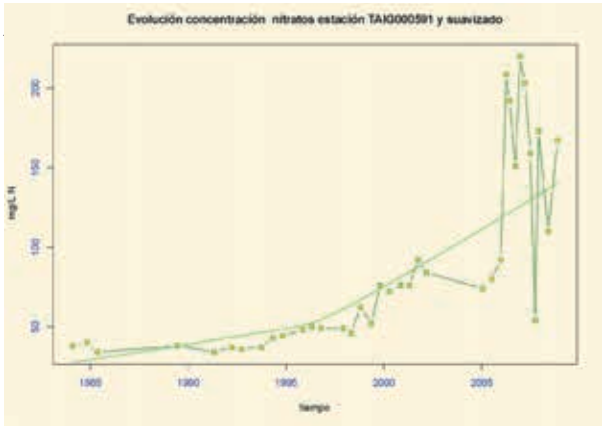


Figura 4. Gráfico resultante de aplicar una técnica de suavizado.

Selección del periodo de referencia para la determinación de tendencias y elaboración del histograma

Teniendo en cuenta lo anterior se selecciona la totalidad de los datos existentes (tabla 3). En el histograma se aprecia que la distribución dista mucho de ser normal, apreciándose una frecuencia de ocurrencia de valores de baja concentración.

Valores de cocentración					
01-02-1984	38	08-10-1996	49	29-06-2005	80
30-10-1964	40	28-11-1997	49	21-11-2005	92
13-05-1985	34	27-04-1998	46	05-04-2006	209
01-06-1969	38	20-10-1998	62	31-05-2006	192
29-04-1991	34	10-05-1999	52	25-09-2006	151
27-03- 1992	37	25-10-1999	76	18-12-2006	220
19-09-1992	36	13-04-2000	72	19-03-2007	203
23-90-1993	37	06-11-2000	76	25-06-2007	159
29-04-1994	43	19-04-2001	76	25-09-2007	54
27-10-1994	48	04-03-2002	84	27-11-2007	173
30-10-1995	48	04-03-2002	84	26-05-2008	110
22-04-1996	50	16-01-2005	74	17-11-2008	167

Tabla 3. Datos registrados en la estación de control.

Ajuste de un modelo lineal de regresión simple al periodo de referencia

El diagrama de caja (figura 3) de los datos correspondientes al periódo de referencia muestra simetría e inexistencia de valores anómalos (outliers), lo que podría indicar normalidad aproximada.

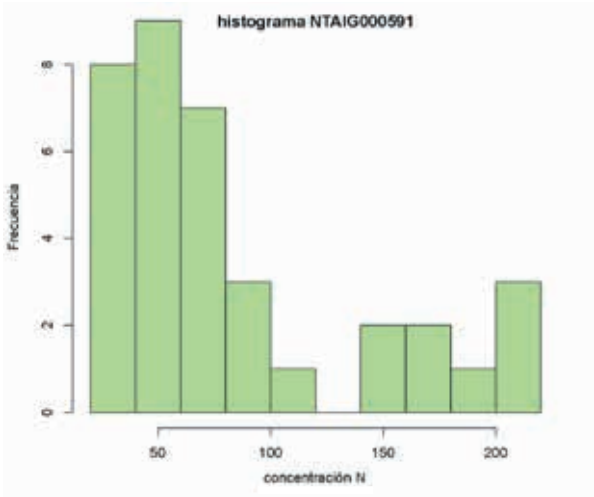


Figura 5. Histograma de los datos empleados.

Con objeto de comprobarlo, efectuamos la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (apropiado para n<50 datos), que proporciona un resultado concluyente, rechazando la hipótesis de normalidad (tabla 4).

Test de Shapiro-Wilk de normalidad	
Valor del estadístico	p-valor
0.80	$1.7e^{-5}$

Tabla 4. Resultados del test de Shapiro-Wilk.

No obstante, dado que para realizar una regresión simple no es necesario que los valores de concentración sean normales, sino más bien los residuos (figura 6) del ajuste, son los que deben verificar dicha hipótesis. Realizada la prueba de normalidad sobre los residuos (tabla 5) se obtiene.

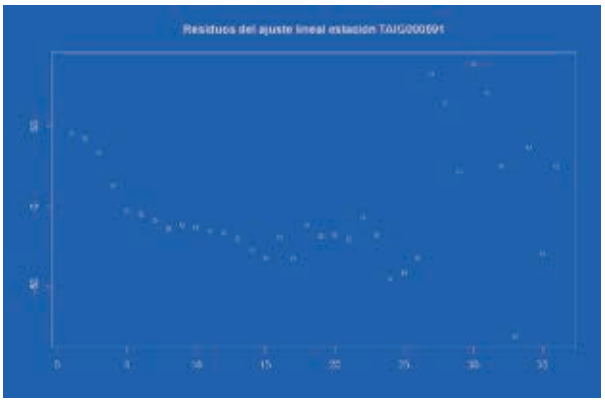


Figura 6. Residuos.

Test de Shapiro-Wilk de normalidad residuos	
Valor del estadístico	**p-valor**
0.92	**0.017**

Tabla 5. Test de normalidad sobre los residuos.

La regresión lineal proporciona los siguientes resultados (tabla 6 y figura 7).

Regresión lineal datos periodo referencia	
Valor del estadístico	**p-valor**
0.92	**0.017**

Tabla 6. Resultados de la aplicación de la regresión lineal.

En este caso se observa que, a pesar de que la prueba de Shapiro-Wilk no rechaza la normalidad de los residuos, se observa un incremento de la variabilidad con el tiempo. Ello contradice la hipótesis de partida de homocedasticidad de los residuos (varianza constante), por lo que los resultados de la regresión lineal deben ser tomados con prudencia.

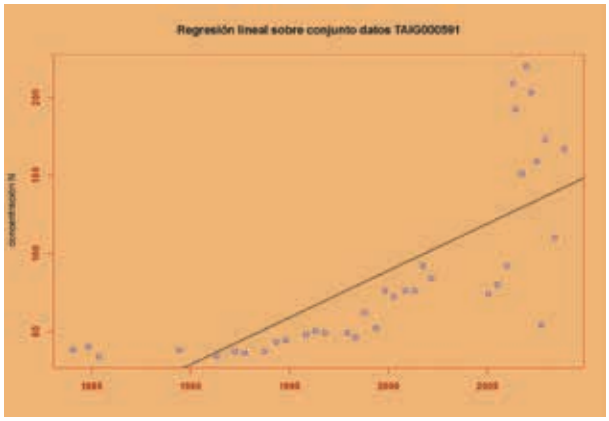


Figura 7. Ajuste del modelo lineal al periodo de referencia.

Transformación de los datos

En función de lo anterior es necesario realizar una transformación de los datos con objeto de conseguir la normalidad. Para ello se realiza una transformación de Box-Cox (figura 8), con objeto de obtener el valor de λ que permita transformar los datos en normales.

Figura 8. Transformación de Box-Cox.

De la figura se deduce que el valor de λ no es igual a cero, supuesto en el que es posible realizar una transformación logarítmica. Si ello fuera posible, la retransformada serviría al menos para evaluar la media geométrica de los datos, pero dado que ello no es factible, renunciamos a la transformación a favor de métodos no paramétricos.

Determinación de intervalos de confianza para la media de los valores actualizados del valor básico

Mediante la aplicación de técnicas bootstrap es posible obtener intervalos de confianza para la media del nivel básico actualizado, que integra la información histórica existente. A continuación se muestran los resultados de la aplicación de esta técnica (tabla 7, figura 8).

INTERVALO DE CONFIANZA BOOTSTRAP MEDIA FONDO Media = 86,02	
Límite inferior confianza	Límite superior confianza
77,13	102,16

Tabla 7. Intervalos de confianza obtenidos.

Como puede verse, el intervalo de confianza para la media está comprendido entre 71,13 y 102,16 mg/L.

Determinación de intervalos de confianza para la pendiente de la tendencia

No obstante, dado que los valores utilizados para la elaboración del nivel de fondo presentan una tendencia creciente altamente significativa, lo único que queda por determinar son los límites de confianza entre los que se encuentra la pendiente con una probabilidad determinada. Para ello es necesario utilizar técnicas no paramétricas con objeto de obtener intervalos de confianza por el método de Teil-Sen (figura 9). Para ello, al igual que el apartado anterior se utilizarán técnicas de remuestreo (bootstrap).

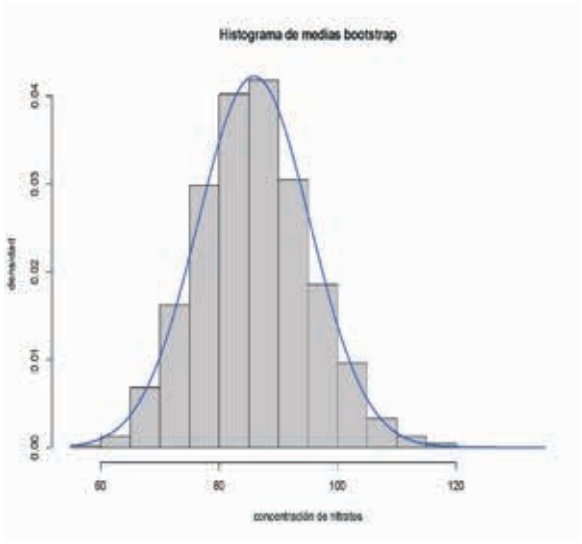


Figura 9. Histograma resultante de la transformación.

En este caso, dado que el límite inferior de confianza en todos los puntos marca una tendencia claramente ascendente, podemos declarar que la tendencia creciente está probada y debe iniciarse una inversión de la misma (figura 10).

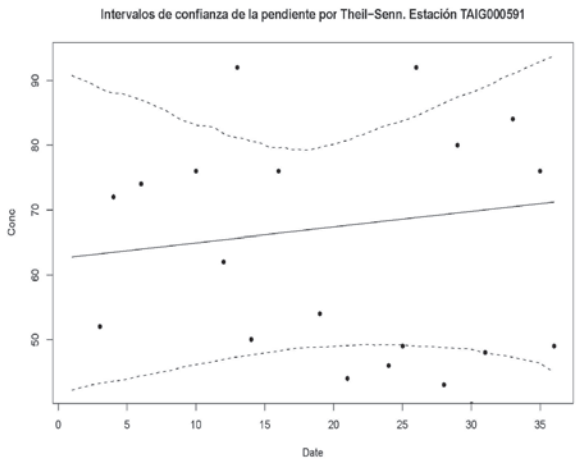


Figura 10. Resultados obtenidos con el método de Theil-Sen.

CONCLUSIONES

- La representación gráfica de la serie temporal indica la existencia de una tendencia creciente, que es confirmada por medio de una prueba no paramétrica de Mann-Kendall.
- Los gráficos de caja de los datos indican asimetría y existencia de valores anómalos, por lo que no parece adecuado el ajuste a una distribución normal en una primera aproximación. Esto queda confirmado por la realización de un test de normalidad a los datos.
- La aplicación de técnicas de suavizado muestra la existencia de dos periodos. Igualmente, se observa la existencia de tendencias crecientes en ambos periodos
- Por todo lo anterior se toma como referencia para la elaboración de estadísticos sobre el fondo la totalidad de los valores de la serie.
- El intervalo de confianza elaborado en torno a los valores que se han seleccionado para la elaboración del fondo presenta unos límites superior e inferior del intervalo de confianza de 71,13 y 102,16 respectivamente, obtenidos por técnicas bootstrap
- Debe destacarse el hecho de que al existir una tendencia creciente estadísticamente significativa los resultados obtenidos para el intervalo de confianza de la media no tienen utilidad práctica.
- Es posible estimar intervalos de confianza para la pendiente de la tendencia, calculadas por medio de técnicas de remuestreo sobre los estimadores de la pendiente obtenidos según el método de Theil-Sen.
- Dado que todos los parámetros se encuentran por encima de la norma de calidad, es necesario iniciar la inversión de la tendencia.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CUENCAS INTERCOMUNITARIAS

El primer paso del análisis de la información ha consistido en representar cada masa de agua con todas las estaciones de control utilizadas para la determinación de la tendencia. En todos los casos se ha incluido la cobertura Corine (figura 11), de esta manera se ha hecho un primer análisis

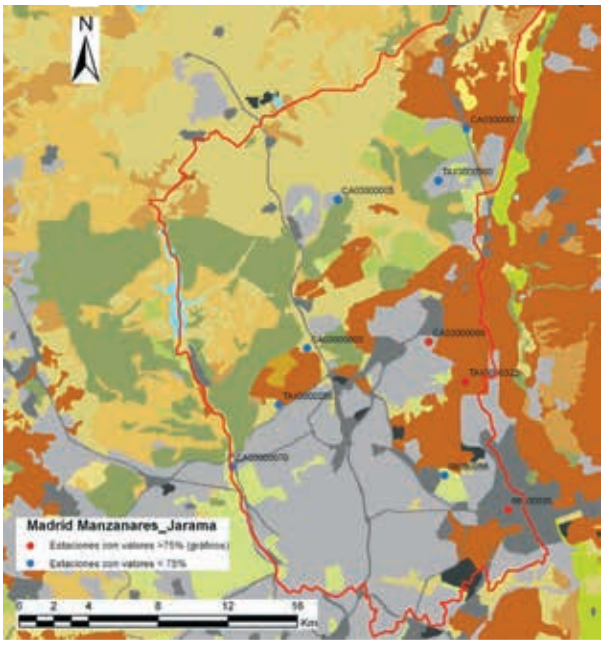


Figura 11. Se muestra un ejemplo con una masa de agua. La leyenda corresponde a la cobertura de Corine.

cualitativo para tener una aproximación inicial del grado de representatividad de la red de control de calidad y posibles influencias de los usos de suelo. A continuación, una vez organizada la base de datos, se representaron las estaciones de control preseleccionadas, es decir, las que tenían algún parámetro que sobrepasaba en algún momento el 75% de la norma de calidad o del valor umbral. La principal característica de las estaciones de la red de control es la escasez de información, de 2 a 4 datos en cada una (figura 12). Cuando el registro es un poco más amplio, casi todas las estaciones presentan importantes interrupciones en el mismo o el comportamiento de los datos arroja muchas

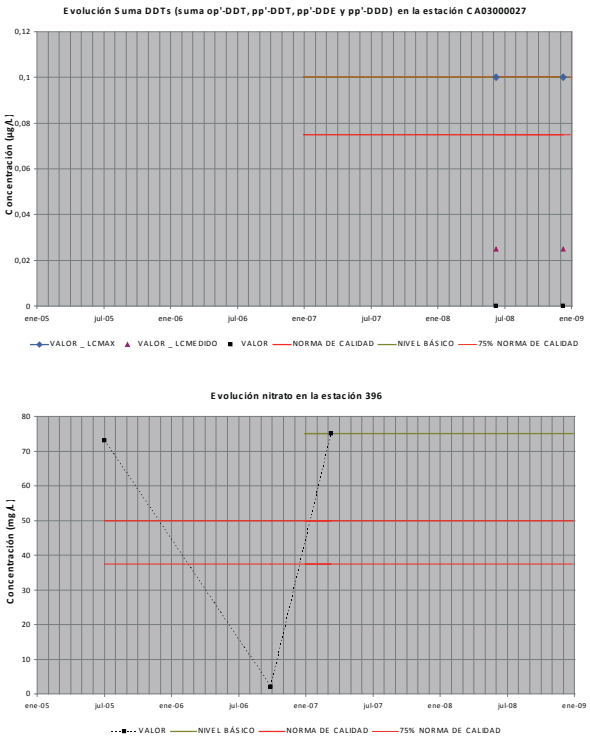


Figura 12. Ejemplo de gráfico tipo para el conjunto de la Demarcaciones donde en la mayoría de las estaciones se dispone de poca información.

dudas sobre la fiabilidad de un ajuste lineal sin ningún tipo de análisis previo y posterior de la información (figura 13).

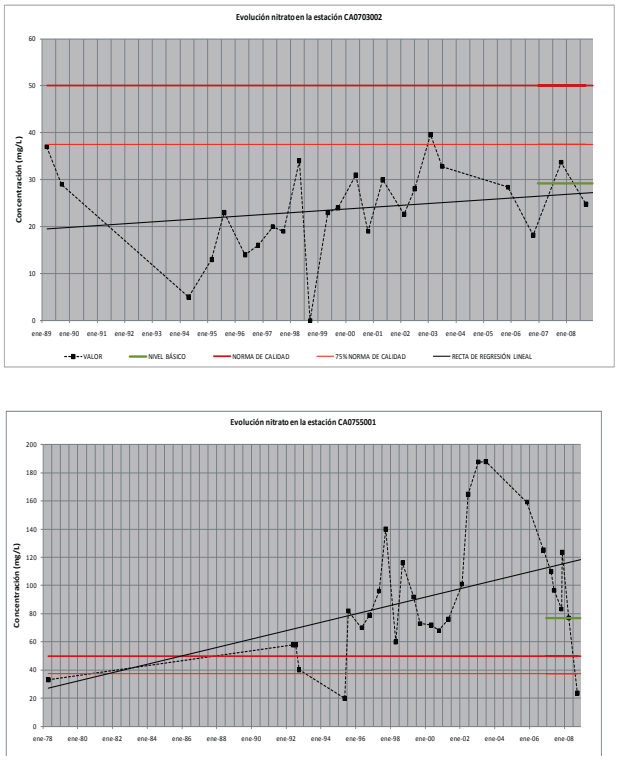


Figura 13. Ejemplo de ajuste lineal de tendencia en la hoja de cálculo Excel. El gráfico de la derecha muestra un falso positivo.

Por otra parte, desde el punto de vista oficial, hasta el momento, la UE sólo ha financiado la realización de un programa que permita el análisis de datos para la determinación e inversión de tendencias de acuerdo con las directrices generales marcadas en la Directiva. El programa mencionado se denomina GWStat (Grath et al., 2001) y cumple, al menos en los casos que se ha podido aplicar, parcialmente los objetivos de fiabilidad de los resultados que cabría exigir aunque en este sentido la Directiva no es suficientemente precisa. Para simplificar la exposición de los resultados obtenidos con este programa, sólo se muestran los resultados de aquellas estaciones donde se ha obtenido aplicar atendiendo a la cantidad y distribución de la información que exige dicho programa. En las figuras 14 y 15 se muestran

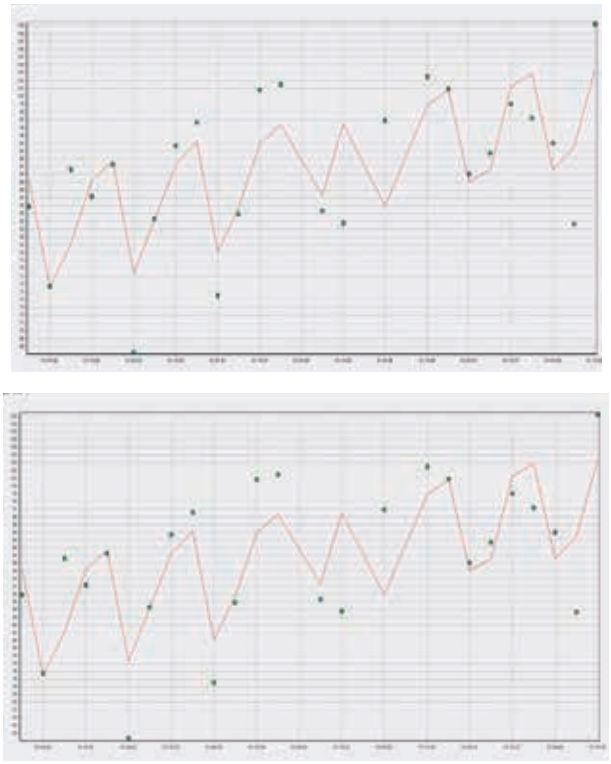


Figura 14. Izquierda: comportamiento estacional detectado y tendencia creciente según el método de Mann-Kendal. Derecha: inversión de tendencia en la misma estación.

ejemplos de resultados obtenidos, comportamiento estacional e inversión de la tendencia que, de acuerdo con el procedimiento utilizado, presenta una probabilidad superior al 95%. En el resto de estaciones no se ha determinado bien por la escasez de información o que el procedimiento empleado no la detecta. Por otra parte, y como ya se ha comentado, en las series con ocho o más datos se ha determinado la tendencia lineal utilizando para ello la hoja de cálculo Excel (figura 13) pero puede

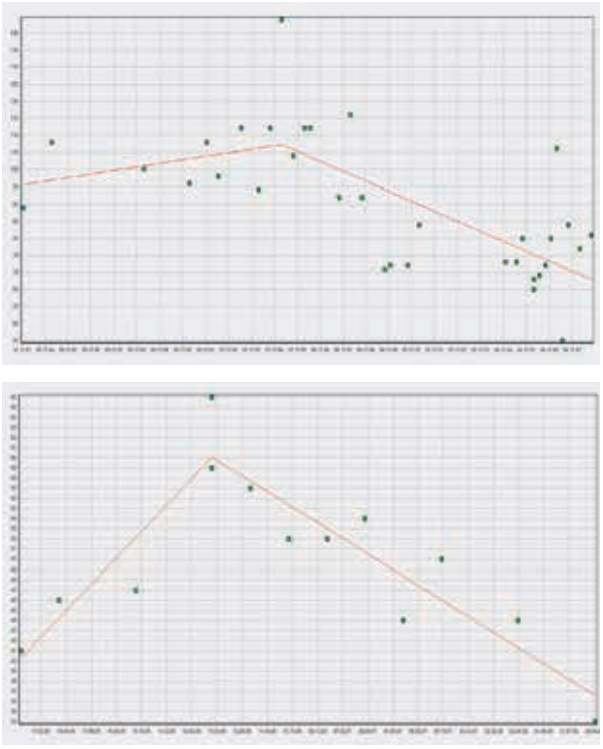


Figura 15. Ejemplo de determinación de inversión de tendencia mediante el programa GWStat.

suceder que den un falso positivo como se puede observar en el gráfico de la derecha. Esta situación se ha producido en otras estaciones.

Los resultados obtenidos en este laborioso proceso de representación de gráficos y tratamiento de la información mediante el ajuste lineal en la hoja de cálculo y mediante el programa GWStat, se resumen en la figura 16, en la que destaca lo ya mencionado, es decir, la información es insuficiente para la determinación de tendencias y en muy pocas estaciones se ha podido aplicar algún análisis. En este sentido, cabe destacar la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir donde ninguna estación tiene un mínimo de 8 valores para ajustar. La Demarcación hidrográfica del Miño-Sil tampoco pero en este caso el número de estaciones es muy inferior.

Otro aspecto igualmente relevante que se debe mencionar es el punto de partida de calidad de las aguas subterráneas, es decir el valor medio de los registros del periodo de referencia (2007-2008), que reflejan las estaciones. Como se puede comprobar en la figura 16 la calidad es mala en general. Respecto al conjunto destaca la Demarcación Hidrográfica del Duero donde más de la mitad de las estaciones muestran que los datos están por debajo del 75% de la norma de calidad o del valor umbral.

CONSIDERACIONES FINALES

El volumen de información utilizado es considerable así como el de estaciones de control, sin embargo en la

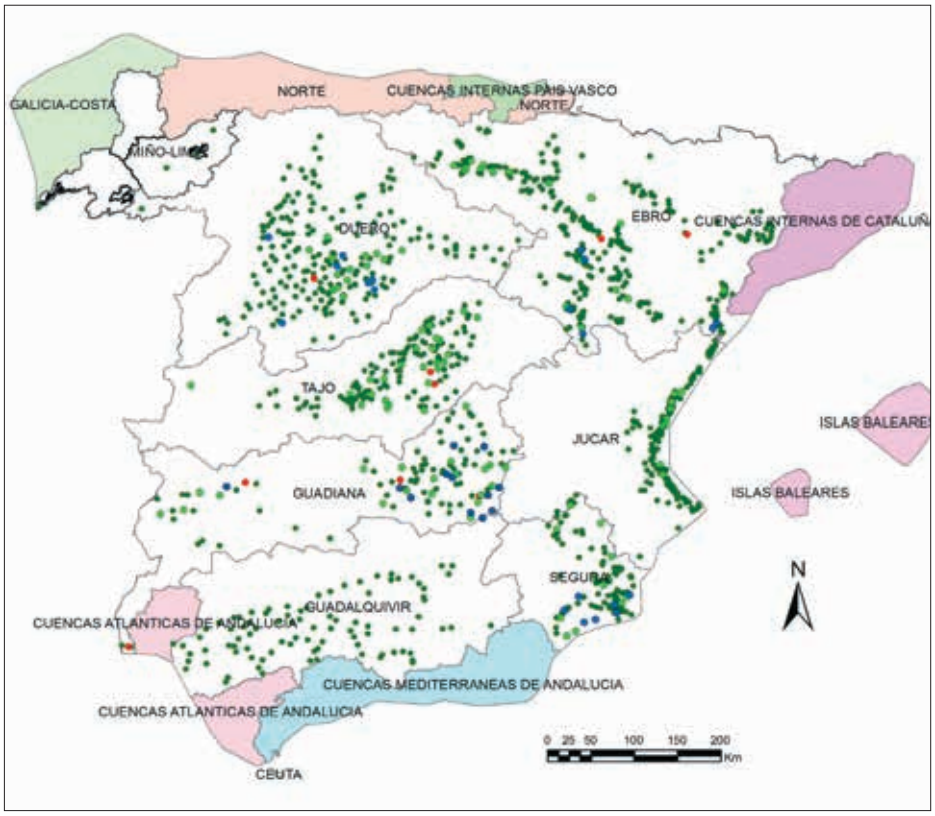


Figura 16. Los puntos de color naranja indican mala calidad en el periodo de referencia (2007-2008).

mayoría de las estaciones la cantidad de información es insuficiente (figura 17) para aplicar alguna técnica estadística para su análisis. En este sentido hasta la revisión del estado de las masas de agua que se haga en el 2015 no se podrá tener una visión más clara del comportamiento de los parámetros de calidad que se están registrando, momento en el que, al ritmo de toma de información actual, habrá un mínimo de 10 o 12 datos por estación.

Hay muchas estaciones con valores elevados, fundamentalmente nitratos, incluso por encima de la norma de calidad, lo que indica que buena parte de las masas de agua presentan una calidad dudosa. En este sentido sería muy necesario realizar un análisis espacial más detallado pues en muchos casos podría ser problemas puntuales teniendo en cuenta la representatividad real que pueda tener una estación en concreto. Se observan, además, fuertes oscilaciones en muchos casos que habría que estudiar en detalle pues cualquier análisis del comportamiento de la variable estaría sujeto a importantes incertidumbres.

La densidad espacial de la información es en general insuficiente y en muchos casos se debería plantear un estudio que permitiera determinar si son necesarias nuevas estaciones de control y dónde para poder llevar a cabo un análisis del comportamiento espacial de las variables más fiable.

Se ha observado que hay bastantes estaciones donde los registros son irregulares. En este sentido, para poder realizar un análisis estadístico de la tendencia, el control debería ser más regular, semestral y a intervalos fijos. De forma orientativa, las determinaciones deberían realizarse en marzo-abril y septiembre-octubre de cada año con objeto de detectar posibles estacionalidades, salvo en aquellos casos que requieran un estudio más detallado.

Como parte del análisis sobre la representatividad de la información espacial, se debería analizar las estaciones de control y la metodología de la toma de muestras. Es decir, características tales como profundidad de los sondeos, localización de las rejillas, uso del agua, protección sanitaria de la captación, método de toma de muestras, etc. Debido a las características de algunas masas de agua, fundamentalmente que son multicapa y presentan importantes espesores saturados, habría que analizar la conveniencia de muestrear a diferentes profundidades de la masa de agua pues en algunos casos parece que existen diferencias en los contenidos de nitrato que podrían estar relacionadas con la configuración multicapa de la masa.

Aunque la Directiva no obliga a incluir datos anteriores a 2007, hubiera sido interesante comprobar el comportamiento de los registros históricos. No obstante, en general, no existen registros de este tipo y los pocos

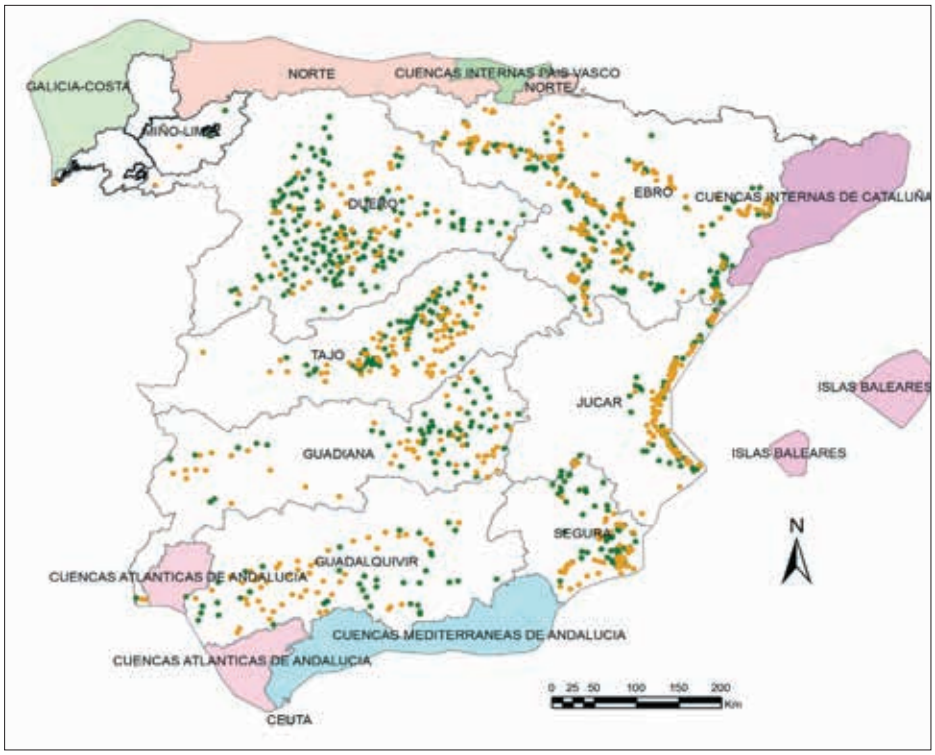


Figura 17. Estaciones de control utilizadas. Puntos de color verde oscuro, con información insuficiente para determinar tendencias. Puntos de color verde claro determinación de tendencia lineal con la hoja de Excel. Puntos de color azul determinción de tendencia con el test de Mann-Kendal. Puntos de color rojo, con determinación de inversión en la tendencia al aumento de contaminantes (ión nitrato).

que hay no son suficientemente fiables en un porcentaje elevado pues las observaciones no son regulares en el tiempo y hay periodos amplios sin datos. Un problema añadido es el comportamiento irregular que en muchos casos presentan las variables en el tiempo pues presentan variaciones muy bruscas en pequeños intervalos.

En muy pocas estaciones se ha detectado inversión de la tendencia de acuerdo con el programa GWStat. Por otra parte, los resultados obtenidos hay que tomarlos con cierta reserva en algunos casos, dado que el comportamiento de las variables en los últimos años de muestreo es contradictorio. En este sentido, a pesar de la inversión detectada, algunas estaciones muestran un incremento de la concentración de los contaminantes en las últimas medidas en vez de un descenso más o menos progresivo. Las fuertes oscilaciones observadas en algunos casos introducen un grado de incertidumbre elevado que se agrava con la escasez de datos. Estos resultados indican, entre otras cosas, la persistencia en la entrada de contaminantes de las masas de agua subterráneas en las diferentes demarcaciones y la necesidad de aplicar medidas para mejorar la calidad de sus aguas.

La metodología desarrollada en el contexto de este trabajo pretende abordar todos los problemas detectados de forma rigurosa y fiable desde el punto de vista científico. En este sentido, para que los resultados que proporciona este enfoque constituyan una herramienta eficaz para la toma de decisiones no se puede limitar el procedimiento a un único análisis con regresión lineal. De hecho, hay series en las cuales la regresión indica una tendencia en los datos, hipótesis que ha sido rechazada con posterioridad mediante la aplicación de la metodología propuesta. Los motivos para ello son variados, desde la existencia de varias tendencias en el periodo temporal estudiado hasta el incumplimiento de las hipótesis requeridas para la aplicación de las técnicas de regresión. En este último caso la aplicación de métodos no paramétricos, como el de Mann-Kendal, ha llevado en ocasiones a rechazar la existencia de dicha "tendencia" significativa, determinada mediante regresión simple.

Los resultados obtenidos con este planteamiento se pueden considerar óptimos puesto que además de determinar el comportamiento de los contaminantes, aporta un intervalo de confianza en función de la información disponible. Este aspecto se considera de gran interés desde la óptica de la aplicación de la Directiva pues se puede cuantificar el grado de fiabilidad de los resultados del análisis.

Además del análisis amplio de la tendencia que ofrece la metodología presentada, un aspecto muy novedoso e importante que ofrece es el establecimiento de intervalos de predicción con objeto de establecer sistemas de alerta temprana en el comportamiento de los contaminantes, es decir, incremento o descenso de la concentración.

El análisis global que ofrece esta metodología permite utilizarla como una herramienta apropiada para la toma de decisiones, puesto que dependiendo del comportamiento de los contaminantes se deberán realizar acciones para corregir el aumento de la concentración de los mismos y en las que el coste económico será variable en función del comportamiento detectado.

En definitiva, un análisis riguroso del comportamiento de los contaminantes tiene una doble vertiente. Fiabilidad estadística y reducción de costes económicos derivados de las acciones a realizar para corregir las concentraciones de contaminantes no deseadas. Ambos requisitos los cumple la metodología presentada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Europea, (2006). Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). Documento Guía nº 18. Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de tendencias. Versión española de la Dirección General del Agua (marzo, 2009), 92 pp.

European Commission, (2001). Common Implementacion Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). The EU Water Framework Directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results, 63 pp.

Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., (2002). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation. Statistical Methods in Water Resources. Environmental science and pollution research international, 14(5):297-307.

Grath, J.; Scheidleder, A.; Uhlig, S.; Weber, K.; Kralik, M.; Keimel, T.; Gruber, D. (2001): "The EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and ag-

gregation of monitoring results". Annex to the Final Report. Austrian Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (Ref.: 41.046/01-IV1/00 and GZ 16 2500/2-I/6/00), European Commission (Grant Agreement Ref.: Subv 99/130794), in kind contributions by project partners. Vienna. December, (2001).

Hornik, K. (2008). Frequently Asked Questions on R. {ISBN} 3-900051-08-9.

Páginas web de interés

http://CRAN.R-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html.

www.DMAgw.net

www.attempto-projects.de/aquaterra/21.0.html

SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA DONDE ES PRECISO PLANTEAR ESTUDIOS Y ACTUACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Raquel Morales García

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 8 *Selección e identificación de masas de agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de recarga artificial de Acuíferos* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas

Directora de la actividad

Raquel Morales García. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España (por orden alfabético):

Coordinación de los Trabajos:

Loreto Fernández Ruiz
Juan Antonio López Geta

Equipo de Redacción:

Angel Diaz Pérez
Juan de Dios Gómez Gómez
Sergio Martos Rosillo
Raquel Morales García
Gerardo Ramos González
Fernando Ruiz Bermudo
Jose Antonio Domínguez Sánchez
Luís Martinez Cortina
Mónica Meléndez Asensio
Luis Moreno Merino
Miguel Luis Rodríguez González
Jose Maria Ruiz Hernández

Comité de Expertos:

Ramon Aragón Rueda
Bruno Jose Ballesteros Navarro
Antonio Fernández Uría
Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno
Miguel Luis Rodríguez González
Jose Maria Ruiz Hernández
Antonio Azcón González de Aguilar
Angel Diaz Pérez
Miguel Martín Machuca
Carlos Mediavilla Laso
Mónica Meléndez Asensio
Juan Carlos Rubio Campos

SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA DONDE ES PRECISO PLANTEAR ESTUDIOS Y ACTUACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

INTRODUCCIÓN

La recarga artificial del acuíferos es un procedimiento relativamente caro de obtención de recursos de agua regulada y de cierta complejidad en su ejecución y operatividad, por lo que este estudio se plantea como una *primera etapa en la selección de masas de agua subterránea donde, desde el punto de vista de la planificación hidrológica, sería preciso y eficaz realizar actuaciones de recarga para paliar determinados problemas relacionados con el uso y gestión de las aguas subterráneas*. Por tanto, esta primera selección constituye una fase previa a los proyectos concretos de recarga que, en un futuro, puedan desarrollarse a partir de los esquemas que aquí se consideren como factibles.

En concreto, en este estudio, la recarga artificial se plantea con cuatro finalidades principales:

—Aumentar la garantía de suministro en el abastecimiento urbano subterráneo.
—Paliar problemas ligados a la explotación intensiva de aguas subterráneas destinadas al regadío.
—Solucionar problemas en situaciones de sequía.
—Favorecer el mantenimiento de ecosistemas y zonas húmedas de especial interés hídrico.

Objetivos

Con este planteamiento, los objetivos del proyecto son los siguientes:

—Establecer la selección de masas en las que realizar recarga, mediante la aplicación de criterios acordes a las cuatro finalidades de la recarga perseguidas.
—Identificar las masas de agua en las que realizar estudios y actuaciones de recarga artificial y realizar un análisis preliminar de la viabilidad técnica de la misma.
—Desarrollar el contenido de un estudio tipo de viabilidad técnica, económica, legal y administrativa para un proyecto de recarga artificial de acuíferos, que sirva como guía metodológica para abordar, en un futuro, proyectos concretos.

Ámbito de aplicación

El ámbito de aplicación del trabajo se extiende por la totalidad de las masas de agua subterránea (MASb) delimitadas en las nueve Demarcaciones Hidrográficas con cuencas intercomunitarias: 492 MASb distribuidas en las Demarcaciones Hidrográficas de Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y Ebro.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

Metodología para la selección de masas de agua subterránea

En primer lugar se establecen los criterios de selección acordes a las cuatro finalidades de recarga. A continuación, la metodología de trabajo para la selección de las masas se desarrolla mediante un proceso aproximativo. En cada demarcación, se realiza una primera selección de masas a recargar mediante la aplicación simultánea de los criterios de selección definidos. En esta etapa, la herramienta de trabajo básica es la superposición de capas de información en formato shape de Arc-GIS. Las masas seleccionadas son aquellas que cumplen con los criterios definidos y la acumulación de criterios establece un sencillo orden de prioridad en las actuaciones. Seguidamente, se realiza un análisis crítico de esta selección preliminar mediante el juicio de expertos, que incluye una valoración general de la cuenca y una revisión de la problemática particular de cada masa seleccionada y las posibilidades hídricas que, a priori, respaldarían la operación de recarga. El resultado de este análisis puede eliminar o añadir el número de masas a recargar, así como modificar el orden de prioridad de actuación. Finalmente, se vincula la relación de masas a recargar con las actuaciones identificadas en el proceso de planificación hidrológica del momento (el Esquema Provisional de Temas Importantes de la Demarcación), resultando la selección final de masas a caracterizar en el siguiente apartado.

De acuerdo con la metodología descrita, el apartado de

selección de masas a recargar realizado en cada Demarcación Hidrográfica incluye tres secciones comunes:

A) Selección preliminar: aplicación de criterios.
B) Análisis crítico de la situación: juicio de expertos.
C) Diagnóstico y selección final.

Criterios de selección

Para definir los criterios de selección, dado el ámbito de aplicación del proyecto (492 MASb de un total de 769 en todo el territorio nacional) y el alcance del mismo (fase previa a los proyectos concretos de recarga), la información de partida debe cumplir dos condiciones básicas: ser homogénea y actual a nivel nacional (intercuenca) y estar disponible en formato digital (o ser susceptible de ello). Además de estas premisas generales, se deben buscar datos o indicadores que sean representativos, directa o indirectamente, de las cuatro finalidades de la recarga.

En relación con la primera finalidad, *la recarga artificial para aumentar la garantía de suministro en el abastecimiento urbano de origen subterráneo*, se han revisado algunos enfoques que podrían ser indicativos de esta situación. Después de evaluar distintas opciones, en definitiva se trataría de identificar, de forma indirecta, aquellas masas de agua subterránea con problemas de explotación intensiva relacionada con su utilización para abastecimiento urbano. En este sentido, se dispone de una información actualizada a nivel nacional e indicadora del estado de las masas que corresponde a la tipificación, en riesgo cuantitativo y/o cualitativo, de las masas en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales de la DMA en el año 2015. Por tanto, se establece como criterio de selección de masas a recargar, representativo de explotación intensiva para abastecimiento, el de las masas clasificadas en riesgo cuantitativo que contengan captaciones significativas abastecimiento urbano.

Respecto a la segunda finalidad, *la recarga artificial para paliar problemas ligados a la explotación intensiva de aguas subterráneas destinadas al regadío*, y siguiendo en la línea anterior, un criterio de selección sería considerar las masas en riesgo cuantitativo que contengan una elevada densidad de captaciones agrícolas, pero dada la amplitud del inventario de pozos éste criterio no resulta viable.

Ahora bien, si se considera que la contaminación por nitratos de origen agrario va ligada en numerosas circunstancias a zonas con explotación intensiva de aguas subterráneas destinada a la agricultura, podrían considerarse, como indicador indirecto, aquellas masas en riesgo cuantitativo que presenten este tipo de afección. En cumplimiento de las normas impuestas por el RD 261/1996, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, se han delimitado y declarado, en función de la problemática, zonas vulnerables a la contaminación por nitratos de origen agrario en diversos sectores del territorio nacional, correspondiendo a las CCAA el desarrollo de programas de actuación para prevenir y reducir esta contaminación y revisar la citada declaración cada cuatro años. La última revisión se ha realizado el pasado año 2008.

Por tanto el criterio de selección elegido es contemplar aquellas masas en riesgo cuantitativo que contengan en su interior zonas designadas oficialmente como vulnerables a la contaminación por nitratos. Eventualmente podrían incluirse masas no designadas en riesgo cuantitativo cuando la zona vulnerable ocupe una gran extensión dentro de la masa. Además, en la selección, se han tenido en cuenta las áreas de riego cartografiadas.

La tercera finalidad, *la recarga artificial para solucionar problemas en situaciones de sequía*, está intrínsecamente ligada con la primera: *la recarga artificial para aumentar la garantía de suministro en el abastecimiento urbano de origen subterráneo*, pues el efecto de la mejora del abastecimiento urbano se traduce tanto en situaciones de normalidad como en situaciones de emergencia; por tanto este aspecto quedaría incluido en el primero. No obstante, se han considerado las especificaciones contenidas en los "Planes Especiales de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía" (PES) (DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA, 2007) relativas a la caracterización meteorológica e hidrológica regional de las sequías, que establecen una clasificación de los sistemas de explotación de recursos (SER) en función de los índices estandarizados de precipitación y de aportación (SPI e SAI). El resultado de este análisis determina cuáles son los sistemas más sensibles a las sequías dentro de la cuenca y, por extensión, las masas de agua subterránea contenidas en éstos sistemas serán las más vulnerables a las sequías.

En relación con la cuarta y última finalidad, *la recarga artificial para favorecer el mantenimiento de ecosistemas y zonas húmedas de especial interés hídrico*, se parte de la conexión zona húmeda-acuífero establecida en la Actividad 4 de esta Encomienda (IGME-DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA, 2010), que identifica los humedales relacionados con las aguas subterráneas y los clasifica, en función de su modo de alimentación, tipo de drenaje y su hidroperiodo, en 8 tipologías principales.

Con esta información se establece, como criterio de selección de masas donde realizar recarga para favorecer el mantenimiento de ecosistemas y zonas húmedas, que la masa de agua subterránea tenga un número elevado de humedales conectados a acuíferos (más de tres) y que, al menos uno, esté clasificado como hipogénico (flujo vertical) ganador, variable o indiferenciado; con alimentación subterránea mixta; o costero; ya que son las categorías que a priori se verían más favorecidas por una operación de recarga. De forma puntual, pueden haberse considerado masas que contienen un número menor de humedales pero de importancia singular, ya sea por su extensión o por su grado de protección.

Vistos los criterios de selección acordes a las cuatro finalidades de la recarga, debe de tenerse en cuenta en el proceso selectivo un factor de decisión más: las *previsiones y recomendaciones de recarga artificial existentes en el ámbito de la planificación hidrológica*, aspecto que incluiremos referido como criterio Antecedentes. Este criterio recoge las actuaciones de recarga artificial de acuíferos referenciadas en los planes hidrológicos de cuenca (PHC) vigentes de cada Demarcación, junto con las acciones identificadas y detalladas en el documento "Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias" (Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas-IGME, 2000). Asimismo, incluye la relación de acuíferos sobreexplotados o en riesgo de estarlo que figuran en los PHC vigentes de cada Demarcación o que están declarados oficialmente sobreexplotados, dado que se trata de acuíferos potencialmente susceptibles de mejorar con operaciones de recarga artificial.

Metodología para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial en las masas seleccionadas

Una vez seleccionadas las masas que precisarían recarga, para identificar y caracterizar las actuaciones en cada una de ellas, se realiza un examen preliminar de la viabilidad técnica de la recarga contemplando los datos de disponibilidad hídrica del sistema, las características del acuífero receptor y una breve descripción del proyecto de recarga en su caso.

Con objeto de homogeneizar la información, la metodología de trabajo se inicia con el diseño de una ficha-modelo para la recogida sistemática de datos. La ficha contiene las especificaciones recogidas en el apartado 3.2.3.4 de la Instrucción de Planificación Hidrológica (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre). De esta manera se pretende que el contenido de las fichas pueda contribuir a la identificación de las recargas artificiales que deben quedar recogidas en el Plan Hidrológico, tal y como establece el Art. 53.1 del RD 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.

Así, el análisis de la disponibilidad hídrica requerido se realiza, en primer lugar, en el marco de las unidades básicas de gestión y asignación de recursos hídricos de cada Demarcación: los sistemas de explotación de recursos (SER) definidos en los Planes Hidrológicos de cuenca vigentes, con objeto de determinar los recursos hídricos totales potencialmente disponibles para las distintas actuaciones de recarga que puedan plantearse en el conjunto de las masas de agua subterránea implicadas en cada SER. En segundo término, se analiza, en función de los datos existentes, la disponibilidad hídrica para la recarga en cada masa.

Por tanto la ficha-modelo queda estructurada en dos partes, la primera responde a los datos del SER (figura 2) y la segunda se centra en los datos propios de la masa (figura 4). En ambas partes, el análisis de la disponibilidad hídrica incluye el potencial de las aguas depuradas y desaladas tal y como contempla el Art. 53.2 del Reglamento de la Planificación Hidrológica.

A continuación, se describen los sistemas de explotación que conforman cada demarcación y se determinan aquellos sistemas de explotación de recursos que estarían implicados en la recarga teniendo en cuenta, por un lado, la adscripción de las anteriores unidades hidrogeológicas, que figura en los planes hidrológicos de cuenca a efectos de asignación y reserva de recursos; así como la distribución espacial que presentan las actuales masas de agua subterránea en la cuenca. A tal efecto se diseña el Mapa de la Demarcación (MAPA 1), que precede al Catálogo de actuaciones de recarga de la Demarcación y que funciona como mapa llave o guía de las fichas siguientes (figura 1).

Una vez identificados los sistemas de explotación de recursos implicados y las masas de agua subterránea que incluye cada uno, (éstas pueden quedar dentro de uno o varios SER dependiendo, como se ha dicho, de su adscripción o su distribución), se elabora el mapa auxiliar de cada ficha, el Mapa del SER (MAPA 2), que recoge la información espacial necesaria para analizar la disponibilidad hídrica (situación de ríos, embalses, canales, estaciones de aforo, depuradoras, desaladoras...) (figura 3).

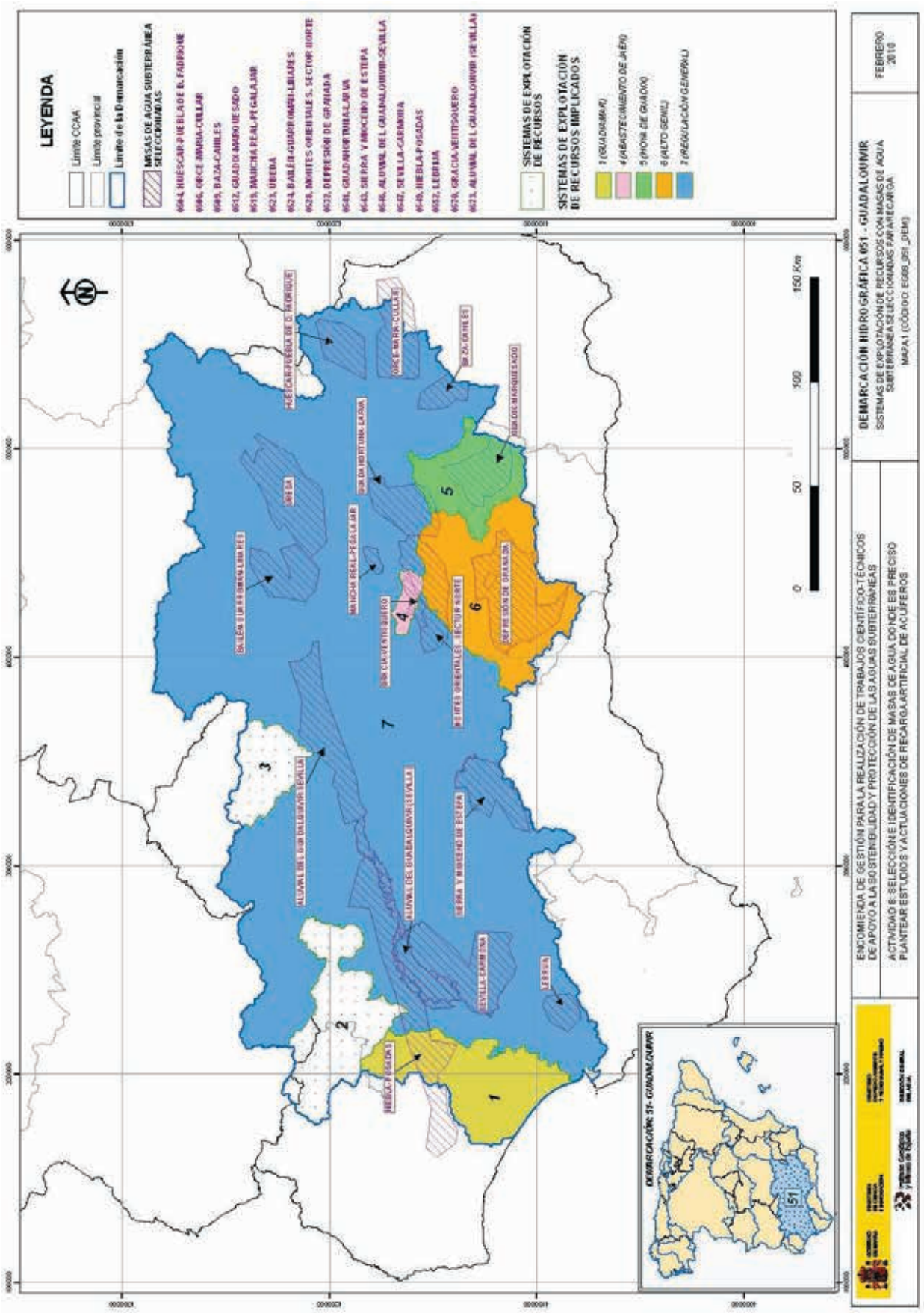
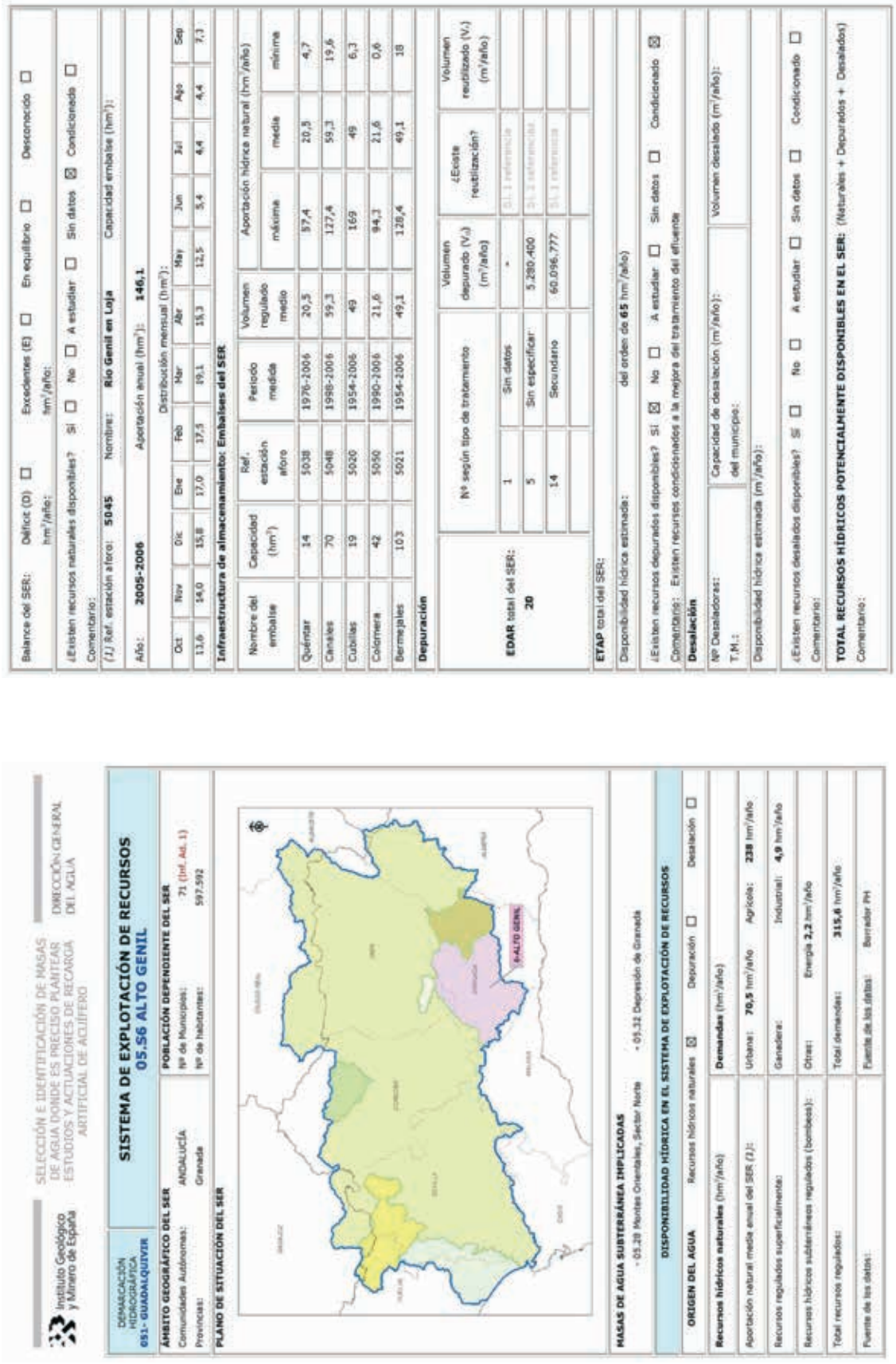


Figura 1. MAPA 1: mapa que precede al catálogo de actuaciones de recarga y que muestra la distribución de los SER y las MASb implicadas



Instituto Geológico y Minero de España

SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA DONDE ES PRECISO PLANTEAR ESTUDIOS Y ACTUACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA 051 - GUADALQUIVIR

SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS
05.S6 ALTO GENIL

ÁMBITO GEOGRÁFICO DEL SER

Comunidades Autónomas: ANDALUCÍA
Provincias: Granada

POBLACIÓN DEPENDIENTE DEL SER

Nº de Municipios: 71 (Inf. Ad. 1)
Nº de habitantes: 597.592

PLANO DE SITUACIÓN DEL SER

MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA IMPLICADAS

- 05.20 Montes Orientales, Sector Norte
- 05.32 Depresión de Granada

DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS

ORIGEN DEL AGUA Recursos hídricos naturales ☒ Depuración ☐ Desalación ☐

Recursos hídricos naturales (hm³/año)	**Demandas** (hm³/año)
Aportación natural media anual del SER (1):	Urbana: **70,5** hm³/año Agrícola: **238** hm³/año
Recursos regulados superficialmente:	Ganadera: Industrial: **4,9** hm³/año
Recursos hídricos subterráneos regulados (bombeos):	Otras: Energía **2,2** hm³/año
Total recursos regulados:	Total demandas: **315,6** hm³/año
Fuente de los datos:	Fuente de los datos: Borrador PH

Balance del SER: Déficit (D) ☐ hm³/año: Excedentes (E) ☐ hm³/año: En equilibrio ☐ Desconocido ☐

¿Existen recursos naturales disponibles? Sí ☐ No ☐ A estudiar ☐ Sin datos ☒ Condicionado ☐

Comentario:

(1) Ref. estación aforo: **5045** Nombre: **Río Genil en Loja** Capacidad embalse (hm³):

Año: **2005-2006** Aportación anual (hm³): **146,1**

Distribución mensual (hm³):

Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
13,6	14,0	15,8	17,0	17,5	19,1	18,3	12,5	5,4	4,4	4,4	7,3

Infraestructura de almacenamiento: Embalses del SER

Nombre del embalse	Capacidad (hm³)	Ref. estación aforo	Periodo medida	Volumen regulado medio	Aportación hídrica natural (hm³/año)		
					máxima	media	mínima
Quéntar	14	5038	1976-2006	20,5	57,4	20,5	4,7
Canales	70	5048	1998-2006	59,3	127,4	59,3	19,6
Cubillas	19	5020	1954-2006	49	169	49	6,3
Colomera	42	5050	1990-2006	21,6	94,3	21,6	0,6
Bermejales	103	5021	1954-2006	49,1	128,4	49,1	18

Depuración

	Nº según tipo de tratamiento		Volumen depurado (V_d) (m^3/año)	¿Existe reutilización?	Volumen reutilizado (V_r) (m^3/año)
EDAR total del SER: **20**	1	Sin datos	-	Sin referencia	
	5	Sin especificar	5.280.400	Sin referencia	
	14	Secundario	60.096.777	Sin referencia	

ETAP total del SER:

Disponibilidad hídrica estimada: del orden de **65** hm³/año)

¿Existen recursos depurados disponibles? Sí ☒ No ☐ A estudiar ☐ Sin datos ☐ Condicionado ☒

Comentario: Existen recursos condicionados a la mejora del tratamiento del efluente

Desalación

Nº Desaladoras:	Capacidad de desalación (m³/año):	Volumen desalado (m^3/año):
T.M.:	del municipio:	
Disponibilidad hídrica estimada (m³/año):		

¿Existen recursos desalados disponibles? Sí ☐ No ☐ A estudiar ☐ Sin datos ☐ Condicionado ☐

Comentario:

TOTAL RECURSOS HÍDRICOS POTENCIALMENTE DISPONIBLES EN EL SER: (Naturales + Depurados + Desalados)

Comentario:

Figura 2. Ficha-Modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Primera parte: datos del SER

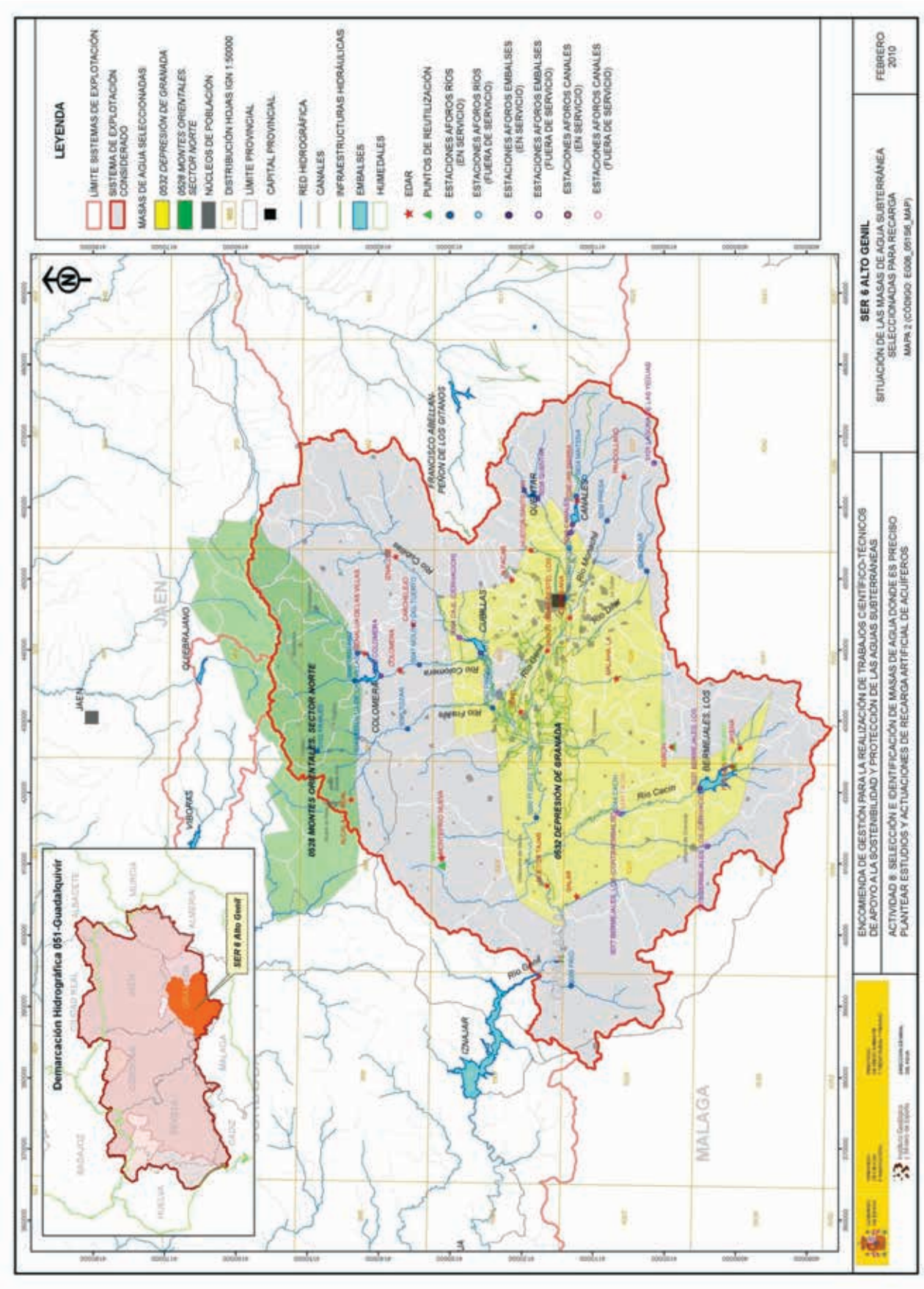


Figura 3. MAPA 2: Mapa del SER

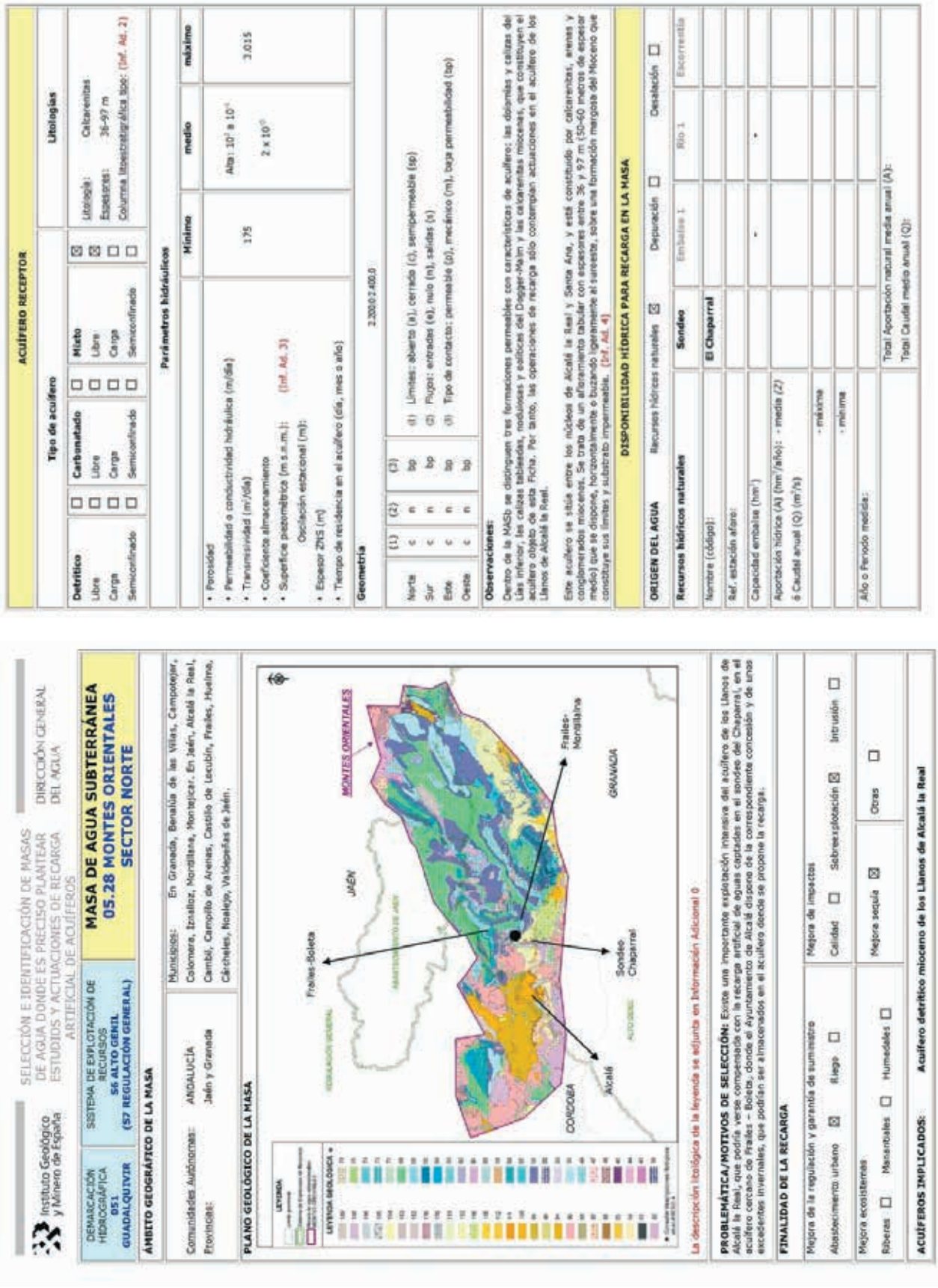


Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa.

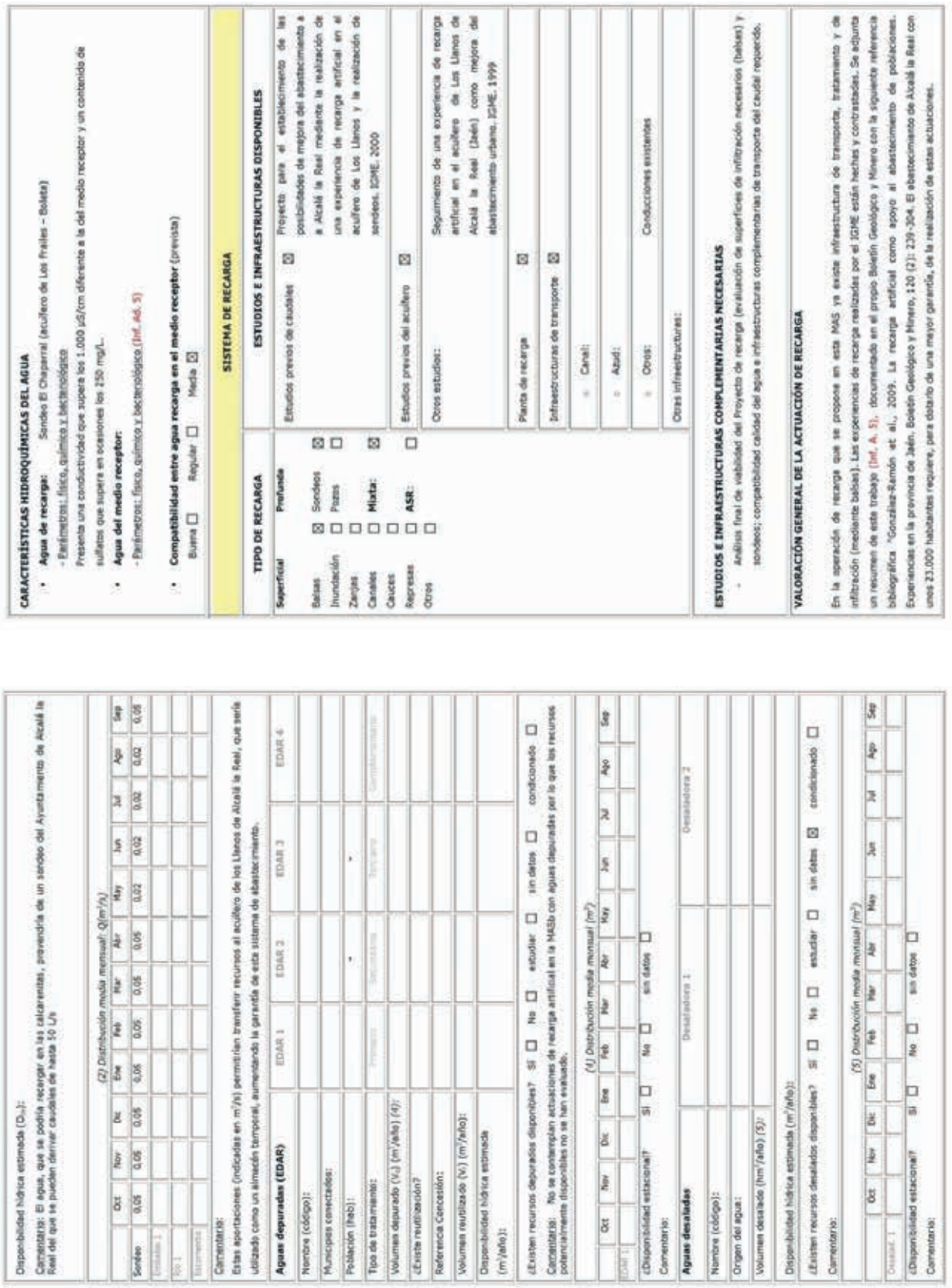
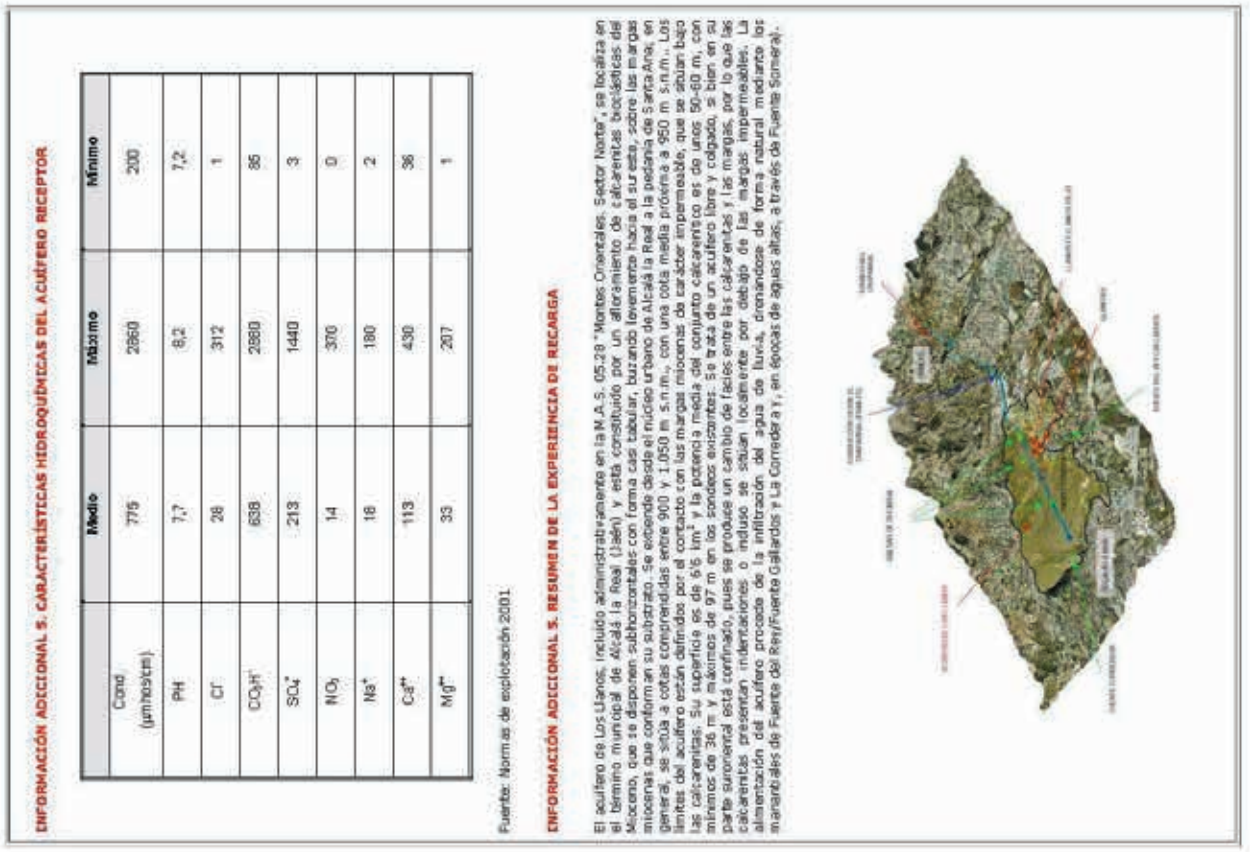


Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa (continuación)



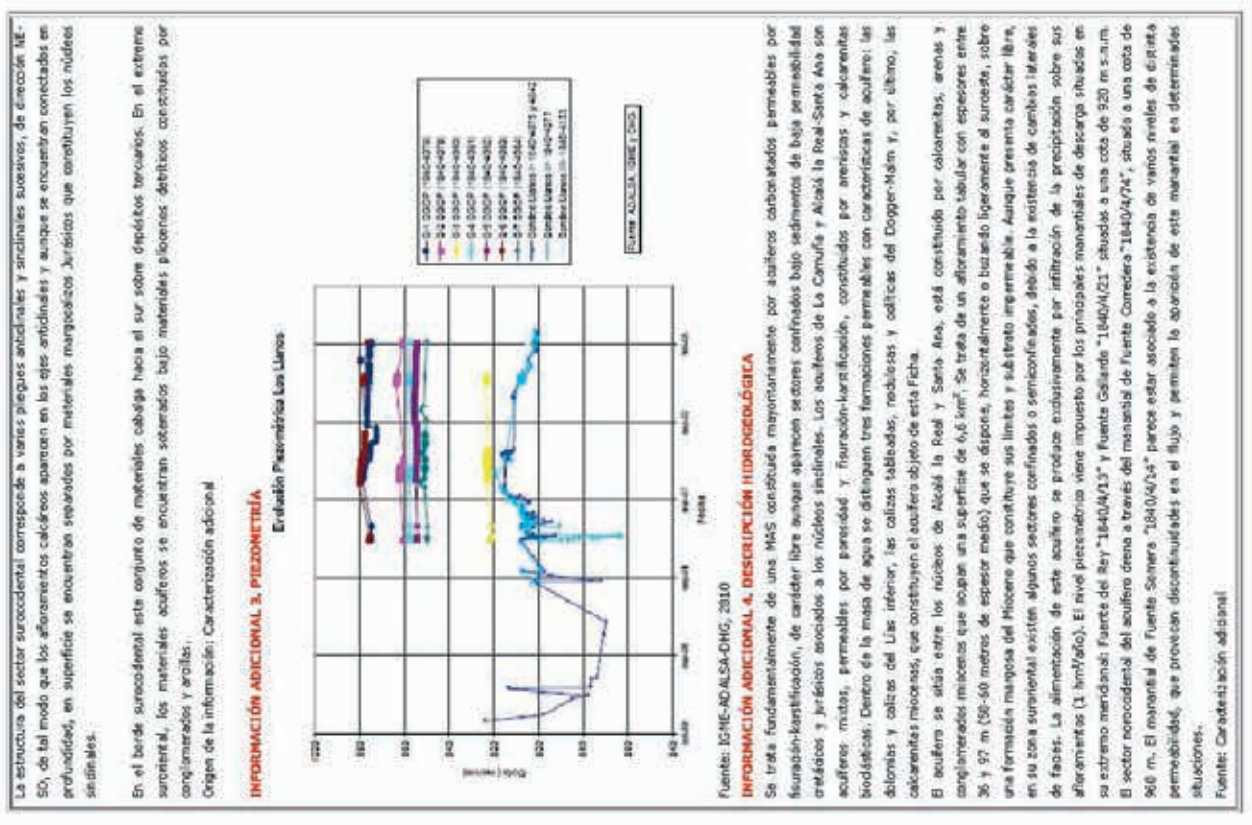
INFORMACIÓN ADICIONAL 5. CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL ACUÍFERO RECEPTOR

	Medio	Máximo	Mínimo
Cond (µmhos/cm)	776	2860	200
PH	7,7	8,2	7,2
Cl⁻	28	312	1
CO_3H^-	638	2880	86
$SO_4^=$	213	1440	3
NO_3^-	14	370	0
Na^+	18	180	2
Ca^{++}	113	430	36
Mg^{++}	33	207	1

Fuente: Normas de explotación 2001.

INFORMACIÓN ADICIONAL 5. RESUMEN DE LA EXPERIENCIA DE RECARGA

El acuífero de Los Llanos, incluido administrativamente en la M.A.S. 05.29 "Montes Orientales, Sector Norte", se localiza en el término municipal de Alcalá la Real (Jaén) y está constituido por un afloramiento de calcarenitas bioclásticas del Mioceno, que se disponen subhorizontales con forma casi tabular, buzando levemente hacia el suroeste, sobre las margas miocenas que conforman su substrato. Se extiende desde el núcleo urbano de Alcalá la Real a la pedanía de Santa Ana, en general, se sitúa a cotas comprendidas entre 900 y 1.050 m s.n.m., con una cota media próxima a 950 m s.n.m.. Los límites del acuífero están definidos por el contacto con las margas miocenas de carácter impermeable, que se sitúan bajo las calcarenitas. Su superficie es de 9,6 km² y la potencia media del conjunto calcarenítico es de unos 50-60 m, con mínimos de 36 m y máximos de 97 m en los sondeos existentes. Se trata de un acuífero libre y colgado, si bien en su parte suroriental está confinado, pues se produce un cambio de facies entre las calcarenitas y las margas, por lo que las calcarenitas presentan intercalaciones o incluso se sitúan localmente por debajo de las margas impermeables. La alimentación del acuífero procede de la infiltración del agua de lluvia, drenándose de forma natural mediante los manantiales de Fuente del Rey/Fuente Gallardo y La Corredera y, en épocas de aguas altas, a través de Fuente Sumeral.



La estructura del sector suroccidental corresponde a varios pliegues anticlinales y sinclinales sucesivos, de dirección NE-SO, de tal modo que los afloramientos calcáreos aparecen en los ejes anticlinales y aunque se encuentran conectados en profundidad, en superficie se encuentran separados por materiales margocalizos Jurásicos que constituyen los núcleos sinclinales.

En el borde suroccidental este conjunto de materiales cabalga hacia el sur sobre depósitos terciarios. En el extremo suroriental, los materiales acuíferos se encuentran soterrados bajo materiales pliocenos detríticos constituidos por conglomerados y arcillas.

Origen de la información: Caracterización adicional

INFORMACIÓN ADICIONAL 3. PIEZOMETRÍA

Evolución Piezométrica Los Llanos

Fuente: IGME-ADALSA-DHG, 2010

INFORMACIÓN ADICIONAL 4. DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA

Se trata fundamentalmente de una MAS constituida mayoritariamente por acuíferos carbonatados permeables por fisuración-karstificación, de carácter libre aunque aparecen sectores confinados bajo sedimentos de baja permeabilidad cretácicos y jurásicos asociados a los núcleos sinclinales. Los acuíferos de La Camuña y Alcalá la Real-Santa Ana son acuíferos mixtos, permeables por porosidad y fisuración-karstificación, constituidos por arenisas y calcarenitas biodetríticas. Dentro de la masa de agua se distinguen tres formaciones permeables con características de acuífero: las dolomías y calizas del Lías inferior, las calizas tableadas, nodulosas y oolíticas del Dogger-Malm y, por último, las calcarenitas miocenas, que constituyen el acuífero objeto de esta Ficha.

El acuífero se sitúa entre los núcleos de Alcalá la Real y Santa Ana, está constituido por calcarenitas, arenas y conglomerados miocenos que ocupan una superficie de 6,6 km². Se trata de un afloramiento tabular con espesores entre 36 y 97 m (50-60 metros de espesor medio) que se dispone, horizontalmente o buzando ligeramente al suroeste, sobre una formación margosa del Mioceno que constituye sus límites y substrato impermeable. Aunque presenta carácter libre, en su zona suroriental existen algunos sectores confinados o semiconfinados, debido a la existencia de cambios laterales de facies. La alimentación de este acuífero se produce exclusivamente por infiltración de la precipitación sobre sus afloramientos (1 hm³/año). El nivel piezométrico viene impuesto por los principales manantiales de descarga situados en su extremo meridional: Fuente del Rey "1840/4/13" y Fuente Gallardo "1840/4/21" situados a una cota de 920 m s.n.m. El sector noroccidental del acuífero drena a través del manantial de Fuente Corredera "1840/4/24", situado a una cota de 900 m. El manantial de Fuente Sumera "1840/4/34" parece estar asociado a la existencia de varios niveles de diferente permeabilidad, que provocan discontinuidades en el flujo y permiten la aparición de este manantial en determinadas situaciones.

Fuente: Caracterización adicional

Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa. Información adicional (continuación)

Finalmente, la cartografía se completa, a escala de la masa, con la incorporación del Mapa geológico de la masa de agua subterránea (MAPA 3) que se incluye en cada una de las masas que conforman la ficha del sistema de explotación de recursos.

De acuerdo con la metodología descrita, el apartado de identificación de actuaciones de recarga artificial realizado en cada Demarcación Hidrográfica, incluye de nuevo tres secciones comunes:

A) Descripción de los sistemas de explotación de recursos (SER): recoge una breve descripción de los SER de cada Demarcación Hidrográfica.
B) Masas seleccionadas y sistemas de explotación de recursos (SER) implicados: detalla qué masas de las seleccionadas se adscriben a cada SER (por su localización o por su definición en el Plan Hidrológico) y, por tanto, qué sistemas de explotación se contemplan en el estudio. Esta información, de forma gráfica, constituye el mapa llave (MAPA 1) del apartado siguiente, el catálogo de actuaciones de recarga.
C) Catálogo de actuaciones de recarga: presenta el conjunto de fichas de los SER implicados junto con los mapas auxiliares asociados (MAPAS 2 y 3).

RESULTADOS OBTENIDOS

Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil

El resultado de la aplicación sucesiva de los criterios de selección en esta Demarcación da lugar a la selección preliminar de una parte de la MASb 011.003 Cuenca del Sil, en concreto el Sistema de Explotación Sil Inferior (tabla 1, figura 5). No obstante, el análisis y juicio experto posterior desestima incluir actuaciones de recarga en este momento.

Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

De la aplicación de los criterios de selección definidos resulta una selección preliminar de 25 masas del total de las 34 delimitadas en esta Demarcación (figura 6). No obstante, después de evaluar la problemática de la cuenca, se recomienda iniciar los estudios y trabajos necesarios para acometer actuaciones de recarga artificial en cuatro de ellas (figura 7).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las cuatro masas seleccionadas se recogen en seis fichas (tabla 2) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. La información disponible en esta cuenca no permite realizar propuestas detalladas de recarga: el sistema de recarga, la ubicación y el origen del agua deberán determinarse en un estudio hidrogeológico concreto que se inicie para determinar la viabilidad técnica de las siguientes propuestas.

Ficha 1.- SER 01.2.01 AGÜERA

MASb 012.011 Castro Urdiales

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de Castro Urdiales*

La recarga se plantea como mejora del abastecimiento urbano ya que se han identificado problemas de suministro, principalmente en épocas de estiaje en las que se suma el aumento de la demanda con la disminución de los recur-

COD	NOMBRE DE LA MASA	Antecedentes			Masas Riesgo-C	ZVN	Sequías	Humedal	Prioridad
		Sobrex	RAA	UUHH					
011.001	Cuenca Alta del Miño								
011.002	Cuenca Baja del Miño								
011.003	Cuenca del Sil						x		5
011.004	Cubeta del Bierzo								
011.005	Aluvial del Bajo Miño								
011.006	Xinzo de Limia								
	SUBTOTAL						1		
	TOTAL	**1**							

Tabla 1. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil

Notas: En la columna Masas Riesgo-Cuantitativo, X_e se refiere a las masas en riesgo exclusivamente cuantitativo y X a las masas en riesgo mixto (cuantitativo y químico). En la columna Prioridad, la máxima prioridad se corresponde con el valor 1.

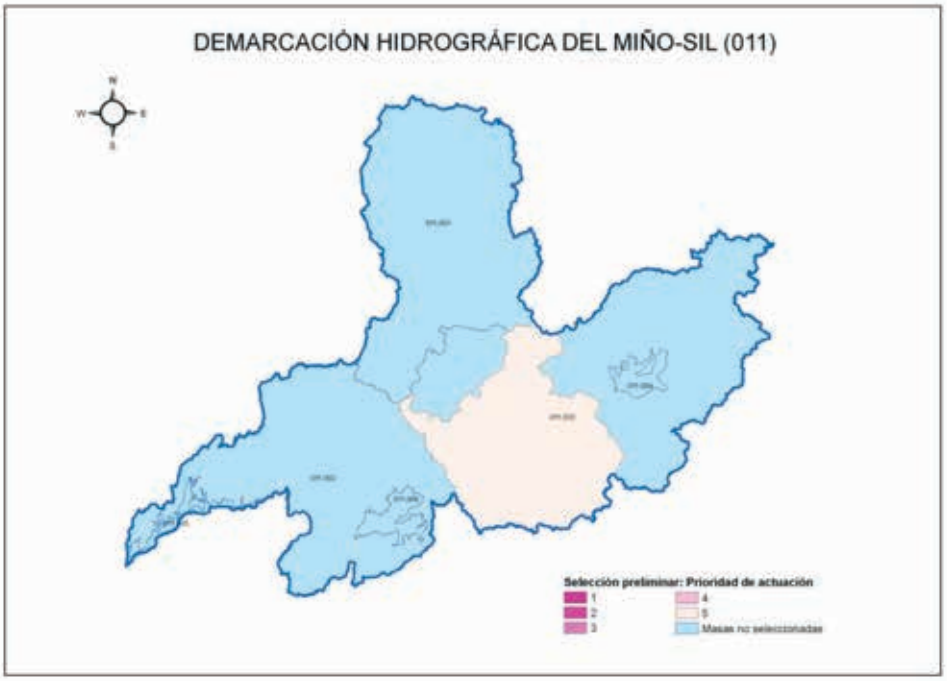


Figura 5. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil

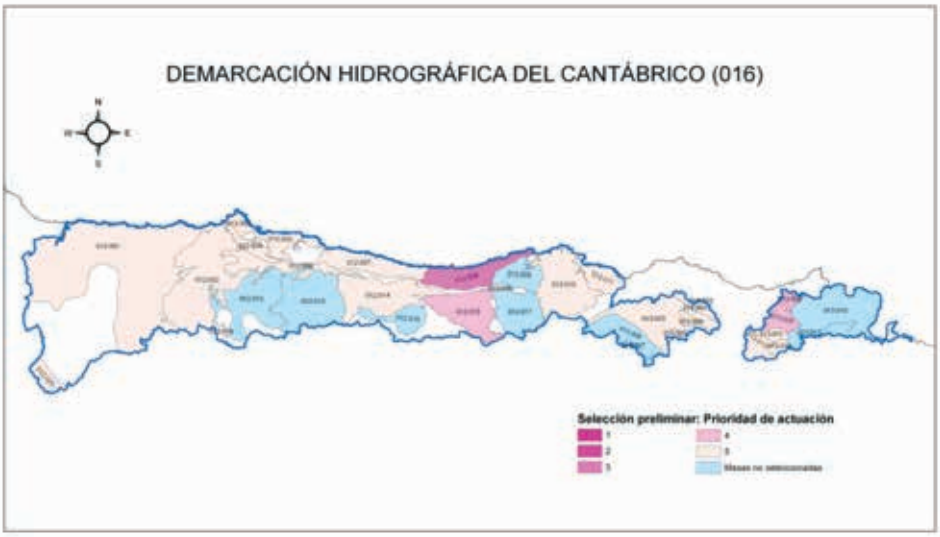


Figura 6. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

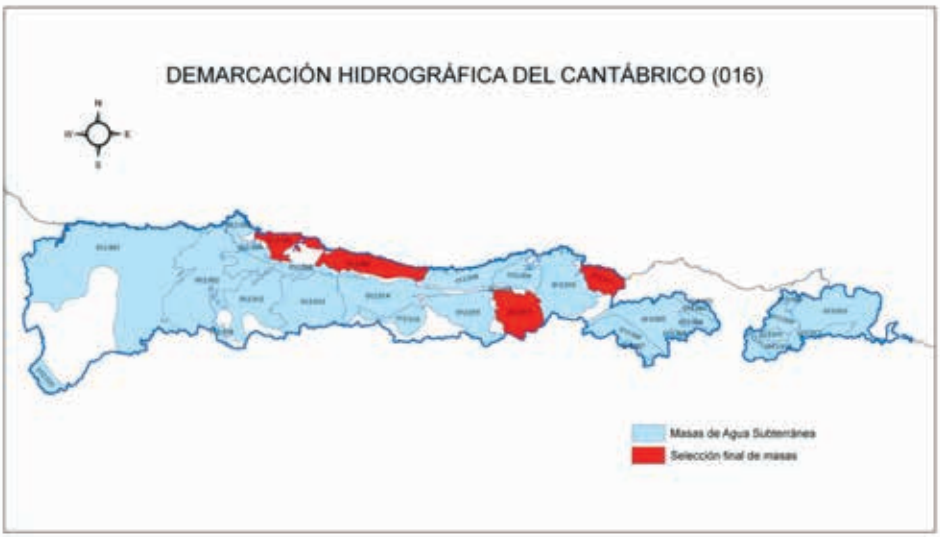


Figura 7. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 01.02.01 AGUERA	012.011 Castro Urdiales
2	SER 01.02.02 ASÓN	012.011 Castro Urdiales
3	SER 01.02.03 PAS-MIERA	012.017 Puerto del Escudo
4	SER 01.02.08 LLANES	012.007 Llanes-Ribadesella
5	SER 01.02.09 SELLA	012.007 Llanes-Ribadesella
6	SER 01.02.11 NALÓN	012.005 Villaviciosa

Tabla 2. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

sos. Por ello, aunque la información recogida es escasa, se considera factible iniciar los estudios previos de viabilidad acerca de las siguientes alternativas de recarga: recarga con aguas procedentes del río Agüera y con aguas depuradas (EDAR de Castro Urdiales y de Gurienzo).

Ficha 2.- SER 01.02.02 ASÓN

MASb 012.011 Castro Urdiales

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de Castro Urdiales*

La problemática de la masa en este sistema es la misma que en el SER anterior, siendo las alternativas de recarga en este caso la recarga con aguas procedentes del río Asón y con aguas depuradas de la EDAR de San Pantaleón.

Ficha 3.- SER 01.2.03 PAS-MIERA

MASb 012.017 Puerto del Escudo

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero jurásico del Valle del Pas*

En este caso, se considera factible iniciar los estudios previos de viabilidad acerca de las alternativas de recarga en la masa, dado el alto valor estratégico que para el abastecimiento a Santander, representa el acuífero jurásico del valle del Pas, cuyas extracciones en estiaje deben diminuir para mantener el caudal ambiental del río Pas y que se complementan con el agua superficial procedente del "bi-trasvase Ebro-Besaya". Las alternativas a estudiar, como agua de recarga, son los ríos Pas y Pisueña, y las aguas depuradas de las EDAR de Selaya y Sarón, aunque ambas presentan escaso caudal.

Ficha 4.- SER 01.2.08 LLANES

MASb 012.007 Llanes-Ribadesella

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos carbonatados de Llanes-Ribadesella*

En la actualidad se aprovechan para abastecimiento urbano numerosos manantiales en régimen natural que, en ocasiones, presentan problemas en estiaje y, recientemente, se ha planteando un estudio sobre la posibilidad de abastecer con aguas subterráneas los núcleos urbanos de Ribadesella, Llanes y Ribadedeva. La recarga artificial se plantea como mejora de la captación de los manantiales y, con la puesta en explotación de los acuíferos que conforman la masa, como medida de garantía del suministro urbano. Por ello, se considera factible como alternativas de agua de recarga el río Riensena, la captación de la escorrentía no regulada o la utilización de los recursos de la EDAR de Llanes.

Ficha 5.- SER 01.2.09 SELLA

MASb 012.007 Llanes-Ribadesella

***Actuación:** Recarga artificial de los acuíferos carbonatados de Llanes-Ribadesella*

La problemática de la masa en este sistema es la misma que en el SER anterior, siendo las alternativas del agua de recarga en este caso el río Sella, la captación de la escorrentía no regulada o la utilización de los recursos de las EDAR de Arriondas, Ribadesella o Ricao.

Ficha 6.-SER 01.2.11 NALÓN

MASb 012.005 Villaviciosa

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero calcáreo-dolomítico jurásico de Gijón*

El abastecimiento urbano de Gijón se realiza actualmente mediante agua superficial (60%), el aprovechamiento de manantiales (33%) y la explotación, mediante sondeos, del acuífero liásico de Gijón (7%). Inicialmente la explotación de este acuífero era mucho mayor, pero la afección al nacimiento del río Peña Francia, tuvo como consecuencia el descenso de los caudales de explotación del acuífero. Por ello se plantea la recarga para garantizar la explotación sostenible de los recursos de agua subterránea en este sector, que permita la existencia de un caudal ambiental del

río en periodos de estiaje. Las alternativas a estudiar son, como agua de recarga, el embalse de San Andrés de los Tacones-Aboño, el río Piles, la captación de la escorrentía no regulada y las aguas de las EDAR de Gijón Este y Gijón Oeste.

Demarcación Hidrográfica del Duero

Teniendo en cuenta los principales problemas o temas importantes identificados en la Demarcación en los que el fomento de la recarga artificial tendría sentido, de las 29 MASb seleccionadas preliminarmente mediante la aplicación sucesiva de los criterios de selección (figura 8), parece posible plantear actuaciones de recarga artificial de acuíferos en 13 de ellas (figura 9).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las trece masas seleccionadas se recogen en seis fichas (tabla 3) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. A continuación se presenta un resumen de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

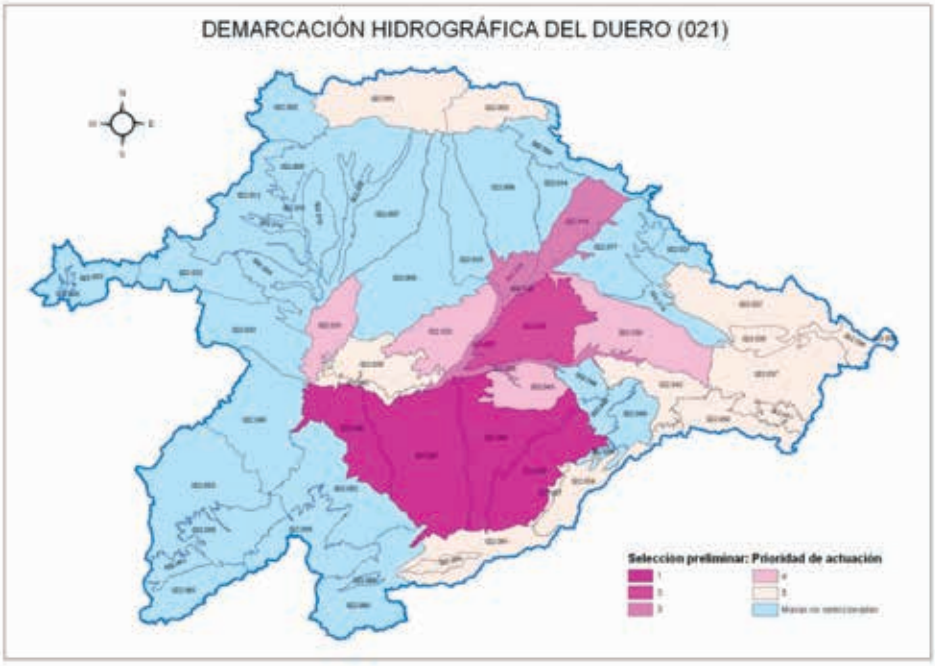


Figura 8. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Duero

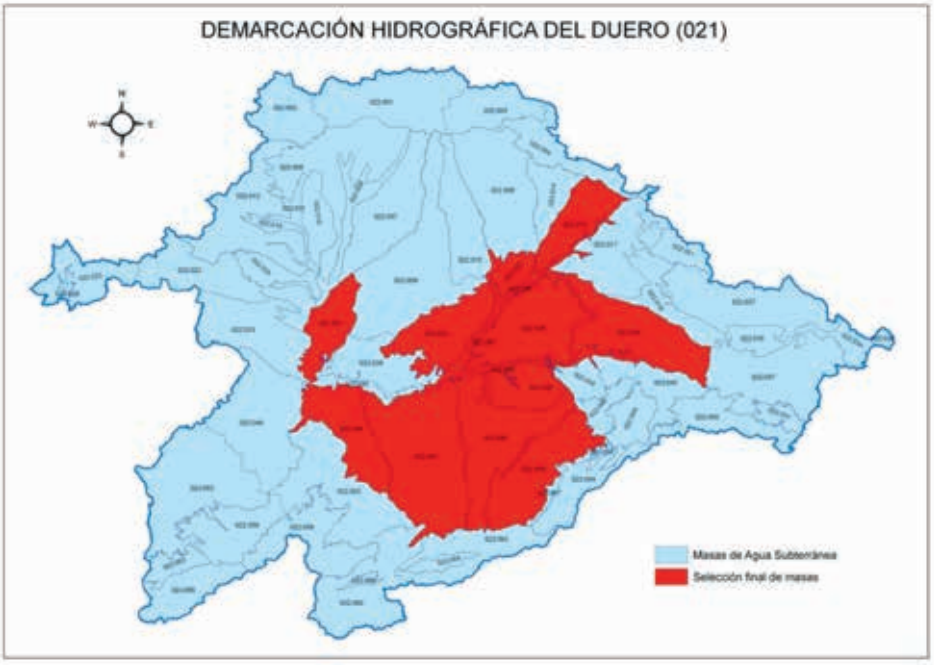


Figura 9. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Duero

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 02.05 PISUERGA	021.020 Aluviales del Pisuerga-Arlanzón
		021.025 Páramo de Astudillo
		021.029 Páramo de Esgueva
		021.032 Páramo de Torozos
2	SER 02.06 ARLANZÓN	021.016 Castrojeriz
		021.020 Aluviales del Pisuerga-Arlanzón
3	SER 02.07 ALTO DUERO	021.030 Aranda de Duero
		021.039 Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas
4	SER 02.08 RIAZA	021.029 Páramo de Esgueva
		021.039 Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas
		021.043 Páramo de Cuellar
		021.055 Cantimpalos
5	SER 02.09 ADAJA-CEgA	021.043 Páramo de Cuellar
		021.045 Los Arenales
		021.047 Medina del Campo
		021.055 Cantimpalos
6	SER 02.10 BAJO DUERO	021.031 Villafáfila
		021.032 Páramo de Torozos
		021.047 Medina del Campo
		021.048 Tierra del Vino

Tabla 3. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación del Duero

Ficha 1. SER 02.05 PISUERGA

MASb 022.020 Aluviales del Pisuerga-Arlanzón

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Aluvial Cuaternario del Pisuerga-Arlanzón con aguas del río Pisuerga a través del Canal de Castilla*

Plantea la posibilidad de derivar caudales del río Pisuerga e infiltrarlos en el aluvial para el aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento de las riberas. También incluye la relación de EDAR que, en función de su tratamiento, serían más adecuadas como agua de recarga (Valladolid, Dueñas y Venta de Baños). Respecto al sistema de recarga, parece que el más idóneo a los materiales serían las zanjas y canales, que podrían interconectarse a través del canal de Castilla. Esta actuación se valora de baja prioridad como herramienta para paliar la sobreexplotación detectada aunque presenta un interés relativo como ensayo para utilizar la capacidad de almacenamiento en riberas y la mejora de los ecosistemas asociados.

MASb 022.025 Páramo del Astudillo

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo del Astudillo*

Propone evaluar la escorrentía invernal en los arroyos de la vertiente norte (Astudillo) y en la vertiente sureste de la masa (Valdeolmillos y Villamediana), pero dada la disposición estructural de la masa (estratos horizontales de calizas formado una plataforma elevada sobre un fondo impermeable) y la situación de los potenciales recursos hídricos, esta operación de recarga no resulta viable en las calizas del Páramo. De acuerdo con la Confederación Hidrográfica del Duero, para el periodo 1972-2009, el descenso de los niveles piezométricos al sur de la masa se cifra entre 20 a 25 m (en el rango de profundidades mayores a 200 m); por lo que la actuación de recarga debe valorarse y plantearse en el acuífero detrítico confinado en profundidad (MASb 022.067).

MASb 022.029 Páramo de Esgueva

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de Esgueva*

Como recursos naturales disponibles plantea derivar excedentes invernales del río Esgueva o del arroyo del Madrazo, evaluados en 1984 por el IGME en el proyecto de realización de una experiencia de recarga en el acuífero detrítico terciario confinado. Dada la disposición estructural de la masa y la situación de los recursos disponibles, no resulta viable plantear esta operación de recarga no resulta viable en las calizas del Páramo. Respecto al acuífero detrítico terciario (diferenciado actualmente en el MASb 022.067), la prueba de recarga de 1984 indica que la recarga es viable como método para paliar el problema de sobreexplotación del acuífero. Por ello, se considera factible actualizar los estudios de viabilidad de la recarga a lo largo del río Esgueva y arroyo Madrazos para invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos del acuífero terciario detrítico.

MASb 022.032 Páramo de Los Torozos

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de Los Torozos en el entorno de Dueñas y Valladolid*

Plantea evaluar los caudales invernales de los arroyos que vierten en la margen derecha del río Pisuerga, entre las localidades de Dueñas y Valladolid, para infiltrarlos en el acuífero detrítico terciario dado que la disposición estructural de la masa y la situación de los posibles recursos disponibles no permite la recarga artificial en las calizas del Páramo; pero sí se considera factible iniciar los estudios previos acerca de las posibles alternativas de recarga en el acuífero detrítico terciario para invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos, sobre todo en esta parte de la masa donde estos descensos, cifrados por la Confederación Hidrográfica del Duero en el rango de profundidades mayor de 200 m, llegan a ser de 30 a 35 m.

Ficha 2. SER 02.06 ARLANZA

MASb 022.016 Castrojeriz

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero terciario detrítico con aguas de los ríos Hornazuela y Urbel*

Plantea evaluar los caudales invernales del río Hormazuela, entre las localidades de Isar y Villagutiérrez, para recargar el acuífero terciario detrítico; así como los del río Urbel a la altura de Las Quitanillas. Desde el año 1972 hasta el 2009, el descenso del nivel piezométrico en esta zona de la masa, en el rango mayor de 200 m de profundidad, se cifra entre 5 y 15 m; mientras que en el rango de 40 a 100 m de profundidad la masa muestra un ascenso de nivel prácticamente generalizado. Por tanto, se trataría de una actuación de baja prioridad respecto a la magnitud de la sobreexplotación observada aunque presenta un interés relativo como mejora de la calidad del agua del acuífero.

MASb 022.020 Aluviales del Pisuerga-Arlanzón

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Aluvial Cuaternario del Pisuerga-Arlanzón con aguas de los ríos Arlanza y Arlanzón*

Propone derivar caudales del río Arlanzón o del Arlanza e infiltrarlos en el aluvial. Como recursos depurados solo se localiza la EDAR de Burgos. Al igual que en el SER 02.05 Pisuerga, la recarga en esta parte de la masa se valora de baja prioridad como herramienta para paliar la sobreexplotación detectada en la Unidad Hidrogeológica en la que estaba integrada, presentando interés relativo como ensayo para utilizar la capacidad de almacenamiento en riberas y la mejora de los ecosistemas asociados.

Ficha 3. SER 02.07 ALTO DUERO

MASb 021.030 Aranda de Duero

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Detrítico Terciario de Aranda de Duero*

Plantea evaluar los caudales invernales en los ríos Bañuelos, Aranzuelo y Perales en las proximidades de Aranda del Duero para inyectarlos en el acuífero terciario detrítico, sobre la unidad detrítica de Aranda. El empleo del efluente de las EDAR Burgo de Osma y San Esteban estaría condicionado a la adecuación de su tratamiento previo. Parece que el emplazamiento más adecuado para la recarga sería el entorno de la localidad de Aranda de Duero, donde además existe un alto grado de explotación de las aguas subterráneas. Por ello se considera factible analizar las posibilidades de recarga planteadas con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos, teniendo en cuenta las experiencias de recarga artificial positivas en curso en la cercana MASb 022.045 Los Arenales.

MASb 021.039 Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Aluvial del Duero con aguas del río Duero*

Plantea la posibilidad de derivar caudales del río Duero e infiltrarlos en el aluvial para el aprovechamiento de la

capacidad de almacenamiento de las riberas. Además existe un importante potencial de aguas depuradas en Aranda del Duero. El descenso del nivel piezométrico observado, desde 1972 hasta 2009, se cifra entre 0 y 5 m, por lo que se trataría de una actuación de baja prioridad como herramienta para paliar la sobreexplotación detectada en la Unidad Hidrogeológica en la que estaba integrada esta MASb, aunque presenta un interés relativo como ensayo para utilizar la capacidad de almacenamiento en riberas y la mejora de los ecosistemas asociados.

Ficha 4. SER 02.08 RIAZA

MASb 021.029 Páramo de Esgueva

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de Esgueva*

Como recursos naturales disponibles plantea derivar excedentes invernales del río Jaramiel, evaluados en 1984 por el IGME en el proyecto de realización de una experiencia de recarga en el acuífero detrítico terciario confinado. Al igual que en el SER 02.05 Pisuerga, en esta parte de la masa, no se considera viable la recarga de las calizas del Páramo pero sí se considera factible la recarga a lo largo del río Jaramiel para invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos del acuífero terciario detrítico.

MASb 021.039 Aluvial del Duero: Aranda-Tordesillas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Aluvial del Duero con aguas de los ríos Riaza y Duratón*

Como agua de recarga plantea derivar caudales de los ríos Riaza y Duratón antes de su confluencia con el río Duero; o del mismo Duero, e infiltrarlos en el aluvial; y como recursos depurados presenta las EDAR de Peñafiel y Tudela. Al igual que en el SER 02.07, en esta parte de la masa, la recarga se considera una actuación de baja prioridad como herramienta para paliar la sobreexplotación detectada en la Unidad Hidrogeológica en la que estaba integrada esta MASb, con interés relativo como ensayo para utilizar la capacidad de almacenamiento en riberas y la mejora de los ecosistemas asociados.

MASb 021.043 Páramo de Cuéllar

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de Cuellar con aguas del río Duratón*

En esta parte de la masa se plantea la posibilidad de derivar caudales del río Duratón a partir de la localidad de Torre de Peñafiel, así como captar la escorrentía del Arroyo de Valimón o del Arroyo de Fuente La Peña. Para recargar las Calizas del Páramo contaríamos con las aguas depuradas de la EDAR de Cogeces del Monte ya que la disposición estructural elevada de las calizas dificulta el transporte de los caudales citados. Los recursos naturales, junto con el efluente de la EDAR de Peñafiel, podrían emplearse en la recarga del acuífero terciario profundo mediante sondeos de inyección. El acuífero cuaternario (aluvial y manto eólico) tiene escaso desarrollo en la zona, por lo que no se contempla ninguna actuación sobre él. La opción que se considera más factible es estudiar las posibilidades de recarga del acuífero terciario detrítico con objeto de invertir la tendencia al descenso del nivel piezométrico observado en esta zona.

MASb 021.055 Cantimpalos

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Cuaternario detrítico (aluvial y arenas eólicas) con aguas del embalse de Burgomillodo*

En la parte de masa incluida en este SER, el agua de recarga procedería del embalse de Burgomillodo (o una toma aguas abajo en el río Duratón). Además existe un importante potencial de aguas depuradas (EDAR de Cantalejo) por lo que sería viable utilizarlas para recargar el acuífero superior cuaternario. Puede planearse una recarga superficial en el acuífero cuaternario (que alimenta por goteo el terciario profundo regional) similar a la existente en Los Arenales, o recargar directamente el terciario profundo mediante sondeos de inyección. Dados los resultados positivos obtenidos en las experiencias en curso en la masa 022.045 Los Arenales, se considera factible extender esta operación al manto eólico de Cantimpalos e iniciar los estudios previos de viabilidad con objeto de mejorar la calidad del agua y de los humedales asociados (Lagunas de Cantalejo). No obstante, desde el punto de vista del descenso piezométrico esta actuación no se considera prioritaria.

Ficha 5. SER 02.09 ADAJA-CEGA

MASb 022.43 Páramo de Cuéllar

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de Cuellar con aguas de escorrentía*

En esta parte de la masa, no existe ninguna EDAR, por lo que se plantea la posibilidad de captar caudales del arroyo del Henar (Río Cega) y la escorrentía vertiente desde Camporedondo en torno a Santiago del Arroyo para recargar, si es posible, las calizas del Páramo, el manto eólico o el terciario detrítico confinado. Lo más indicado sería recargar el acuífero terciario detrítico

con objeto de invertir la tendencia al descenso del nivel piezométrico observado en la zona, así como evaluar la alternativa de recarga del manto eólico teniendo en cuenta las experiencias de recarga artificial en curso en la cercana MASb 022.045 Los Arenales.

MASb 022.45 Los Arenales

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Cuaternario detrítico (aluvial y arenas eólicas) de Los Arenales: investigación de nuevas áreas de recarga*

En la actualidad existen dos actuaciones de recarga en el acuífero superficial cuaternario de Los Arenales: la Cubeta de Santiuste y El Carracillo, que operan con los excedentes invernales de los ríos Voltoya y Cega respectivamente. Otros recursos superficiales a considerar en la masa serían los ríos Eresma y Malucas (afluente del Pirón). Además existe un importante potencial de aguas depuradas, en total hay 10 EDAR que generan un volumen anual aproximado de 9 hm^3/año. En vista de los resultados obtenidos durante los 7 y 4 años de funcionamiento de los dispositivos de recarga existentes, se propone la selección y caracterización geológica e hidrogeológica de detalle de nuevos emplazamientos para recarga, introduciendo, como experiencia-piloto, las aguas depuradas en el agua de recarga. Así mismo, se considera muy recomendable iniciar los estudios necesarios para ampliar las áreas de recarga en la masa y extrapolar esta experiencia al resto de las masas de la cuenca con características geológicas e hidrogeológicas análogas.

MASb 022.47 Medina del Campo

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Cuaternario detrítico (aluvial y arenas eólicas) en San Pascual*

Se propone evaluar los excedentes invernales del río Adaja y de su aflluente el río Arevalillo, en el entorno de San Pascual, para recargar el acuífero cuaternario mediante un sistema combinado de zanjas, canales y balsas, de forma análoga a la recarga de la masa 022.045 Los Arenales: las experiencias en la comarca de El Carracillo avalan el estudio y aplicación en esta masa. Además, dado que en esta zona de la masa el flujo tiene componente vertical descendente y constituye una importante zona de recarga de los acuíferos profundos, la recarga del acuífero cuaternario contribuiría indirectamente a la recarga del acuífero terciario detrítico. Otra propuesta es la utilización del efluente de la EDAR de Arévalo para recargar el acuífero cuaternario en las inmediaciones de la planta.

MASb 022.55 Cantimpalos

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Cuaternario detrítico (aluvial y arenas eólicas) con aguas de los ríos Pirón y Cega*

En esta parte de la masa podría derivarse agua del río Pirón, a la altura de Monzonillo, o del río Cega en la confluencia con el arroyo vertiente de Turégano, para la recarga del acuífero cuaternario. De las EDAR existentes, las más cercanas al área potencial de recarga son Turégano y Carboneros el Mayor. Al igual que en el SER 02.08, en esta parte de la masa puede planearse una recarga superficial en el acuífero cuaternario (que alimenta por goteo el terciario profundo regional), similar a la existente en Los Arenales; o recargar directamente el terciario profundo mediante sondeos de inyección. Dados los resultados positivos obtenidos en la recarga de la masa 022.045 Los Arenales, se considera factible extender esta operación al manto eólico de Cantimpalos en aquellos lugares donde se compruebe que el espesor de acuífero tenga entidad suficiente. No obstante, desde el punto de vista del descenso piezométrico esta actuación no se considera prioritaria.

Ficha 6. SER 02.10 BAJO DUERO

MASb 022.31 Villafáfila

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero terciario detrítico en Arquillinos*

Se propone evaluar los caudales invernales del río Salado y su calidad, en las proximidades del núcleo de Arquillinos, para recargar el acuífero detrítico profundo mediante sondeos de inyección. La propuesta incluye también la evaluación de la escorrentía del arroyo afluente al río salado. Por la situación de estos recursos no es factible efectuar una recarga que favorezca el funcionamiento de las lagunas de Villafáfila, pero ésta sería beneficiosa para el conjunto del acuífero y de las captaciones para abastecimiento que se sitúan aguas abajo, en el sentido del flujo subterráneo. En esta zona de la masa, los descensos piezométricos observados en el intervalo de profundidades de 40 a 100 no son tan importantes (de 0 a 10 m) como en el rango de profundidades mayores de 200 m donde el descenso alcanza los 30 a 35 m; por lo que la actuación de recarga que pueda iniciarse debería ir orientada a alcanzar tales profundidades.

MASb 022.32 Páramo de los Torozos

***Actuación**: Recarga artificial de la masa Páramo de los Torozos con aguas de los ríos Hornija y Bajóz*

Se propone evaluar los caudales invernales en la cabecera

de los ríos Hornija (en Peñaflor de Hornija y Wamba) y Bajóz (en La Santa Espina) para infiltrarlos en el acuífero detrítico terciario. Dada la disposición estructural de la masa y la situación de los posibles recursos disponibles, no resulta viable plantear esta recarga en las calizas del Páramo; pero sí se considera factible la recarga del acuífero detrítico terciario confinado (MASb 022.067), donde los descensos piezométricos observados, en el rango de profundidades mayor de 200 m, llegan a ser de 25 a 30 m.

MASb 022.47 Medina del Campo

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos Cuaternario y Terciario detrítico en la masa Medina del Campo*
Con la información analizada parece posible plantear: a) Recarga del acuífero cuaternario con excedentes invernales del río Zapardiel mediante un sistema combinado de zanjas, canales y balsas; b) Recarga de los niveles más superficiales del acuífero detrítico terciario mediante sondeos de inyección (de profundidades entre 40 y 100 m) con agua excedente de los ríos Guareña y Trabancos. Respecto a las aguas depuradas, se propone la EDAR de Medina del Campo que, por su situación, puede emplearse para la recarga del acuífero cuaternario (como actuación individual o complementando el caudal del río Zapardiel). Dado que la recarga del acuífero cuaternario se está realizando con buenos resultados en la masa de Los Arenales y que los niveles acuíferos terciarios más explotados son los más superficiales, se considera necesario analizar la realización de las dos alternativas planteadas en las inmediaciones de Medina y en el centro y este de la masa.

MASb 022.48 Tierra del vino

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Terciario Detrítico en la masa Tierra del Vino entre Cantalpino y Fuentesauco*
Se propone evaluar los caudales invernales en los ríos Mazores y Guareña para la recarga de acuífero terciario detrítico, en los niveles más superficiales (c8 y c9), así como considerar el efluente de la EDAR de Fuentesauco, como agua alternativa de recarga. Teniendo en cuenta que los mayores descensos piezométricos observados (20 a 30 m), en el rango de profundidades de 40 a 100 m, se localizan al sur de la masa (Cantalpino) y decrecen hacia el norte, estando en el entorno de Fuentesauco sobre los 10-15 m; se considera necesario iniciar los estudios de viabilidad para realizar la recarga artificial sobre los niveles superiores del acuífero terciario detrítico en el sector entre Cantalpino y Fuentesauco.

Demarcación Hidrográfica del Tajo

El número de masas seleccionadas preliminarmente en esta Demarcación es de 16, sobre un total de 24 (figura 10). El análisis realizado en la cuenca descarta algunas masas por no presentar una problemática realmente importante, quedando una selección final de cuatro masas (figura 11). Cabe destacar, como alternativa de futuro, la utilización del acuífero del Calerizo (antiguo abastecimiento de Cáceres), para su utilización potencial como "almacén"; si bien, desde el punto de vista administrativo, el acuífero se localiza fuera del ámbito de una Masa de Agua Subterránea.

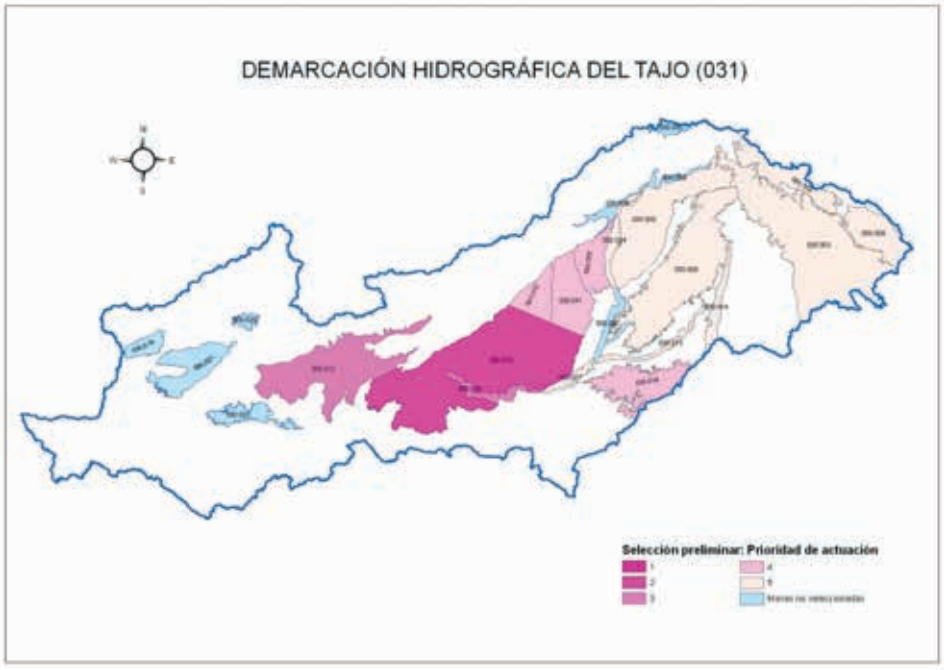
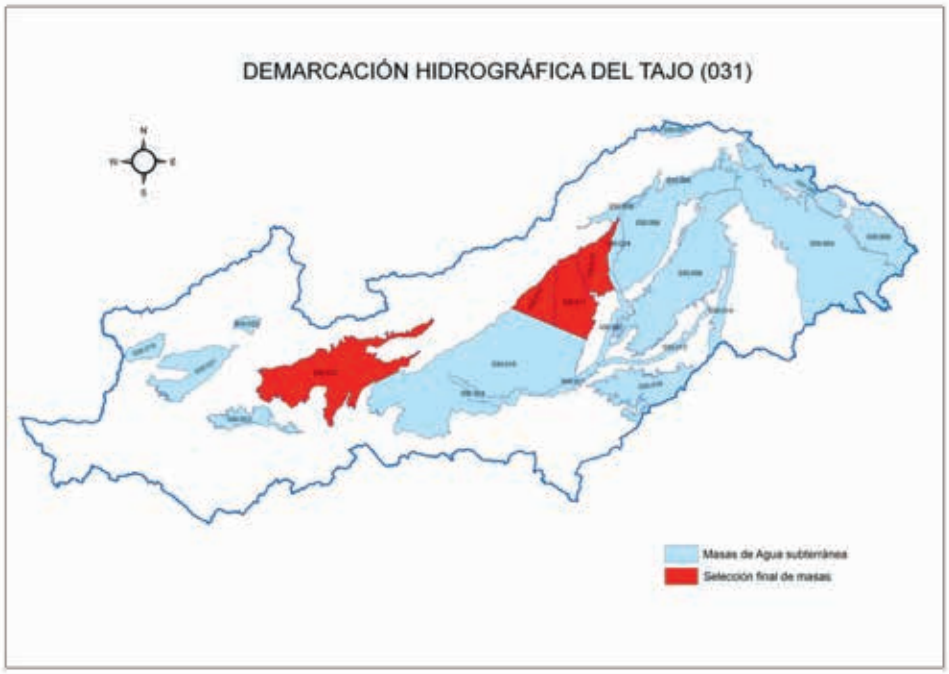


Figura 10. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Tajo

Figura 11. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Tajo



Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las cuatro masas seleccionadas se recogen en dos fichas (tabla 4) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. A continuación se presenta un resumen de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

Ficha 1.- SER 03.05 ABASTECIMIENTO A MADRID

El Acuífero Detrítico Terciario de Madrid (ADTM) se extiende por las tres MASb que integran esta ficha. Debido al interés de mantener un uso estratégico y sostenible de este acuífero para abastecimiento, se plantea la recarga artificial en profundidad como elemento de apoyo a la gestión; y para mejorar y aumentar el ritmo de recuperación de los niveles en el acuífero en las zonas de mayor explotación (coincidiendo entre otros con los campos de pozos del CYII) cuyos descensos residuales no se recuperan antes del siguiente período de bombeo. Dado que las aguas del acuífero están reservadas para abastecimiento urbano, parece lógico en este caso que el agua para recargar proceda de la red de embalses del CYII tratada previamente en una ETAP (agua de recarga con calidad apta para el consumo humano), por lo que por ahora se podrían descartar otras fuentes de agua y la disponibilidad hídrica dependería tanto de los recursos naturales como de los caudales de producción de las ETAP y la demanda. Por otra parte, los campos de pozos del CYII citados, se localizan aguas abajo de las ETAP.

MASb 030.010 Madrid: Manzanares-Jarama

***Actuación**: Recarga artificial del Acuífero Terciario Detrítico de Madrid*

En esta masa los campos de pozos del CYII en los que podrían llevarse a cabo operaciones de recarga artificial son: CANAL BAJO (11 pozos), CANAL ALTO-GOLOSO (6 pozos) y FUENCARRAL (9 pozos). El CYII está realizando experiencias satisfactorias de recarga en dos sondeos de los campos de pozos de Canal Alto-Goloso (Casilla de Valverde) y Fuencarral (FE-1). Las solicitudes de autorización para las pruebas experimentales se presentaron en 2002 y 2003 respectivamente. Se

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 03.05 ABASTECIMIENTO A MADRID	030.010 Madrid: Manzanares-Jarama
		030.011 Madrid: Guadarrama-Manzanares
		030.012 Madrid: Aldea del Fresno-Guadarrama
2	SER 03.09 TIÉTAR	030.022 Tiétar

Tabla 4. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Tajo

propone la utilización de sondeos del CYII en el acuífero para realizar operaciones de recarga artificial en ciclos de cuatro años, dependiendo de la explotación realizada en los mismos.

MASb 030.011 Madrid: Guadarrama-Manzanares:

***Actuación**: Recarga artificial del Acuífero Terciario Detrítico de Madrid*

En esta masa los campos de pozos del CYII en los que podrían llevarse a cabo operaciones de recarga artificial son: PLANTIO-MAJADAHONDA (6 pozos), CANAL DEL OESTE (7 pozos), MOSTOLES (7 pozos) y FUENLABRADA (4 pozos). El CYII está realizando experiencias satisfactorias de recarga en el sondeo La Cabaña del campo de pozos del Canal del Oeste, próximo a Pozuelo de Alarcón. La solicitud de autorización para la realización de pruebas experimentales se presentó en 2003. Se propone la utilización de sondeos del CYII en el acuífero para realizar operaciones de recarga artificial en ciclos de cuatro años, dependiendo de la explotación realizada en los mismos.

MASb 030.012 Madrid: Aldea del Fresno-Guadarrama

***Actuación**: Recarga artificial del Acuífero Terciario Detrítico de Madrid*

En esta masa los campos de pozos del CYII en los que podrían llevarse a cabo operaciones de recarga artificial son: GUADARRAMA (28 pozos) y BATRES (7 pozos). Una de las aportaciones externas al SER 03.05 proviene del río Alberche (en el SER 03.06) a través de la conducción del embalse de Picadas a Majadahonda, gestionada por el CYII. En este caso, podrían hacerse experiencias de recarga con agua proveniente de la conducción de Picadas antes de su tratamiento en la ETAP de Majadahonda, desviándola por la arteria aductora troncal del campo de pozos del Guadarrama. Además de la posibilidad llevada a cabo en otros campos de pozos de recarga con agua tratada en ETAP, en este campo podría ensayarse esta otra alternativa.

Ficha 2.- SER 03.09 TIÉTAR

MASb 030.022 Tiétar

***Actuación**: Recarga artificial mediante zanjas, canales y pozos en la margen izquierda del río Tiétar al norte de Talayuela*

Uno de los problemas importantes en la Demarcación es la satisfacción de las demandas futuras en regadíos públicos del Tiétar, alcanzando la superficie en regadío más de 30.000 has y existiendo déficits en casi todas las Unidades de Demanda Agraria. Como las aportaciones en la cuenca del Tiétar son importantes y la capacidad del embalse de Rosarito es pequeña (84 hm^3), se podría contar con agua para recarga artificial. Además se ha observado una tendencia al descenso del nivel piezométrico en un punto de la red de control en el municipio de Talayuela (Cáceres) cuyas causas podrían relacionarse con la explotación intensiva para regadío en la zona. Se propone abordar los estudios necesarios para realizar una experiencia piloto de recarga artificial en la zona norte de Talayuela en la zona regable del Rosarito, donde podrían utilizarse caudales tanto del Arroyo Santa María antes de su conexión con el Tiétar, como de los canales de regadío y acequias de la margen izquierda del Tiétar.

Demarcación Hidrográfica del Guadiana

El resultado de la aplicación sucesiva de los criterios de selección en la Demarcación del Guadiana da lugar a 14 masas seleccionadas preliminarmente (figura 12). Del análisis de la problemática general de la cuenca se desprende que la recarga artificial en las MASb de la Cuenca Alta del Guadiana, dada la singularidad de la zona y la particular evolución de los procesos ocurridos, no es considerada, en este momento, una técnica efectiva para solucionar o paliar los problemas detectados y racionalizar con ello el aprovechamiento de los recursos hídricos. Por el contrario, sí se plantean alternativas de recarga en el Guadiana Medio y Bajo Guadiana quedando finalmente propuestas dos masas para recarga (figura 13).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las dos masas seleccionadas se recogen en dos fichas (tabla 5) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. A continuación se presenta un resumen de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

Ficha 1. SER 04.1.03 SISTEMA GENERAL

MASb 041.015 Vega Bajas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero aluvial cuaternario del r*ío Guadiana y sus afluente*s*

Se considera factible considerar las alternativas siguientes de agua de recarga: el entorno de los ríos Albuera y Endrín (en la margen izquierda del río Guadiana y en el sector occidental del acuífero) y los embalses de Montijo, Proserpina y Los Canchales conectados por el

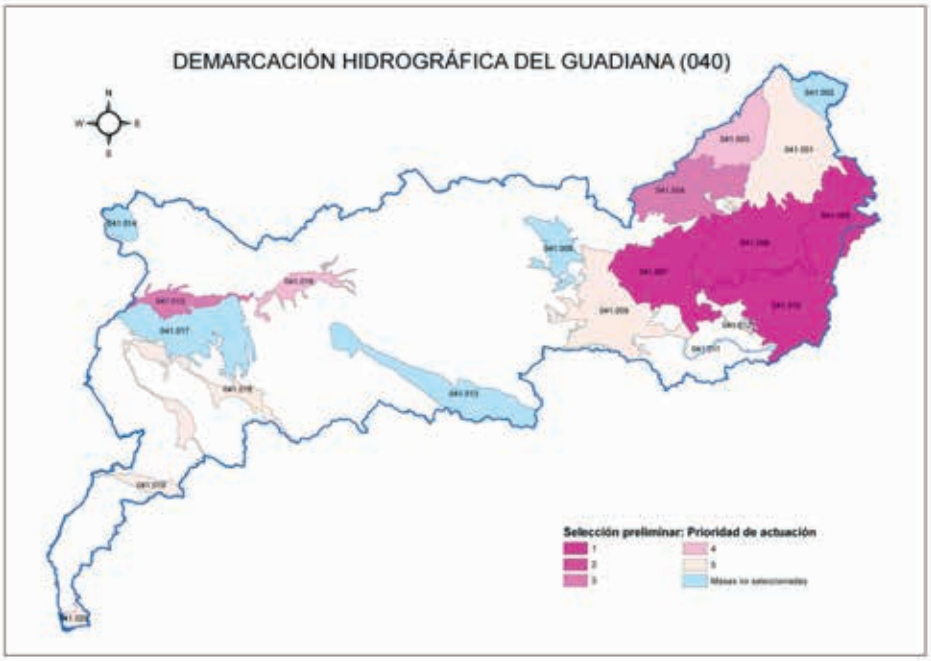


Figura 12. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana

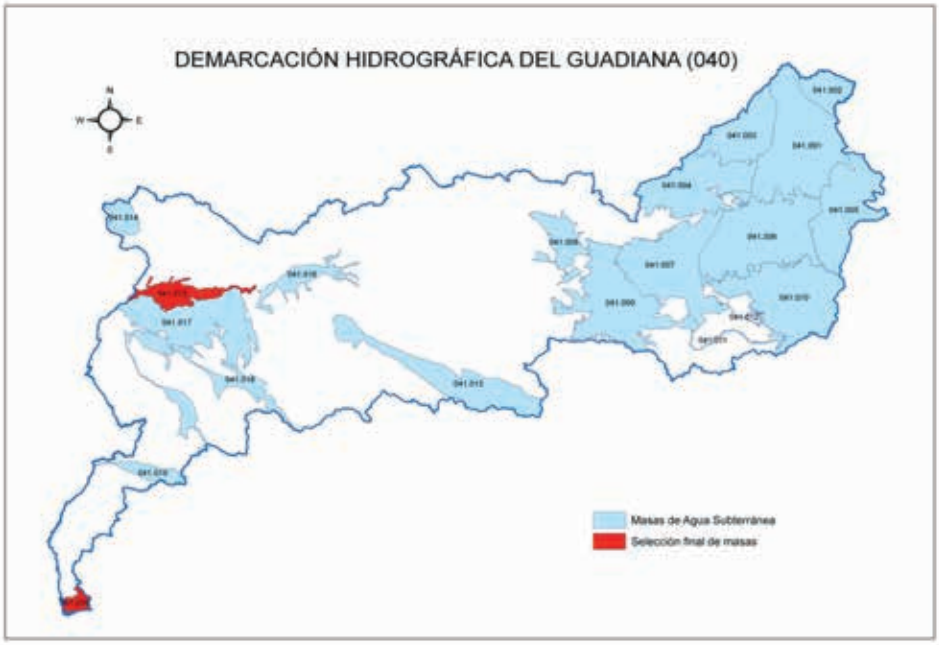


Figura 13. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana

canal de Montijo en la margen derecha y sector oriental del acuífero. Como infraestructura de apoyo podría contarse con las balsas de regulación anejas a los canales principales (Montijo y Lobón). Otra iniciativa sería la recarga con aguas depuradas, de forma independiente o complementando las alternativas anteriores. En cualquier caso, parece que el sistema adecuado de recarga sería de tipo superficial (balsas, canales).

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 04.1.03 SISTEMA GENERAL	041.015 Vega Bajas
2	SER 04.2.01 SISTEMA SUR	041.020 Ayamonte

Tabla 5. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana

Ficha 2. SER 04.2.01 SISTEMA SUR
MASb 041.020 Ayamonte

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Ayamonte-Huelva desde el canal del río Piedras*
Se propone utilizar las balsas y conducciones de riego de la mancomunidad del Chanza-Piedras para, en invierno, recargar con los excedentes de los embalses del Chanza y Andévalo que tienen recursos para tal fin. No obstante, en la actualidad la MASb presenta un ascenso generalizado del nivel después de la entrada en vigor de los riegos con aguas superficiales, por tanto el grado de sobreexplotación a la que estaba sometida la masa de agua ha desaparecido. En esta situación pueden aparecer, en muy poco tiempo, encharcamientos en las fincas por lo que antes de iniciar cualquier actuación de recarga sería recomendable diseñar primero un modelo de gestión de uso conjunto para el acuífero.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

En la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir el número de masas seleccionadas preliminarmente, después de aplicar los criterios de selección definidos, es de 37 del total de 60 (figura 14). De acuerdo con el Esquema Provisional de Temas Importantes, los problemas generales identificados en materia de aguas subterráneas son, en orden de prioridad, la explotación sostenible de las aguas subterráneas, la contaminación por nitratos y el abastecimiento urbano con aguas subterráneas. Por tanto, después de analizar las posibles alternativas de recarga en las masas y aplicando el juicio experto al conjunto de propuestas, parece posible plantear actuaciones de recarga en 17 MASb (figura 15).

Además de estas 17 masas, pueden citarse otras que, bien por tener una problemática ciertamente compleja (MASb 05.51 Almonte-Marismas del Guadalquivir) o bien por ser dependientes de la creación de infraestructuras que actualmente no se encuentran en fase de próxima ejecución (MASb 05.13 El Mencal, 05.14 Bédmar-Jódar, 05.15 Torres-Jimena, 05.18 San Cristóbal ó 05.45 Sierra Morena), quedarían fuera del alcance de este proyecto aunque no de su análisis en futuros proyectos de recarga artificial. Otra actuación de futuro sería la recarga artificial de las calizas cámbricas que conforman los materiales acuíferos de la MASb 05.45 Sierra Morena, a lo largo de la traza de las conducciones de abastecimiento que se están desarrollando en la actualidad.

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las 17 masas seleccionadas se recogen en cinco fichas (tabla 6) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. A continuación se presenta un resumen de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

Ficha 1. SER 05.S1 GUADIAMAR
MASb 05.49 Niebla-Posada

***Actuación**: Recarga artificial desde el río o embalse Agrio y desde el río Guadiamar sobre los afloramientos*

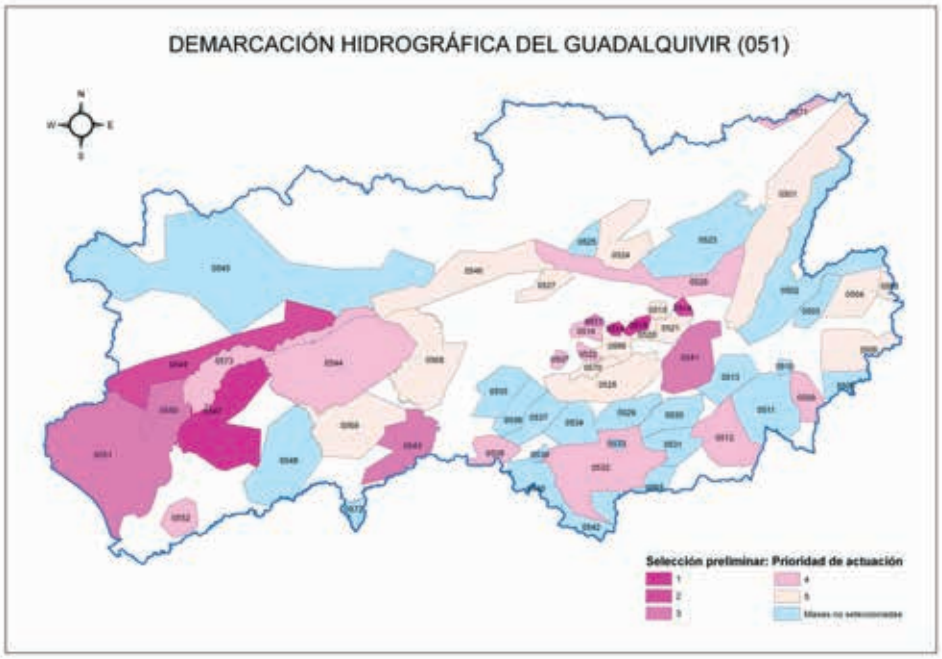


Figura 14. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

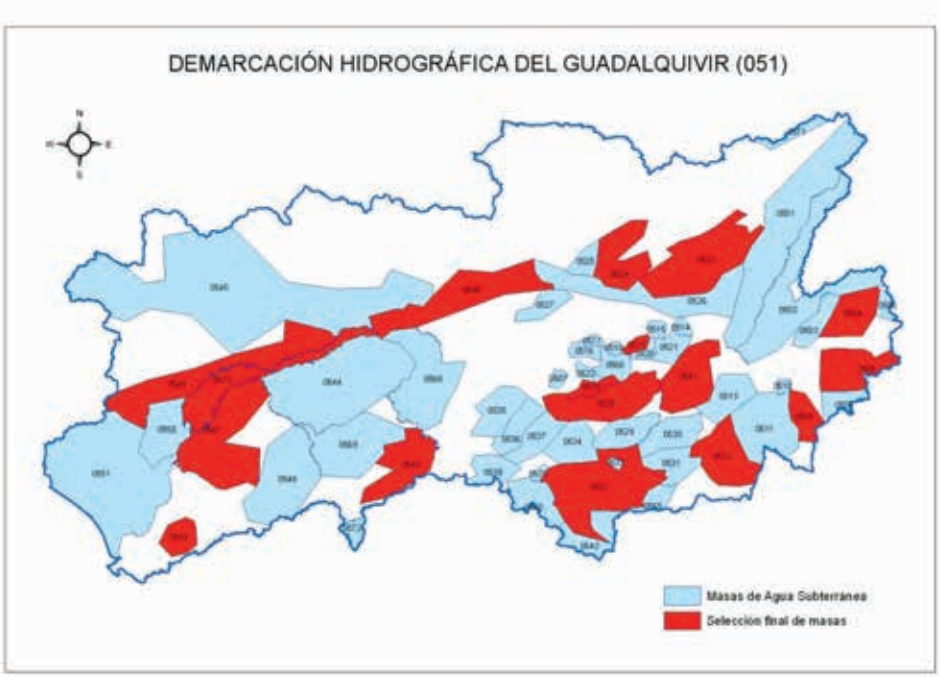


Figura 15. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 1 GUADIAMAR	05.49 Niebla-Posada
2	SER 4 ABASTECIMIENTO A JAÉN	05.70 Gracia Ventisquero
3	SER 5 HOYA DE GUADIX	05.12 Guadix-Marquesado
4	SER 6 ALTO GENIL	05.28 Montes Orientales. Sector Norte
		05.32 Depresión de Granada
5	SER 7 REGULACION GENERAL	05.04 Huéscar-Puebla de Don Fadrique
		05.06 Orce-María-Cúllar
		05.09 Baza-Caniles
		05.19 Mancha Real-Pegalajar
		05.23 Úbeda
		05.24 Bailén-Guarromán-Linares
		05.41 Guadahortuna-Larva
		05.43 Sierra y Mioceno de Estepa
		05.46 Aluvial del Guadalquivir-Medio
		05.47 Sevilla-Carmona
		05.49 Niebla-Posadas
		05.52 Lebrija
		05.73 Aluvial del Guadalquivir (Sevilla)

Tabla 6. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

del acuífero Mioceno de base.

Los acuíferos de esta masa presentan un elevado valor estratégico tanto para abastecimiento urbano como agrícola por lo que su gestión debe incorporar actuaciones de recarga que incrementen los recursos disponibles en el SER. Como alternativas de recarga se propone detraer caudales del río Agrio a su paso por los afloramientos de mioceno o, si la distancia es pequeña, derivar el agua desde la cerrada del embalse Agrio y hacerla llegar mediante una conducción directa a los afloramientos. Esta opción también resulta adecuada para el río Guadiamar a su paso por dichos afloramientos. También se plantea utilizar como agua de recarga la escorrentía super-

ficial no regulada, aunque posiblemente la creación de infraestructura de recarga en este caso sea más compleja que las opciones anteriores.

Ficha 2. SER 05.S4 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE JAÉN

MASb 05.70 Gracia Ventisquero

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Gracia-Morenita desde el río Víboras*

En el año 2000, el IGME elabora un informe donde estudia la posibilidad de realizar, en el acuífero de Gracia-Morenita, operaciones de recarga artificial mediante sondeos utilizando, como agua de recarga, los excedentes invernales de la cabecera del río Víboras (del arroyo del papel) antes de que esta escorrentía se salinice aguas abajo en la cerrada del embalse del Víboras. Los excedentes invernales estimados fueron de 4 a 5 hm^3/año. El trabajo concluye con una propuesta de recarga de 50 L/s, durante 6 meses al año, para extraer posteriormente un caudal de 100 L/s durante los meses de estiaje. La viabilidad técnica y económica de las operaciones de recarga ha sido valorada positivamente en el citado informe que incluye un modelo de flujo donde se estudian varias alternativas de inyección/extracción, quedando por tanto justificado el inicio de las actuaciones de recarga en esta masa.

Ficha 3. SER 05.S5 HOYA DE GUADIX

MASb 05.12 Guadix-Marquesado

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Guadix-Marquesado con aguas de escorrentía de la vertiente norte de Sierra Nevada*

Se propone favorecer la recarga de las aguas de escorrentía de la vertiente norte de Sierra Nevada, en la zona de influencia de la concentración de bombeos para uso industrial y agrícola del Llano de La Calahorra. Esta actuación disminuirá las posibles afecciones a las descargas que se producen hacia el río Verde, que además de un gran valor ambiental, contribuyen al abastecimiento de la localidad de Guadix. El transporte del agua se podrá realizar por las propias acequias de las comunidades de regantes dado que esos recursos no son utilizados en la época del año en la que se propone la recarga. La derivación de las aguas de escorrentía y su infiltración, en el área de influencia del bombeo, permitirían reducir estas afecciones y no supondría modificar el balance de la MASb, dado que lo único que se plantea es cambiar la zona de infiltración de las aguas de escorrentía de Sierra Norte, durante el periodo invernal, asegurando el mantenimiento de los usos industriales.

Ficha 4. SER 05.S6 ALTO GENIL

MASb 05.28 Montes Orientales. Sector Norte

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero detrítico mioceno de los Llanos de Alcalá la Real*

La explotación intensiva del acuífero de los Llanos de Alcalá la Real podría verse compensada con la recarga artificial de aguas captadas en el sondeo del Chaparral, en el acuífero cercano de Frailes – Boleta, donde el Ayuntamiento de Alcalá dispone de la correspondiente concesión y de unos excedentes invernales, que podrían ser almacenados en el acuífero donde se propone la recarga. En esta MAS ya existe infraestructura de transporte, tratamiento y de infiltración (balsas). Las experiencias de recarga realizadas por el IGME están contrastadas. El abastecimiento de Alcalá la Real con unos 23.000 habitantes requiere, para dotarlo de una mayor garantía, de la realización de estas actuaciones.

MASb 05.32 Depresión de Granada

***Actuación**: Recarga artificial de la Subunidad de la Vega de Granada*

Se recargarían una mínima parte de los excedentes invernales procedentes de los ríos Monachil y Dilar, para lo cual se requiere un mejor tratamiento de las aguas residuales que se vierten al río Monachil y la eliminación de finos de las aguas del río Dilar. La posibilidad de recarga del acuífero ya fue planteada en el proyecto de Guadalquivir de la FAO (incluso se hizo una operación de recarga artificial), de los años setenta del anterior siglo. También el IGME junto a la Agencia Andaluza del Agua de la Junta de Andalucía han realizado estudios al respecto, donde se indica disponibilidad de agua y emplazamientos seleccionados, motivo por el cual se considera factible iniciar las actuaciones de recarga en la masa. En el 2008, dentro del Proyecto del IGME "Análisis y discusión de la respuesta que ofrece el Uso Conjunto ante la dualidad precio-demanda. Comparación con otras filosofías de gestión hídrica. Aplicación a la Cornisa de la Vega de Granada" es en el último de los proyectos en los que se simula y se valora los resultados de la recarga que se propone en un contexto de uso conjunto.

Ficha 5. SER 05.S7 REGULACION GENERAL

MASb 05.04 Huéscar-Puebla de Don Fadrique

***Actuación**: Recarga artificial del Acuífero detrítico y carbonatado de Huéscar-Puebla de Don Fadrique desde el canal de San Clemente*

La operación de recarga está prevista en el Llano de La

Puebla, al noreste del núcleo de Huéscar. La actuación requiere la ejecución de uno o dos sondeos junto al Canal de San Clemente para captar las pérdidas que existen en el embalse de San Clemente en época invernal o enlazar, por elevación directa, las salidas naturales realizando una conducción que conecte con el canal. Las pérdidas que se producen aguas abajo del embalse (afloran en el manantial de Los Ruices, en el cauce del río Guardal*)*, se estiman en unos 200 L/s, y podrían ser utilizadas para la recarga durante al menos 6 meses al año (unos 3 hm^3/año). En todo caso, sería necesario compartir las operaciones de recarga, en su caso, con las propuestas en el acuífero de Huéscar-Puebla. Cabe indicar que el aprovechamiento del agua del embalse para la recarga son sus pérdidas no reguladas, fuera de la época de aprovechamiento directo por los regantes (época invernal). Por otra parte existe la infraestructura de transporte hasta la zona de recarga mediante el Canal de San Clemente; si bien, sería necesario la construcción de 2-3 km adicionales.

MASb 05.06 Orce-María-Cúllar

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos de Orce-María-Cúllar desde el canal de San Clemente*

Con la recarga se pretenden liberar presiones sobre el descenso de niveles, los abastecimientos y sobre algunos manantiales agotados como consecuencia de la explotación intensiva de este acuífero con motivo de los riegos intensivos localizados en el borde norte de la Sierra (sureste de Venta Micena, Piedra Cañepla, Cortijo Casablanca y borde norte de sierra de Umbría del Campo). Se trata de aprovechar las pérdidas que se producen aguas abajo del embalse de San Clemente, estimadas en unos 200 L/s, que podrían ser utilizadas para la recarga durante al menos 6 meses al año (unos 3 hm^3/año). En todo caso, sería necesario compartir las opciones de recarga, si procede, con las propuestas en el acuífero de Huéscar-Puebla de Don Fadrique. Se requerirá la ejecución de uno o dos sondeos para captar las pérdidas en época invernal o enlazar por elevación las salidas naturales realizando una conducción que conecte directamente con el canal. Donde termina el Canal de San Clemente se requerirá una conducción adicional hasta el emplazamiento donde se decida realizar las obra de recarga.

MASb 05.09 Baza-Caniles

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero detrítico de Baza-Caniles*

Se propone la recarga a partir de la escorrentía superficial conjunta de los ríos Valcabra y Galopón. En proyectos previos la aportación mínima se evaluaba en 11 hm^3/año, si bien las condiciones de los últimos años hacen que prudentemente se aconseje rebajar esta cifra a 3 hm^3/año, más aún teniendo en cuenta la regulación y demandas aguas abajo del embalse del Negratín. Se necesitaría un informe de viabilidad complementario que confirmara los emplazamientos viables y la disponibilidad mínima de caudal, que puede superar los 3 hm^3/año. En la actualidad la Agencia Andaluza del Agua está realizando un estudio de detalle que incluirá un modelo de flujo del acuífero y la evaluación de los aportes superficiales.

MASb 05.19 Mancha Real-Pegalajar

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero mioceno de Mancha Real desde el conjunto Quiebrajano-Vívoras*

El acuífero mioceno de Mancha Real constituye un acuífero que reúne buenas condiciones para ser utilizado en operaciones de recarga artificial. Existen dos experiencias previas realizadas por el IGME mediante los sondeos (La Barrena) donde la capacidad de almacenamiento subterráneo fue evaluada en 3 hm^3, que serviría como reserva estratégica para el municipio de Mancha Real en periodos de sequía. La futura construcción del Canal del Quiebrajano-Víboras permitiría disponer de los recursos requeridos para la recarga. El volumen a recargar sería inferior, siempre, a los 3 hm^3/año. La viabilidad técnica de esta actuación se considera alta, dependiendo de la construcción de la conducción prevista que enlazará el sistema Quiebrajano-Víboras, con la margen derecha del río Guadalbullón, hasta Mancha Real.

MASb 05.23 Úbeda

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado Jurásico de Úbeda con excedentes invernales de la cabecera del Guadalquivir*

El agua de recarga provendría de los excedentes invernales de los ríos Guadalquivir o Guadalimar (en éste la infraestructura necesaria sería mucho menor). En todo caso, se requeriría la construcción de una planta de tratamiento de eliminación de finos, conducciones y sondeos de recarga. La recarga máxima sería del orden de 10 a 12 hm^3/año. El IGME ya ha realizado estudios previos sobre la viabilidad de las operaciones de recarga en este acuífero y actualmente sigue mejorando su conocimiento hidrogeológico. Se está finalizando un nuevo modelo de flujo calibrado mediante la información hidrogeológica de detalle generada en los últimos años.

MASb 05.24 Bailén-Guarromán-Linares

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero detrítico de Bailén – Guarromán con aguas del embalse de Rumblar*
La proximidad del embalse de Rumblar permitiría recargar en el acuífero mediante una conducción desde la cola del embalse hasta el límite noreste del acuífero. La recarga podría satisfacer el exceso de bombeo que se realiza en este acuífero. La calidad del agua, ausente de fitosanitarios posiblemente en la cola del embalse, facilitaría la mejora de la explotación intensiva a que está sometida y la presencia de un gran almacén lleno para situaciones de sequía. Al no existir actualmente infraestructura de transporte (en principio se necesitarían unos 6 km de conducción desde el sector, a priori, más favorable para la toma de agua de recarga), la viabilidad técnica de esta actuación de recarga se considera media.

MASb 05.41 Guadahortuna-Larva

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos carbonatados Cabra de Santo Cristo, Larva y Chotos-Sazadilla-Los Llanos con aguas del río Guadiana Menor, aguas abajo del embalse del Negratín*
Los acuíferos considerados presentan una gran problemática y son estratégicos dado que las poblaciones abastecidas por los mismos no cuentan con otra fuente alternativa de suministro. Hay problemas de calidad y descenso de niveles. Para la realización de las operaciones de recarga propuestas se requeriría de una conducción de más de 20 km de longitud, desde el Guadiana Menor, en el caso del acuífero de Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y de unos 7 km en el caso de Larva. La recarga se haría con sondeos en las propias calizas. La salinidad del agua es alta, sería necesario la instalación de una depuración previa a la recarga.

MASb 05.43 Sierra y Mioceno de Estepa

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos carbonatados de la Sierra de Becerrero (o Estepa), Águilas-Guinchón y de los Caballos con aguas procedentes del embalse de El Retortillo*
La red de conexión de la comarca de Estepa con el Plan Écija está proyectada por la Junta de Andalucía, por lo que se prevé que en poco tiempo el agua superficial regulada en El Retortillo esté en la Sierra de Estepa. Los depósitos de regulación en alta están previstos junto a sondeos que podrían ser utilizados para la recarga artificial. Cuando finalice esta conexión, la recarga sería posible. Sin embargo habría que realizar nuevos sondeos con los correspondientes ensayos de inyección. La infraestructura de recarga dotaría de una mayor garantía a los abastecimientos, permitiría regular recursos en el volumen no saturado disponible en la actualidad y también conseguiría recuperar el funcionamiento de los manantiales emblemáticos de esta comarca, secos en la actualidad.

MASb 05.46 Aluvial del Guadalquivir-Medio

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Mioceno de Base y las Calizas Cámbricas a través del acuífero Cuaternario*
En esta masa coinciden, puntualmente, hasta tres formaciones acuíferas con entidad regional, reconocidas como: aluvial del Guadalquivir, mioceno basal y calizas cámbricas. Este hecho, junto a la presencia de infraestructura hidráulica de regulación (canales del Guadalmellato y canal de las Vegas Bajas sectores 5 y 6), y la propia existencia de caudales no regulados de algunos afluentes de la margen derecha del Guadalquivir posibilitan, en conjunto, unas zonas con interés donde plantear actuaciones de recarga artificial. Dentro de esta masa, el aluvial tiene escasa extensión, por lo que el acuífero donde plantear recarga artificial sería el Mioceno Basal y/o Calizas Cámbricas a través de actuaciones en el acuífero aluvial. La recarga en el propio aluvial presenta problemas de permanencia ya que, de forma natural y en un corto período de tiempo, sería drenado hacia el río.

MASb 05.47 Sevilla-Carmona

***Actuación**: Recarga artificial de las Calcarenitas de Carmona (acuífero mioceno)*
Existen experiencias previas de recarga que permiten afirmar que la recarga artificial resulta técnicamente viable y altamente eficaz para mejorar la regulación de los recursos hídricos en la masa. La interpretación de los cuatro ensayos realizados indica que se puede conseguir una tasa de infiltración media con valores superiores a los 5 m/día (incluso superiores a 10 m/día) si dichas experiencias se localizan en las zonas de mayor densidad de fracturación. Considerando una infiltración conservadora de 5 m/día, sería necesaria una superficie útil de infiltración de 1,5 ha para recargar los 9,5-10 hm^3/año en que se evalúa el déficit actual de toda la unidad de las calcarenitas de Carmona, operando cuatro meses al año. Como agua de recarga se proponen como alternativas: el embalse de El Horcajo, los ríos Corbones y Guadaira y el Canal del Bajo Guadalquivir. La opción de las EDAR de Carmona y Los Alcores, en volumen, no resulta suficiente para cubrir el déficit que presenta

la masa, aunque podría utilizarse como fuente complementaria del agua de otro origen (p.e. en la época de máximo riego del canal del Bajo Guadalquivir).

MASb 05.49 Niebla-Posadas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Mioceno de Base con agua de diversos embalses y de escorrentía superficial no regulada*

Se proponen dos alternativas de recarga: 1) Recarga a partir de embalses. Por su situación, los embalses a derivar agua desde la cerrada y hacerla llegar mediante una conducción directa a los afloramientos del Mioceno son: El Esparragal, Gergal, José Torán y El Retortillo (Derivación). Los embalses de Melonares y Huesna están más alejados de los afloramientos por lo que requerirían la detracción de los caudales en el río, aguas abajo del embalse; en el caso del de Melonares podría utilizarse el canal de riego del Viar como canal de transporte hasta la ubicación de la recarga. Esta alternativa está menos avanzada y requiere iniciar estudios hidrogeológicos concretos en el entorno de los embalses y la determinación de los caudales excedentes disponibles para la recarga. 2) Recarga con la escorrentía superficial no regulada (excedentes invernales procedentes del paleozoico en el sector Rivera de Huelva-Rivera del Huezna). Existe un proyecto realizado por el IGME en el 2002 que evalúa la disponibilidad hídrica en los 10 cauces superficiales principales de la zona. Esta alternativa está más avanzada y requiere el estudio de selección de un emplazamiento donde ubicar una planta piloto de recarga para obtener con mayor exactitud los parámetros y datos a considerar en el diseño de una operación de recarga a gran escala.

MASb 05.52 Lebrija

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos Sierra de Lebrija (Paleógeno) y arenas fosilíferas (Plioceno) desde el Canal del Bajo Guadalquivir*

Se propone la recarga del acuífero con aguas procedentes del Canal del Bajo Guadalquivir (final de la conducción antes de verter a la marisma). En los años noventa el Servicio Geológico de Obras Públicas realizó una experiencia de recarga artificial mediante pozos de recarga y, posteriormente, se ha realizado una tesis doctoral del tema.

MASb 05.73 Aluvial del Guadalquivir (Sevilla)

***Actuación**: Recarga artificial de a terraza media del río Guadalquivir desde el Canal del Bajo e Inferior Guadalquivir*

En invierno, cuando la demanda agrícola es mínima, se generan unos excedentes hídricos susceptibles de una mayor regulación con un coste económico reducido mediante el empleo de técnicas de recarga artificial localizada en la terraza media del río Guadalquivir. La existencia de los canales principales del Valle Inferior y del Bajo Guadalquivir y de una densa red de canales secundarios permitiría el transporte de agua hasta los puntos más favorables para la realización de la misma. Existen experiencias previas de recarga que valoran positivamente la viabilidad técnica de la actuación. Aunque el ensayo de recarga que se realizó en el año 1994 puso de manifiesto que el sitio no era el más idóneo para el fin, ya que se encontraba muy próximo a la divisoria del Guadalquivir y el Corbones, hay ya estudiadas varias zonas para la recarga.

Demarcación Hidrográfica del Segura

El resultado de la aplicación sucesiva de los criterios de selección en esta Demarcación da lugar a una selección preliminar elevada: 42 MASb (figura 16). Teniendo en cuenta que la Demarcación presenta unas características hídricas muy específicas respecto al resto de cuencas españolas peninsulares, las actuaciones de recarga deben fundamentarse básicamente en la posibilidad de incrementar los recursos hídricos naturales externos puesto que, a priori, no existen muchas expectativas de disponer de recursos naturales internos. Un análisis detallado más detallado recomienda iniciar los estudios y trabajos necesarios para acometer actuaciones de recarga artificial en una selección final de 11 masas (figura 17).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las once masas seleccionadas se recogen en cinco fichas (tabla 7) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. La información disponible en esta cuenca no permite realizar propuestas detalladas de recarga: el sistema de recarga, la ubicación y el origen del agua y su cuantificación deberán determinarse en un estudio hidrogeológico concreto que se inicie para determinar la viabilidad técnica de las siguientes propuestas.

Ficha 1.

MASb 070.002 Sinclinal de la Higuera

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado del Sinclinal de la Higuera con agua de origen incierto*

No existen en la masas recursos naturales propios con los que planificar la recarga, por lo que deberán proce-

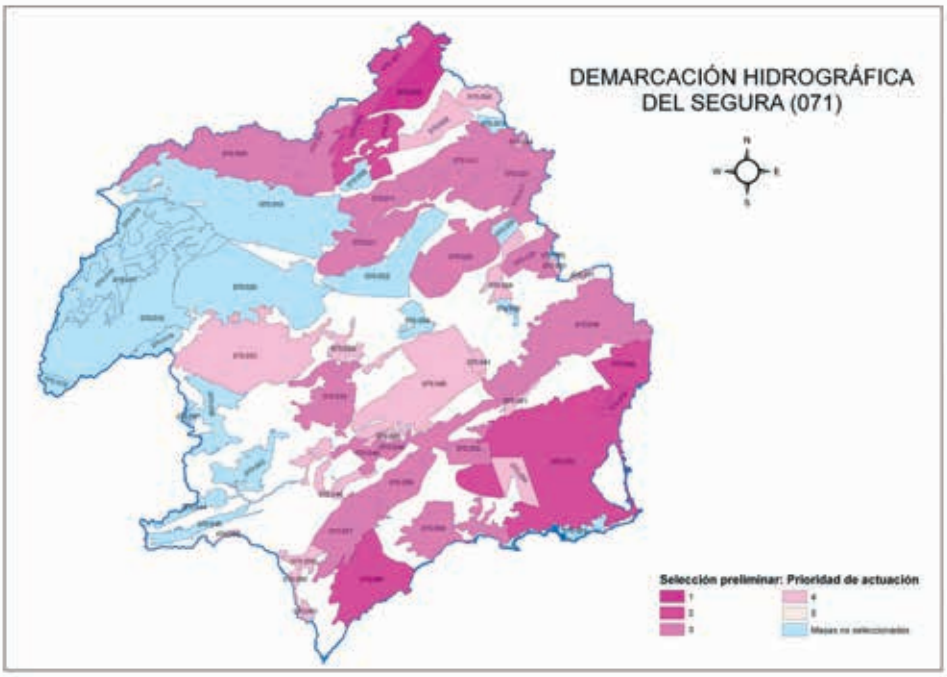


Figura 16. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Segura

der del exterior. Tampoco existen recursos depurados, salvo que se empiecen a tratar los efluentes de los pequeños núcleos urbanos o se solicite una concesión en la estación más cercana con recursos disponibles fuera de la época de riego agrícola (p.e. EDAR de Montealegre del Castillo). Por tanto, el origen del agua de recarga es incierto y requiere un estudio más detallado. Se debe considerar la continuidad hidráulica que existe al sur con la masa de Tobarra y, sobre todo, al norte la posible conexión con la cuenca del Júcar, en el sentido de que una actuación en esas zonas conectadas hidráulicamente podría inducir efectos positivos sobre la recuperación de niveles (descensos de hasta 40 m) en la masa del Sinclinal de la Higuera.

Ficha 2.

MASb 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de la formación Chorros con agua del embalse de laminación de Los Charcos*

Aunque no se dispone de información específica sobre el agua de recarga, se considera factible iniciar los estudios previos de viabilidad acerca de la posibilidad de recargar la masa a partir del embalse de laminación de los Charcos (y en segundo término desde la EDAR de Tobarra) con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 12 m) y mitigar el grado de sobreexplotación que presenta. En principio parece que el sistema adecuado de recarga sería de tipo profundo, en las calizas jurásicas

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	(El Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura adopta un sistema de explotación único para todo su ámbito territorial. Por tanto, las fichas que contienen el análisis de la disponibilidad hídrica para la recarga artificial sólo tienen un apartado, el correspondiente a los datos de la masa.)	070.002 Sinclinal de la Higuera
2		070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla
3		070.007 Conejeros-Albatana
4		070.011 Cuchillos-Cabras
5		070.012 Cingla
6		070.023 Jumilla-Yecla
7		070.025 Ascoy-Sopalmo
8		070.027 Serral-Salinas
9		070.029 Quibas
10		070.040 Sierra Espuña
11		070.050 Bajo Guadalentín

Tabla 7. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Segura

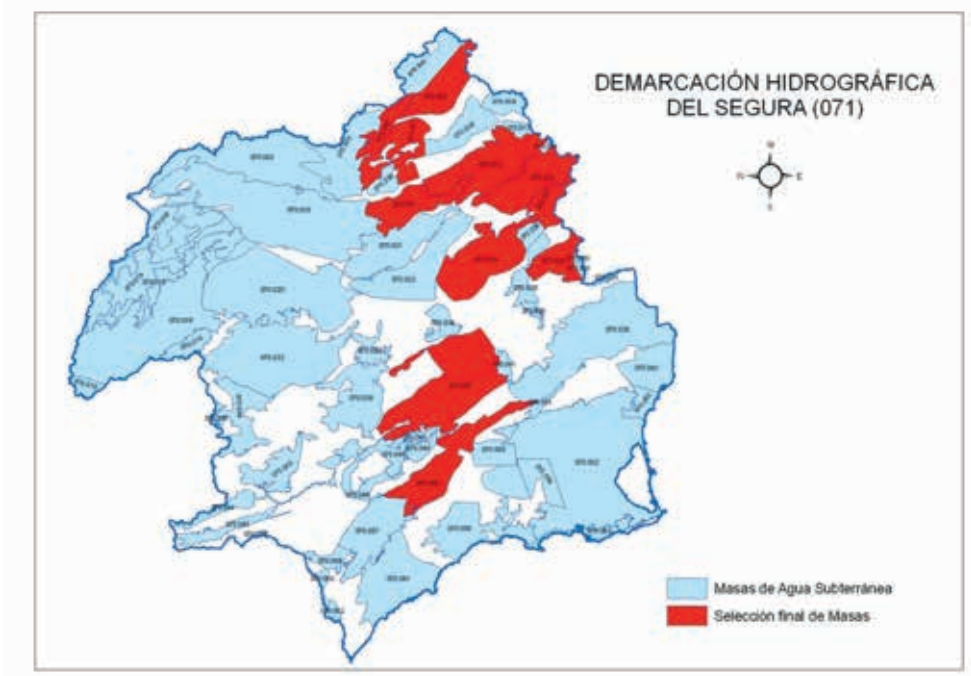


Figura 17. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Segura

(en torno al piezómetro 07.16.003), aunque las distintas alternativas, deben estudiarse con más detalle.

Ficha 3.

MASb 070.007 Conejeros-Albatana

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado y detrítico no aluvial de Conejeros-Albatana con agua del embalse del Bayco*

En esta actuación el agua de recarga puede proceder del embalse de laminación del Bayco (y en segundo término de la EDAR de Ontur) y se plantean dos alternativas de recarga no excluyentes entre sí, si existen recursos, ambas situadas entre el embalse del Bayco y Ontur: a) Recarga del acuífero pliocuaternario, siendo el sistema adecuado las zanjas o canales paralelos al cauce de la Rambla de Ortigosa, las balsas o represas y otras actuaciones en el cauce; b) Recarga del acuífero carbonatado mediante sondeos de inyección.

Ficha 4.

MASb 070.011 Cuchillos-Cabras

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos Agra-Cabras, Acebuchal, Minateda, Casas de Losa y Candil con agua del trasvase Júcar-Vinalopó*

Se considera muy recomendable iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga planteadas a partir del trasvase Júcar-Vinalopó con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 70 m) y mitigar el grado de sobreexplotación que presenta la masa. En segundo término, dada la situación de la EDAR de Hellín se plantea la posibilidad de recargar el acuífero más próximo (Agra-Cabras), previa determinación de la existencia real de caudales disponibles y de la idoneidad de su calidad para su introducción en el acuífero.

Ficha 5.

MASb 070.012 Cingla

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de Cingla-Cuchillo con agua del trasvase Júcar-Vinalopó*

Se considera recomendable iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga planteadas a partir del trasvase con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 40 m) y mitigar el grado de sobreexplotación que presenta la masa. No se dispone de información suficiente para realizar una propuesta determinada de recarga pues toda la actuación, tanto el método de recarga como el emplazamiento concreto, dependerá del trazado del futuro trasvase Júcar-Vinalopó y del caudal que previsiblemente esté disponible. Cuando esta situación quede definida se deberá iniciar el correspondiente estudio hidrogeológico de detalle para determinar la viabilidad técnica de la operación de recarga.

Ficha 6.

MASb 070.023 Jumilla-Yecla

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado y detrítico de Jumilla-Villena con agua del trasvase Júcar-Vinalopó*

Se considera urgente iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga a partir del trasvase Júcar-Vinalopó con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 125 m) y mitigar el alto grado de sobreexplotación que presenta la masa. Toda la actuación, tanto el método de recarga como el emplazamiento concreto, dependerá del trazado del futuro trasvase Júcar-Vinalopó y del caudal que previsiblemente esté disponible, aunque cabe señalar que existen zonas de actuación preferente de acuerdo con los conos de descensos provocados por la sobreexplotación.

Ficha 7.

MASb 070.025 Ascoy-Sopalmo

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado y mixto de Ascoy-Sopalmo con agua de origen múltiple*
Se considera urgente iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga a partir del trasvase Júcar-Vinalopó, del embalse de laminación del Cárcabo y de la EDAR de Cieza, con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 75 m) y mitigar el grado de sobreexplotación de la masa. En relación con la EDAR de Cieza, por su situación, se plantea la posibilidad de recargar el acuífero carbonatado en las inmediaciones de la planta, donde también podrían conducirse los caudales potenciales procedentes del embalse del Cárcabo.

Ficha 8.

MASb 070.027 Serral-Salinas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de Serral-Salinas con agua del trasvase Júcar-Vinalopó*
Aunque sin información suficiente para realizar una propuesta determinada, se considera recomendable iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga a partir del trasvase Júcar-Vinalopó con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 35 m) y mitigar el grado de sobreexplotación que presenta la masa.

Ficha 9.

MASb 070.029 Quibas

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero carbonatado de Quíbas con agua del trasvase Júcar-Vinalopó*
Se considera urgente iniciar los trabajos para definir las posibilidades de recarga a partir del trasvase Júcar-Vinalopó con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 120 m) y mitigar el alto grado de sobreexplotación que presenta la masa. Toda la actuación, tanto el método de recarga como el emplazamiento concreto, dependerá del trazado del futuro trasvase y del caudal que previsiblemente esté disponible.

Ficha 10.

MASb 070.040 Sierra Espuña

***Actuación**: Recarga artificial de los acuíferos de Cajal y Espuña-Mula con agua de los embalses de laminación Doña Ana, Los Rodeos y del Pliego*
Se considera factible iniciar los estudios previos de viabilidad acerca de las alternativas planteadas de recarga a partir de los embalses de laminación de Doña Ana, Los Rodeos y del Pliego (y en segundo término desde la EDAR de Torres de Cotillas) con objeto de invertir la tendencia al descenso de los niveles piezométricos (hasta 100 m) y mitigar el grado de sobreexplotación que presenta. Desde los embalses se plantean tres actuaciones: a) Recarga del acuífero del Cajal (calizas del Mioceno) desde el embalse de Doña Ana derivándo el caudal mediante conducción hasta un punto del río Mula, aguas abajo del embalse de la Cierva, y de ahí recargar el acuífero en las inmediaciones de Yechar. b) Recarga del acuífero Espuña-Mula desde el embalse del Pliego, en los afloramientos de calizas y dolomías próximos a la localidad de Pliego, mediante sondeos de inyección. c) Recarga del acuífero Espuña-Mula desde el embalse de Los Rodeos, en las inmediaciones de El Rodeo de la Ermita. En relación con la alternativa de la EDAR de Torres de Cotillas, por su situación, se plantea la posibilidad de recargar el acuífero Espuña-Mula en las inmediaciones de la planta.

Ficha 11.

MASb 070.050 Bajo Guadalentín

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero pliocuaternario del Bajo Guadalentín con agua de los embalses de laminación Presa del Paretón y El Romeral*
El carácter multicapa y la disparidad de niveles piezométricos confieren al acuífero un alto grado de complejidad que dificulta la planificación de una operación de recarga aunque se plantean las siguientes alternativas: a) Recarga del acuífero desde la Presa del Paretón, en la llanura de inundación, mediante dispositivos de recarga superficial (red de canales y zanjas si hay espacio) o profunda mediante sondeos. b) Recarga del acuífero desde el embalse del Romeral mediante sondeos de inyección. c) Recarga con el efluente sobrante de la reutilización de la EDAR de Lorca mediante infiltración superficial en las inmediaciones de las instalaciones.

Demarcación Hidrográfica del Júcar

El número de masas seleccionadas preliminarmente en esta Demarcación es de 58, sobre un total de 116 (figura 18). En materia de aguas subterráneas, los problemas más destacados son la contaminación por nitratos y la explotación sostenible de las aguas subterráneas, que en la Demarcación del Júcar no pueden separarse de la atención de las demandas. El análisis realizado, teniendo en cuenta esta problemática, resuelve plantear actuaciones de recarga artificial de acuíferos en 23 MASb (figura 19).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las 23 masas seleccionadas se recogen en nueve fichas (tabla 8) que componen el Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación. A continuación se presenta un resumen de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

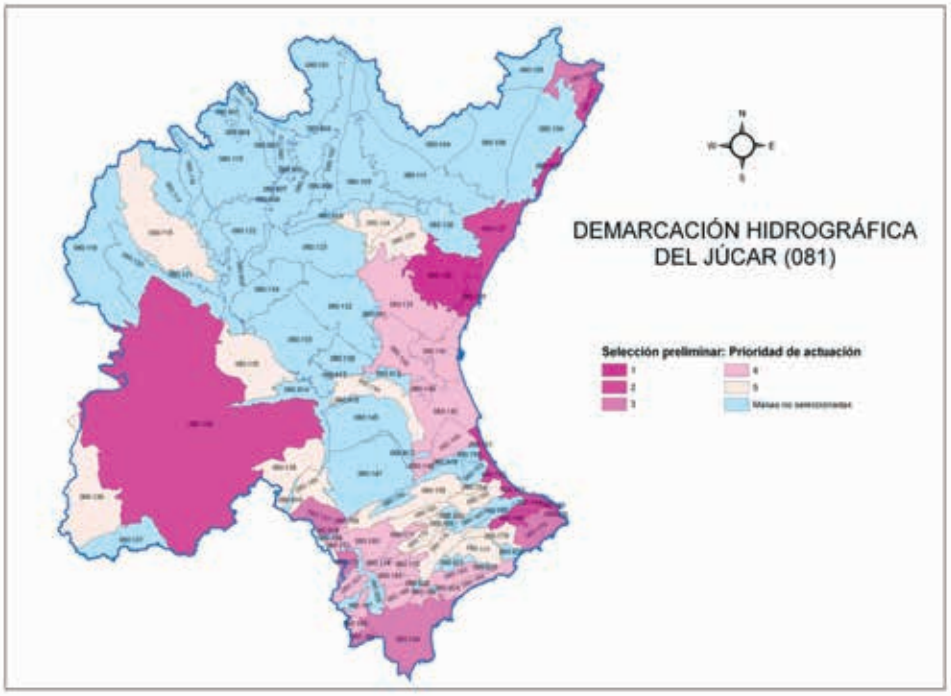


Figura 18. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

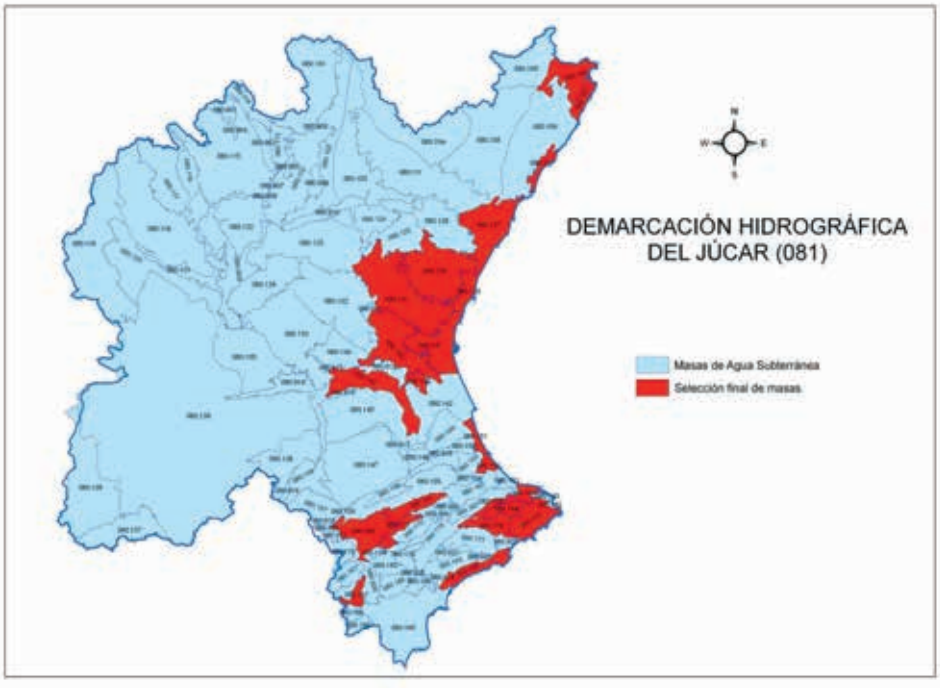


Figura 19. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS IMPLICADOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA SELECCIONADAS
1	SER 08.01 CENIA-MAESTRAZGO	080.106 Plana de Cenia
		080.107 Plana de Vinaroz
		080.108 Plana de Oropesa-Torreblanca
2	SER 08.02 MIJARES-PLANA DE CASTELLÓN	080.127 Plana de Castellón
3	SER 08.03 PALANCIA Y LOS VALLES	080.128 Plana de Sagunto
		080.130 Medio Palancia
4	SER 08.04 TURIA	080.131 Liria-Casinos
		080.140 Buñol Cheste
		080.141 Plana de Valencia Norte
5	SER 08.05 JÚCAR	080.143 La Contienda
		080.144 Sierra del Ave
		080.161 Volcadores-Albaida
6	SER 08.06 SERPIS	080.151 Plana de Jaraco
		080.152 Plana de Gandía
7	SER 08.07 MARINA ALTA	080.164 Ondara-Denia
		080.166 Peñón-Bernía
		080.168 Mediodía
		080.179 Depresión de Benisa
8	SER 08.08 MARINA BAJA	080.178 Serella-Aixorta-Algar
		080.184 San Juan-Benidorm
9	SER 08.09 VINALOPÓ-ALACANTÍ	080.160 Villena-Benajama
		080.171 Sierra Mariola
		080.187 Sierra del Reclot

Tabla 8. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Ficha 1. SER 08.01 CENIA-MAESTRAZGO

MASb 080.106 Plana de Cenia

***Actuación**: Recarga artificial del* acuífero Cenia-Maestrazgo en el río Cenia

Existen tramos del río Cenia con calizas cretácicas (en la sierra del Montsiá) que actúan de sumideros con drenaje subterráneo hacia la Plana de Vinaroz. Las actuaciones de recarga consistirían en la construcción de represas para favorecer la infiltración en el cauce en esos tramos del río. Indirectamente se produce la recarga de la masa 080.107 Plana de Vinaroz.

MASb 080.107 Plana de Vinaroz

***Actuación**: Recarga artificial del* acuífero Plana de Vinaroz con aguas depuradas

Las actuaciones de recarga artificial en esta masa se basan en la infiltración de aguas procedentes de plantas depuradoras. Debe estudiarse la posibilidad de emplear métodos mixtos superficiales (zanjas, balsas, canales) y de inyección profunda (pozos y sondeos) con el objetivo combinado de recargar, frenar la intrusión y mejorar la calidad de las aguas subterráneas.

MASb 080.108 Plana de Oropesa-Torreblanca

***Actuación**: Recarga artificial del* acuífero *Plana de Oropesa-Torreblanca*

Se plantea el escariado del cauce del río San Miguel, para aumentar la recarga natural, y la posibilidad de recargar con aguas depuradas, al no disponer de otros recursos superficiales. La masa presenta intrusión marina por lo que habría que analizar la posibilidad de realizar inyección en pozos costeros con objeto de contrarrestarla. La planta desaladora de Oropesa se encuentra en ejecución y probablemente tenga una capacidad de desalación superior a la demanda real por lo que se deberá realizar un estudio de los recursos que estarían disponibles.

Ficha 2. SER 08.02 MIJARES-PLANA DE CASTELLÓN

MASb 080.127 Plana de Castellón

***Actuación**: Recarga artificial del* acuífero *Plana de Castellón*

Se proponen a estudio diversas fuentes de agua: aguas depuradas de Castellón, excedentes de la Font del Molí,

embalses de Sichar y Mª Cristina y, en la zona salinizada de Moncofa, con aguas superficiales del río Mijares ya que existen canales del mismo río que podrían servir de distribución. Otras medidas que se deben valorar es la ejecución de pequeñas represas en zonas apropiadas en los cauces de los ríos no permanentes como el río Seco, el Belcaire o el río Veo, u otras actuaciones como escarificaciones, encharcamientos, etc. También ha de tenerse en cuenta la inyección directa al acuífero en pozos costeros como medida de lucha contra la intrusión.

Ficha 3. SER 08.03 PALANCIA Y LOS VALLES

MASb 080.128 Plana de Sagunto

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Plana de Sagunto*

El agua de recarga debe obtenerse fundamentalmente de los efluentes de EDAR urbanas. La infraestructura a emplear para la recarga ha de ser variada, tanto sondeos y pozos para inyección directa en el acuífero como el empleo de canales y zanjas de regadío o drenaje. Hay que tener en cuenta la posibilidad de acondicionar algunos tramos del río Palancia como áreas de recarga preferencial, mediante la ejecución de escarificados, áreas de lagunaje o incluso pequeñas represas que laminen las aguas de escorrentía, que si bien se producen puntualmente y de forma ocasional, pueden representar un volumen importante.

MASb 080.130 Medio Palancia

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Medio Palancia*

La presa de Algar constituye el principal elemento de recarga en la masa. Hay que tener en cuenta que con pequeñas infraestructuras en barrancos y ramblas (ramblas de Algimia, Almedíjar, Azuébar, etc), como pueden ser represas, áreas de lagunaje, actuaciones periódicas de escarificado, zanjas de infiltración, etc., se pueden conseguir unos volúmenes de infiltración notables de las aguas de escorrentía. En cuanto a las aguas depuradas, se plantea la recarga a través de la infiltración desde la superficie, en los cauces naturales o mediante balsas o zanjas; obteniéndose de esta forma una depuración suplementaria.

Ficha 4. SER 08.03 PALANCIA Y LOS VALLES

MASb 080.131 Liria-Casinos

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Liria-Casinos*

La recarga en esta masa ha de basarse en la ejecución de obras de acondicionamiento en barrancos y cauces secundarios que en épocas lluviosas presentan escorrentía superficial (rambla Castellana, rambla Escarihuela, barranco Carraixet, de Artaj (donde vierte y se infiltra el efluente de la EDAR de Casinos)) y en el manantial de San Vicente; así como la inyección en cabecera con excedentes del embalse de Benagéber.

MASb 080.140 Buñol-Cheste

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Buñol-Cheste*

La recarga en esta masa ha de basarse en la ejecución de obras de acondicionamiento en las ramblas de Chiva y del Poyo, que permitan la infiltración de las aguas de escorrentía generadas en las épocas lluviosas, y donde pueden además canalizarse los recursos obtenidos por depuración.

MASb 080.141 Plana de Valencia Norte

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de la Plana de Valencia Norte*

El gran volumen de recursos hídricos procedente de las plantas depuradoras de esta masa la convierte en una zona en la que la recarga ha de basarse casi en exclusiva en este agua.

Las técnicas para ello pueden ser variadas, desde el empleo de balsas y canales de infiltración, el vertido en los tramos finales del río Turia, rambla del Poyo y barranco del Carraixet, hasta la inyección directa en ambos niveles permeables mediante pozos y sondeos.

Ficha 5. SER 08.05 JÚCAR

MASb 080.143 La Contienda

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de La Contienda*

Las posibles actuaciones han de centrarse en la ejecución de pequeñas infraestructuras de recarga en los barrancos de la masa que permitan la infiltración de las aguas de escorrentía y en algún tramo favorable del río Magro. Debe estudiarse la viabilidad de recargar el acuífero con aguas procedentes de depuradora, para lo cual será conveniente acondicionar sectores de infiltración que permitan una depuración complementaria de las aguas vertidas.

MASb 080.144 Sierra del Ave

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de la Sierra del Ave*

Las actuaciones de recarga han de basarse en la regulación de los excedentes del río Magro en el tramo desde el embalse de Forata hasta la localidad de Montroy, donde se plantea la ejecución de represas, escarificado

del lecho del río, áreas de lagunaje, zanjas o balsas de infiltración, etc. Otro área a estudiar es la cuenca de la rambla de Alfaris, en la que diversos barrancos de cabecera canalizan las aguas de escorrentía generadas en la vertiente norte de la sierra del Ave. También de interés es el barranco del Charco Claro que drena las aguas de escorrentía del alto comprendido entre el Caballón del Aire y el Puntal de Bujes. Debe estudiarse además, la viabilidad de recargar el acuífero con aguas procedentes de EDAR, que suponen más de 5 hm^3/año.

MASb 080.161 Volcadores-Albaida

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Volcadores-Albaida*

Las actuaciones de recarga han de basarse en la ejecución de infraestructuras de recarga en barrancos y cursos fluviales. Parte de estas obras ya están determinadas dentro del Plan de Construcción de Presas de Recarga realizado por la Diputación Provincial de Alicante, que espera obtener unos recursos hídricos extras en esta masa de 0,3 hm^3/año. La construcción de pequeñas represas, zanjas o balsas de infiltración, actuaciones como el escarificado de los lechos fluviales o el lagunaje, han de permitir que las aguas de escorrentía generadas en los episodios de precipitaciones, se infiltren en gran medida en el acuífero.

Ficha 6. SER 08.06 SERPIS

MASb 080.151 Plana de Jaraco

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Plana de Jaraco*

El agua de recarga procederá fundamentalmente de los efluentes de EDAR urbanas. La infraestructura a emplear ha de ser variada, tanto sondeos y pozos para inyección directa en el acuífero (las aguas a inyectar presentarán una calidad probablemente mejor que la del acuífero, debido a los problemas de intrusión y al alto contenido en nitratos) como el empleo de canales y zanjas de riego o drenaje. Se plantea la posibilidad de acondicionar tramos del río Xeraco como áreas de recarga preferencial, mediante escarificados, áreas de lagunaje o incluso pequeñas represas que laminen las aguas que de forma ocasional discurren por este cauce y que puntualmente pueden representar un volumen importante.

MASb 080.152 Plana de Gandía

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Plana de Gandía*

El agua de recarga debe obtenerse fundamentalmente de los efluentes de EDAR urbanas que realicen un tratamiento complementario. La infraestructura a emplear podrá ser variada, ya que se pueden aportar aguas depuradas a los cauces de la zona, ya sean río barrancos, zanjas de riego o drenaje, etc, además de poder acondicionar zonas de lagunaje, realizar escarificados de los lechos, zanjas de infiltración, o ejecutar pequeñas represas. Este agua, sufrirá un proceso de depuración complementario durante su infiltración y mejorará, tanto la calidad general de las aguas subterráneas costeras, con altos contenidos en sales marinas y nitratos, como ejercerá una acción de lucha contra la intrusión. También se pueden realizar acciones de inyección directa en pozos y sondeos, en las áreas más próximas a la costa para luchar igualmente contra la intrusión. Hay que tener en cuenta la posibilidad de aprovechar las aguas de escorrentía (y los caudales anormalmente elevados del río Serpis) en algunos tramos del río Serpis, barranco de Palmera, barranco de Xeresa, etc. En estas áreas de recarga preferencial, se realizarán escarificados, zonas de lagunaje o incluso pequeñas represas que laminen las aguas y faciliten su infiltración al terreno.

Ficha 7. SER 08.07 MARINA ALTA

MASb 080.164 Ondara-Denia

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Ondara-Denia*

En la actualidad continua realizándose la recarga artificial de Vergel-Els Poblets y Vergel-Setla. El agua de recarga que se obtenga de los efluentes de las EDAR urbanas podrá emplearse tanto para la mejora de la calidad de las aguas subterráneas, afectadas por la intrusión marina y con altos contenidos en nitratos, como en la lucha contra dicha intrusión. Por tanto, la infraestructura a emplear ha de ser variada: sondeos y pozos para inyección directa en el acuífero (las aguas a inyectar presentarán una calidad probablemente mejor que la del acuífero) así como el empleo de canales y zanjas de riego o drenaje. También las represas, áreas de lagunaje y embalsado en el cauce del río Girona permitirán un aumento del volumen infiltrado al acuífero.

MASb 080.166 Peñón-Bernía

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Peñón-Bernía*

En esta masa, la recarga prevista se fundamenta en la ejecución de obras de recarga en cauces tal como recoge la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga realizado por la Diputación Provincial de Alicante.

MASb 080.168 Mediodía

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de Mediodía a partir del embalse de Isbert*

Se propone el recrecimiento del embalse de Isbert para aumentar la capacidad en 1 hm³ y lograr mayor recarga en el denominado barranco del Infierno. Este tipo de actuaciones vienen reflejadas igualmente en la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga de la Diputación Provincial de Alicante.

MASb 080.179 Depresión de Benisa

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Depresión de Benisa*

La recarga prevista se fundamenta en la ejecución de obras en cauces, fundamentalmente en el río Gorgos y barrancos subsidiarios, tal como recoge la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga de la Diputación Provincial de Alicante. También deben tenerse en cuenta los recursos procedentes de las EDAR pudiendo ser la infraestructura para recargar estas aguas variada, tanto sondeos y pozos en zonas costeras para inyección directa en el acuífero (las aguas a inyectar presentarán una calidad probablemente mejor que la del acuífero, debido a los problemas de intrusión) como el empleo de canales y zanjas de riego o drenaje, o el vertido directo sobre tramos de cauce en los que se infiltren las aguas y además sufran un proceso depurativo complementario antes de alcanzar el acuífero.

Ficha 8. SER 08.08 MARINA BAJA

MASb 080.178 Serella-Aixorta-Algar

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Serella-Aixorta-Algar*

La recarga prevista se fundamenta en la ejecución de obras en cauces tal como queda indicado en la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga de la Diputación Provincial de Alicante. Además, aunque los recursos procedentes de depuradoras son relativamente escasos (≈ 0,25 hm³/año) hay que contar con la posibilidad de emplearlos en recarga, por ejemplo, vertiéndolos al terreno en áreas apropiadas en las que sufran un proceso adicional de depuración al infiltrarse en el terreno antes de alcanzar la zona saturada.

MASb 080.184 San Juan-Benidorm

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero San Juan-Benidorm*

La recarga se basa en el empleo de las aguas procedentes de las EDAR que contabilizan un total disponible de más de 10,9 hm³/año. Este volumen, junto con las aguas de escorrentía generadas en los tramos bajos de los ríos Guadalest y Monegre deben recargar el acuífero a partir de pequeñas obras, fundamentalmente en algunos tramos de dichos cauces, tales como zonas de lagunaje, escarificado de tramos de cauce, zanjas y/o balsas de infiltración, empleo de canales de riego, pequeñas represas u obras de laminado de aguas de escorrentía, etc.

Ficha 9. SER 08.09 VINALOPÓ-ALACANTÍ

MASb 080.160 Villena-Benajama

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de Villena-Benajama*

La recarga prevista se fundamenta en obras de recarga en cauces tal como queda indicado en la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga de la Diputación Provincial de Alicante, en donde se incluye dentro del denominado acuífero de Solana. Además, aunque los recursos de EDAR son relativamente escasos (≈ 0,5 hm³/año), hay que contar con la posibilidad de emplearlos, por ejemplo, vertiéndolos al terreno en áreas apropiadas en las que sufran un proceso adicional de depuración al infiltrarse en el terreno antes de alcanzar la zona saturada.

MASb 080.171 Sierra Mariola

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de la Sierra Mariola*

La recarga prevista se fundamenta también en las obras de recarga en cauces de la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga donde esta actuación se incluye dentro del denominado acuífero de Pinar de Camús. También, aunque los recursos de EDAR son escasos (≈ 0,5 hm³/año), hay que contar con la posibilidad de emplearlos en actuaciones de recarga, por ejemplo, vertiéndolos al terreno en áreas apropiadas en las que sufran un proceso adicional de depuración.

MASb 080.187 Sierra del Reclot

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero de la Sierra del Reclot*

De nuevo la recarga prevista se fundamenta en las obras de recarga en cauces de la Fase 1 del Plan de Construcción de Presas de Recarga en donde se incluye dentro del denominado acuífero de Chinorlet. Además, en este caso los recursos de EDAR son importantes (≈ 2,73 hm³/año), por lo que hay que contar con la posibilidad de emplearlos en actuaciones de recarga, por ejemplo, vertiéndolos al terreno en áreas apropiadas, o en aquellas zonas de barrancos que se acondicionen para laminar y favorecer la infiltración de las aguas de escorrentía. Entre éstos barrancos destacan los de Chinorla, rambla de las Casas del Señor, rambla Honda o rambla Romana.

Demarcación Hidrográfica del Ebro

La selección preliminar en esta demarcación asciende a 41 MASb del total de 105 delimitadas en la Demarcación (figura 20). Desde el punto de vista de la planificación hidrológica y teniendo en cuenta la relevancia de los temas importantes identificados en la cuenca, la recarga debe de plantearse con el objetivo de mitigar la contaminación (difusa y/o puntual) de las aguas subterráneas y como herramienta eficaz para paliar los problemas concretos de explotación intensiva de las aguas subterráneas detectados. No obstante, en relación con los problemas de calidad de las aguas afectadas por nitratos, al estar incorporadas a lentos flujos regionales, técnicamente, la recarga no conlleva efectos significativos e inmediatos, por lo que más bien debe plantearse de forma experimental en unas pocas masas. Así, las alternativas de recarga finalmente contempladas se proponen en 6 MASb (figura 21).

Las actuaciones de recarga que ha sido posible identificar en las seis masas seleccionadas se recogen en cinco fichas (tabla 9). Singularmente en la Demarcación Hidrográfica del Ebro, el Catálogo de actuaciones de recarga artificial se ha desarrollado únicamente a nivel de Propuesta, por lo que las actuaciones recogidas en las fichas no disponen de datos cuantificados y requerirán, en una fase posterior del proyecto, un trabajo adicional con respecto al resto de las Demarcaciones analizadas. A continuación se presenta la relación de las recargas identificadas o propuestas en cada caso.

Ficha 1.- SER 09.01 CABECERA DEL EBRO
MASb 090.058 Aluvial del Ebro: Zaragoza

***Actuación**: Recarga artificial experimental del acuífero Cuaternario Aluvial del Ebro*
La masa presenta un importante problema de calidad, por lo que se propone la recarga artificial del acuífe-

FICHAS	SISTEMAS DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS	MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
1	SER 09.01 CABECERA DEL EBRO	090.058 Aluvial del Ebro en Zaragoza
2	SER 09.05 JALÓN	090.076 Pliocuaternario de Alfamén
		090.077 Mioceno de Alfamén
3	SER 09.06 HUERVA	090.075 Campo de Cariñena
4	SER 09.07 AGUAVIVAS	090.079 Campo de Belchite
5	SER 09.12 SEGRE	090.064 Calizas de Tárrega

Tabla 9. Relación de fichas del Catálogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación Hidrográfica del Ebro

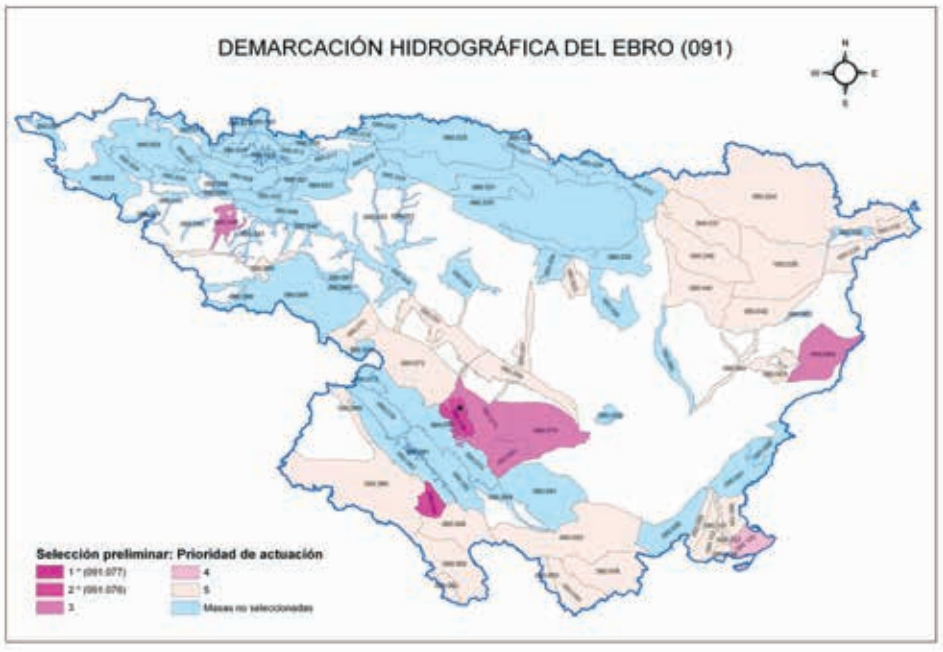


Figura 20. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Ebro

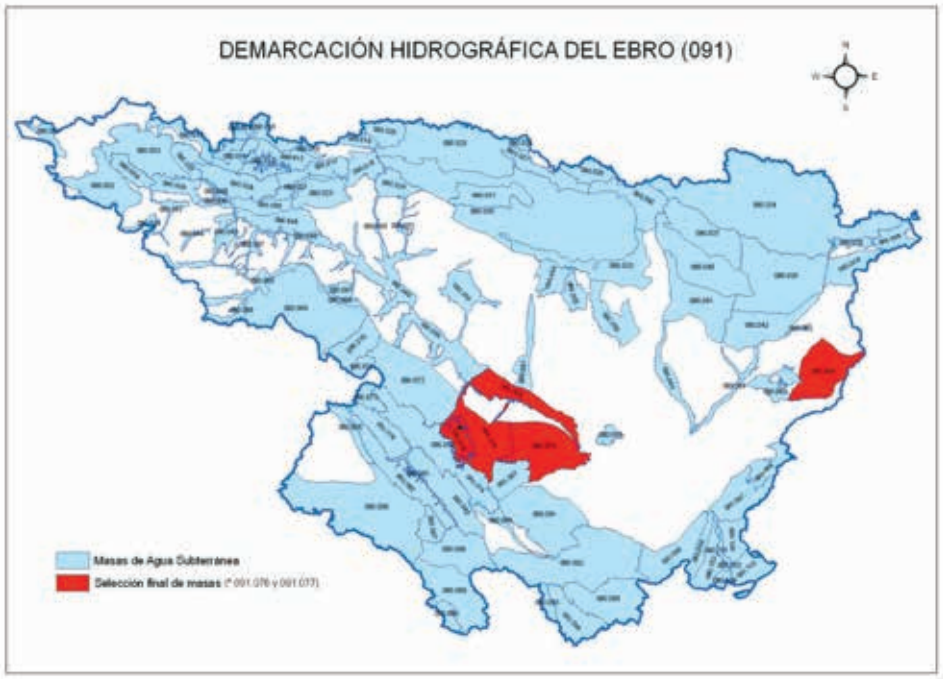


Figura 21. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Ebro

ro, aguas arriba de la ciudad de Zaragoza, a través del Canal Imperial de Aragón, como medida experimental para aminorar la contaminación difusa y puntual que presenta la masa.

Ficha 2.- SER 09.05 JALÓN

MASb 090.076 Pliocuaternario de Alfamén

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Pliocuaternario y Cuaternario aluvial de Alfamén*

La masa formaba parte de la Unidad Hidrogeológica 09.06.03 Campo de Cariñena que, en el Plan Hidrológico se recomendaba iniciar los estudios para ver si era susceptible de ser recargada artificialmente. En la actualidad existe aprobado un proyecto de recarga artificial (junio de 2008) que se recomienda desarrollar. El proyecto consiste básicamente en la retención del agua torrencial procedente de los barrancos de Aguarón y Cosuenda mediante pequeños diques, favoreciendo de esta forma la infiltración del agua en el acuífero y disminuyendo las inundaciones aguas abajo. Como agua de recarga contaría con la futura presa de Mularroya (río Grío), cuyo proyecto de presa, azud de derivación y conducción de trasvase fue aprobado en noviembre de 2003.

MASb 090.077 Mioceno de Alfamén

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Mioceno de Alfamén*

La recarga se plantea con objeto de aliviar la continuada evolución descendente de los niveles piezométricos de la masa. Dado que se trata de un acuífero confinado, la recarga ha de efectuase en profundidad, mediante pozos. Los únicos excedentes a recargar serían los invernales que circulan por las acequias derivadas del río Grío, previa impulsión hacia las zonas en donde se detectan los mayores descensos, o el futuro embalse previsto de Mularroya.

Ficha 3.- SER 09.06 HUERVA

MASb 090.075 Campo de Cariñena

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Carbonatado Jurásico y Terciario detrítico del Campo de Cariñena*

En este caso se plantea la recarga artificial a partir de excedentes invernales de los embalses de Mezalocha y de las Torcas (río Huerva) y la recarga por inyección del acuífero mesozoico que drena hacia Alfamén, ya que es la zona más problemática en cuanto a explotación y descenso de niveles piezométricos.

Ficha 4.- SER 09.07 AGUAVIVAS

MASb 090.079 Campo de Belchite

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Carbonatado Jurásico y Terciario detrítico del Campo de Belchite*

La propuesta consiste en el almacenamiento de los excedentes invernales del río Aguasvivas mediante recarga artificial en la masa, aguas abajo de Almonacid de la Cuba, con objeto de solventar los problemas de sostenibilidad de la explotación actual.

Ficha 5.- SER 09.12 SEGRE

MASb 090.064 Calizas de Tárrega

***Actuación**: Recarga artificial del acuífero Calizas de Tárrega*

Para intentar mitigar la contaminación puntual y difusa de la masa, se propone la regeneración de la calidad del acuífero mediante la inyección de agua procedente de excedentes invernales del canal de riego Segarra-Garrigues, que parte del embalse de Rialb.

CONSIDERACIONES FINALES

La aplicación de los criterios de selección en las 492 MASb delimitadas en las Demarcaciones Hidrográficas intercomunitarias, da lugar a una *Selección Preliminar* de 263 MASb susceptibles de recargarse artificialmente (el 53% del total), siendo el criterio Antecedentes el que mayor número de masas selecciona (tabla 10). De la valoración conjunta de los criterios de selección (figura 22) resulta una prioridad de actuación alta (prioridad 1)

CÓDIGO	DEMARCACIÓN HIDROGRÁFCIA	Nº PRELIMINAR DE MASAS SELECCIONADAS	Nº MASAS SELECCIONADAS POR CRITERIO				
			Antecedentes	Masas Riesgo-C	ZVN	Sequías	Humedal
011	Miño-Sil	1	0	0	0	1	0
016	Cantábrico	25	19	0	0	8	3
021	Duero	29	13	6	1	21	4
031	Tajo	16	5	7	6	7	2
041	Guadiana	14	8	6	10	3	7
051	Guadalquivir	37	17	21	12	15	4
071	Segura	42	31	27	12	0	6
081	Júcar	58	25	45	22	22	8
091	Ebro	41	18	1	13	18	2
	TOTAL	263	136	113	76	95	36

Tabla 10. Selección preliminar de MASb en las Demarcaciones Hidrográficas Intercomunitarias por tipo de criterio de selección

CÓDIGO	DEMARCACIÓN HIDROGRÁFCIA	Nº PRELIMINAR DE MASAS SELECCIONADAS	Nº MASAS SELECCIONADAS POR PRIORIDAD				
			1	2	3	4	5
011	Miño-Sil	1	0	0	0	0	1
016	Cantábrico	25	0	0	1	3	21
021	Duero	29	4	1	4	4	16
031	Tajo	16	0	1	2	4	9
041	Guadiana	14	4	0	2	2	6
051	Guadalquivir	37	3	2	5	12	15
071	Segura	42	1	7	17	17	0
081	Júcar	58	4	9	6	22	17
091	Ebro	41	1	2	5	1	32
	TOTAL	263 (100%)	17 (6,5%)	22 (8,4%)	42 (15,0%)	65 (24,8%)	117 (44,5%)

Tabla 11. Prioridad de actuación en la Selección preliminar de MASb en las Demarcaciones Hidrográficas Intercomunitarias

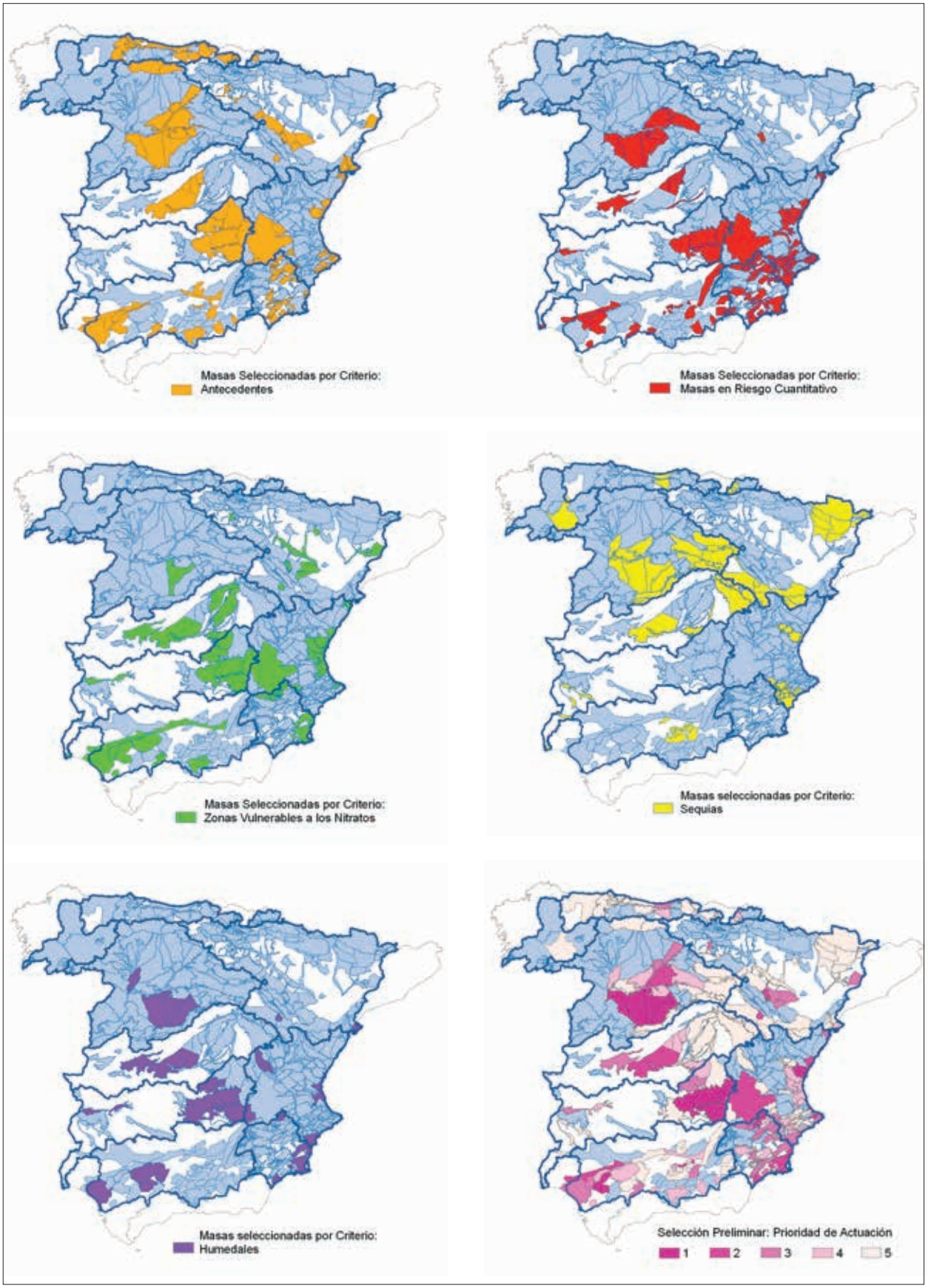


Figura 22. Selección Preliminar: MASb seleccionadas por tipo de criterio y prioridad de actuación resultante del proceso de valoración conjunta de los criterios

en tan sólo el 6,5% de masas seleccionadas; la mayor parte de la selección resulta de baja prioridad (el 44,5%) (tabla 11). Después del análisis y juicio experto realizado en cada demarcación, el número de MASb para planear actuaciones de recarga artificial se reduce notablemente, pasando de 263 MASb a una *Selección final* de 80 MASb, lo que supone el 16% del total de las MASb delimitadas en las Demarcaciones Hidrográficas intercomunitarias (figura 23).

Durante el proceso de identificación de actuaciones de recarga artificial de acuíferos en las 80 MASb seleccionadas finalmente, se han realizado ocho Catálogos de Actuaciones de Recarga que contienen un total de 46 fichas de recarga (organizadas por sistemas de explotación de recursos) en las que se han identificado, o propuesto para su estudio, 91 actuaciones potenciales de recarga artificial.

Los catálogos de actuaciones de recarga elaborados para cada Demarcación Hidrográfica resultan adecuados como punto de partida para iniciar los estudios de detalle propuestos en cada caso, al tiempo que pretenden contribuir a integrar plenamente la recarga artificial de acuíferos en la planificación hidrológica puesto que, al abordar y caracterizar las actuaciones de recarga artificial en el marco de las unidades básicas de asignación y reserva de recursos de los Planes Hidrológicos (los sistemas de explotación de recursos), facilitan su inclusión ordenada y homogénea en los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOE (2007). "RD 907/2007, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica". *Boletín Oficial del Estado* núm. 162, 29369, 29376-29377 pp.

BOE (2008). "Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica". *Boletín Oficial del Estado* núm. 229, 38510-38511 pp.

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2007). *Planes Especiales de Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas-IGME (2000). *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias.*

IGME-DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA (2010). *Actividad 4: Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico.* Memoria-Resumen e Informes de Demarcación 1 a 9.

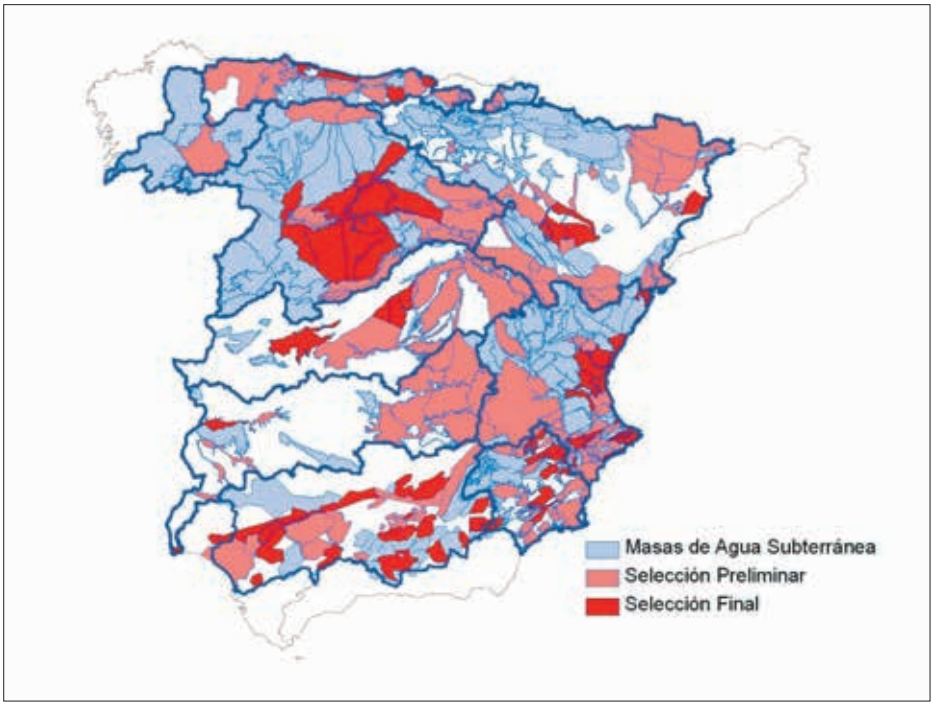


Figura 23. Selección final de MASb en las Demarcaciones Hidrográficas Intercomunitarias

ACTUACIONES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LA REVISIÓN DE LOS PLANES DE SEQUÍA

José María Pernía Llera
Silvino Castaño Castaño
José María Ruiz Hernández

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 6 *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (DGA) al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Director de la actividad

José María Pernía Llera. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España

José María Pernía Llera
Silvino Castaño Castaño
José María Ruiz Hernández

Dirección General del Agua

Fernando Octavio de Toledo y Ubieto

Confederaciones Hidrográficas

Emilio Rodriguez Merino (CHMS)
Juan Manuel Fernández Estrada (CHC)
Victor del Barrio Beato (CHD)
José Antonio Fernández Sánchez (CHT)
José Ramón Aragón Cavaller (CHG)
Victor Cifuentes Sánchez (CHGudl)
Arancha Fidalgo Pelarda (CHJ)
Ignacio Genovés Cardona (CHS)
Teresa Carceller Layel (CHE)

Empresa colaboradora

THIGSA: José Luis Herrero Pacheco,
Esperanza Reaño García,
Pedro González Vázquez

ACTUACIONES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LA REVISIÓN DE LOS PLANES DE SEQUÍA

INTRODUCCIÓN

La sequía constituye un fenómeno hidrológico para el que los diversos especialistas implicados no tienen un acuerdo generalizado en su definición. Este fenómeno supone una disminución coyuntural significativa de los recursos hídricos, durante un periodo temporal prolongado y en un área lo suficientemente extensa. Suele caracterizarse en función de la disminución de la precipitación, del déficit de la humedad del suelo, de la disminución de los recursos hídricos, etc. Así según su caracterización hablaremos de sequía meteorológica, agrícola, hidrológica, etc.

La sequía hidrológica, a la que nos referiremos en lo sucesivo, se caracteriza por una disminución temporal de los recursos hídricos respecto a los valores medios disponibles, circunstancia puede impedir satisfacer la demanda de agua a los sectores que la utilizan. A diferencia de la sequía agrícola que suele seguir a la sequía meteorológicas, la hidrológica puede demorarse durante meses en función del tipo de recurso hídrico que se utilice en el área afectada (agua superficial, subterránea, depurada o desalada) o de la capacidad que exista para la regulación del recurso.

La gestión adecuada de los recursos hídricos, tanto en época de sequía como en época de normalidad climática, puede demorar la sequía hidrológica en el tiempo minimizando su efecto hasta el siguiente episodio de abundancia de recursos. La gestión y reasignación de los recursos a las nuevas prioridades de la demanda ocasionadas por la sequía, puede paliar o disminuir la mayor parte de sus efectos negativos.

Ante la escasez de agua de agua, no se comportan de manera análoga todos los sistemas de distribución, ya su vulnerabilidad depende del origen de la aportación del recurso. Son menos vulnerables aquellos que tienen una aportación mayor de agua subterránea en el suministro del recurso. Esto está motivado a que cuando escasea la aportación de agua superficial, pueden incorporarse recursos suplementarios que proceden de agua subterránea no utilizados e incluso de una explotación controlada de la reserva de los acuíferos, para completar el déficit en el suministro.

La necesidad de potenciar la utilización del agua subterránea en situaciones de sequía se ha puesto de manifiesto claramente durante las dos últimas sequías (años 1992-1996 y 2004-2006). En estos periodos la construcción y explotación de los denominados "pozos de sequía" y la expropiación temporal o reasignación de los recursos, ha permitido proporcionar agua rápidamente en las zonas donde no se podía satisfacer la demanda únicmente a los recursos preexistentes. La experiencia adquirida durante estos episodios de sequía, ha demostrado como la explotación controlada de recursos subterráneos de determinadas Masas de Agua Subterránea, puede coadyuvar a paliar los efectos nocivos de la sequía (merma en los recursos disponibles), ofertando recursos hídricos complementarios para solventar los déficit. Esta explotación se ha efectuado sin que se produzcan alteraciones sensibles, ni en el funcionamiento hidrodinámico de los sistemas hidrogeológicos explotados de forma temporal, ni en los sistemas ecológicos con éstos vinculados. Desarrollándose, por tanto, estas actuaciones en un marco de gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

La aplicación de soluciones urgentes en estas situaciones ha requerido la adopción de medidas y actuaciones urgentes, para lo cual ha sido necesario incorporar al sistema administrativo y jurídico una serie de Reales Decretos y Resoluciones. Entre ellos destacan para el periodo de sequía 1992-1996: el Real Decreto 134/1994, de 4 de febrero, por el que se adoptan medidas administrativas especiales para la gestión de los recursos hidráulicos, al amparo del articulo 56 de la Ley de Aguas; el Real Decreto-Ley 1/1995, de 10 de febrero (para los abastecimientos); Resolución de 18 de octubre de 1995, de la Secretaría de Estado de política Territorial y Obras

Públicas (adopción de medidas urgentes). Para el periodo 2004-06 se adoptaron medidas excepcionales al amparo del Real Decreto 1265/2005, de 21 de octubre.

La planificación hidrológica española ha establecido en su legislación la Gestión de Sequías la necesidad de realizar una serie de actuaciones, que culminan con el Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía para cada una de las Confederaciones Hidrográficas. Estos planes incorporan la gestión de las aguas subterráneas con un tratamiento dispar en las confederaciones, lo que ha motivado el presente trabajo. Que pretende que en futuras actualizaciones de los planes de sequía se unifiquen los criterios para optimizar su utilización.

OBJETIVOS

La incorporación a la Gestión de Sequías de las posibilidades que ofrecen todas las masas de agua subterránea en sus respectivas demarcaciones hidrográficas, ha sido realizado en el reciente trabajo del año 2010: *Actuaciones en Aguas Subterráneas para la revisión de los Planes de Sequía. Demarcación Hidrográfica del... (IGME-DGA).* Este trabajo se ha realizado para las nueve demarcaciones intercomunitarias y cada uno de ellos consta de una memoria y un anexo con las fichas de todas las masas de agua. Su resumen se recoge en la presente publicación, por lo que su análisis detallado, debe ser localizado en los documentos de referencia.

Los objetivos primordiales de los estudios, son:

1. Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos.
2. Análisis de la sensibilidad a la explotación intensiva.
3. Análisis de la infraestructura disponible o necesaria para el seguimiento de la explotación.
4. Establecimiento de un protocolo de actuación y un plan de vigilancia ambiental.

Para lograr estos objetivos, ha sido necesario realizar un importante acopio de información de naturaleza hidrogeológica en los Organismos competentes, y tratar dicha información desde los niveles más básicos, hasta los más generales, puesto que no hay que olvidar que el estudio se ha realizado para todas las cuencas intercomunitarias de España. La unidad de trabajo básico ha sido la Masa de Agua Subterránea, tratando la información hasta conseguir obtener unos resultados satisfactorios, y respetando la concordancia con conclusiones de otros trabajos realizados por los citados Organismos.

METODOLOGÍA

La metodología resumida para la consecución de los objetivos, ha seguido los siguientes pasos:

1. Recopilación de toda la información sobre redes de control de piezometría y calidad, en el ámbito de cada Cuenca Intercomunitaria, disponible en el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) y en el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Asimismo, se han recopilado datos meteorológicos, coberturas administrativas, información hidrogeológica y en general, toda la información útil en relación con los recursos hídricos de las diferentes demarcaciones hidrográficas. Todo ello se ha descrito detalladamente en el apartado de información de partida.
2. Determinación de un índice de explotación (Ie) y de la disponibilidad de recursos en cada masa de agua subterránea. En este análisis se evalúa la disponibilidad de recursos según el grado de explotación de cada masa de agua, utilizando para ello la información de balances más reciente disponible en las Oficinas de Planificación Hidrológica de cada Demarcación Hidrográfica y/o en el IGME (recursos renovables, requerimientos medioambientales y extracciones).
3. Selección de los puntos de agua con mejor registro de control piezométrico en cada masa de agua, y análisis de la tendencia piezométrica del periodo común de dichos puntos. Este análisis se realiza por separado para los puntos de la red histórica del IGME (1971-2001), y para la red básica de cada Demarcación (2001-2009).
4. Selección de los puntos de agua con mejor registro de control hidroquímico en cada masa de agua, y análisis de la tendencia hidroquímica de la conductividad, el magnesio, los nitratos, el sodio y los sulfatos. Al igual que en el caso de la piezometría, este análisis se hace por separado para los puntos de la red histórica del IGME, y para la red básica de cada Demarcación.
5. Determinación de un Índice de Calidad (Ic) para cinco parámetros químicos entre todos los analizados, y clasificación de la masa de agua subterránea en base al peor valor obtenido en el cálculo del Ic.
6. Delimitación de las zonas sensibles a la sequía. En este análisis se detectan las zonas de interés ambiental que pueden verse afectadas por un incremento de la explotación, informando de los elementos del territorio que deben ser objeto de

Vigilancia Ambiental, ante la puesta en funcionamiento de infraestructuras de sequía para la extracción de aguas subterráneas.

7. Determinación de los criterios para la selección de MASb, que permitan incrementar la disponibilidad en las diferentes situaciones de sequía.
8. Análisis de la Infraestructura de sequía y redes de control asociadas a la misma.
9. Determinación de los recursos hídricos subterráneos utilizables en situaciones de sequía.
10. Desarrollo de un protocolo de actuación en materia de aguas subterráneas para extracciones en situaciones de sequía.
11. Plan de Vigilancia Ambiental en materia de aguas subterráneas para extracciones de sequía.
12. Recomendaciones.

Tratamiento y resumen de datos de las Masas de Agua Subterráneas

El tratamiento de estas para el análisis cualitativo y cuantitativo de cada masa de agua subterránea, se basa en las directrices de análisis establecidas en la "Instrucción de Planificación Hidrológica" aprobada el 10 de septiembre de 2008 (BOE n.º 229, de fecha 22 de septiembre de 2008)

Toda la información sobre aspectos cuantitativos y cualitativos de las aguas subterráneas relativas a cada MASb, que han permitido calcular índices y evoluciones temporales, han sido recogidas en una serie de fichas cuya configuración y contenido se recogen en los siguientes apartados.

El siguiente esquema ilustra la metodología de análisis de las MASb (figura 1)

Características Generales de la Masa de Agua Subterránea

Esta ficha recoge lo datos generales sobre la MASb y las redes de control piezométrico e hidroquímico,

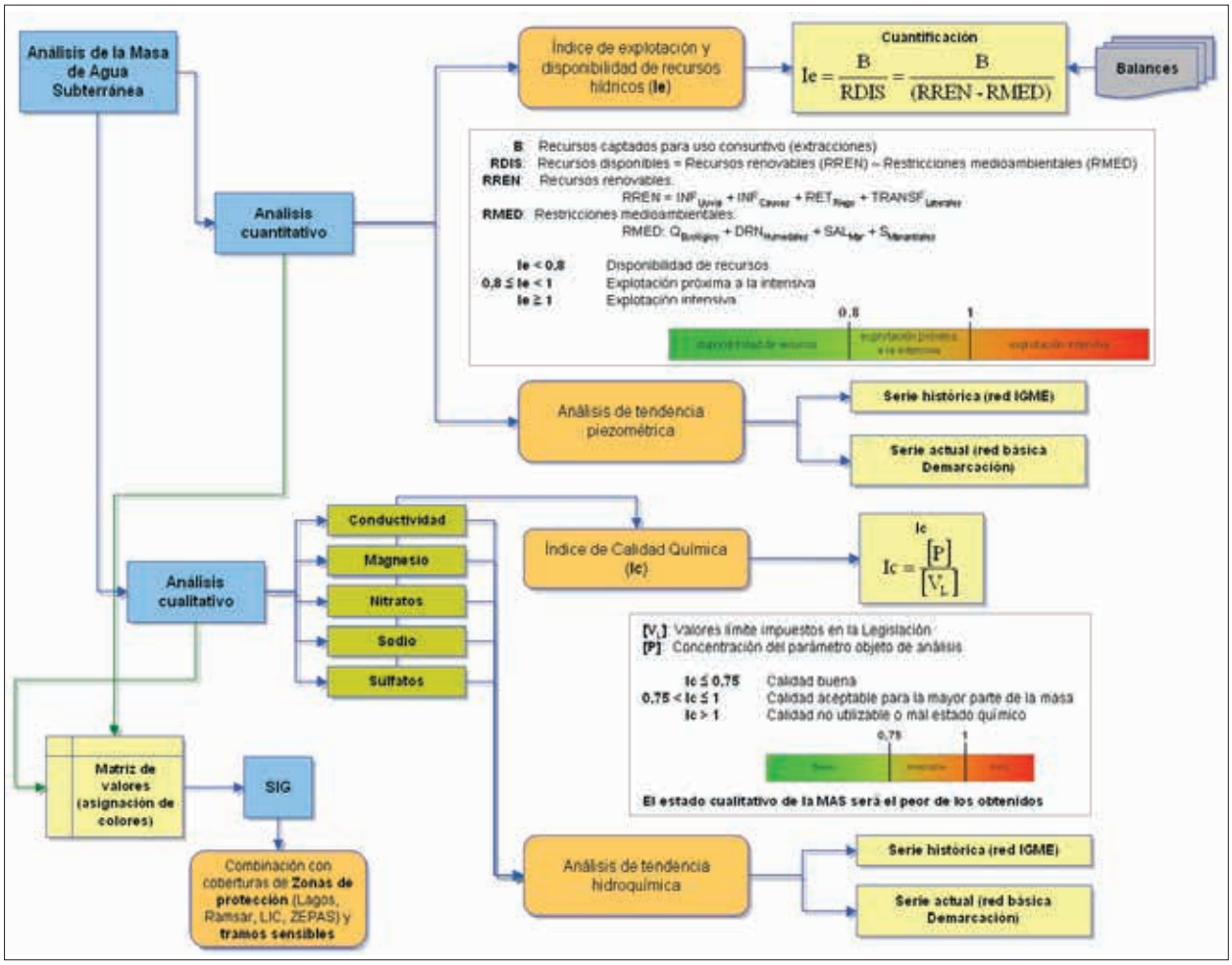


Figura l. Metodología empleada para el cálculo de los Índices de Disponibilidad (*Ie*) y Calidad (*Ic*) de una Masa de Agua Subterránea

tanto las activas (redes básicas operadas por cada Demarcación Hidrográfica) como las históricas que están recogidas en la Base de Datos AGUAS del IGME (figura 2).

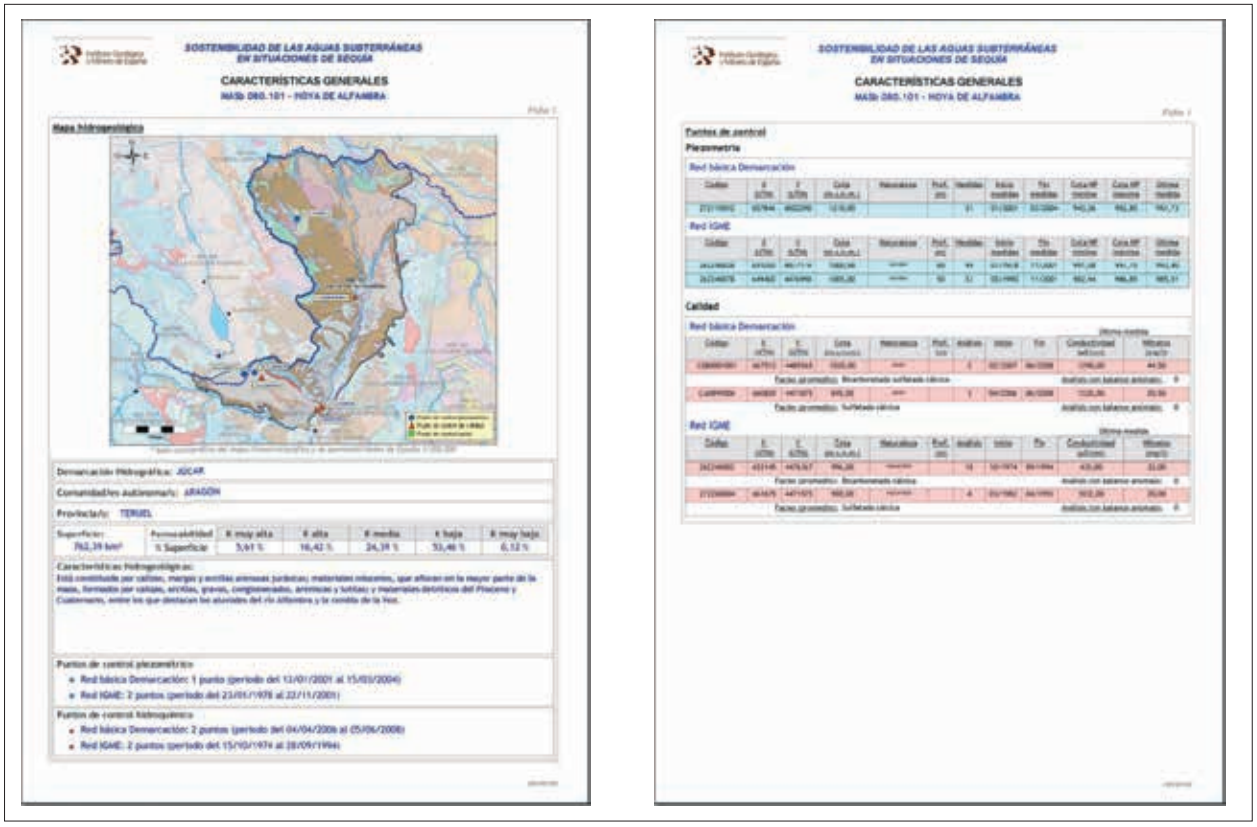


Figura 2: Ficha de características generales (anverso y reverso)

Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo de cada MASb se efectúa mediante la realización de un doble cálculo:

- Determinación del Índice de explotación (Ie) en base a datos básicos de balance de la MASb.
- Análisis de las series temporales de piezometría (red histórica del IGME y red básica de la demarcación), analizando por separado la tendencia de las series históricas y la tendencia de la serie actual.

Para determinar el Índice de Explotación a partir de los datos de balance hidrogeológico de cada Masa de Agua Subterránea, (ver el análisis cuantitativo de la figura 1) se calculan de forma separada los Recursos Renovables (RREN) y las Restricciones Medioambientales (RMED). Los Recursos Renovables están constituidos por:

- Recarga por infiltración de agua de lluvia (INF_{LLUVIA})
- Recarga por infiltración de agua de cauces (INF_{CAUCES})
- Retornos de riego (RET_{RIEGO})
- Transferencias laterales [1] ($TRANSF_{LATERALES}$).

De tal forma que RREN = (INF_{LLUVIA}) + (INF_{CAUCES}) + (RET_{RIEGO}) + ($TRANSF_{LATERALES}$)

Como Restricciones Medioambientales (RMED) se consideran los caudales de descarga natural de la MASb que se precisan para el mantenimiento de unas condiciones ambientales adecuadas en cauces (caudales ecológicos), para la alimentación a humedales conectados con la MASb, para evitar la intrusión marina (salidas subterráneas al mar) y para el mantenimiento de manantiales:

- Caudales Ecológicos ($Q_{ECOLÓGICO}$)
- Humedales ($DRN_{HUMEDALES}$)
- Salidas al mar (SAL_{MAR})
- Manantiales ($S_{MANANTIALES}$)

[1] Las Transferencias Laterales deberían de expresarse como Entradas laterales a la Masa de Agua Subterránea desde Masas vecinas, mientras que las Salidas Laterales deberían de figurar como Restricciones Medioambientales, pero se ha optado por considerar el resultado global como Transferencia Lateral, de tal forma que si las salidas laterales son mayores que las entradas, la Transferencia Lateral será un valor negativo.

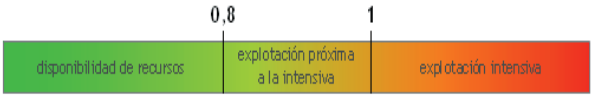
De tal forma que RMED = ($Q_{ECOLÓGICO}$) + ($DRN_{HUMEDALES}$) + (SAL_{MAR}) + ($S_{MANANTIALES}$)

De la diferencia entre ambos términos, se obtiene el Recurso Disponible (RDIS), el cual puede ser utilizado para su aprovechamiento sin causar, en principio, efectos no deseados en la MASb:

$$RDIS = RREN - RMED$$

El cociente entre las extracciones que registra la MASb (B) respecto a los Recursos Disponibles calculados (RDIS), constituye el Índice de Explotación (*Ie*), el cual indica el grado de aprovechamiento a que está sometida la MASb. Toma un valor mínimo nulo, que representa un régimen natural o no influenciado; y puede tomar valores superiores a la unidad. Se han establecido rangos de valores del Ie, de tal forma que:

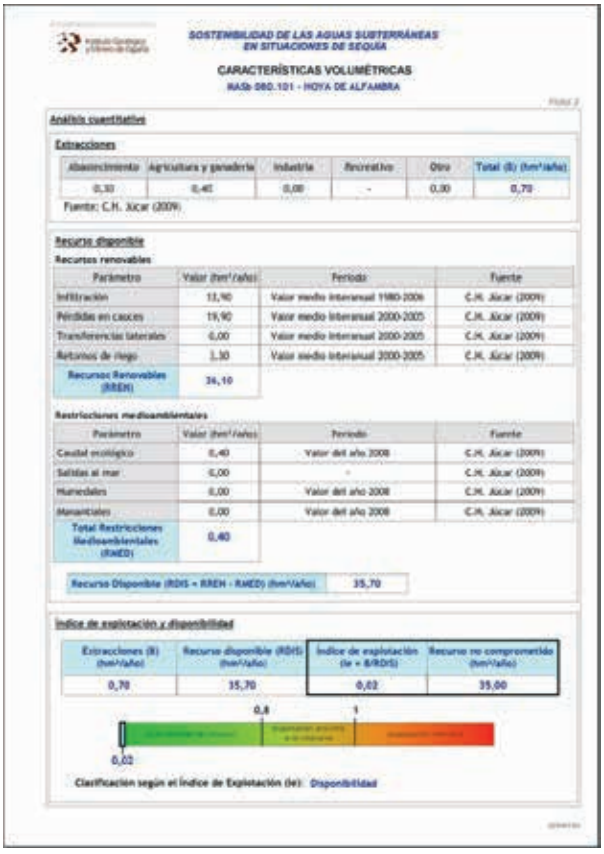
- Si Ie < 0,8, existen recursos, y por lo tanto, la MASb es susceptible de ser utilizada en situación de sequía para su aprovechamiento.
- Si 0,8 ≤ Ie < 1, la MASb tiene recursos, pero se halla en una situación próxima a la explotación intensiva, por lo que los recursos deben ser explotados con precaución.
- Si Ie ≥ 1, la MASb está sometida a explotación intensiva, y por lo tanto, no quedan recursos que puedan ser considerados como explotables. Un valor superior a la unidad implica una situación de desequilibrio, por cuanto, se aprovechan mediante captaciones directas y bombeos un volumen de recursos hídricos subterráneos por encima de los declarados como disponibles. Valores muy superiores a la unidad indican un régimen de aprovechamiento de aguas subterráneas que se califica como "minería del agua subterránea", ya que implica la captación de reservas hidrogeológicas y la instauración de un régimen no sostenible en la gestión de la MASb.



Partiendo de que los datos de balances hidrogeológicos que se utilizan en los cálculos corresponden a valores tipo medio, se considera que sólo valores del Índice de Explotación (*Ie*) inferiores a 0,80 es un indicador que existen recursos disponibles en situaciones de sequía. Este coeficiente se fija en función de dos aspectos:

- Al objeto de fijar un margen del 20% correspondiente a la variación que se produce en el balance hidrogeológico (concepto dinámico) en un periodo seco respecto a uno húmedo.
- Se considera que las masas de agua subterránea presentan una evolución hiperanual en su balance hidrogeológico y que, por tanto, siempre que no se establezca una explotación no sostenible (lo que se asegura con un valor para el *Ie* inferior a 0,80), existe la posibilidad real de una recuperación tras un periodo de bombeo.

Mediante la utilización de este índice se asegura un aprovechamiento sostenible de las MASb en escenarios de sequía, puesto que sólo se cifra como recursos subterráneos aprovechables el volumen de recursos renovables que exceden de los compromisos medioambientales que presenta el sistema hidrogeológico (figura 3). Este planteamiento en la explotación de los sistemas hidrogeológicos asociados a las MASb, implica la no utilización de reservas hidrogeológicas en la mitigación de situaciones de sequía, entendiendo por reservas hidrogeológicas aquellas aguas subterráneas almacenadas en los acuíferos que no son objeto de renovación anual, sino que responde a ciclos hiperanuales.


SOSTENIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN SITUACIONES DE SEQUÍA

CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS

Figura 3. Ejemplo de la ficha de características volumétricas

Por otro lado, también se lleva a cabo un análisis de la tendencia piezométrica, utilizando para ello piezómetros representativos de cada MASb, con un registro de datos lo más amplio posible, dentro de dos periodos diferentes:

- Periodo anterior al año 2001, en el cual el IGME se encargaba del control de las aguas subterráneas (Red IGME). En este periodo se analiza la tendencia histórica.
- Periodo posterior al año 2001, año a partir del cual el control de las aguas subterráneas pasó al Ministerio de Medio Ambiente (Red Básica Demarcación). En este periodo se determina la tendencia actual.

En ambos casos, se muestra la velocidad promedio de ascenso/descenso de cada tendencia, indicándose también el grado de correlación obtenido, número de puntos utilizados y la amplitud de la serie (figura 4).

Análisis cualitativo

Para cada MASb se efectúa mediante el análisis de las series temporales de datos hidroquímicos de que se dispone (red histórica del IGME y red básica del MARM), calculando los Índices de Calidad Química para diferentes elementos (conductividad, magnesio, nitratos, sodio y sulfatos), comparada con los límites impuestos por la legislación vigente para la potabilidad del agua (RD 140/2003, *Criterios Sanitarios de la calidad del agua de consumo humano)*.

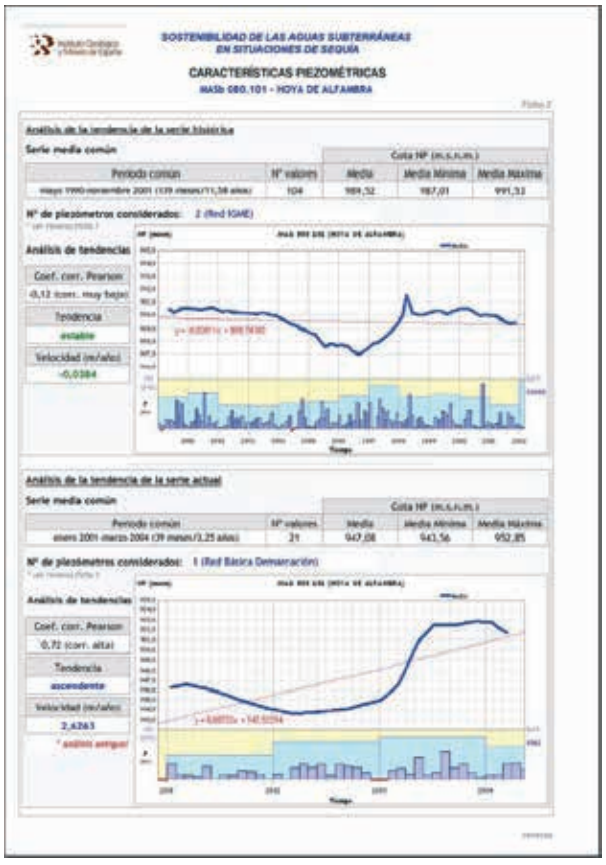


Figura 4. Ejemplo de la ficha de características piezométricas

Los indicadores de calidad hidroquímica de cada parámetro considerado ($Ic_{[P]}$), se obtiene comparando la concentración obtenida en los análisis químicos realizados sobre muestras de agua subterráneas tomadas en las redes de control, con los límites impuestos por la legislación vigente para la potabilidad del agua. De manera que un valor del $Ic_{[P]}$ mayor que la unidad, en algunos de los parámetros considerados, implica la no potabilidad del agua subterránea.

La calidad del agua subterránea de la MASb para su utilización en abastecimiento urbano se cuantifica mediante el Índice de Calidad (*Ic*), que resumen el conjunto de los indicadores de calidad hidroquímico ($Ic_{[P]}$), adoptando el valor máximo de ellos.

Se ha establecido un rango para el Índice de Calidad de cada parámetro:

- Si Ic ≤ 0,75, el índice es bueno, y por lo tanto la calidad para el parámetro analizado es buena.
- Si 0,75 < Ic ≤ 1, el índice es aceptable.
- Si Ic > 1, el índice es malo, y por lo tanto la calidad para el parámetro analizado es mala, puesto que supera los límites impuestos.

La calidad final, será la correspondiente a la peor de los parámetros analizados.

Este índice asegura que las aguas subterráneas de las MASb analizadas presentan unas características mínimas o de referencia para garantizar un suministro de calidad suficiente para dotar abastecimientos urbanos (sería preciso analizar todos los parámetros incluidos en la reglamentación para asegurar la potabilidad). No obstante, en muchas ocasiones las aguas subterráneas captadas en situaciones de sequía se emplean para dotar demandas de regadío, menos exigentes en la calidad de las aguas que pueden ser suministradas que los abastecimientos urbanos. Esto significa que el *Ic* calculado no constituye un indicador excluyente respecto a la utilizaciön de una

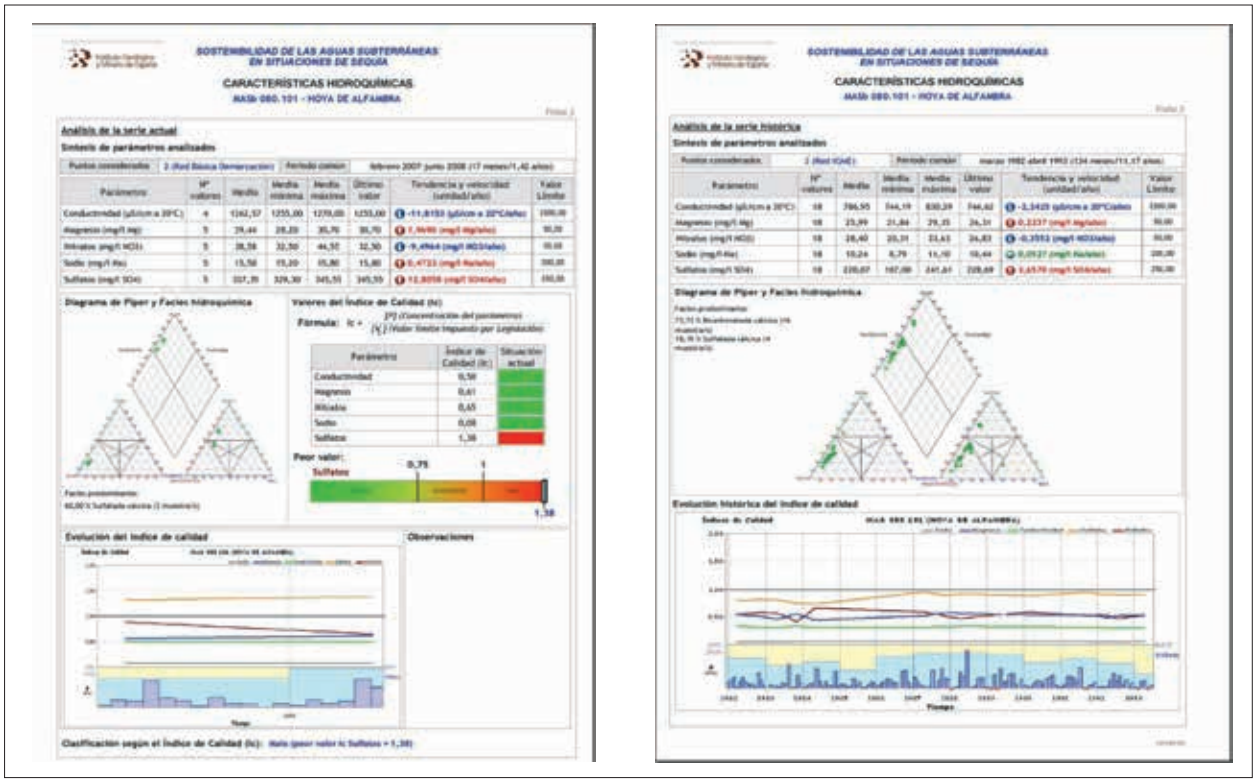


Figura 5. Fichas de características hidroquímicas actuales e historicas Zonas sensibles

determinada MASb para la ampliaciön de la oferta mediante la integración de sus aguas subterráneas en situaciones de sequía, ya que depende de la unidad de demanda receptora.

Las ficha de características hidroquímicas (figura 5), también tiene un doble contenido. Por el anverso se efectúa un *análisis actual* con los datos obtenidos en las redes operativas de control de la calidad química de las aguas subterráneas, donde se incluye un diagrama de Piper con indicación de la facies hidroquímica predominante, el cálculo de los índices de calidad (*Ic*) para los diferentes parámetros considerados (Conductividad, Magnesio, Nitratos, Sodio, Sulfatos) y la evoluciön temporal de los indices de calidad calculados. Por el reverso se *analiza la serie histórica* (datos registrados en la Base de Datos Aguas del IGME) recogiendo un diagrama de Piper y las facies hidroquímicas predominantes, así como la evolución histórica del índice de calidad calculado en referencia a los datos históricos.

Zonas sensibles

Para el análisis de zonas sensibles se han tenido en cuenta, fundamentalmente, las figuras de protección existentes en cada Demarcación Hidrográfica.

Los resultados óptimos se obtendrían mediante un análisis de aquellas zonas que muestran dependencia directa o indirecta de las aguas subterráneas, aunque, en general, sólo se dispone parcialmente de tal información. En los PES existentes, se analiza la vulnerabilidad de las zonas de alto valor ambiental frente a situaciones de sequía, pero no se determina la dependencia de las mismas de las aguas subterráneas. De forma resumida, en una situación de sequía, se deben analizar las siguientes zonas:

- Lugares de Interés Comunitario (LIC) y Zonas de Especial Protección para la Aves (ZEPA), que conformarán la futura red Natura 2000.
- Humedales Ramsar, ya que presentan ecosistemas acuáticos de alto valor y una importante vinculación al medio hídrico.
- Masas de agua tipo ríos muy modificados, en concreto los embalses, ya que pueden sufrir los efectos de una situación de la sequía por la reducción de las aportaciones, produciéndose una disminución del volumen almacenado y por lo tanto modificación de la calidad de las aguas embalsadas, surgiendo problemas como la eutrofización y consecuentemente daños en los ecosistemas existentes.
- Masas de agua superficial categoría lagos definidos según los criterios de la DMA.

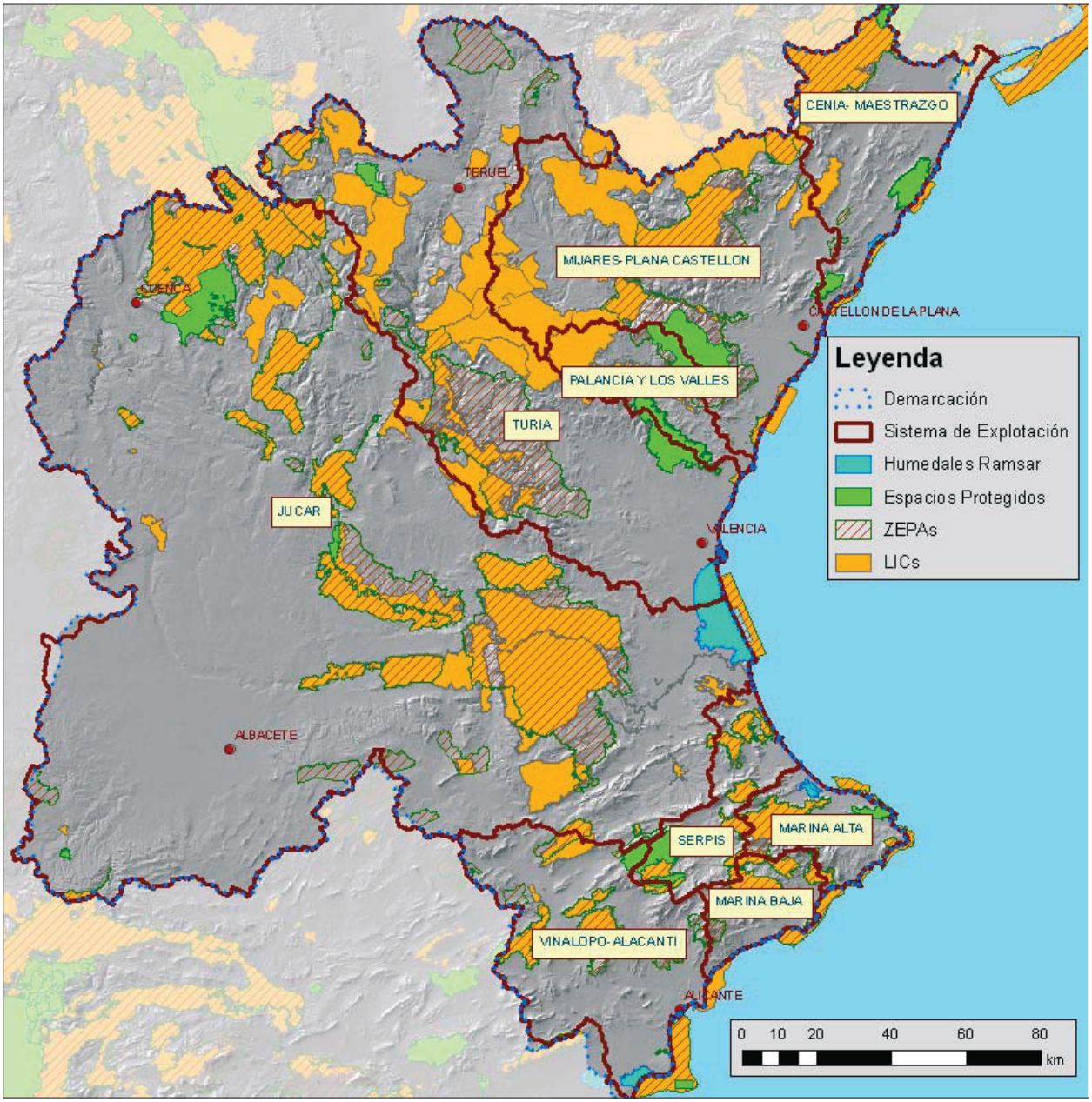


Figura 6. Figuras de Protección en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Aparte de las zonas citadas, se han considerado otras figuras de protección, como son los Espacios Naturales Protegidos (Parques, Reservas, etc.) y las Reservas de la Biosfera. Como ejemplo se recoge en la figura 6 las zonas con protección en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

Infraestructura de Sequía

Con el nombre genérico de infraestructura de sequía se hace referencia a las captaciones (normalmente pozos y sondeos) que son ejecutadas para su utilización en situación de sequía, o bien activadas para obtener recursos adicionales (normalmente antiguos abastecimientos urbanos o captaciones en reserva). Esta infraestructura conforma una red, cuyo objetivo primordial es, en general, la captación de recursos suplementarios que permitan suplir las carencias en abastecimientos surgidas en una situación de sequía, y/o el mantenimiento de caudales ecológicos, y otros usos que determine la Comisión de Sequía. Competencias que tiene al ser una Comisión Permanente de la Junta de Gobierno de la Demarcación, creada para esas funciones en el periodo de emergencia ante la sequía.

Las infraestructuras de sequías existente en la demarcaciones hidrográficas tienen sus peculiaridades propias, principalmente motivadas porque se han desarrollado en situaciones de sequía extremas, atendiendo a diferentes demandas con distintos medios. Así, existen pozos aislados o bien baterías de pozos, que unas veces son gestionados directamente por la Administración Hidráulica o bien por comunidades de usuarios tutelados por la administración.

Se pueden distinguir dos tipos básicos de infraestructuras:

1. Pozos de sequía realizados ex profeso para la captación de aguas subterráneas en época de sequía.
2. Antiguos pozos de abastecimiento urbano abandonados o en reserva, que son útiles en situaciones de sequía. Su incorporación para otros usos está supeditada a que no sea en detrimento del abastecimiento urbano.

La situación real es que la distribución de las infraestructuras de sequía no es homogénea en la Demarcación, concentrándose esta en las zonas donde los recursos hídricos superficiales son más vulnerables y donde aumenta la demanda estacional. En las Demarcaciones que tienen costa, normalmente la demanda aumenta en las zonas costeras.

Escenarios de sequía

De acuerdo con la Directiva Marco del Agua y los Planes Hidrológicos, las Demarcaciones Hidrográficas deben considerar en su planificación las situaciones hidrológicas extremas, como es el caso de las sequías. En este sentido, en los Planes Especiales de Alerta y Eventual Sequía se establecen cuatro tipos de escenarios (normalidad, prealerta, alerta y emergencia) que definen esa situación extrema, y se apuntan distintos tipos de medidas para la mitigación de los efectos de la sequía desde el punto de vista operativo. Las medidas propuestas se deben aplicar de modo consecutivo, según se avance en cada uno de los escenarios definidos.

Con el fin de que el uso de las aguas subterráneas sea óptimo, se plantea a continuación una serie de actuaciones técnicas y administrativas que deberían ser tenidas en cuenta. Dichas actuaciones deben considerar el conocimiento de las masas de agua subterránea afectadas, y deben basarse, si es posible, en procedimientos de tipo predictivo (p.e. modelos matemáticos). Los resultados de dichas actuaciones pueden modificar o mejorar el conocimiento hidrogeológico previo, si se originan respuestas del medio diferentes a las previstas, por lo que es necesaria la ejecución de un plan de seguimiento de las actuaciones que permita que las consecuencias de éstas sean conocidas de forma rápida para así poder adecuar el estado de la masa de agua subterránea a la situación de sequía concreta.

Las actividades se pueden agrupar según se realicen previamente, durante o tras la situación de sequía. En el primer grupo los trabajos a desarrollar serían de tipo preventivo y deberían ser contemplados en la planificación hidráulica. Durante la sequía los trabajos deben contemplar actuaciones administrativas y técnicas en función del tipo de escenario de sequía en el que se encuentre cada sistema de gestión. La parte final de este plan debe tener como finalidad conocer el estado de la masa de agua subterránea para que, con las actividades destinadas a su restauración, se alcance una situación hídrica lo más parecida posible a la original.

Actuaciones en escenario de normalidad

Estas actividades pueden no estar ligadas exclusivamente a las sequías, y pueden formar parte de la planificación hidráulica o ser estudios y trabajos independientes de la misma. Sin embargo su desarrollo, previo a las sequías, ayudará a reducir los esfuerzos en las medidas a tomar en esas situaciones. Estas actividades forman parte de la investigación de las masas de agua subterránea, que sirven de apoyo al desarrollo de herramientas de gestión hídrica y se pueden dividir, a vez, en varios grupos.

- Caracterización preliminar del medio, análisis de las bases de datos existentes y estudios referentes a geología e hidrogeología.
- Realización de sondeos específicos de investigación, en aquellas zonas donde el conocimiento hidrogeológico sea más reducido o sean más favorables para la movilización de reservas en caso de emergencia.
- Caracterización hidrodinámica de las captaciones y de la masa de agua subterránea con la realización de ensayos de bombeo, con cuyos resultados se podrán determinar los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos

Actuaciones en escenarios de sequía

En los tres escenarios de sequía, prealerta, alerta y emergencia, son necesarias medidas de control, ahorro, conservación y hasta de restricción de los recursos hídricos. Entre las medidas a adoptar también se encuentran

aquellas encaminadas al incremento de la oferta de recursos hídricos mediante la puesta a disposición de los usuarios de nuevas fuentes de agua. En estos casos, las aguas subterráneas suelen ser ampliamente utilizadas, poniéndose en marcha captaciones específicas o regulándose la extracción o los usos, en los que se conocen como "pozos de sequía", y estableciéndose un Plan de Vigilancia Ambiental (figura 7). Este último requiere un conjunto de actuaciones de carácter administrativo y técnico específicas. Además, la respuesta de la masa de agua subterránea a ellas debe ser controlada de modo estricto, con el fin de poder modificarlas de forma rápida si la evolución de la sequía o los acuíferos no es la prevista.

La experiencia adquirida en las sequías, ha permitido elaborar una metodología que sirva como punto de partida para el desarrollo de las siguientes actuaciones.

Actuaciones administrativas

Se trataría de la autorización de la explotación de captaciones por parte de las autoridades competentes, en este caso las de la Demarcación Hidrográfica, regulando todos los aspectos posibles de la extracción del agua contemplando los usos, la explotación de cada pozo, beneficiarios, deberes de éstos, controles, etc.

1) Autorización de la puesta en marcha de pozos como "pozos de sequía".

En la autorización de la Administración se deben identificar individualmente las captaciones que se utilizarán coyunturalmente para mitigar los efectos de la sequía. Se debe especificar el propietario de la explotación, el beneficiario de los recursos hídricos y la denominación individual de cada pozo de sequía, la masa de agua o zona de explotación.

2) Limitación del volumen de explotación.

La explotación de los pozos de sequía deber servir para complementar aquellos recursos no disponibles por efecto de la sequía, por lo que las extracciones deben limitarse. En las autorizaciones, esas limitaciones deben estar estrictamente cuantificadas por beneficiario y por pozo individual, para no afectar a zonas protegidas o de interés ambiental, y para no modificar la calidad del agua.

3) Especificaciones de control.

En cada pozo de bombeo debe realizarse un control con el fin de garantizar el cumplimiento de las normas dictadas por la autoridad competente para cada uno de ellos y comprobar las posibles afecciones entre aprovechamientos.

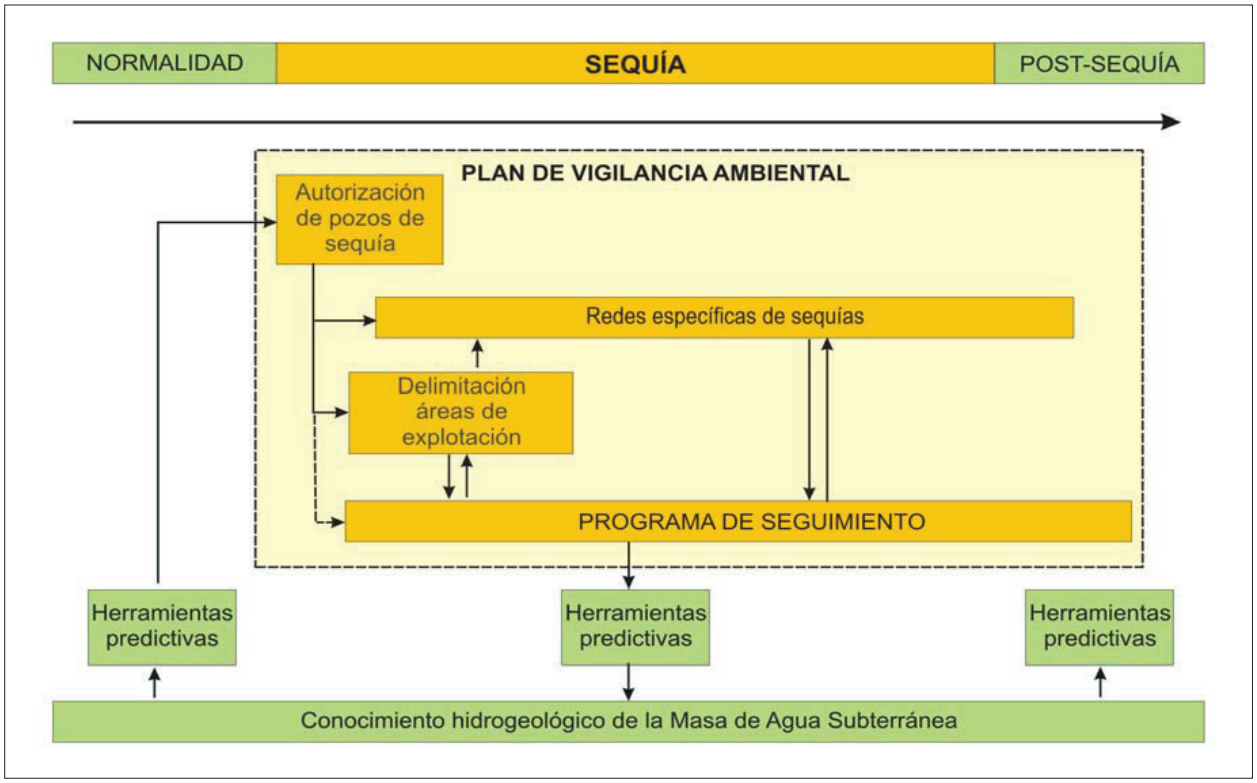


Figura 7. Componentes directos e indirectos del Plan de Vigilancia Ambiental

En la autorización de los pozos de sequía, la Demarcación debe especificar quiénes son los responsables del control, la periodicidad de las medidas y la posibilidad de realizar inspecciones de los dispositivos de control y contraste de los datos facilitados. Los responsables deben hacer el seguimiento del tiempo de bombeo en cada pozo autorizado, de los caudales y volúmenes extraídos y de la evolución de los niveles de agua y de su calidad general mediante la conductividad eléctrica. La homogeneidad de la información debe quedar garantizada, por lo que los responsables de la toma de datos deben disponer del mismo sistema de presentación de los datos, ejemplos de estadillos en la figura 8.

Actuaciones técnicas

Complementariamente se necesita realizar una serie de trabajos técnicos para el cumplimiento de las actuaciones administrativas y para una mayor eficacia en la gestión del conjunto del sistema de explotación en situación de sequía. Por ello, es necesario controlar las masas de agua subterránea y el tratar de modo rápido la información de los parámetros de control establecidos, para que, ante los efectos de una posible afección, el Organismo gestor pueda tomar rápidamente las medidas oportunas.

1) Delimitación de sectores o áreas de explotación

Dentro de una masa de agua subterránea, se definen como tales aquellas áreas de potencial influencia directa de las extracciones realizadas en las captaciones de sequía, y en las que éstas quedan englobadas. Se puede estimar que una potencial influencia directa de las extracciones realizadas en esas captaciones será mínima o despreciable más allá de dicha área de explotación.
Se puede considerar que, en principio, el comportamiento general del acuífero fuera de los sectores de explotación establecidos es resultado del conjunto de actuaciones que se realizan sobre todo el sistema, tales como bombeos preexistentes, drenajes naturales o artificiales, etc., en el que las extracciones de sequía son una más de éstas, así como de las condiciones externas a las que se encuentra sometido el acuífero, especialmente las referentes a las de carácter hidrometeorológico.

2) Implantación y seguimiento de redes de control específicas de las aguas subterráneas (Red Específica de Sequía)

Para el seguimiento del comportamiento de los acuíferos ante las extracciones de sequía debe definirse una Red de Control Específica de Sequía con objeto de conocer la evolución espacial y temporal de las aguas subterráneas, tanto desde el punto de vista de sus niveles piezométricos como de su calidad. Dicha red, que puede ser totalmente nueva, estar basada en una preexistente o complementar las redes básicas de la Demarcación. Estará compuesta, a su vez, por tres tipos de subredes:

- Red de control piezométrico (RP), basada en la medida de la profundidad del agua,
- Red de control elemental de calidad (REC), centrada en la determinación de la conductividad eléctrica y del contenido en ion cloruro, y que sería necesaria para el control de la intrusión marina.
- Red de control de calidad general (RCG), basada en la determinación de los principales compuestos de las aguas subterráneas (bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio).

En caso de ser necesario se podría plantear la implantación de una red hidrométrica en sectores de salida de

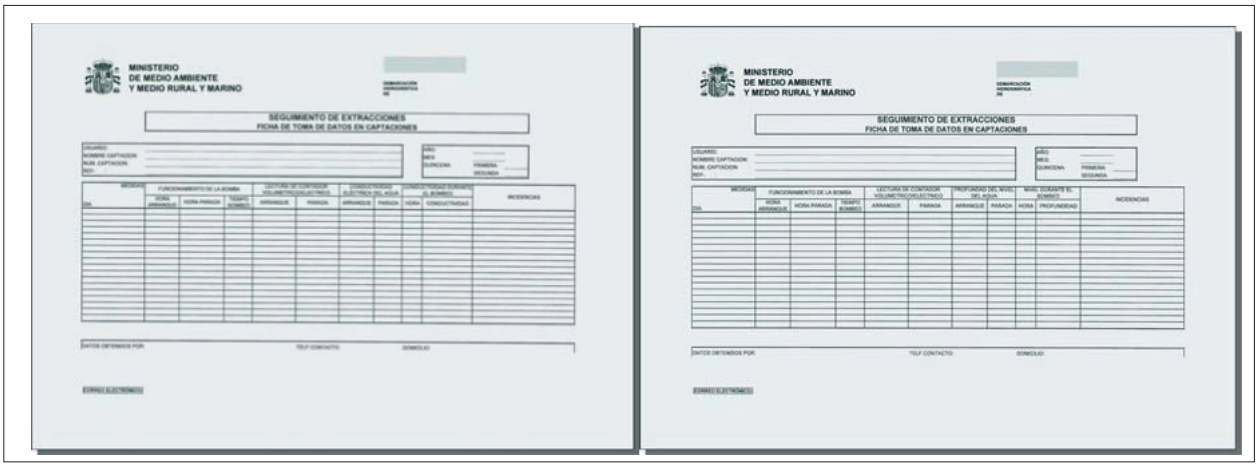


Figura 8. Estadillos para la presentación de datos de control de volúmenes extraídos, piezometría y calidad

agua subterránea, especialmente si están relacionadas con zonas de interés ambiental.

Los resultados de los parámetros de control de las distintas redes serán reflejados para cada acuífero en diferentes tablas, tanto de cada uno de los sectores de explotación como de las redes que se encuentran fuera de éstos. En las tablas se indicarán las medidas obtenidas en el mes considerado, la variación de éstas con respecto al mes anterior y las diferencias existentes con las medidas anteriores a la situación de sequía.

Con objeto de obtener cifras comparativas, los datos se deben tratar de forma sencilla (medias aritméticas simples). Debido a que en la mayoría de los casos la información obtenida no está distribuida de forma homogénea, su verdadera utilidad no radicará tanto en el valor absoluto de los datos como en la variación relativa sufrida por éstos (figura 9).

El tratamiento así realizado permitirá establecer de forma rápida un análisis comparativo de las variaciones espaciales de los parámetros controlados en los distintos sectores de explotación y acuíferos, así como de las modificaciones temporales sufridas en cada uno ellos, lo que orientará el diagnóstico sobre el estado y situación hidrogeológica de los mismos y sobre su evolución.

3) Control periódico de las extracciones en las captaciones de sequía

Atendiendo a los requerimientos de las actuaciones administrativas, es necesario realizar un control periódico de las extracciones en los pozos de sequía, que se debe realizar mensualmente. En caso de se prevea causar afecciones se debería controlar de forma quincenal, durante los meses de máxima demanda.

Los resultados obtenidos mediante el control periódico mensual de las extracciones realizadas en cada una de las captaciones de sequía, deben ser estructurados en diversos tipos de tablas, donde se reflejará el volumen bombeado en cada uno de los pozos para el periodo considerado, con información de lo extraído desde el comienzo de la explotación. Estas tablas ofrecerán, además, información sobre los volúmenes aprovechados por las diferentes comunidades de usuarios, así como la explotación efectuada en cada acuífero y en cada uno de los sectores de explotación definidos.

4) Trabajos complementarios de carácter específico

Para alcanzar los objetivos perseguidos con la mayor garantía posible es necesario llevar a cabo determinados trabajos que mejorarán la información, el co-

ACTUACIONES DE SEQUÍA

RESUMEN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
RED ESPECÍFICA DE SEQUÍA Y EXTRACCIONES

Código M.A.S. *Nombre M.A.S.*

Mes: *Año:*

SECTOR DE EXPLOTACIÓN	VALORES MEDIOS			DIFERENCIAS OBSERVADAS						EXTRACCIONES EN CAPTACIONES DE SEQUÍA (m3)	
				Piezometría (msnm)		Conductividad (µS/cm)		Cloruros (mg/L)			
	Nivel piezométrico (msnm)	Conductividad (µS/cm)	Cloruros (mg/L)	Con mes anterior	Con medida inicial	Con mes anterior	Con medida inicial	Con mes anterior	Con medida inicial	Mes	Total desde
SECTOR 1											
SECTOR 2											
SECTOR 3											
SECTOR 4											
SECTOR 5											
SECTOR 6											
SECTOR 7											
SECTOR 8											
SECTOR 9											
SECTOR 10											
SECTOR 11											
CAPTACIONES AISLADAS											
VALOR MEDIO SECTORES											
MEDIA RESTO ACUÍFERO											
								TOTALES EXTRACCIONES DE SEQUÍA			

Figura 9. Ejemplo de tabla resumen del estado y extracciones de agua subterránea por sectores de explotación y masa de agua subterránea

nocimiento y la compresión del funcionamiento de las masas de agua afectadas. Entre estos trabajos se incluyen los destinados a determinar los parámetros hidrodinámicos de los acuíferos implicados durante la explotación, y los correspondientes a la nivelación de precisión de captaciones de sequía y puntos de control piezométrico.

Programa de seguimiento

Los datos y resultados obtenidos y resumidos deben servir para conocer la respuesta a corto plazo de las masas de agua subterránea en una situación de explotación intensa debida al déficit hídrico provocado por la sequía. Se trata, en definitiva, de dar respuesta en el periodo de tiempo más corto posible a las cuestiones o problemas que puedan surgir, así como prever aquellos otros que pudieran presentarse en el futuro. También debe analizarse la recuperación de la masa de agua para que los posibles efectos negativos sean transitorios, logrando un equilibrio de sostenibilidad.

Al comienzo del período de sequía (situación de prealerta) es conveniente la realización de un informe inicial. Éste debe contener las características esenciales de los acuíferos, así como su casuística, problemática específica, el estado del conocimiento de los mismos, y su situación previa a la sequía que pueda servir de referencia como objetivo a lograr una vez finalizada ésta.

Igualmente, toda la información debe quedar reflejada y sintetizada, como mínimo, en un informe anual (o de temporada de bombeos), donde se plasmarán las principales conclusiones obtenidas, así como las recomendaciones que se estime conveniente hacer.

Los tres tipos de informe recomendados son:

- Informe de situación inicial
- Informes mensuales periódicos en los meses de bombeo
- Informe de situación final

Es conveniente también un informe adicional en el que se reflejará la situación y comportamiento de los acuíferos a lo largo de un ciclo hidrogeológico completo, dando una visión de la recuperación de los acuíferos.

RESULTADOS

El presente trabajo es un resumen de los resultados de otros nueve más extensos, en los que se aplica la metodología descrita. Para profundizar y analizar los resultados concretos se debe recurrir a cada trabajo particular (ver apartado de bibliografia).

Características cuantitativas

Los datos cuantitativos que se recogen en las fichas de las masas de agua subterránea, se extractan en la figura 10.

Estos conjuntos de datos, bien de disponibilidad de recursos o de análisis de tendencias e pueden presentar tablas

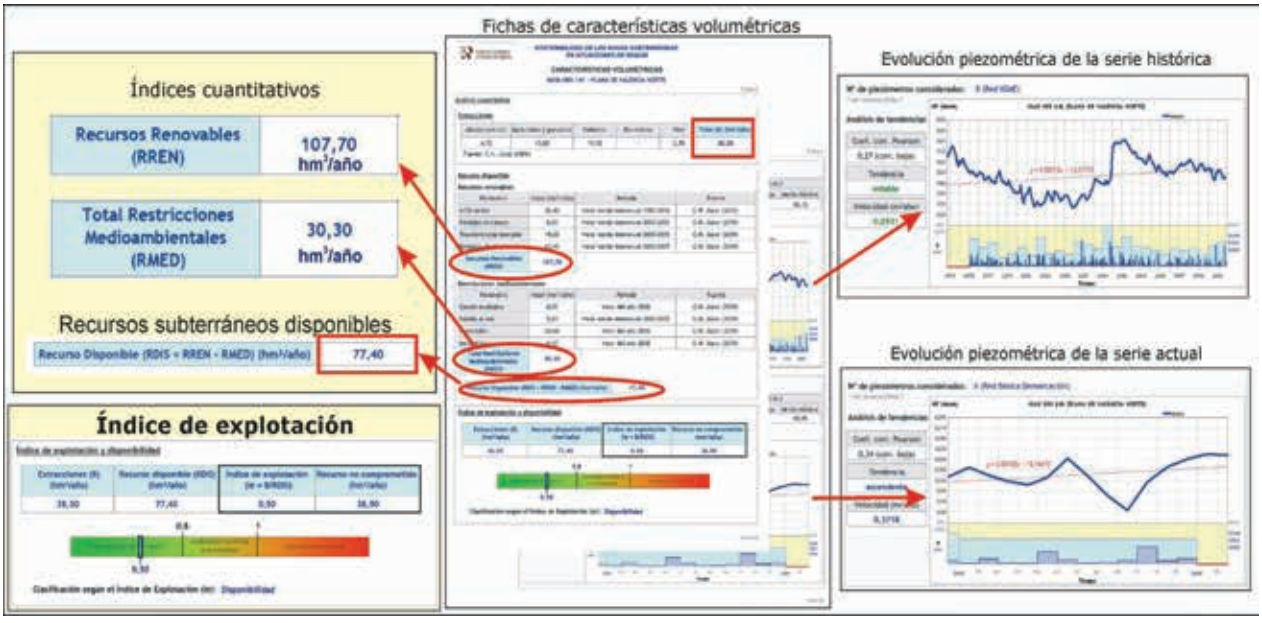


Figura 10. Datos cuantitativos utilizados en tablas y mapas

o mapas que recojan los de todas las masas de agua de la Demarcación. Esta agrupación de datos se puede efectuar por agrupaciones, por centros de consumo, sistemas de explotación u otras agrupaciones de MASb.

Análisis cuantitativo de cada masa de agua

Partiendo de los datos de balances hidrogeológicos recogidos en las fichas de cada masa de agua subterránea, se ha realizado un resumen en las tablas correspondientes. En la tabla 1 se expone, a modo de ejemplo, un cuadro con algunas de las Masas de Agua Subterránea definidas en la D.H. del Júcar, diferenciándose por colores el *Ie* calculado:

- Si *Ie* < 0,8, existe disponibilidad de recursos (color verde).
- Si 0,8 < *Ie* < 1, existe una explotación pròxima a la intensiva (disponibilidad condicionada) de los recursos (color anaranjado).
- Si *Ie* > 1, existe explotación intensiva (no disponibilidad) de recursos (color rojo).

Esta información se ha plasmado también en una cartografía de las MASb de la demarcación, exponiendose el ejemplo de la D.H. del Júcar (figura 11). De manera análoga a las tablas, las MASb se han clasificado en una escala de colores, definida en función del valor del Índice de Explotaciön (*Ie*).

Análisis de tendencias

El análisis de tendencia está relacionado con la evolución de los registros piezométricos, que como se ha comentado se ha realizado para las Redes Históricas (IGME) y las Redes Básicas Oficiales (DH). En algunas ocasiones estas redes presentan una cierta continuidad, pero en la mayor parte de las ocasiones no existe y se trata de redes piezométricas no comparables, por lo que no es conveniente llevar a cabo un análisis conjunto de los datos y si procede realizar un análisis separado de las series históricas por un lado, y las actuales por otro. Por tanto se han diferenciado:

- Series Temporales de registros piezometricos de que dispone el IGME en su Base de Datos AGUAS, donde se almacenan todos los datos piezométricos registrados en las Redes de Control Históricas desde el año 1971 hasta el año 2001.
- Series Temporales de datos piezométricos de que dispone el MARM procedente de la explotación de las Redes Oficiales de Control de Aguas Subterráneas de la cuenca Hidrográfica del Júcar y que abarcan el periodo 2001-2009.

Masa de Agua Subterránea		Recursos Renovables (RREN) (hm³/a)	Restricciones Ambientales (RMED) (hm³/a)	Recursos Disponbles (RDIS) (hm³/a)	Extracciones (B) (hm³/a)	Recursos NO Comprometidos (RNC) (hm³/a)	Índice de Explotación (Ie)
Código	Nombre						
080.101	HOYA DE ALFAMBRA	36,10	0,40	35,70	0,70	35,00	0,02
080. ---	—	—	—	—	—	—	—
080.138	ALPERA (CARCELEN)	14,30	4,90	9,40	6,80	2,60	0,72
080.139	CABRILLAS-MALACARA	22,20	1,00	21,20	0,70	20,50	0,03
080.140	BUÑOL-CHESTE	65,21	0,70	64,51	67,86	0,00	1,05
080.141	PLANA DE VALENCIA NORTE	107,70	30,30	77,40	38,50	38,90	0,50
080.142	PLANA DE VALENCIA SUR	255,30	91,80	163,50	58,60	104,90	0,36
080.143	LA CONTIENDA	7,20	0,00	7,20	5,80	1,40	0,81
080.144	SIERRA DEL AVE	45,90	12,20	33,70	23,80	9,90	0,71
080.145	CAROCH NORTE	60,10	1,30	58,80	0,80	58,00	0,01
080.146	ALMANSA	14,80	0,00	14,80	23,38	0,00	1,58
080.147	CAROCH SUR	73,60	21,80	51,80	26,40	25,40	0,51
080.190	BAJO VINALOPO	58,60	4,70	53,90	5,90	48,00	0,11
TOTALES		**4 010,40**	**768,92**	**3 241,48**	**1 483,43**	**1 950,50**	—

Tabla 1. Evaluación de Recursos Disponibles en las Masas de Agua Subterránea de la DH del Júcar

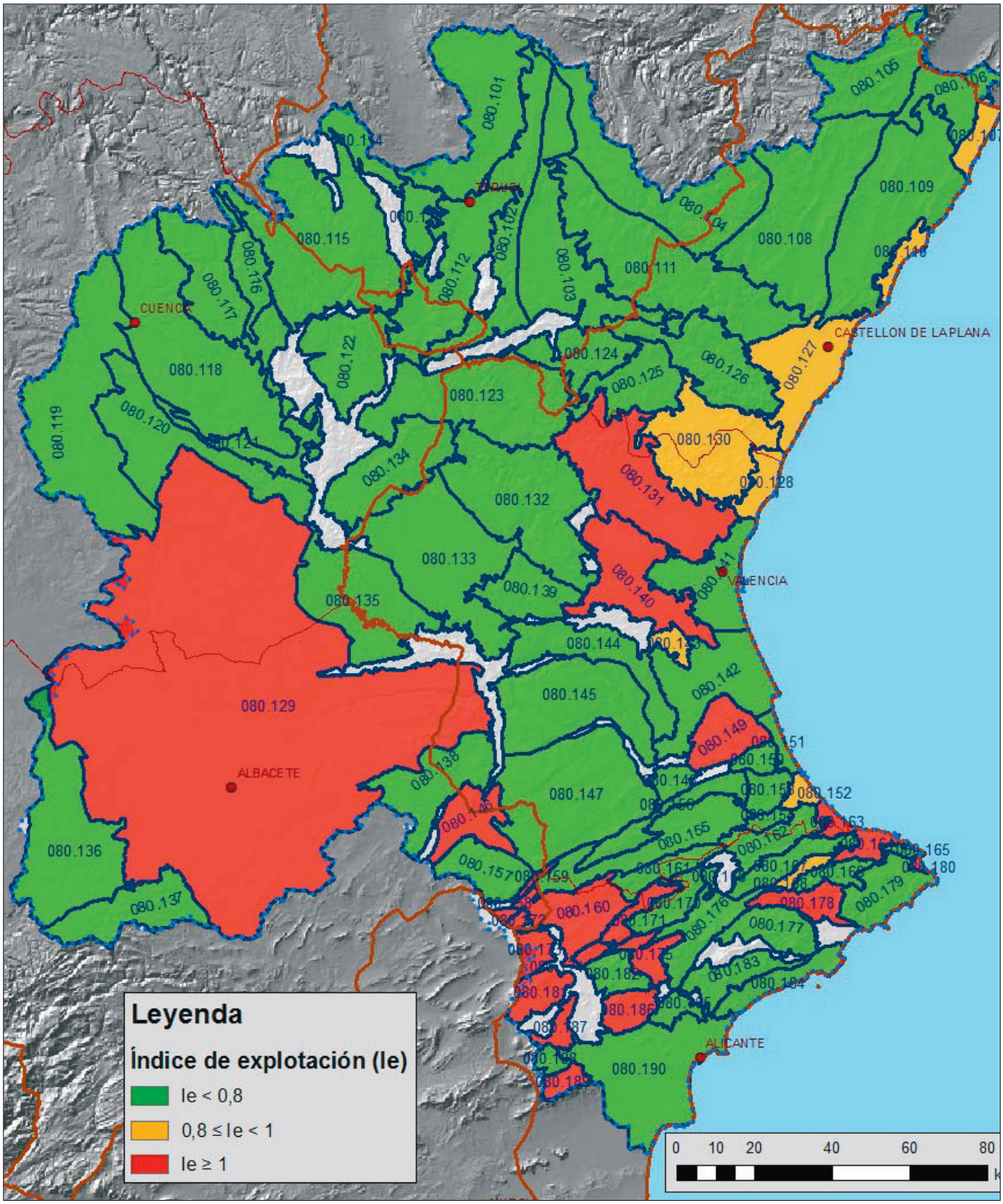


Figura 11. Valores del Índice de Explotación (Ie) de las Masas de Agua Subterránea de la DH del Júcar

Como ejemplo de la caracterizaciön de las MASb, basada en el análisis de tendencias de los niveles piezométricos, se presenta cartográficamente, en la figura 12, las tendencias actuales de los niveles piezométricos en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Duero.

Disponibilidad de recursos

Para facilitar la gestión, la disponibilidad de recursos para usos en situaciones de sequía, se ha efectuado por agrupación de las MASb existentes en los Sistemas de Explotación. Su presentación se ha efectua-

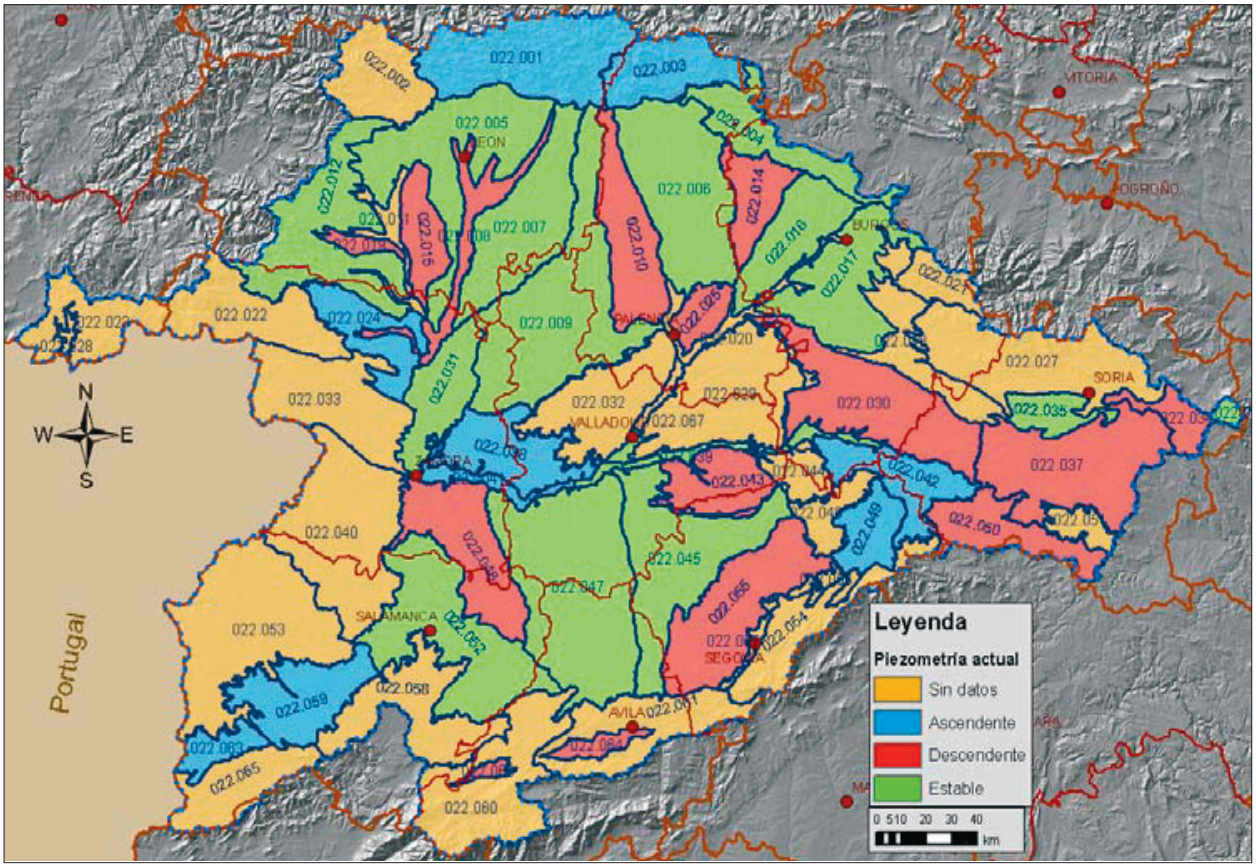


Figura 12. Análisis de la piezometría actual de las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Duero

do en tablas y cartográficamente, como puede verse en los ejemplos de la Marina Baja (tabla 2) y en el Vinalopó-Alicantí (figura 13) de la Demarcación del Júcar.

Características hidroquímicas

Para el análisis del estado cualitativo de las Masas de Agua Subterránea, se han utilizado tanto los datos de

Sistema de Explotación 08-MARINA BAJA		%MASb en sistema	Recursos Renovables (RREN) (hm³/a)	Requerimientos Ambientales (RMED)(hm³/a)	Recursos Disponibles (RDIS) (hm³/a)	Extracciones (B)(hm³/a)	Recursos NO comprometidos (RNC) (hm³/a)	Índicede Explotación (*Ie*)	
Masas de Agua Subterránea								Ie	Disponibilidad
080.177	SIERRA AITANA	100,0%	22,70	9,30	13,40	7,20	6,20	0,54	Disponibilidad
080.178	SERRELLA-AIXORTA-ALGAR	73,3%	14,95	5,28	9,68	9,68	0,00	1,00	No disponibilidad
080.183	ORCHETA	48,3%	6,71	0,58	6,13	1,01	5,12	0,17	Disponibilidad
080.184	SAN JUAN-BENIDORM	100,0%	10,50	0,00	10,50	4,30	6,20	0,41	Disponibilidad
	4 masas		54,87	15,16	39,71	22,19	17,52	0,53	

Tabla 2. Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos en el Sistema de Explotación de la Marina Baja

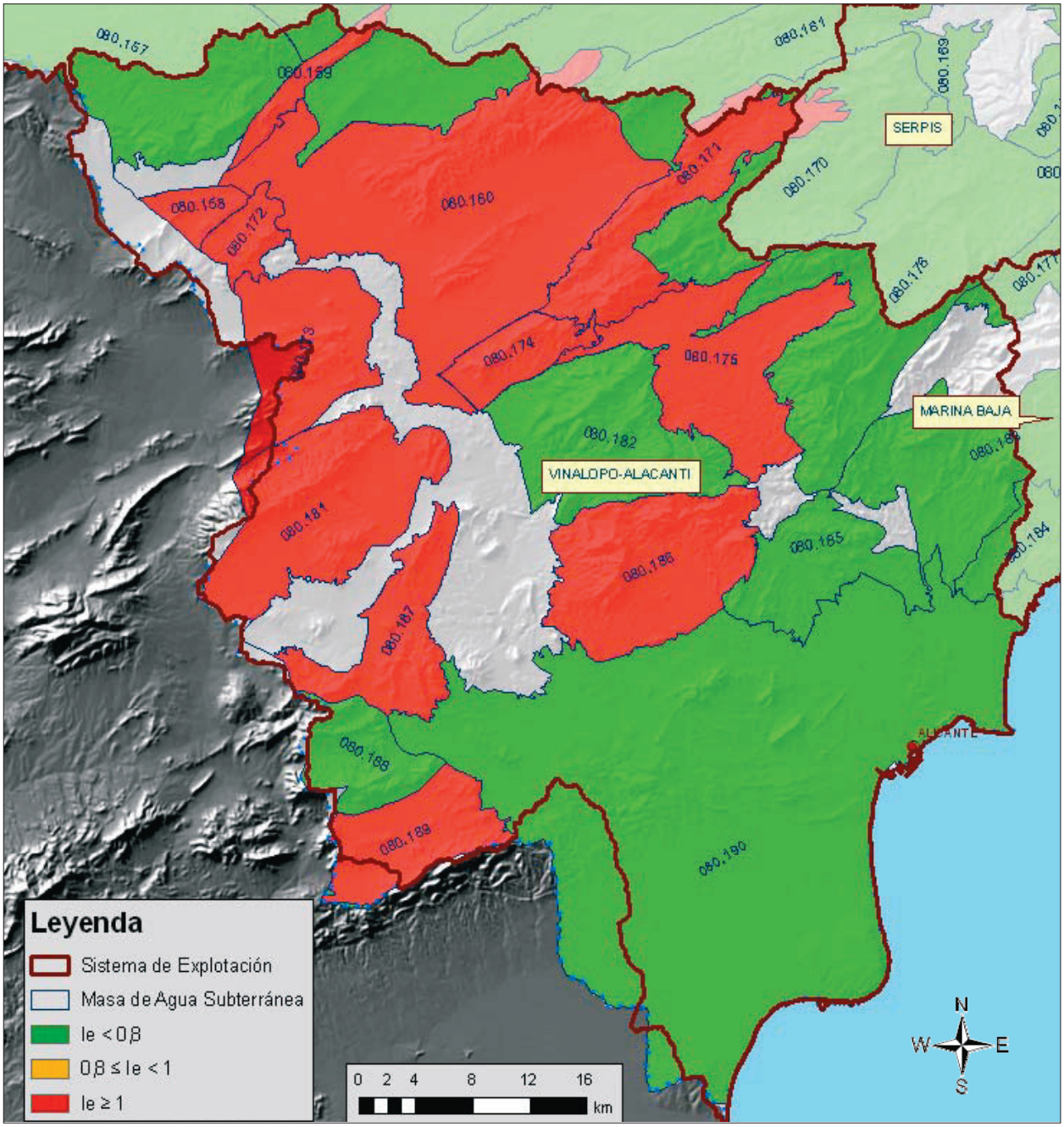


Figura 13. Masas de Agua Subterránea en el Sistema de Explotación del Vinalopó-Alacantí.

calidad química obtenidos de las redes de Control Históricas del IGME (periodo 1971-2001) y las asociadas a las Redes Oficiales de Control de la Calidad Química del Agua Subterránea de las Demarcaciones Hidrográficas (periodo 2001-2009). Se ha trabajado con una serie de parámetros mayoritarios que ofrecen información sobre la facies hidroquímica predominante en las MASb y su evolución temporal, evaluando la calidad del agua subterránea por comparación de los contenidos registrados en los muestreos realizados en las diferentes campañas (redes históricas y actuales), con los umbrales de potabilidad que fija el R.D. 140/2003 "Criterios Sanitarios de la calidad del agua de consumo humano" para esos mismos parámetros. En concreto, los parámetros corresponden a: Conductividad (µS/cm a 20 °C), magnesio (mg/L), nitratos (mg/L), sodio (mg/L) y sulfatos (mg/L).
Los datos de la caracteristicas hidroquimicas se recogen en las fichas de las masas de agua subterränea y se extractan en figura 14

En cada uno de los trabajos de las Demarcaciones se presentan los índices de calidad los diferentes parame-

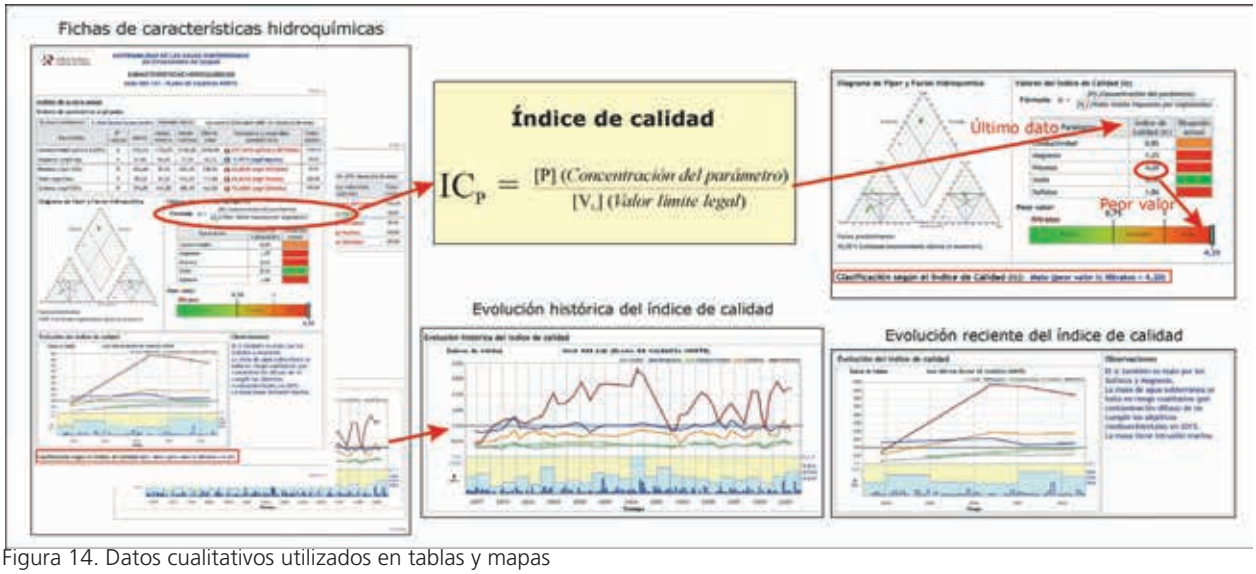


Figura 14. Datos cualitativos utilizados en tablas y mapas

tros, tanto de las series históricas como las actuales. comparándose su evolución

Análisis hidroquímico de las masas de agua

Aunque se han realizado análisis correspondientes a dos periodos (series históricas del IGME y series actuales de la Red Básica de Demarcación), el valor definitivo del $Ic_{[p]}$ se ha fijado tomando como referencia los datos de concentración más actual disponible, de forma que se ofrece la situación más reciente sobre la calidad del agua subterránea.

Como ejemplo de las conclusiones que se obtienen con las Redes Oficiales de Control de la Calidad Química del Agua Subterránea, en la tabla 3 se sinteti-

Masa de Agua Subterránea		Valores del Índice de Calidad (Ic)						Clasificación según *Ic*
Código	Nombre	Conductividad	Nitratos	Sulfatos	Magnesio	Sodio	*Ic* máximo	
070.001	CORRAL RUBIO	0,49	0,47	0,14	1,26	0,11	1,26	Malo
070.002	SINCLINAL DE LA HIGUERA	0,28	0,68	0,16	0,70	0,08	0,70	Bueno
070.003	ALCADOZO	0,25	0,74	0,06	0,64	0,05	0,74	Bueno
070.004	BOQUERÓN	0,66	0,36	2,52	1,83	0,23	2,52	Malo
070.005	TOBARRA-TEDERA- PINILLA	0,61	0,19	2,90	1,99	0,17	2,90	Malo
070.006	PINO	1,38	0,29	6,08	3,65	0,77	6,08	Malo
070.007	CONEJEROS-ALBATANA	0,70	0,59	2,01	1,84	0,32	2,01	Malo
070.008	ONTUR	0,33	0,24	0,41	0,87	0,11	0,87	Aceptable
070.009	SIERRA DE LA OLIVA	-	-	-	-	-	-	-
070.010	PLIEGUES JURÁSICOS DEL MUNDO	0,23	0,16	0,05	0,60	0,06	0,6	Bueno
070.011	CUCHILLOS-CABRAS	1,44	0,9	6,32	4,02	0,86	6,32	Malo
070.012	CINGLA	0,30	0,14	0,48	0,89	0,19	0,89	Aceptable
070.013	MORATILLA	0,04	0,08	0,03	0,08	0,02	0,08	Bueno
070.014	CALAR DEL MUNDO	0,13	0,1	0,03	0,28	0,01	0,28	Bueno
070.015	SEGURA-MADERA-TUS	0,13	0,05	0,02	0,29	0,02	0,29	Bueno
070.016	FUENTE SEGURA- FUENSANTA	0,19	0,03	0,04	0,24	0,01	0,24	Bueno
070.----								
070.063	SIERRA DE CARTAGENA	0,91	2,54	2,23	2,21	0,82	2,54	Malo

Tabla 3. Índice de calidad en las Masas de Agua Subterránea de la DH del Segura (serie actual)

zan los resultados de las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Segura, para el periodo comprendido entre los años 2001 a 2009.

La clasificación de estas MASb se ha representado cartográficamente según el valor de su índice de calidad mediante una gama de colores, común para todas las demarcaciones (figura 15).

Calidad de los recursos por sistema de explotación

Partiendo de los datos fijados para el Índice de Calidad (*Ic*) de las aguas subterráneas, definido en referencia a los umbrales de potabilidad de ciertos parámetros fisicoquímicos básicos, se ha evaluado la calidad de los recursos hídricos subterráneos asociados a las MASb de las demarcaciones.

La consideración de que no son aptos para el abastecimiento urbano, no implica que pueden ser empleadas en la resolución de problemas de escasez de recursos en situaciones de sequía, para otro tipo de demandas (agrícola o industrial).

Como ejemplo del tratamiento de los resultados, se resume la información hidroquímica que se obtiene para la Junta de Explotación.

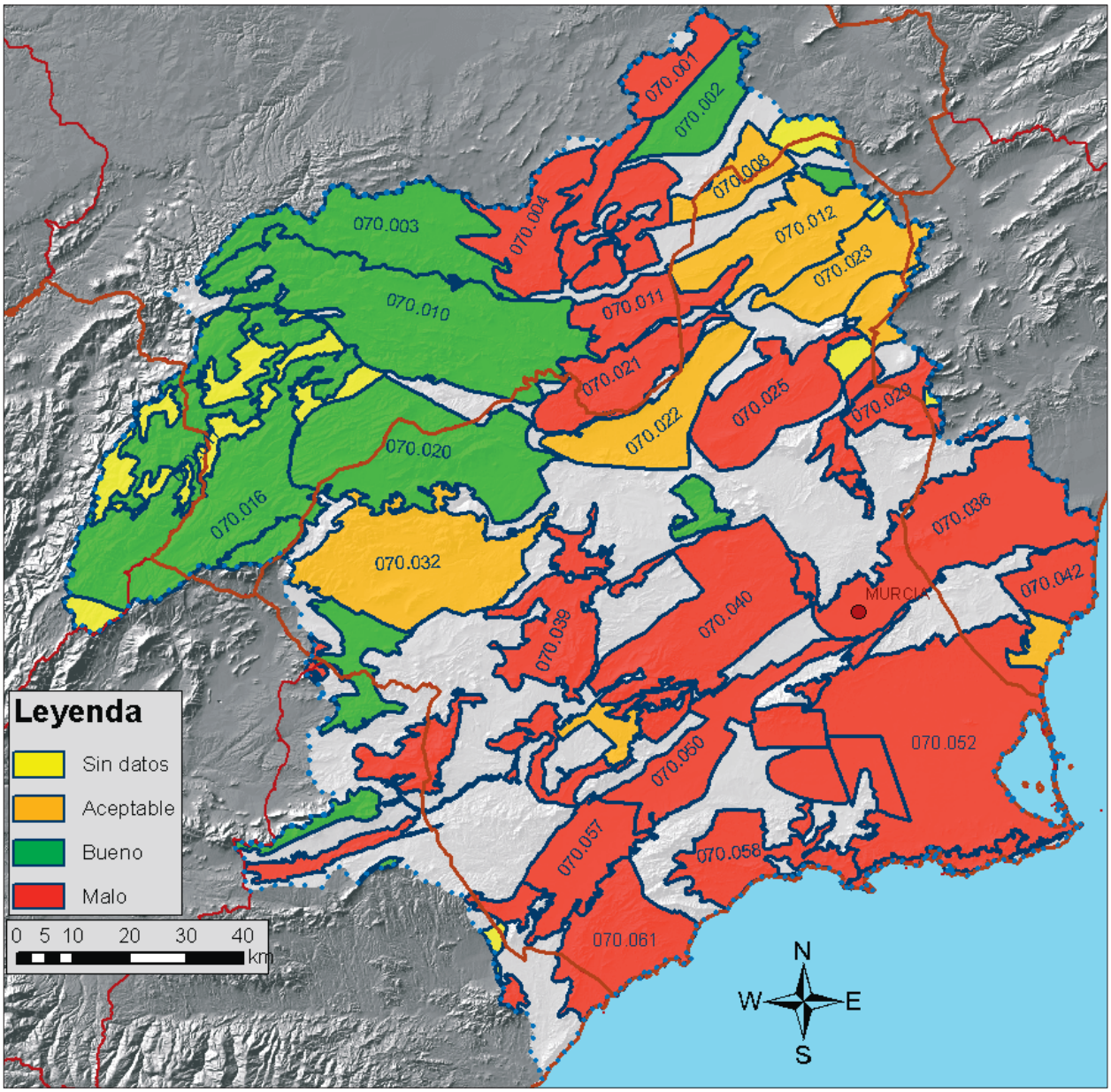


Figura 15. Clasificación de las Masas de Agua Subterránea en la DH del Segura, según Ic (datos de la Red Básica)

Junta de Explotación 3 - CUENCA DEL IREGUA		% MASb en Junta	Recursos NO comprometidos MASb (RNC) (hm³/a)	Parte RNC proporcional a MASb (hm³/a)	Índice de calidad (Ic)	
Masas de Agua Subterránea					Serie histórica	Serie Actual
090.048	ALUVIAL DE LA RIOJA- MENDAVIA	26,2 %	14,61	3,83	Bueno	Malo (Nitratos)
090.065	PRADOLUENGO- ANGUIANO	54,5 %	6,44	3,51	Bueno	Bueno
090.069	CAMEROS	20,3 %	21,13	4,29	Bueno	Malo (Sulfatos, Magnesio, Sodio, Conductividad)

Tabla 4. Recursos Hídricos e Índices de Calidad en la Junta de Explotación del Iregua de la CH del Ebro

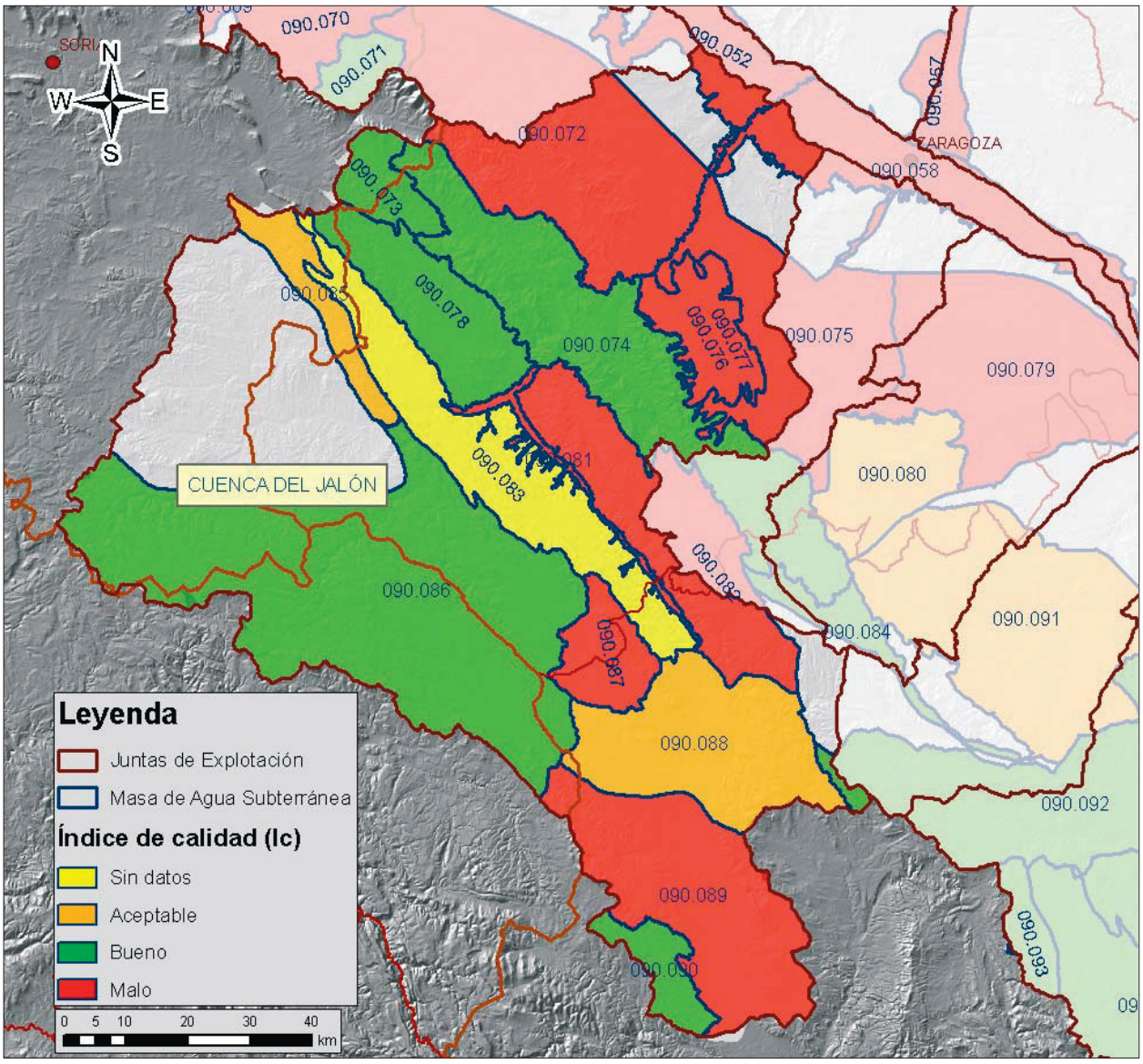


Figura 16. Índice de calidad de la Junta de Explotación de la Cuenca del Jalón. de la CH del Ebro

- Cuenca del Iregua en la tabla 4. También se presenta, en la figura 16, el mapa de la Junta de Explotación.
- Cuenca del Jalón de la Demarcación del Ebro

Zonas sensibles ante la explotación intensiva

Para el análisis de zonas sensibles se han tenido en cuenta, fundamentalmente, las figuras de protección existentes en la Demarcación Hidrográfica. Los resultados óptimos se obtendrían mediante un análisis de aquellas zonas que muestran dependencia directa o indirecta de las aguas subterráneas, pero por desgracia, se dispone parcialmente de tal información. En los PES existentes, se analiza la vulnerabilidad de las zonas de alto valor ambiental frente a situaciones de sequía, pero no se determina la dependencia de las mismas de las aguas subterráneas.

Como ejemplo se presenta, en la figura 17, el mapa de la Demarcación Hidrográfica del Tajo, que recoge de forma resumida las zonas que se deben analizar en una situación de sequía.

En todas estas zonas, debería de existir un análisis de la vinculación a las aguas subterráneas. Para efectuar su valoración únicamente se ha dispuesto de los resultados obtenidos en la *"Identificación y caracterización de la interrelación entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descargas por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial interés hídrico"*, uno de los trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas del acuerdo para la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua, al Instituto Geológico y Minero de España.

Zonas sensibles por sistemas de explotación.

Como ejemplo de la presentación de resultados en la tabla 5, aparecen las zonas protegidas situadas en el Sistema de Explotación 02-Tiétar, de la Demarcación Hidrográfica del Tajo.

La tabla recoge las masas de agua subterránea que existen en el sistema de explotación, indicado para cada una de ellas el tipo de figura, su nombre y la superficie que ocupa.

Para presentar gráficamente los resultados se recoge el resumen del Sistema de Explotación Bajo Tajo-Extremadura en la figura 18, con los resultados obtenidos en el Índice de Explotación (Ie), y con las zonas protegidas existentes. En este sistema no existen MASb con explotación intensiva (disponibilidad de recursos condicionada), en la que existan figuras de protección definidas.

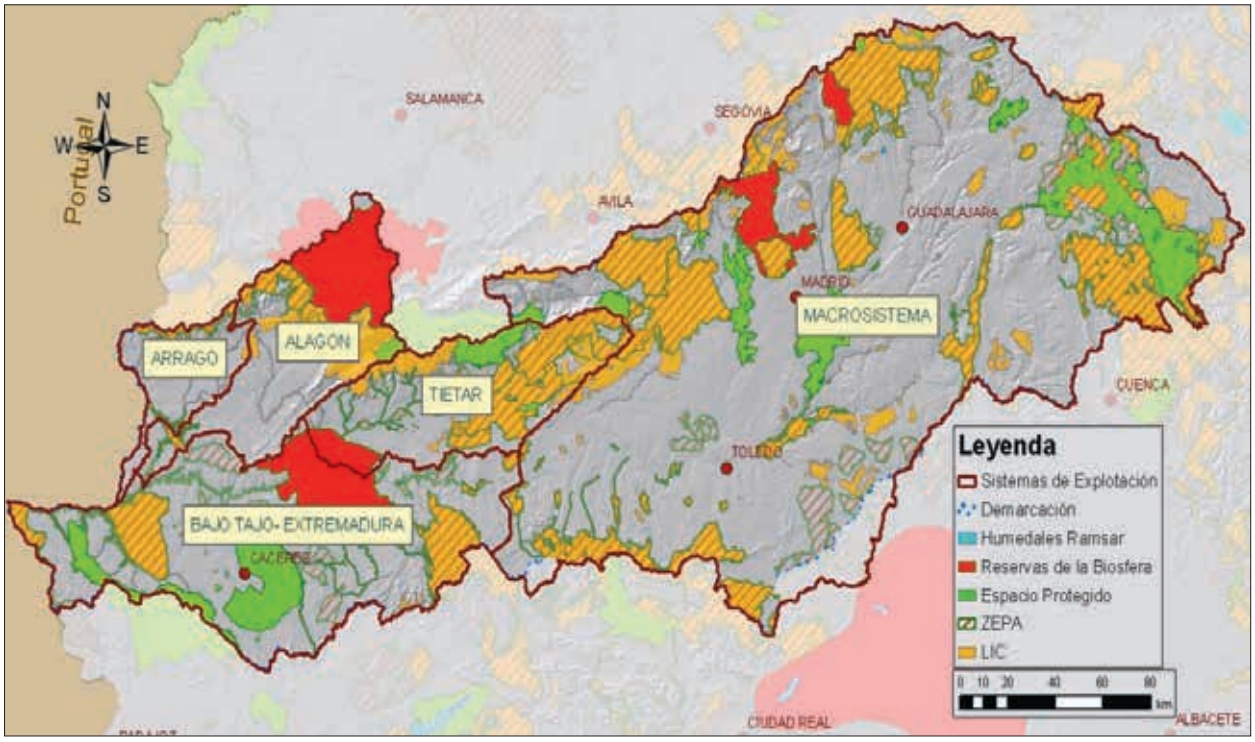


Figura 17. Figuras de Protección en la Demarcación Hidrográfica del Tajo

MASb	FIGURA	NOMBRE	SUPF en MASb en ha
030.015 (TALAVERA)	LUGAR DE INTERÉS COMUNITARIO (LIC)	LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	278
		SIERRA DE SAN VICENTE Y VALLES DEL TIÉTAR Y ALBERCHE (ES4250001)	2.077
	ZONA DE ESPECIAL PROTECCIÓN PARA LAS AVES (ZEPA)	LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	311
		VALLE DEL TIÉTAR Y EMBALSES DE ROSARITO Y NAVALCÁN (ES0000089)	2.077
030.022 (TIÉTAR)	ÁRBOLES SINGULARES	ENCINA LA MARQUESA	3
	LUGAR DE INTERÉS COMUNITARIO (LIC)	MONFRAGÜE (ES4320077)	625
		CAÑADA DEL VENERO (ES4320062)	2.187
		RIO TIETAR (ES4320031)	4.249
		LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	9.032
		VALLE DEL TIÉTAR (ES4110115)	11.322
		SIERRA DE SAN VICENTE Y VALLES DEL TIÉTAR Y ALBERCHE (ES4250001)	39.422
	PARQUE NATURAL	MONFRAGUE (E4329302)	625
	RESERVA DE LA BIOSFERA	MONFRAGUE	14.008
	RESERVA FLUVIAL	SOTOS DEL RÍO GUADYERBAS Y ARENALES DEL BALDÍO DE VELADA	1.455
	ZONA DE ESPECIAL PROTECCIÓN PARA LAS AVES (ZEPA)	CHARCA DEHESA BOYAL NAVALMORAL (ES0000411)	9
		COMPLEJO LAGUNAR EJIDO NUEVO (ES0000409)	29
		RIO Y PINARES DEL TIETAR (ES0000427)	7.585
		LLANURAS DE OROPESA, LAGARTERA Y CALERA Y CHOZAS (ES0000168)	9.069
		VALLE DEL TIÉTAR (ES0000184)	12.111
		MONFRAGÜE Y LAS DEHESAS DEL ENTORNO (ES0000014)	14.008
		VALLE DEL TIÉTAR Y EMBALSES DE ROSARITO Y NAVALCÁN (ES0000089)	39.076

Tabla 5. Espacios naturales protegidos en el Sistema de Explotación Tiétar de la DH del Tajo

Recursos disponibles en situaciones extremas

A continuación, se sintetizan los resultados obtenidos a nivel de Demarcación, en agrupándolos en tres categorías:

- Aspectos cuantitativos: disponibilidad de recursos.
- Aspectos cualitativos: calidad de los recursos para uso en abastecimiento urbano (aunque no es descartable la posible utilización para otros usos).
- Aspectos mixtos: combinación de los dos aspectos an-

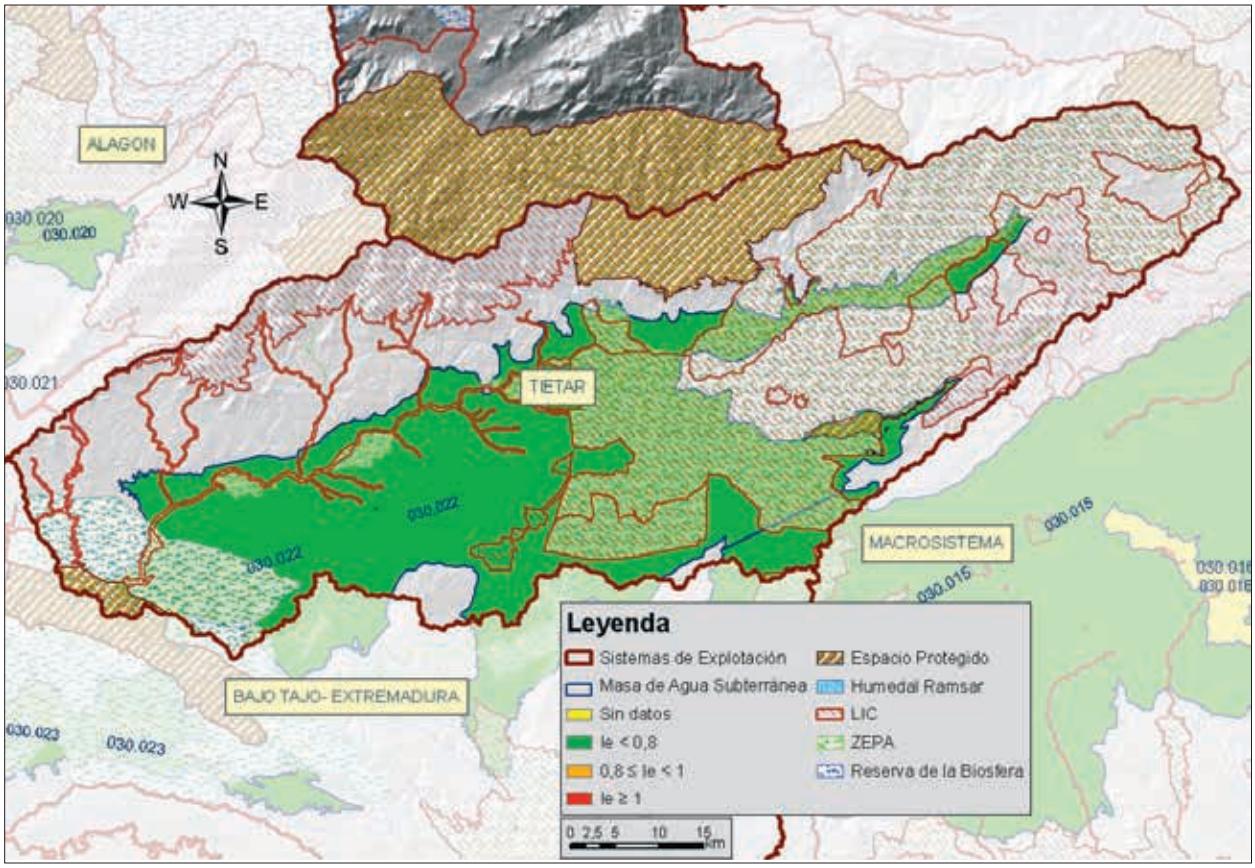


Figura 18. Espacios naturales protegidos en el Sistema de Explotación Bajo Tajo-Extremadura

teriores para la selección de los recursos disponibles más adecuados.

Disponibilidad de recursos

Los datos calculados de recursos no comprometidos de cada demarcación se agrupan por Sistemas de Explotación, presentándose en tres formatos (diagramas de barras, cuadros y mapas) según se desee sintetizar o presentar más ampliamente la información obtenida.

A continuación se recogen los obtenidos en la Demarcación Hidrográfica del Duero (figura 19).

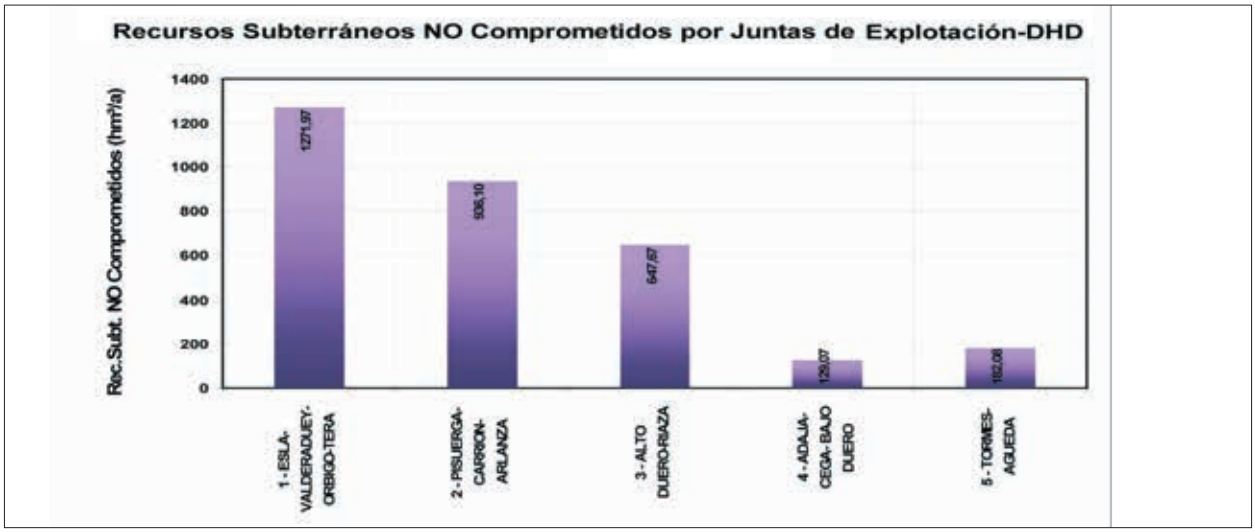


Figura19. Recursos Subterráneos no Comprometidos en la DH del Duero

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Recursos Renovables (RREN) (hm³/a)	Requerimientos Ambientales (RMED) (hm³/a)	Recursos Disponibles (RDIS) (hm³/a)	Extracciones (B) (hm³/a)	Recursos NO comprometidos (RNC) (hm³/a)	Índice de Explotación (Ie)
1 - ESLA-VALDERADUEY- ORBIGO-TERA	17	16	1	1669,14	255,17	1413,97	148,39	1271,97	0,21
2 - PISUERGA-CARRION- ARLANZA	16	10	6	1207,43	212,28	995,15	59,05	936,10	0,09
3 - ALTO DUERO-RIAZA	19	11	8	854,03	156,70	697,33	49,66	647,67	0,09
4 - ADAJA- CEGA- BAJO DUERO	13	1	12	497,23	70,21	427,01	394,91	129,07	0,57
5 - TORMES-AGUEDA	9	9	0	329,08	53,00	276,08	94,00	182,08	0,16
SUMA	**74,00**	**47,00**	**27,00**	**4 556,91**	**747,37**	**3 809,54**	**746,00**	**3 166,89** [1]	**0,23**

Tabla 6. Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos Disponibles y NO Comprometidos por Sistemas de Explotación en la DHD

[1] La relación RDIS – B = RNC no es aplicable de forma directa a la síntesis de datos, puesto que en los Sistemas de Explotación existen MASb en las que las extracciones (B) son superiores a los Recursos Disponibles (celdas sombreadas). En esos casos RNC = 0 (no puede tomar valores negativos).

En las tablas, un ejemoplo de ellas es la tabla 6, en ella se muestran los recursos NO comprometidos agrupados por sistema de explotación, los cuales estarían disponibles para su posible utilización. Se ha sombreado aquellos casos en los que existen MASb donde RNC=0, debido a que sus extracciones (B) superan al recurso disponible (RDIS). Además, algunas MASb son compartidas entre sistemas de explotación, por lo que el recuento global de MASb es superior al real (84 en vez de 60 MASb reales).

La representación cartografica (figuara 20) presenta la situación de los recursos en cada masa de agua de la Demarcarción, en función de su indice de explotación, agrupadas por sistemas de explotación.

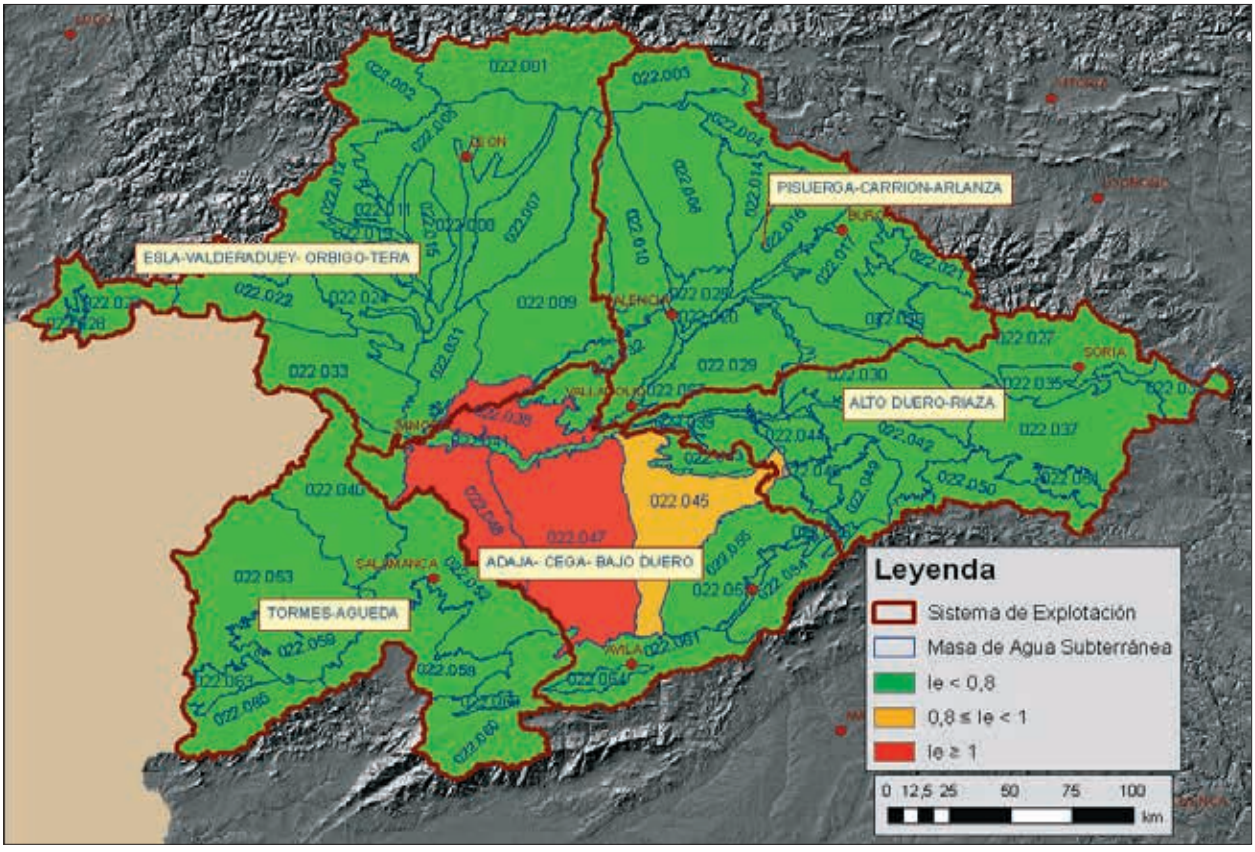


Figura 20. Índices de Explotación de las Masas de Agua Subterránea en la DH del Duero

Calidad de los recursos para abastecimiento urbano

Atendiendo a la calidad de los recursos disponibles para su utilización en abastecimientos urbanos, y considerando que:

- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *buena*, lo es porque *ninguno de los parámetros analizados* (conductividad, nitratos, sulfatos, sodio y magnesio) superan el 75% del contenido máximo permitido por la legislación para cada uno de ellos (R.D. 140/2003), en la última campaña medida.
- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *aceptable*, lo es porque alguno de los parámetros analizados (o todos) supera el 75% del contenido máximo permitido, pero *ninguno supera el citado límite*, en la última campaña medida.
- Cuando se dice que la calidad para abastecimiento urbano es *mala*, lo es porque alguno de los parámetros analizados (o todos) *supera el contenido máximo permitido* en la última campaña medida, fijando la calidad el peor valor de los obtenidos.

Aunque se ha dicho anteriormente la calidad se ha cuantificado mediante el cálculo del Índice de calidad (*Ie*) para la última campaña disponible, quedando clasificadas las MASb según el peor de los valores obtenidos. También se recalca en el hecho de que obtener una calidad mala para utilización como abastecimiento urbano, no significa que el agua no pueda ser utilizada en otros usos (por ejemplo agricultura).

Los resultados se han resumido en tablas y mapas. Así en la tabla 7 y figura 21 aparecen como ejemplo la síntesis de los resultados obtenidos para la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Indicando el Índice de Calidad de las masa de agua subterránea y el sistema de explotación al que pertenece

Disponibilidad de los recursos en función de su utilización

El análisis de la disponibilidad de recursos en función de su utilización para abastecimiento urbano, se presenta combi-

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Índice de calidad (Ic)				
				Bueno	Aceptable	Malo	Sin datos	Parámetros fuera de límite
01-SALADO DE MORON	1	0	0	0	0	1	0	nitratos, sodio
02-CAMPIÑA SEVILLANA	4	1	3	0	0	3	1	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
03-ALTO GENIL	14	8	6	10	1	3	0	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio
04-GUADAJOZ	8	2	6	5	1	2	0	nitratos, magnesio, sulfatos
05-JAEN	8	4	4	7	0	1	0	sulfatos
06-HOYA DE GUADIX	6	2	4	4	0	2	0	sulfatos, magnesio, sodio
07-ALTO GUADIANA MENOR	9	7	2	5	1	2	1	sulfatos, magnesio
08-RUMBLAR	1	1	0	1	0	0	0	
09-GUADALMELLATO	1	0	1	0	0	1	0	nitratos
10-BEMBEZAR-RETORTILLO	1	0	1	1	0	0	0	
11-RIVERA DE HUESNA	1	0	1	1	0	0	0	
12-VIAR	1	0	1	1	0	0	0	
13-SEVILLA	1	0	1	1	0	0	0	
14-ALMONTE- MARISMAS	3	1	2	1	0	2	0	nitratos
15-REGULACION GENERAL	25	13	12	10	2	12	1	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
SUMA	**84**	**39**	**44**	**47**	**5**	**29**	**3**	

Tabla 7. Calidad por Sistemas de Explotación en la DH del Guadalquivir

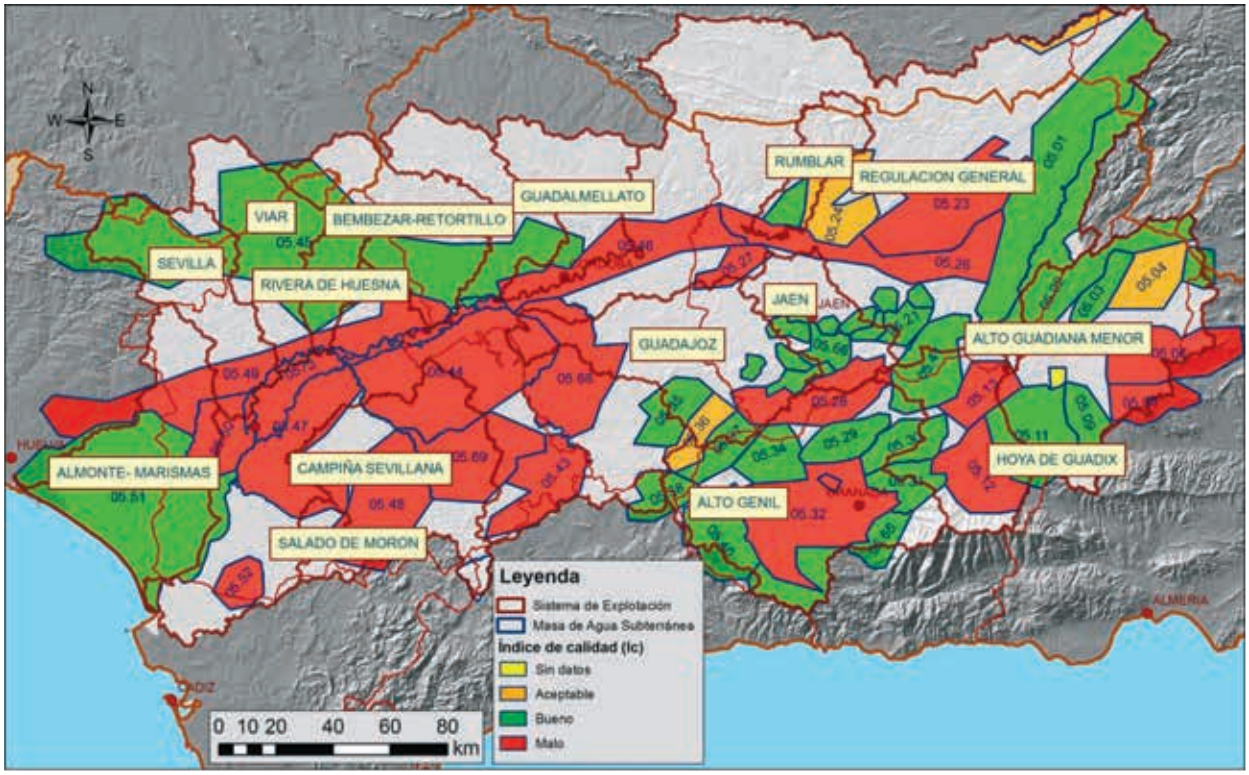


Figura 21. Sistemas de Explotación de Recmsos Hídricos e Índice de calidad de las MASb en la DH del Guadalquivir

nado los resultados obtenidos de tal forma que se obtenga una visión de la distribución cuantitativa y cualitativa de las MASb de la demarcación, como ejemplo se recogen los obtenidos en la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

En la figura 22 se sintetizan gráficamente los recursos subterráneos no comprometidos en cada sistema de explotación, indicando la calidad que tienen para su utilización en el abastecimiento urbano

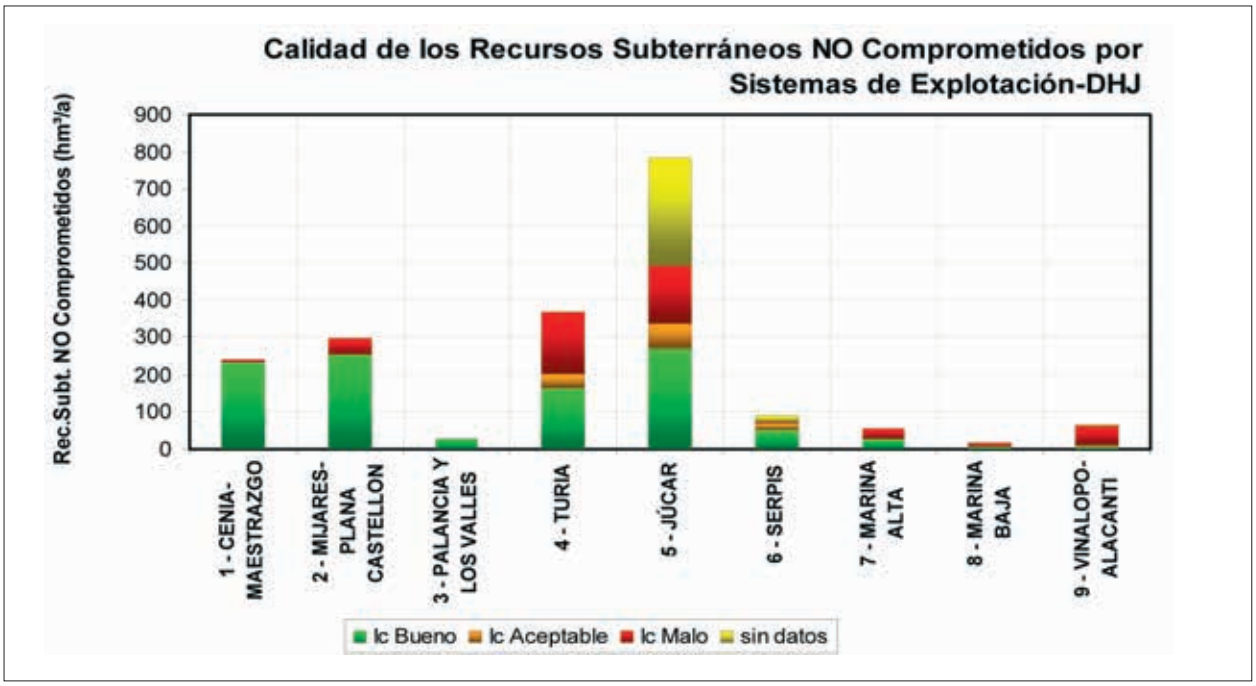


Figura 22. Calidad de los Recursos NO Comprometidos en la DH del Júcar

Sistema de Explotación	Nº MASb	Nº MASb completas	Nº MASb compartidas	Índice de Explotación (Ie)	Recursos NO comprometidos totales (RNC) (hm³/a)	Recursos NO comprometidos totales (RNC) según Índice de calidad (*Ic*) (hm³/a)				
						Bueno	Aceptable	Malo	Sin datos	Parámetros fuera de límite
01 - CENIA-MAESTRAZGO	6	5	1	0,40	240,70	234,84	0	5,86	-	nitratos, sodio
02 - MIJARES-PLANA CASTELLON	9	4	5	0,25	297,46	256,25	0	41,21	-	nitratos, sulfatos, magnesio
03 - PALANCIA Y LOS VALLES	3	1	2	0,40	29,54	28,39	0	1,15	-	nitratos, sulfatos, magnesio
04 - TURIA	16	9	7	0,37	367,85	163,51	40,70)	163,64	-	nitratos, sulfatos, magnesio
05 - JÚCAR	29	24	5	0,37	783,67	270,71	66,13	158,46	288,38	nitratos, sulfatos, magnesio, conductividad
06 - SERPIS	10	5	5	0,37	90,35	51,14	20,60	0,64	17,96	nitratos
07 - MARINA ALTA	10	7	3	0,64	57,22	29,02	0	26,40	1,80	nitratos, magnesio, sodio, conductividad
08 - MARINA BAJA	4	2	2	0,53	17,52	6,20	0	11,32	-	nitrato, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
09 - VINALOPO-ALACANTI	20	16	4	1,79	66,19	7,54	1,38	53,48	3,79	nitratos, sulfatos, magnesio, sodio, conductividad
SUMA	**107**	**73**	**34**	**0,57**	**1950,50**	**1047,60**	**128,81**	**462,16**	**311,93**	

Tabla 8. Recursos Hídricos Subterráneos Disponibles, NO Comprometidos y calidad de los mismos por Sistemas de Explotación en la Demarcación Hidrográfica del Jucar.

La presentación de número de MASb, el índice de explotación, volumen de recursos no comprometidos y la clasificación de su calidad, indicando los parámetros que se sitúan fuera del límite se detalla en la tabla 8.

La síntesis final de los trabajos se ha plasmado en el plano *"Disponibilidad de Recursos en función de su utilización"* en el cual mediante una matriz de colores y tramas, se presenta la disponibilidad de recursos y su calidad para el abastecimiento (figura 23).

CONCLUSIONES

La experiencia adquirida durante estos episodios de sequía pasados, ha demostrado como la explotación controlada de recursos subterráneos de determinadas Masas de Agua Subterránea, puede contribuir a paliar los efectos nocivos de la sequía (merma en los recursos disponibles), ofertando recursos hídricos complementarios para solventar los déficit. Su explotación se ha efectuado sin que se produzcan alteraciones sensibles, ni en el funcionamiento hidrodinámico de los sistemas hidrogeológicos explotados de forma temporal, ni en los sistemas ecológicos vinculados con éstos. Desarrollándose, por tanto, en estos supuestos, las actuaciones en un marco de gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

La planificación hidrológica española ha establecido en su legislación de Gestión de Sequías, la necesidad de realizar una serie de actuaciones que culminan con el Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía de cada Demarcación Hidrográfica. Esto ha motivado el trabajo realizado para cada demarcación, con el título de *"Actuaciones en Aguas Subterráneas para la Revisión de los Planes de Sequía"* , pretendiendo que en futuras actualizaciones de los Planes se unifiquen los criterios para optimizar su utilización.

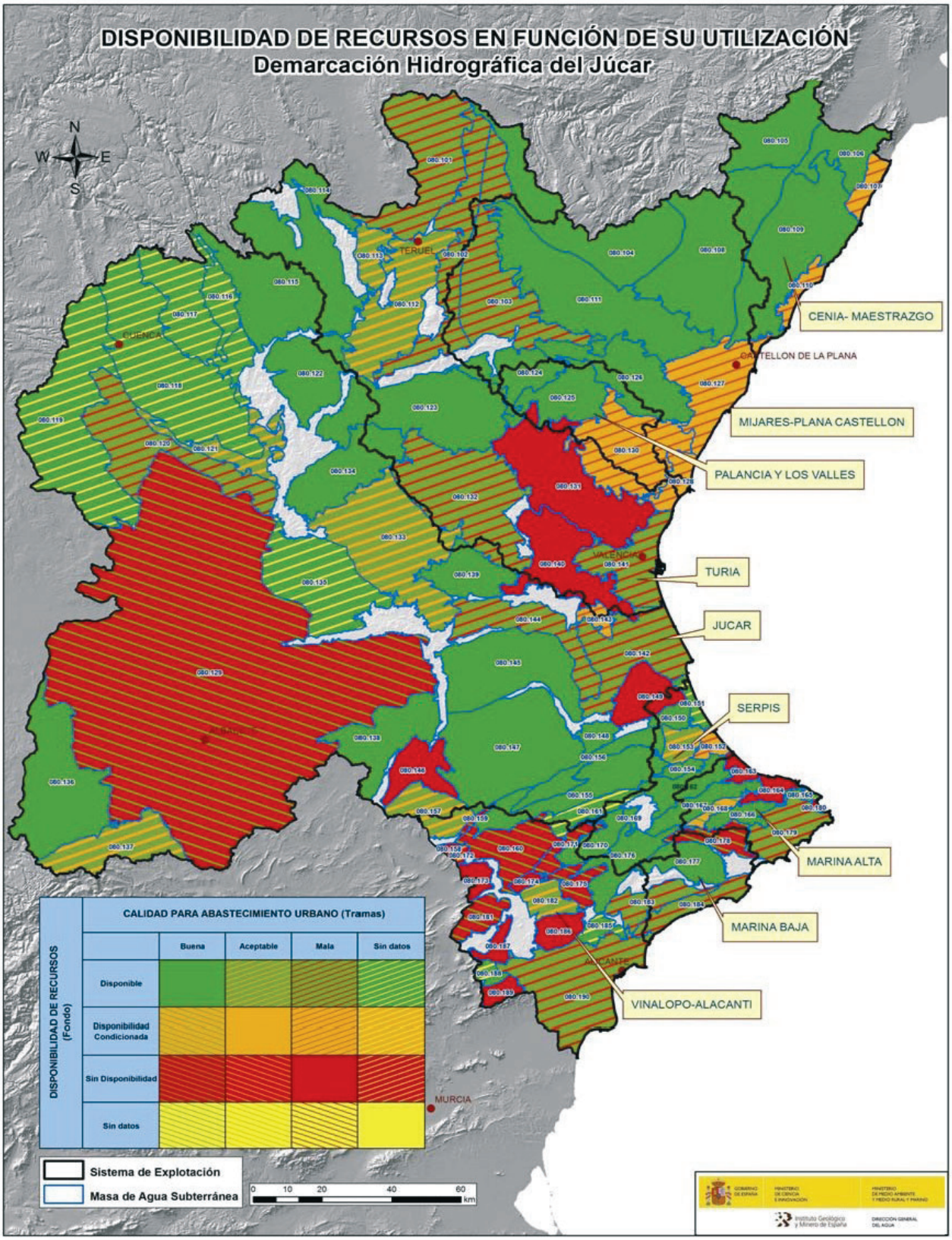


Figura 23. Disponibilidad de recursosen función de su utilización. D. H. del Júcar

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Duero*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pernia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Tajo*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pemia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.* Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pemia, J.M.; Castaño, S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Segura*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pemia, J.M.; Castaño, S.: Ruiz. J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Júcar*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pemia, J.M.; Castaño. S.; Ruiz, J.M., et al. 2010. *Actuaciones en aguas subterráneas para la revisión de los planes de sequía. Demarcación Hidrográfica del Ebro*. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección general del Agua, 2 tomos.

Pemia, J.M.; Ruiz-Hemández, J.M.; Castaño, S.; Herrero, J.L. (2010): *Sustainable use of groundwater for prolonged droughts*. European Groundwater Conference. Groundwater Protection in the UE. Proceedings, p. 121. Madrid.

INCORPORACIÓN DE FUENTES DE DATOS, MÉTODOS Y CRITERIOS GEOLÓGICOS EN EL ANÁLISIS Y LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS INUNDABLES POR AVENIDAS TORRENCIALES

Andrés Díez-Herrero,
Julio Garrote Revilla
Mª Guillermina Garzón Heydt
Luís Laín Huerta
Miguel Llorente Isidro
Carlos G. Morales Rodríguez
José Antonio Ortega Becerril
María Teresa Ortega Villazán
Ángel Salazar Rincón

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 14 *Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y la cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Director de la actividad:

Andrés Díez Herrero. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España

Luis Laín Huerta
Ángel Salazar Rincón
Miguel Llorente Isidro

Dirección General del Agua:

Jesús Yagüe Córdova
Francisco Javier Sánchez

Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX), Madrid

Julio Garrote Revilla.

Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas.

Mª GuillerminaGarzón Heydt.

Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias.

José Antonio Ortega Becerril.

Universidad de Valladolid, Departamento de Geografía.

María Teresa Ortega Villazán.
Carlos G. Morales Rodríguez.

INCORPORACIÓN DE FUENTES DE DATOS, MÉTODOS Y CRITERIOS GEOLÓGICOS EN EL ANÁLISIS Y LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS INUNDABLES POR AVENIDAS TORRENCIALES

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD

El desarrollo de esta actividad tiene como objetivo fundamental el de servir de asesoramiento científico-técnico a la Dirección General del Agua (DGA), y en particular a las labores llevadas a cabo por el denominado "Grupo de Inundaciones", equipo de trabajo espejo nacional del Grupo F europeo, que la DGA constituyó en el año 2005 para el seguimiento de la implantación de la Directiva Marco del Agua y posteriormente el seguimiento y transposición de la Directiva de Gestión del Riesgo de Inundaciones; y al cual el IGME se había incorporado a inicios del año 2008 por invitación de su presidente (Figura 1).

Originalmente, el encargo a los científicos y técnicos del IGME fue realizar una recopilación de los antecedentes más relevantes y el estado del arte sobre metodologías y criterios geológicos y geomorfológicos susceptibles de ser incorporados en el análisis y la cartografía de las zonas inundables por avenidas torrenciales, tal y como reza el título de la actividad. Pretendía ser un complemento y alternativa de los estudios realizados a través de las encomiendas y acuerdos firmados por la DGA con otras instituciones (CEDEX, Dirección General de Costas, Dirección General de Protección Civil y Emergencias, INDUROT...) para la incorporación de métodos y criterios hidrológicos, hidráulicos, históricos, ecológicos, etc.

El IGME cuenta con una dilatada y contrastada experiencia en la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el estudio de las avenidas torrenciales e inundaciones (ver al respecto los artículos de Díez y Laín, 1998; y Llorente *et al*., 2006). Desde los antecedentes remotos de los primeros trabajos de la Comisión del Mapa Geológico de España a cargo de Casiano de Prado, pasando por las recopilaciones de las descripciones provinciales, hasta la época reciente (último cuarto de siglo) en la que se han publicado infinidad de guías, estudios y mapas que incorporan, integran y validan dichos métodos y criterios; entre ellos la edición del libro "Geología y prevención de daños por inundaciones" (Ayala, 1985), auténtico antecedente de estos trabajos; o la reciente publicación de libro "Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración", publicada en castellano y en inglés (Díez-Herrero *et al.*, 2008 y 2009b). La experiencia del IGME se centra fundamentalmente en criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables y estudios de estimación de carga sólida transportada, obtenida por la experiencia acumulada y proyectos de investigación como Paleotagus, Georiada, Albuñol, Metavenidas, Dendro-Avenidas, RICAM, etc.; pero mantiene fluidos contactos y colaboraciones con otros grupos de investigación nacionales y extranjeros especializados en la incorporación de datos paleohidrológicos, y en la estimación de la variabilidad asociada al cambio global.

Por ello, tras examinar los requerimientos de la DGA, el equipo responsable del IGME decidió estructurar la actividad original en cuatro, que se corresponden con otros tantos aspectos en los que las ciencias geológicas y geomorfológicas pueden aportar métodos y criterios aplicados:

1. Incorporación de fuentes de datos paleohidrológicos
2. Incorporación de métodos de estimación de la carga sólida transportada
3. Incorporación de criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables
4. Asesoramiento sobre la estimación de la variabilidad en la frecuencia y magnitud de avenidas asociada al cambio climático

Para llevarlo a cabo se consideró imprescindible contar en el equipo de trabajo con el grupo de investigación en Geomorfología Fluvial del Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), de reconocido prestigio y dilatada experiencia en estos temas. También se solicitó la participación del equipo del IGME

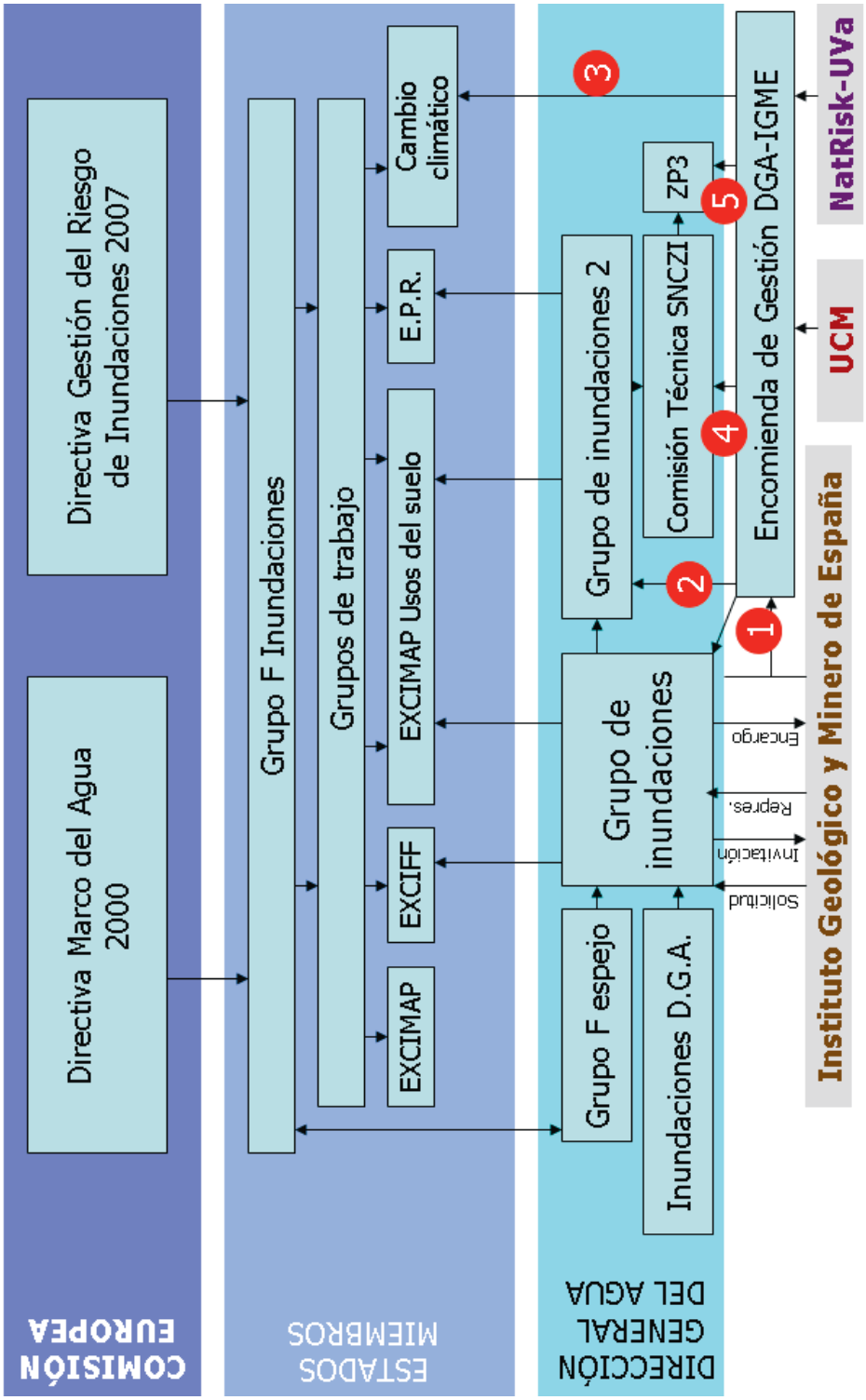


Figura 1. Marco conceptual en el que se ha desarrollado la Actividad 14 de la Encomienda, con indicación de los organismos e instituciones involucradas. Los números en los círculos rojos señalan tareas realizadas y documentos generados; su numeración corresponde al orden de los epígrafes de este artículo.

en la representación española dentro del grupo de trabajo sobre "Cambio Climático e Inundaciones", para la elaboración de los documentos de intercambio y discusión, y la presentación del estado de conocimientos en el *Thematic workshop on Climate Change and Flooding* del *Working Group F on Floods*, celebrado entre los días 8 y 10 de septiembre de 2009 en la localidad sueca de Karlstad.

Durante el proceso de gestación de la Encomienda se produjo además la publicación y entrada en vigor de la nueva modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, y la creación del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI). Ello supuso dos nuevos encargos complementarios al IGME por parte de la DGA a través del Grupo de Inundaciones: participar en la Comisión Técnica del Grupo en la que se elaborarían las guías metodológicas y las recomendaciones técnicas; y hacerse cargo de la ejecución de uno de los tres estudios piloto (ZP3, tramo medio-bajo del río Carrión) para la calibración y validación de dichas guías y métodos. Para este nuevo encargo se decidió contar con otro equipo de trabajo con experiencia en la zona de estudio, el grupo NatRisk de la Universidad de Valladolid.

RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE SOBRE LAS APLICACIONES DE LA GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA AL RIESGO DE INUNDACIONES

En primer lugar se llevó a cabo una amplia y exhaustiva recopilación bibliográfica sobre todo lo publicado respecto a criterios y métodos geológicos y geomorfológicos de aplicación al estudio de las avenidas torrenciales y sus riesgos asociados. Para ello se consultaron las principales bibliotecas especializadas de España en esta temática, como las ubicadas en las Facultades de Ciencias Geológicas y Geografía e Historia de la UCM, la del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, y las colecciones bibliográficas particulares de los autores. Pero además, y fundamentalmente, se realizaron búsquedas sistemáticas en bases de datos bibliográficas digitales en Internet, tanto para libros y colecciones, como para revistas científicas y otras publicaciones periódicas. Para ello se usaron motores de búsqueda genéricos (Google) y sobre todo herramientas específicas en plataformas y bases de datos (Web of Science, Scopus, GeoRef, Geobase, Pascal, ICYT, etc.). De esta forma se consiguió una recopilación, con recuperación de textos completos, de más de medio millar de registros directamente relacionados con la temática a analizar (Díez-Herrero *et al*., 2009a); la bibliografía que acompaña a este artículo sólo es una ínfima selección de dicho listado. Destacar que esta recopilación se encontraba totalmente actualizada a fecha del año 2009, y además con un amplio espectro de procedencia geográfica de las aportaciones, gracias a las facilidades de Internet, suponiendo una mejora sustancial de anteriores síntesis realizadas en las décadas de 1980 y 1990.

La segunda fase de la tarea fue el análisis pormenorizado de todos y cada uno de los registros bibliográficos, con lectura, extracción de notas y resúmenes de los principales que podían aportar información de utilidad. Con todos estos resúmenes y notas se hizo una labor de síntesis y condensación de las principales ideas que a continuación se exponen como resultados en cada una de las cuatro subactividades, a los que se añade un anexo dedicado al papel de la geología en el proceso de transformación lluvia-escorrentía.

Incorporación de fuentes de datos paleohidrológicos

Las corrientes de las áreas montañosas de nuestro país tienen un notable déficit de fuentes de información meteorológica e hidrológica convencional (pluviómetros y estaciones de aforo), lo que unido a las dificultades para la modelación hidráulica en torrentes, hace que los métodos hidrológico-hidráulicos estandarizados para la delimitación de áreas inundables, tengan una serie de limitaciones y fuentes de error. Para paliar este déficit de información, las fuentes de datos paleohidrológicos pueden complementar, alargar e incluso suplir a las fuentes convencionales, permitiendo análisis estadísticos más fiables y representativos. Estas fuentes paleohidrológicas son tanto los depósitos producidos durante eventos de avenida pretéritos (SWD), como marcas de nivel alcanzado, e incluso el registro dendrogeomorfológico en las secuencias de anillos de árboles próximos a los cauces.

La paleohidrología estudia eventos de crecidas pasadas preservadas en el registro sedimentario, permitiendo conocer la magnitud y frecuencia de las avenidas independientemente del registro histórico. Se realizan en tramos no aluviales, en roca, y complementan un vacío de información existente, pues son muy útiles para calcular el calado máximo alcanzado por la crecida, y con ello su caudal máximo por modelización hidráulica y asignar un valor de magnitud y frecuencia al evento mediante su datación. El estudio conjunto de la información sistemática y no sistemática permite extrapolaciones en las fun-

ciones de frecuencia, y por tanto mejora notablemente la estimación de periodos de retorno.

Los datos paleohidrológicos utilizados más frecuentemente son los depósitos de remanso y de remolino (*slackwater deposits*, SWD) que representan la sedimentación local por la caída del pico del hidrograma. Otro tipo de información muy útil son los detritus flotantes (*floatsam*), las bandas de limos y las líneas o cicatrices erosivas que suelen constituir una banda continua a lo largo de las márgenes. Otro de los indicadores que están alcanzando un gran desarrollo son los daños en la vegetación, cicatrices y malformaciones, recrecimientos de árboles y raíces adventicias ocasionados por avenidas y datables por dendrocronología. Métodos clásicos basados en paleoflujos ó paleocompetencia muestran más incertidumbres.

Los depósitos indicadores de paleocrecidas corresponden a zonas de separación de flujo para diversos ambientes sedimentarios tales como confluencias de afluentes, cambios en las condiciones geométricas del valle (zonas de expansión o contracciones, etc.), desbordamiento sobre la llanura de inundación en zonas protegidas, depósitos de sombra por obstáculo, abrigos rocosos y cuevas, entre los más propicios (Figura 2). Suelen acumularse varios niveles de sucesivas crecidas, que pueden estar separadas por periodos muy largos sin depósito. Construirán así una secuencia donde la separación de unos niveles de otros ha de hacerse por la presencia de intercalaciones arcillosas o depósitos no fluviales como coluviones (Figura 2), paleosuelos, bioturbaciones, indicadores erosivos, cambios en las características físicas del sedimento (color o tamaño de grano), espeleotemas, etc. Los depósitos suelen estar sujetos a la erosión parcial, creando superficies irregulares a techo que no se corresponden con la paleotopografía original. Sobre ellos pueden aparecer nuevas secuencias que fosilicen el nivel erosivo. El resultado final son secuencias estratigráficas muy complejas y difíciles de interpretar, lo que obliga a un análisis detallado y minucioso.

El trabajo con datos paleohidrológicos requiere asumir una serie de premisas previas como que el canal inundable ha de estar sobre roca estable y asegurar que no ha existido una variación significativa en la topografía del

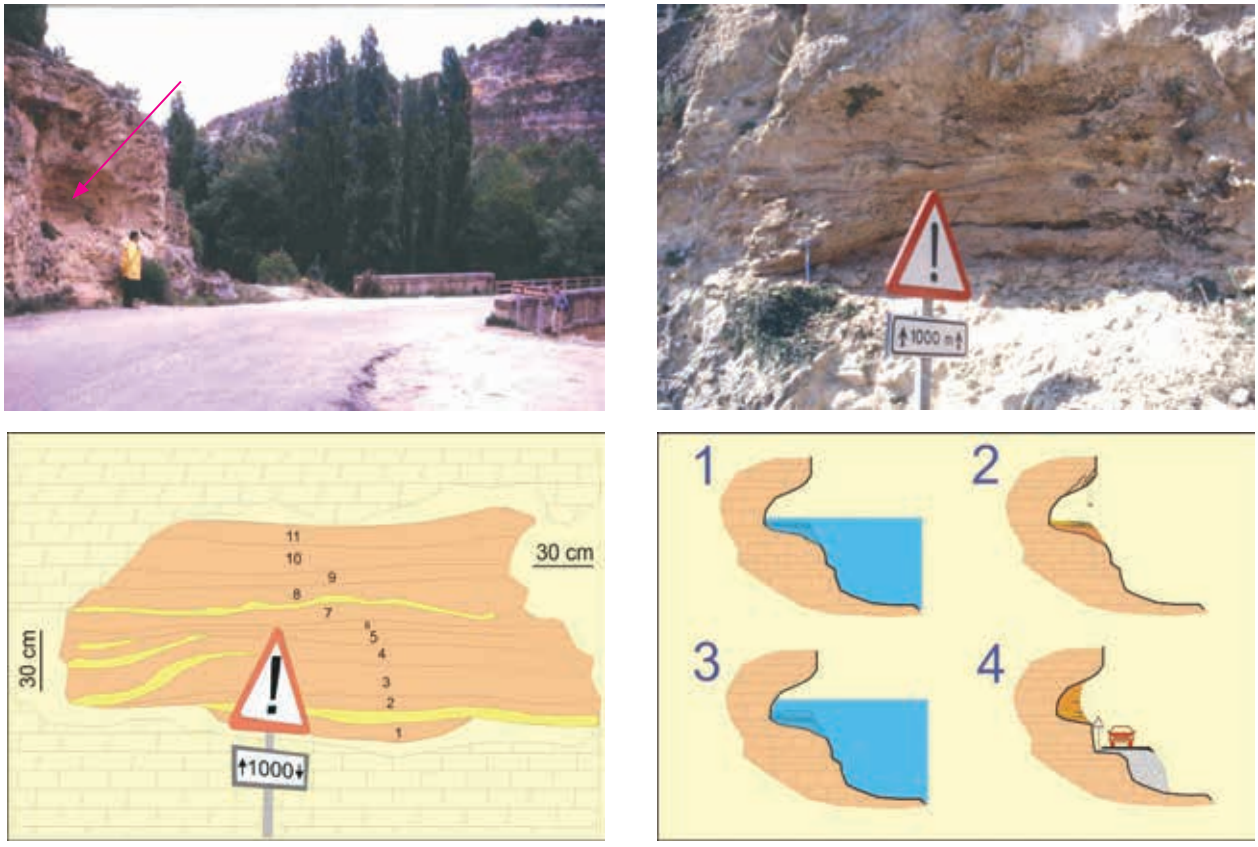


Figura 2. Ejemplo de depósitos de paleoinundaciones en un abrigo rocoso del cañón del Duratón (cuenca del Duero), donde se encuentra una secuencia de hasta 11 eventos de inundaciones extraordinarias en los últimos miles de años, separados por periodos con desprendimientos del techo del solapo que intercalan coluviones (niveles amarillos). Ver estudio completo en Díez-Herrero *et al*. (2005).

cauce. El método al calcular un caudal asignado a una altura mínima de las aguas subestima los valores finales. La cronología de paleoniveles puede establecerse mediante técnicas de datación arqueológicas, radioisótopos, termoluminiscencia o dendrocronología, como más frecuentes.

Los estudios de paleohidrología en la península Ibérica han comenzado recientemente pero se han desarrollado rápidamente dado el elevado potencial para su aparición de indicadores en tramos fluviales encajados (Benito *et al.,* 2008a), con incidencia en la región valenciana y murciana, cuenca del Tajo, Ebro y Guadiana, vertiente catalana y cuenca hidrológica del Sur. Bases de datos conteniendo fuentes paleohidrológicas a nivel mundial son GLOCOPH; y con información de España cabe señalar dos bases de datos, una para el río Tajo (*Paleotagus database*) implementada por investigadores del CSIC e IGME; y otra más amplia (SPHERE-GIS) que es, más bien, un sistema de información geográfica aplicado para el manejo de información procedente de las paleoinundaciones, pero también histórica, etc.

Incorporación de métodos de estimación de la carga sólida transportada

La mayor parte de las fórmulas y modelos numéricos empleados para el análisis hidrológico-hidráulico de las áreas inundables parten de la suposición de que el agua que circula por las corrientes fluviales se encuentra desprovista de cualquier carga sólida (agua limpia). Sin embargo, en nuestro país y especialmente durante eventos de avenidas torrenciales, esta suposición no es asumible desde el punto de vista científico-técnico. La importante carga sólida transportada hace cambiar parámetros del flujo, como la densidad y viscosidad, que varían los campos de velocidades y profundidades y la capacidad de carga (efecto de retroalimentación), y por lo tanto la peligrosidad asociada a las avenidas. Es posible incorporar métodos para estimar la magnitud de esa carga sólida transportable (tipo RUSLE-MUSLE, coeficientes de entrega, etc.) para mejorar los análisis y cartografías derivados.

El control de la tipología de transporte, así como de la concentración de sólidos dentro del flujo es un aspecto esencial para analizar el posible comportamiento del flujo, pues estas concentraciones pueden modificar las propiedades del fluido.

La realización de medidas fiables en campo es realmente difícil, y más las asociadas a la carga de fondo, siendo los principales errores que se generan los relativos a las propias maquinas de medición y los debidos a las variaciones temporales tan extremas que se producen en este tipo de transporte, característica ésta innata a este tipo de proceso. Los métodos de medida utilizados para cuantificar este proceso de transporte pueden dividirse en dos grandes grupos: por un lado los métodos directos (como las trampas de sedimento o las estaciones totales de transporte de sedimento, con trampas automáticas de transporte de fondo que proporcionan un registro continuo del mismo), de los cuales podemos destacar en España los trabajos llevados a cabo en el tramo bajo del río Ebro, en los que tratan de estimar tanto el momento de inicio del movimiento de las partículas como las tasas de transporte y el efecto que sobre las mismas tiene la regulación hidrológica de los ríos mediante presas; y por otro los métodos indirectos (como trazadores o repetidas campañas de análisis en campo), utilizando grabaciones de video en los parches de arena y gravas para determinar el momento de inicio del movimiento de las partículas del fondo por ejemplo utilizando una placa metálica situada en el lecho del río y geófonos para registrar los pulsos que se generan por el golpeo de las partículas en su movimiento por el lecho del río. Ninguno de los métodos es enteramente satisfactorio, aunque las medidas indirectas se han manifestado como análisis aceptables que muestran pequeñas oscilaciones en los valores medios obtenidos para una época temporal concreta en tramos de no excesiva longitud.

Otro enfoque que ha tenido un amplio desarrollo en los últimos tiempos es el de los modelos de base física para la estimación de la erosión y producción de sedimento en una cuenca. Los modelos de base física se basan en el entendimiento de los procesos físicos de erosión y transporte de sedimento, y su descripción mediante ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa, momento y energía. Debido a que se basan en ecuaciones de validez universal y sus parámetros poseen un significado físico, los modelos de base física pueden en teoría ser aplicados a partir de medidas directas de los valores de los parámetros, sin que sea necesario recurrir a la calibración a partir de registros empíricos. A grandes rasgos se pueden identificar dos tipos de modelos: *i)* modelos con una representación detallada de los procesos de erosión a partir de consideraciones conceptuales y físicas; y *ii)* modelos con una representación simplificada. Con frecuencia este último grupo muestra un elevado grado de empirismo y tiende a operar en un conjunto de resoluciones espacial y temporal amplias. Los modelos conceptuales

y de base física son generalmente capaces de operar tanto a resolución de evento como de forma continua, y suponen una representación espacial más detallada.

Todos estos análisis pueden verse alterados por la acción del hombre y su capacidad de modificación de su entorno, en nuestro caso las cuencas fluviales, de tal manera que se modifican las variables de primer orden que regulan el ciclo hidrológico. La modificación de la cobertera vegetal tiene además su influencia en el hidrograma de avenida de la cuenca; así diversos estudios muestran cómo la forma del hidrograma en dos cuencas próximas pero con distintas características de cobertera es diferente, siendo la evolución del pico de avenida más regular y lenta en la cuenca con mayor vegetación (arbórea), mientras que en la otra cuenca (con presencia mayoritaria de matorral) el pico del hidrograma es mayor, pudiendo presentar además varios picos en cuanto a la carga sólida, asociados a pequeños movimientos en masa del talud del cauce. Actividades mineras, industriales y urbanísticas, actuaciones hidrológico-hidráulicas, o las actividades forestales e incendios pueden provocar modificaciones significativas en la cuenca hidrológica, de tal forma que tanto los volúmenes de agua como su distribución temporal se pueden ver afectados, con los riesgos para las personas que esto trae acarreado.

Así, las variaciones en la carga sólida pueden provocar modificaciones tanto en parámetros morfológicos del cauce (dimensiones y forma, gradiente y patrón del canal) como en los parámetros dinámicos del fluido. Como resumen del comportamiento hidrodinámico de la mezcla agua con sedimento se puede indicar que existe un proceso de alejamiento del modelo newtoniano cuando se incrementa la concentración de sólidos; esta separación es lógicamente paulatina pero puede delimitarse en el entorno del 8 al 10% de concentración de finos, a partir del cual el comportamiento de la mezcla (flujo hiperconcentrado) se aleja totalmente del modelo newtoniano; en la zona intermedia (flujo cuasi-newtoniano), se puede utilizar la formulación clásica con algunas consideraciones y modificaciones. Otro parámetro que se ve modificado por la presencia de sedimento en el flujo es el Número de Reynolds, el cual desciende con el incremento de la concentración de sedimento para una velocidad y profundidad del flujo dadas; esto es así porque el incremento de la viscosidad con la concentración es mayor que el incremento de la densidad. Por tanto, puede esperarse que el grado de turbulencia del flujo disminuya con la concentración de sedimento dentro del mismo.

Incorporación de criterios geológicos y geomorfológicos en la cartografía de áreas inundables

Diversos parámetros y variables de naturaleza geológica controlan el fenómeno de las avenidas, desde la transformación lluvia-escorrentía con parámetros de claro condicionante litológico-edafológico como el umbral de escorrentía, hasta la variabilidad espacio-temporal del espacio inundable controlada por la dinámica fluvial del canal/es, pasando por la propagación de la onda de crecida influida por la configuración geomorfológica de la cuenca y la red de drenaje. Diversos trabajos y estudios proponen fórmulas y procedimientos para incorporar en los análisis y cartografías estos parámetros. Para ello es imprescindible conocer la configuración y dinámica del *bankfull* y el cauce fluvial, otros elementos geomorfológicos de la zona inundable, la movilidad del cauce y las particularidades de los abanicos aluviales.

El término caudal de bancos llenos se corresponde con la traducción del término anglosajón "*bankfull*" y su significado hace referencia al caudal máximo que es capaz de transportar el cauce sin que se produzca un desbordamiento del mismo que resultaría en la anegación u ocupación por las aguas de la llanura de inundación adyacente al cauce. Este caudal tiene además implicaciones morfológicas en el sentido de capacidad de formación y modificación del cauce. A partir de esta definición, la selección del caudal de bancos llenos como modificador principal de la morfología del canal se debe a la premisa de que la acción morfogenética de este caudal, que se alcanza casi todos los años (en latitudes medias y climas húmedos), es mayor que la que pueden tener caudales asociados a periodos de retorno mayores, los cuales pese a tener una energía mayor y por tanto una mayor capacidad de modificación de las orillas del canal, por su menor recurrencia poseen una capacidad neta de cambio inferior.

Debido a la gran diversidad geomorfológica de los cauces sobre los que se ha llevado a cabo su estimación, así como los diferentes dominios climáticos sobre los que se desarrollan, existen variadas aproximaciones a la estimación del caudal de bancos llenos, pudiendo agruparlas en función del tipo de aproximación en dos grandes grupos: las que desde un punto de vista hidrológico tratan de asignar un cuantil de periodo de retorno a dicho caudal, aunque ante la variabilidad de los resultados existen trabajos que ponen de manifiesto la dependencia del valor del caudal de bancos llenos respecto a variables tales

como la pendiente del cauce, el régimen climático o el tipo de río; y las que tratan de delimitar la morfología del cauce asociado al caudal de bancos llenos a partir de criterios geomorfológicos. A este respecto, dos trabajos indispensables son los publicados por Williams (1978) y Harrelson *et al.* (1994).

De manera complementaria a los trabajos de identificación de los elementos morfológicos asociados a la dinámica fluvial, que nos permiten la determinación de la zona activa del canal, el trabajo de delimitación de la zona de migración activa del canal nos ha de servir para una mejor estimación de las áreas asociadas a la dinámica activa del cauce, y por tanto con posibilidad de verse afectadas por la misma en un periodo de tiempo 'relativamente' corto. Con este objetivo en mente y de una manera muy analítica, algunas instituciones han editado guías prácticas para facilitar tales fines, como el Departamento de Recursos Naturales del Estado de Washingto, ilustrando acerca de los elementos en consideración a la hora de la delimitación de la zona activa del canal así como la modelación de la misma en diferentes escenarios fluviales.

En la modificación del reglamento del dominio público hidráulico se recoge la necesidad de contemplar en las zonas inundables la ocurrencia de aportes en masa y de coladas de derrubios. En este sentido hay una serie de factores que deben tenerse en cuenta tanto en mapas, fotos aéreas como en campo, que ofrecen indicios de actividad reciente sobre el propio cauce pero también fenómenos de cabecera y valles de aproximación capaces de desencadenar eventos que puedan afectar a los sistemas aluviales aguas abajo. Pero las cuencas más peligrosas para la producción de coladas de derrubios, no son precisamente las que más depósitos transportan en la actualidad, y las más susceptibles potencialmente pueden ser las que no han funcionado recientemente, por lo que sus laderas tendrán más materiales disponibles para su futura removilización..

Como indicadores morfológicos de actividad hay que analizar todos los tramos que conforman un sistema torrencial: la cabecera, el torrente de transferencia, la actividad de coladas de derrubios y ocurrencia de avulsiones en el abanico. Finalmente, otros aspectos a tener en cuenta son posibles cambios de vegetación, usos del suelo o actividades antrópicas que actúen como factores desestabilizadores o detonadores de procesos. Se pueden establecer además una serie de criterios morfométricos para la estimación de la actividad de abanicos, tales como la relación entre la superficie de la cuenca y del abanico con la pendiente, la relación entre las pendientes del abanico y de la cuenca hasta la influencia del espacio de acomodación.

El concepto de umbral es muy importante para la predicción de actividad en abanicos, pues permite identificar formas incipientemente inestables y tomar medidas para evitar o minimizar su efecto. Cuando la cabecera del abanico sobrepasa una determinada pendiente, el cauce supera un umbral intrínseco y se encajará sobre sus propios sedimentos. Pero también hay factores extrínsecos como el clima, la tectónica y los usos del suelo, que detonan su funcionamiento.

Respecto a la zonificación de peligrosidad, uno de los principales problemas en abanicos es que no son aplicables los criterios habituales de vulnerabilidad para desbordamientos de corrientes acuosas. Se ha considerado, en general, que la peligrosidad se incrementa radialmente desde el ápice activo del abanico, esto es, la zona de mayor acumulación que es a partir de la que va a abrirse el nuevo canal cuando se produzca el cambio de curso; sin embargo en cada caso hay que valorar cuál es la zona más inestable por donde puede producirse la avulsión. Por tanto hay que diferenciar entre lo que es ápice topográfico del abanico a partir del que discurre el cauce encajado y el hidrológico donde se expande el flujo, y dependiendo de la posición relativa de ambos ápices puede determinarse la zona sujeta a inundación. El Modelo FAN es una alternativa a la modelización hidráulica y divide la superficie del cono en segmentos de probabilidad uniforme. La peligrosidad sólo depende del caudal estimado en el ápice y de la anchura estimada para el abanico en ese punto. El método resulta muy conservador y los flujos uniformes que no tienen en cuenta la topografía de pequeña escala. Las propuestas de otros autores consisten en un modelo integrado combinando un modelado hidráulico bidimensional con mapas de formaciones superficiales, imágenes satélite y datos de campo post-avenida. Otros autores plantean una zonificación basada en la susceptibilidad a flujos de derrubios y avulsión. Una vez que se ha producido la avulsión hacia una zona topográficamente mas deprimida, este cauce se hace estable durante un cierto tiempo hasta que se propicie un nuevo cambio hacia otra zona más baja. Las coladas de derrubios son más difíciles de predecir pero establecen unas clases de ocurrencia a partir de la colada de diseño para cada torrente definida por el mayor volumen de sedimentos esperable.

Los ejemplos en España de dinámica de abanicos con cambios y migración del cauce son múltiples y de diver-

sa tipología. El abanico de Albaida (Valencia) también ha sido muy activo históricamente con cinco sucesivas migraciones del cauce. La Plana de Levante constituye un ejemplo de abanicos anastomosados en que ramblas distribuidoras muy móviles acaban dispersándose sobre sus antiguos cauces, o bien impedidas en su desagüe por interferencia de temporales costeros. El funcionamiento de las ramblas sigue pautas de gran violencia en el litoral, como el flujo hiperconcentrado de la rambla de Albuñol que hizo avanzar su abanico deltaico 200 m mar adentro.

En zonas de montaña también ocurren procesos de gran actividad, como el abanico de Arás, con formación de un lóbulo nuevo a partir de la colmatación del ápice de abanico y avulsión lateral. El lóbulo superior de bloques representa una inundación en manto, por expansión de flujo no confinado seguido de una nueva extensión del abanico de bloques y gravas. Un ejemplo de la variabilidad no sólo en el abanico, sino en el cauce de aproximación, es el torrente de Montardit.

Y es que en los abanicos aluviales podemos encontrar tipologías de transporte en función de la concentración de sólidos en el fluido, lo que determina por un lado mezclas (líquido más sólido) dominadas por la fase fluida (denominadas aquí como transporte mediante corrientes hídricas) o dominadas por la fase sólida (o por lo menos con un porcentaje de sólidos suficiente como para modificar las propiedades características de un fluido), a lo que denominaremos flujos de alta densidad. Estas tipologías de transporte pueden aparecer en distintas zonas del abanico.

Asesoramiento sobre la estimación de la variabilidad en la frecuencia y magnitud de avenidas asociada al cambio climático

El cambio climático, o la aceleración inducida antrópicamente en el cambio climático respecto a las condiciones naturales, es un hecho reconocido no sólo por la comunidad científica internacional, sino también por los gobiernos y la opinión pública mundial. En esta circunstancia, la elaboración de análisis y cartografías de inundaciones basándose en las técnicas clásicas y empleando como fuentes de datos los registros sistemáticos del último siglo (en el mejor de los casos), presenta un alto grado de incertidumbre sobre su validez futura. A través del estudio de las variaciones en la frecuencia y magnitud de las avenidas y sus inundaciones asociadas, a lo largo del registro geológico reciente (Holoceno) y del registro histórico, pueden estimarse los órdenes de magnitud que los cambios climáticos del pasado produjeron en dicha variabilidad; y a partir de ello, poder intuir las modificaciones que se producirán en el futuro ante las previsiones de cambio climático.

Los cambios climáticos conllevan modificaciones en la temperatura atmosférica, la de la superficie del mar, en las presiones, precipitaciones y caudales. La aceleración antrópica en el clima es un hecho confirmado y por tanto el análisis de inundaciones basado en registros pasados acarrea incertidumbres sobre su extrapolación futura. Las predicciones para la península Ibérica indican que la temperatura media subirá, disminuyendo los meses mas fríos y aumentando los más cálidos, mientras que las aportaciones de los ríos reducirán en sus valores medios. Esto supone la acentuación de las condiciones mediterráneas, con un aumento de fenómenos extremos por convección tanto aislados como a mesoescala. Uno de los problemas mayores en las futuras predicciones es la variabilidad del clima de España debido a su compleja topografía y situación geográfica. Para entender esos cambios hay que conocer la tipología de inundaciones actuales y los cambios en el pasado reciente, el Holoceno. Los datos sistemáticos y no sistemáticos permiten establecer las complejas relaciones entre las oscilaciones climáticas de macroescala o teleconexiones y los recientes pulsos fríos-cálidos ligados a eventos de alta magnitud.

Respecto a los escenarios de precipitación e hidrología, la variabilidad climática interanual es muy elevada, condicionada por los patrones de circulación atmosférica del hemisferio Norte, ante todo por la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Durante el siglo XX las temperaturas en España han aumentado de forma general y en magnitud superior a la media global y las precipitaciones invernales han bajado. Esta tendencia se asocia en parte con un aumento en el índice de la NAO (Moreno, 2005). El empleo de escenarios en Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGA-OA) señala variaciones en temperaturas siempre positivas mientras que las de las precipitaciones son moderadas y en ambos sentidos. Los modelos regionales más empleados son: PROMES (Pronóostico a Mesoescala) para el efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos y las demandas de agua, simulando escenarios climáticos. El modelo agregado de Ayala e Iglesias estima que el cambio climático produciría una reducción global de los recursos hídricos del 17%. El SIMPA establece balances en los que la variabilidad hidrológica en las cuencas atlánticas aumentará en el futuro debido a la intensificación del índice NAO positivo y disminuirá la frecuencia

de avenidas, pero no su magnitud. En las cuencas mediterráneas y del interior se ocasionará un aumento en la irregularidad de crecidas y su celeridad.

Respecto a la relación entre las inundaciones y los pulsos climáticos holocenos hay que señalar que el óptimo climático Holoceno representa una disminución de la lluvia invernal (Benito *et al.,* 2008a) y para este periodo del Holoceno temprano los registros de lagos sugieren condiciones más húmedas con una progresiva aridificación posterior.

La Pequeña Edad de Hielo (LIA), representa uno de los principales pulsos históricos del Holoceno. En él, se produce un incremento de los periodos de bloqueo sobre la Europa Central asociado con sistemas frontales del O y eventos intensos en el Mediterráneo. En el río Guadiana, se ha señalado una concentración de eventos de paleocrecidas al final de pulsaciones frías y en momentos de transición hacia pulsos cálidos (Ortega y Garzón, 2009).

Existe una clara relación entre las inundaciones en la península Ibérica y la circulación atmosférica regional y global. Las teleconexiones son relaciones, definidas estadísticamente, entre atmósfera y océanos en regiones separadas y constituyen patrones de variabilidad de baja frecuencia. La oscilación del Atlántico Norte (NAO) representa un patrón de variaciones en la circulación a gran escala que supone cambios en las temperaturas superficiales de los océanos y corrientes, en la intensidad y numero de tormentas y en las precipitaciones, que se refleja en forma de índices como el de Hurrell definido por la variación en la presión superficial entre Lisboa e Islandia. Su fase negativa supone un debilitamiento del anticiclón de las Azores, con el aumento del tiempo inestable en invierno y la entrada de frentes con mayor circulación meridional que derivan en lluvias en el Mediterráneo Occidental.

Una de las consecuencias del cambio climático es la modificación de la distribución de los recursos hídricos. Se han identificado una serie de tipologías en función del signo positivo o negativo de la NAO: Trigo *et al*. (2004) indican la relación entre caudales en las tres cuencas atlánticas y el índice NAO. La relación entre el índice de Hurrell de la NAO con las inundaciones ha sido establecida en la cuenca del río Guadiana. Cuando los valores NAO son negativos, las lluvias son abundantes, desviándose positivamente respecto a los valores medios; mientras que si los valores son positivos, las lluvias de invierno son escasas (Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2004).

En otras cuencas españolas se han detectado relaciones entre el índice NAO y las avenidas en el río Guadalquivir y Tajo (Benito, 2006 y Benito *et al*., 2008a). Las avenidas históricas se encuentran relacionadas con momentos negativos del índice, mientras que en el registro instrumental esta relación no es tan clara.

La Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) es el patrón de baja frecuencia más importante que influye en las precipitaciones en el Mediterráneo y está muy relacionada con la teleconexión del Atlántico Norte (NAO) durante el invierno. Se relaciona con avenidas de precipitación de tipo convectivo e incluso directamente con la actividad torrencial. El Niño (ENSO) es la mayor fuente de variabilidad climática interanual en el Pacífico; se relaciona con lluvias en el Mediterráneo, y temperaturas en el Atlántico Norte para anomalías de precipitación invernal.

Finalmente, sobre la relación de inundaciones con la actividad solar se citan correlaciones entre el numero de manchas y la temperatura oceánica y con la NAO y la posibilidad de emplear los registros de inundaciones históricas como dato proxy de actividad solar.

El papel de la geología en el proceso de transformación lluvia-escorrentía

La relación existente entre los procesos de infiltración y escorrentía determinan en la mayoría de los casos y modelos el volumen efectivo de agua que se transmite dentro de una cuenca entre su cabecera y desembocadura. Esta relación se basa en las características propias en cada punto del territorio de una serie de variables de muy diverso tipo y origen.

Desde el punto de vista geomorfológico, el análisis y estimación de la producción de escorrentía superficial se ha abordado desde dos puntos de vista, con resultados diversos. Por un lado, el análisis de aspectos primarios en la morfología del terreno ha aportado información valiosa respecto a la capacidad teórica de una cuenca respecto a la generación de escorrentía superficial, y la influencia de estos aspectos primarios se encuentra contrastada y aceptada. Por otro lado, principalmente durante los años 70-80 se trató de establecer relaciones entre parámetros morfométricos del terreno más complejos y la producción de escorrentía superficial, analizando la influencia que los valores asociados a parámetros tales como la densidad de drenaje, la distribución de segmentos de diferente orden jerárquico, la rugosidad del terreno o el relieve de la cuenca. Sin

embargo en este último caso, en general no se han podido establecer relaciones directas y unidireccionales entre estos parámetros morfométricos y la producción de escorrentía superficial, lográndose en la mayoría de los casos establecer únicamente la relación existente entre los valores de estas variables (a nivel de magnitud de los valores) y la forma de los hidrogramas asociados a los diferentes eventos de precipitación.

El enfoque de los estudios basados en la relación entre las litologías dominantes dentro de una cuenca respecto a la generación de escorrentía superficial dentro de la misma se ha centrado principalmente en la estimación de los tipos y grados de desarrollo de los suelos asociados a estas litologías; que sin embargo se ha comprobado que en función del ambiente climático en que se encuentran y su fracturación pueden dar lugar a suelos significativamente distintos respecto al parámetro infiltración, prestando atención a dos elementos primarios, la textura y la capacidad de formación de suelos desarrollados, con espesores significativos previos a la aparición de la roca inalterada. Estas dos variables condicionan el comportamiento hidrológico del suelo, y permiten la clasificación de los mismos en los diferentes grupos hidrológicos de uso en la estimación del parámetro de Número de Curva (en España, la aplicación del modelo de Número de Curva se ha extendido bajo la variación que se conoce por Umbral de Escorrentía, desarrollado por el SCS y de uso generalizado en la estimación de los caudales asociados a los eventos de precipitación.

Existen relaciones entre la infiltración y los grupos litológicos en el ecosistema mediterráneo, comparando los resultados obtenidos según la litologías y las condiciones de alteración de los suelos. Esta relación entre infiltración y la litología condiciona a su vez el porcentaje de la precipitación que pasa a formar parte de la escorrentía superficial, y por tanto regula la forma de los hidrogramas de avenida asociados a estas precipitaciones, los cuales a su vez controlan en buena parte la morfología de los cauces encargados de ejercer el papel de agente de transporte.

CAMBIO CLIMÁTICO Y ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD POR INUNDACIONES EN ESPAÑA

Otro de los resultados de los estudios llevados a cabo en el marco de la Encomienda-Avenidas fue un análisis de las aportaciones geológicas al estudio de la incidencia del cambio climático en la peligrosidad por inundaciones en España, cuyo documento de síntesis supuso la aportación de la representación española al *Thematic workshop on Climate Change and Flooding* del *Working Group F on Floods*, celebrado entre los días 8 y 10 de septiembre de 2009 en la localidad sueca de Karlstad (Llorente-Isidro *et al*., 2009).

Antecedentes de los estudios sobre el cambio climático y las inundaciones en España

Existen numerosos antecedentes de estudios llevados a cabo sobre la variabilidad temporal en la frecuencia de las inundaciones históricas en España, algunos de ellos pioneros (Rico Sinobas, 1850; Bentabol, 1900); e infinidad de trabajos recopilatorios sobre las avenidas pretéritas en ámbitos locales, comarcales, regionales y nacionales (Font Tullot, Fontana Tarrats…).

Sin embargo, hasta que no se propuso la hipótesis del cambio climático antropogénico, no surgen los primeros estudios científicos modernos sobre la relación entre este paradigma y las inundaciones en España, que se remontan a la década de 1990 (Benito *et al*., 1996). En este decenio, varios grupos de investigación inician proyectos de estudio de las variaciones históricas en la frecuencia de inundaciones basándose en tres tipos de fuentes de información y metodologías de estudio, diferentes pero complementarias: documentales-meteorológicas, geológico-geomorfológicas, y sistemáticas-instrumentales.

El empleo de las fuentes documentales a partir del estudio de series continuas y sistemáticas de registros en hemerotecas y archivos se lleva a cabo principalmente por miembros del Grupo de Climatología de la Universidad de Barcelona, encabezado por la Dra. Carmen Llasat y el Dr. Javier Martín-Vide, y de donde han salido prestigiosos paleoclimatólogos como el Dr. Mariano Barriendos; y realizan sus tesis doctorales otros como M. Barnolas. Estos estudios tienen un carácter multidisciplinar, combinando especialistas del análisis histórico-documental (del ámbito de las humanidades), con meteorólogos y físicos de la atmósfera. Ello ha creado una sinergia que permite contemplar los procesos vinculados a la avenida fluvial desde una perspectiva integral, empezando por el análisis y la estima de los procesos microfísicos involucrados en la precipitación, y pasando por la predicción a corto plazo utilizando el rádar meteorológico (Barnolas y Llasat, 2007). También han investigado sobre las fuentes históricas y su incorporación al análisis estadístico de frecuencias, los técnicos y científicos del Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente en la Uni-

versidad Politécnica de Valencia, encabezado por los Drs. Juan B. Marco y Félix Francés, y al que pertenece también M. A. Eguíbar.

Por lo que respecta a las fuentes y métodos de tipo geológico-geomorfológico, varios equipos de investigación han avanzado en el conocimiento de las paleoinundaciones holocenas e inundaciones históricas en diferentes cuencas peninsulares, combinando aspectos puramente geológicos (análisis y datación de *slackwater & backwater deposits*; Benito *et al*., 2008b) con modelaciones y reconstrucciones hidrológicas e hidráulicas, que permiten no sólo estimar la variación de la frecuencia, sino también de los órdenes de magnitud de los caudales. Entre ellos destacan: el Grupo de Investigación de Paleohidrología y Análisis del Cambio Climático del Museo de Ciencias Naturales (CSIC), encabezado por el Dr. Gerardo Benito, y en el que se han formado y desarrollado sus tesis doctorales la Dra. María Teresa Rico, la Dra. María José Machado y el Dr. Varyl Thorndycraft; y el Grupo de Geomorfología Ambiental del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid, en particular el grupo encabezado por la Dra. Mª Guillermina Garzón Heydt, y en el que han realizado sus tesis doctorales el Dr. J. Martínez-Goytre, la Dra. Ángela Potenciano y el Dr. José Antonio Ortega Becerril.

El análisis de los registros instrumentales sistemáticos, principalmente de la red foronómica de registros más longevos (ROEA) tiene la virtud de trabajar con datos cuantitativos medidos reales, pero el inconveniente de la reducida longitud de las series. Ha sido abordado tanto por personal de las administraciones responsables de la gestión de los recursos hídricos (DGA, agencias autonómicas...), como por grupos de universidades y centros de investigación, como el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (J. Álvarez, A. Jiménez, L. Quintas, T. Estrela, J. Garrote...).

Con ambos grupos de equipos de investigación vienen colaborando desde hace más de una década diferentes investigadores y técnicos de otros centros de la Administración General del Estado como: el Instituto Geológico y Minero de España (F.J. Ayala, L. Laín, A. Díez, M. Llorente, A. Barnolas); y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (G. Pascual, A. Bustamante, A. Álvarez, R. Martínez).

Aprendiendo lecciones del pasado reciente

A partir de los estudios y publicaciones de los grupos anteriormente mencionados, se pueden extraer los siguientes resultados sobre la variabilidad de la frecuencia y magnitud de inundaciones en el pasado reciente, con particularidades según la vertiente estudiada (atlántica o mediterránea), y la cuenca objeto de estudio:

Para la cuenca del río Tajo, a partir del análisis espacio-temporal de fuentes documentales utilizando bases de datos relacionales y SIG (Díez *et al*., 1998 y 2003; Benito *et al*., 2003a), las mayores frecuencias de inundación en el último milenio se registraron en los periodos: AD 1160-1210, 1540-1640, 1730-1760, 1780-1810, 1870-1900 y 1960-1980. Con respecto a la magnitud, empleando modelación hidráulica para reconstruir órdenes de magnitud de caudales históricos en cuatro localidades singulares, se ha detectado que las mayores avenidas tuvieron lugar en los periodos: AD 1168-1211, 1658-1706, 1870-1900 y 1930-1950. De la comparación de estos periodos con las tendencias climáticas históricas establecidas para la península Ibérica, se puede deducir que las épocas de mayores inundaciones corresponden con las décadas inicial y final de periodos con un 'deterioro' del clima a escala continental; lo que sugiere que la viabilidad climática en el último milenio ha producido una respuesta de eventos hidrológicos (positiva o negativa), independientemente del mecanismo que produce la inundación. Para esta misma cuenca se ha analizado el registro de paleoinundaciones del Pleistoceno Superior y Holoceno (Benito *et al*., 2003b), llegándose a la conclusión que los periodos de incremento de la frecuencia y magnitud de las avenidas prehistóricas en la cuenca del Tajo están estrechamente relacionados con el aumento de circulación húmeda y precipitaciones invernales en la península Ibérica, especialmente en la zona occidental, demostrando una buena correspondencia con otros indicadores (lagos, pólenes…) y los cambios en la circulación atmosférica que afectan a la Península.

Para la cuenca del río Guadiana, a partir del análisis geológico e hidráulico del registro de paleocrecidas en su tramo medio-bajo (Ortega y Garzón, 2003; Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2009), se ha podido completar el registro sistemático de eventos, e incorporar estos datos no sistemáticos al análisis estadístico de caudales. Los resultados muestran que existe una variación en las funciones de distribución de frecuencias que pueden achacarse a las transformaciones antrópicas que han cambiado las condiciones hidrológicas, pero también a los últimos cambios climáticos. Las inundaciones de mayor magnitud se relacionan con periodos fríos, especialmente en momentos transicionales de cambio desde periodos fríos a cálidos. Esta tendencia ha cambiado

desde la última crecida de magnitud media-alta, que tuvo lugar en el periodo sistemático. Por ambos motivos, parece justificarse un cambio en las curvas de frecuencia que indican un descenso reciente en el periodo de retorno de las grandes crecidas ($Q>8000\ m^3s^{-1}$). Las paleoinundaciones indican un mayor periodo de retorno para el mismo caudal, mostrando los valores de referencia previos a la transformación antrópica de la cuenca.

Para ambas cuencas se han encontrado muy buenas correlaciones con indicadores regionales de la circulación y teleconexiones atmosféricas, como el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO; Benito *et al*., 2004; Ortega y Garzón, 2004; Trigo *et al*., 2004), e incluso con la actividad solar (Vaquero, 2004; Benito *et al*., 2004).

En el caso de las cuencas mediterráneas, se han definido varios periodos de mayor frecuencia y magnitud de las inundaciones históricas (Barriendos, 1994; Barriendos y Martín Vide, 1998; Barnolas y Llasat, 2007). Desde finales del siglo XVI hasta mediados del siglo XVII (años 1580-1620) se denota un aumento sensible del número de avenidas catastróficas coincidiendo con un momento más frío en la península Ibérica; se trata de una de las oscilaciones climáticas adversas más evidentes de las registradas durante la última miniglaciación (Barriendos, 1994). La relativa calma hidrológica se alarga más de un siglo, desde mediados del siglo XVII hasta las últimas décadas del siglo XVIII; en estas últimas décadas tiene lugar la Oscilación Maldá y corresponde con episodios de lluvia torrencial de amplia afección espacial en la parte oriental de la península Ibérica; luego vuelve a haber un periodo de incremento y mayor severidad de las inundaciones entre los años 1840 y 1870. En este caso la correlación adecuada no se produce con el índice NAO, sino con la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO; Oliva *et al*., 2006). De tal manera que el índice de la WeMO invernal presenta una buena correlación negativa con las inundaciones a escala anual de las cuencas de la vertiente mediterránea desde el año 1500; las fases más negativas del índice, entre los años 1590-1650 y los picos del siglo XIX, coinciden con los periodos de inundaciones más graves y/o recurrentes; y la serie de precipitación de Valencia desde 1837 detecta una correlación negativa óptima con las fases negativas y positivas del índice. También en la vertiente mediterránea se han hecho estudios de correlación de paleoinundaciones y periodos climáticos (Rico, 2004; Benito *et al*., 2008a y b), llegándose a la conclusión que existe una buena correlación entre los periodos de mayor frecuencia con cambios climáticos, pero también de la influencia notable de los cambios históricos en los usos y ocupación del suelo.

Principales resultados para la previsión futura

Para la obtención de resultados sobre la evolución futura de la frecuencia y magnitud de las inundaciones en España, en relación con los cambios climáticos previstos, caben dos vías de análisis:

La modelación físico-matemático de la respuesta hidrológica en las diferentes partes de España, ante los cambios previsibles en parámetros climáticos obtenidos a partir de los Modelos de Circulación Global acoplados océano-atmósfera (Llorente, 2007). El principal inconveniente de esta vía es que dichos modelos todavía tienen una resolución espacial muy baja y grosera para alimentar modelos hidrometeorológicos, haciendo poco representativos los resultados obtenidos con el descenso de escala (*downscaling*); además, ofrecen resultados de la variación de parámetros medios o totalizadores (precipitación media anual, temperatura media…), que si bien pueden ser útiles en la evaluación de los recursos hídricos globales, son muy difíciles de adaptar para el estudio de eventos extremos como las avenidas e inundaciones.

Extrapolar el comportamiento de las inundaciones en periodos análogos del pasado reciente (ver anterior apartado), en función de las previsiones de cambios climáticos de los escenarios futuros, y de las proyecciones de los indicadores como el NAOi, WeMOi y actividad solar. De esta manera, si como parece se está produciendo un calentamiento global con aumentos de las temperaturas medias, se podría suponer un comportamiento análogo a los periodos históricos en los que se pasó de un periodo más frío a otro más cálido, como el inicio de la era cálida romana, o el periodo cálido medieval.

Para España, las escasas previsiones concretas que se han hecho de los impactos del cambio climático (Benito *et al*., 2005; Moreno, 2005; Benito, 2006), han empleado mayoritariamente la segunda vía de las anteriormente expuestas, llegándose a los resultados que se exponen de forma sintética en la Tabla 1.

Conclusiones

Como sintetiza magistralmente G. Benito (2006), los registros de paleocrecidas y crecidas documentales en España muestran una mayor frecuencia de crecidas durante los estadios iniciales y finales de periodos fríos como la Pequeña Edad del Hielo (1550-1850 AD) o la pulsación de carácter frío y húmedo ocurrida hace 2650 años. En el periodo instrumental (1910 hasta la actualidad), los ríos

Tabla 1. Resultados cualitativos del análisis de la respuesta de las diferentes cuencas hidrográficas españolas a posibles impactos del cambio climático (adaptada de Benito *et al*., 2005)

POSIBLE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO					
Cuenca hidrográfica		**Cambios en la circulación zonal (NAOi positivo)**	**Aumento de los fenómenos de gota fría**	**Generación de núcleos convectivos**	**Cambios bruscos en la temperatura**
Vertiente atlántica	Guadalquivir Guadiana Tajo	- Extremos (+intensos) + Ordinarias (-intensas)		+ Avenidas súbitas	
	Duero	- Extremos (+intensos) + Ordinarias (-intensas)		+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Norte		+ Irregularidad de extremos	+ Avenidas súbitas	
Vertiente mediterránea	Ebro			+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Cuencas internas de Cataluña		+ Irregularidad de extremos	+ Avenidas súbitas	+ Crecidas por deshielo
	Levante/ Sur		+ Irregularidad de extremos Crecidas/sequías	+ Avenidas súbitas	

atlánticos han experimentado una disminución de la frecuencia de las crecidas ordinarias, aunque la magnitud de las crecidas catastróficas se ha mantenido, incluso aumentado, a pesar del efecto laminador de los embalses. En las cuencas mediterráneas las series de crecidas del pasado indican que las avenidas extremas se han producido durante periodos de elevada irregularidad de la precipitación tanto estacional como anual. En periodos recientes, los datos existentes apuntan a que el incremento de la temperatura puede aumentar la irregularidad del régimen de crecidas y sequías y promover la generación de avenidas súbitas en las cuencas mediterráneas y del interior de la península Ibérica.

Sin embargo queda aún mucho trabajo de investigación y desarrollo técnico en más cuencas y periodos temporales más representativos, para poder transferir estos resultados (algunos de ellos cualitativos) a los análisis y cartografía de la peligrosidad de inundaciones en España.

ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS EN LA MODIFICACIÓN DEL REGLAMENTO DEL DPH, EL SNCZI (extracto de MARQUÍNEZ *et al*, 2008)

El miércoles 16 de enero de 2008 se publicó en el Boletín Oficial del Estado (número 14, páginas 3141-3149) el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (en adelante, RDPH), aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.

El nuevo Real Decreto 9/2008 se compone de un artículo único, en el que se modifica el título del RDPH, se cambia la redacción de varios de sus artículos (4, 6, 7, 9 y 14) y se añade un nuevo título (VII, *De la seguridad de presas, embalses y balsas*). Los artículos modificados tratan sobre la definición del álveo o cauce natural (Art. 4), la zonación de las riberas y márgenes (Art. 6), sus fines y limitaciones de uso (Arts. 7 y 9.1), la delimitación de la zona de flujo preferente (Art. 9.2), las zonas inundables y el nuevo Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (en adelante, SNCZI; Art. 14).

La mayor parte de estos artículos en los que se ha cambiado la redacción, contienen múltiples alusiones a las características, criterios y métodos geomorfológicos para la determinación y delimitación de los elementos y zonas; además de diversas menciones a aspectos de la dinámica fluvial y los procesos asociados (transporte de carga sólida).

La geomorfología en la determinación del cauce

El antiguo Real Decreto 849/1986 que regulaba el RDPH, y que ha estado vigente durante casi los últimos 22 años, únicamente contenía una referencia a los temas geomorfológicos al objeto de la delimitación del dominio público hidráulico (Art. 240.2) como un criterio "*coadyuvante*" de la zona ocupada por la máxima crecida ordinaria (en adelante, MCO). De esta forma quedaba claro que existía un criterio de determinación principal (el hidrológico-hidráulico), y otros complementarios o adicionales *("...la observación del terreno y de las condiciones topográficas y geomorfológicas (…) y,*

en general, cuantos datos y referencias resulten oportunos") cuyo empleo no era de obligado cumplimiento. Los criterios hidrológico-hidráulicos contaban con la ventaja de ser cuantificables numéricamente, lo que aparentemente les otorgaba una mayor objetividad y facilidad para ser soportados jurídicamente; por el contrario, los otros criterios (geomorfológicos, ecológicos, históricos ...) eran tildados de cualitativos y subjetivos, a pesar de que a diferencia de los anteriores, se basan en evidencias empíricas y no en artificios estadísticos.

Consecuencia de esta definición de cauce, los diferentes planes y proyectos para la delimitación del DPH, como el conocido LINDE (Villarroya y Sánchez, 2006) han volcado sus esfuerzos en la aplicación de métodos hidrológico-hidráulicos, lo que ha producido no pocos problemas técnicos y logísticos. Salvo casos excepcionales, se dejaba en manos de las empresas y consultoras adjudicatarias de la delimitación, el empleo o no de estos criterios complementarios o adicionales, que en el mejor de los casos quedaban restringidos al examen de fotografías aéreas antiguas, rudimentarios esquemas geomorfológicos, o recorridos de campo de algunos tramos.

El propio legislador se hace eco de estos problemas, cuando en el preámbulo del nuevo Real Decreto dedica un párrafo a ello: "*La definición de cauce natural establecida en el vigente Reglamento, basada en el concepto de máxima crecida ordinaria, se ha mostrado claramente insuficiente en numerosas situaciones, por lo que resulta imprescindible que los cauces naturales se definan no sólo a partir de criterios hidrológicos, sino atendiendo también a otras características, como las geomorfológicas, las ecológicas y teniendo en cuenta las referencias históricas disponibles*".

La modificación que introduce el nuevo Real Decreto 9/2008 en el artículo 4, en parte motivada por las nuevas directivas europeas ambientales, incorpora las características geomorfológicas, fotográficas, cartográficas e históricas, al menos en igualdad de condiciones que las hidrológicas e hidráulicas para la determinación del cauce natural (Art. 4.1); incluso coloca las características geomorfológicas en primer lugar en la redacción. Esta modificación supone un cambio significativo respecto a la situación anterior, aunque sin entrar en contradicción con el artículo 4 del texto refundido de la Ley de Aguas, ya que mantiene la definición de la MCO (Art. 4.2), pero indicando que "... *tengan en cuenta lo establecido en el apartado 1*".
Sin embargo, de todos es sabido que la delimitación del cauce con criterios geomorfológicos no es una cosa banal, salvo contadas ocasiones de tramos muy simples de cauces bien definidos entre escarpes de orillas; cuando son ríos complejos, existen diferentes términos para los caudales asociados al cauce, como caudal generador, caudal formador, caudal de bancos llenos, caudal de aguas altas, que no son exactamente sinónimos de la MCO y que conviene clarificar.

La geomorfología en la zonación de riberas y márgenes

También el antiguo Real Decreto del RDPH presentaba serias deficiencias en la delimitación de zonas dentro de las riberas y márgenes. Desde el principio, la comunidad científico-técnica criticó el sinsentido de la delimitación exclusivamente métrica de las zonas de servidumbre (5 m) y policía (100 m), con independencia de la magnitud de la corriente y su dinámica.

En este sentido, de nuevo la modificación del RDPH viene a matizar dicha delimitación, incorporando cierta racionalidad, una vez más sin entrar en conflicto con el texto refundido de la Ley de Aguas. Ya el preámbulo justifica esta modificación en la necesidad de que estas zonas sirvan, además de proteger el DPH, para prevenir el deterioro de los ecosistemas acuáticos y proteger el régimen de las corrientes en avenidas. Este último aspecto se consigue "... *favoreciendo la función de los terrenos colindantes con los cauces en la laminación de los caudales y carga sólida transportada*" (Art. 6.3); en la que quizás sea la primera y única mención al papel de la carga sólida en nuestra legislación de aguas, a pesar de su importancia en la mayor parte de las avenidas torrenciales que causan víctimas mortales en nuestro país.

Por ello plantea la posibilidad de ampliar los 100 m de anchura de la zona de policía cuando sea necesario para la seguridad de las personas y bienes. Esta posibilidad se materializa con la nueva incorporación de la *zona de flujo preferente, envolvente de la vía de intenso desagüe (definida en el nuevo reglamento de for*ma semejante al *floodway* de la FEMA en los EEUU) y la zona de inundación peligrosa para las personas (según rangos de calado y velocidad). Esta delimitación, aunque no del todo satisfactoria puesto que no deja de ser un artificio matemático de límites numéricos arbitrarios y basado en modelos hidrológico-hidráulicos de dudosa precisión, suele tener una muy buena correlación con elementos geomorfológicos muy bien caracterizables empíricamente, como la envolvente del cinturón de meandros o de aquellas zonas donde las avenidas generan formas erosivas y sedimentarias.

La geomorfología en la determinación de las zonas inundables

Al igual que ocurría con la definición de cauce natural o álveo, las zonas inundables en el antiguo RDPH venían determinadas única y exclusivamente con criterios hidrológico-hidráulicos: "*... los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo periodo estadístico de retorno sea de quinientos años*.."(Art. 14.3). De esta delimitación han derivado consecuencias parecidas a las ya referidas para el cauce, tanto en el ámbito técnico como práctico.

La modificación del RDPH mantiene la citada definición de la zona inundable, pero añade *"... atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, así como de series de avenidas históricas y documentos o evidencias históricas ..."* (Art. 14.1).

De forma análoga a como se hace con el cauce, se equiparan los estudios geomorfológicos a los hidrológicos e hidráulicos, e incluso se anteponen en la redacción. Esto no debe significar, al contrario de lo que se venía haciendo hasta ahora, que unos primen sobre otros sino, como dice el artículo, se tomará la decisión que resulte más adecuada según la problemática y la información disponible. Tampoco debe conllevar que cada estudio de zonas inundables sea una recopilación inconexa de los diferentes estudios, que sin relación entre ellos se apilen en sucesivos mapas y anexos. Lo ideal es que estos métodos y criterios se integren, complementen y combinen, como ya existen experiencias prácticas desde hace décadas (Lastra *et al*., 2008).

La geomorfología en el SNCZI

El apartado 3 del artículo 14 de la modificación del RDPH recoge la aparición del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, que viene a sustituir e integrar buena parte de las actividades del proyecto LINDE y otros semejantes (Yagüe, 2007).

Para llevar a cabo el diseño del Sistema y el seguimiento de su desarrollo, el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Dirección General del Agua, inicia en el año 2005, con un grupo de trabajo interno sobre inundaciones, las necesarias modificaciones de la Ley de Aguas y de su normativa en lo referente al DPH y a la gestión de las zonas inundables. Este equipo de trabajo es el responsable de la redacción de los borradores del Real Decreto 9/2008, aprobado el 11 de enero. En el año 2006 el grupo fue ampliado incorporando otros representantes del propio Ministerio de Medio Ambiente (DGA, CC.HH., SGTB...), otros organismos de la AGE y universidades (CEDEX, IGME, DG Costas, DGPCE, INDUROT...) Su objetivo es realizar el seguimiento de la implantación de la Directiva Marco del Agua y asesorar a los representantes españoles en materia de la nueva Directiva de Gestión del Riesgo de Inundaciones, y diversos grupos europeos de trabajo (EXCIMAP, EXCLUP...). Este Grupo se encargará de redactar la guía metodológica y de recomendaciones para la elaboración de los nuevos estudios de delimitación de la zonación aquí propuesta. Los primeros borradores de esa guía y de los pliegos (Fernández, 2009) técnicos para los concursos de ejecución de los trabajos, tienen un apartado específico donde se incorporan múltiples fuentes de datos, criterios y métodos geomorfológicos, siguiendo el espíritu de la modificación del RDPH.

SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES. ESTUDIO PILOTO RÍO CARRIÓN (Tramo Villoldo)

Como se ha indicado en el apartado anterior, a partir de la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (*Real Decreto 9/2008*, de 11 de enero) se establece un cambio en la prelación de los criterios a aplicar a la hora de delimitar las áreas inundables: se incorporan los criterios geomorfológicos e históricos en igualdad de condiciones a los hidrológico-hidráulicos clásicos (Marquínez *et al*., 2008). Así mismo se diseña un Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), una Comisión Técnica que elabore una *Guía Metodológica* de aplicación de los criterios geomorfológicos-históricos, y la selección de tres *Zonas Piloto* donde ensayarla: sobre ríos cantábricos (Nalón), en ramblas mediterráneas (Palancia), y en ríos meseteños atlánticos (Carrión).

El presente apartado tiene por objeto mostrar los métodos empleados y los resultados obtenidos en la *Zona Piloto del río Carrión* (Tramo Villoldo, junio 2009), y discutir las particularidades reveladas en la delimitación de zonas inundables en el Medio-Bajo Carrión (Cuenca del Duero, Palencia), por ser un claro ejemplo de un río de cuenca sedimentaria, de régimen atlántico y regulado en cabecera (embalses de Compuerto, Camporredondo, Velilla con capacidades de 90, 70 y 1,8 hm^3 respectivamente). Los principales resultados del citado estudio se han recogido en un informe-memoria (Morales y Ortega, 2009) y en diferentes generaciones de mapas.

En este tramo de Villoldo, el Carrión muestra un canal único (de dirección NO-SE) de alta-media sinuosidad (meandriforme), que discurre por un valle en artesa con un sistema de terrazas asimétrico y sobre una amplia y variablemente funcional llanura aluvial, fuertemente intervenida por la mano del hombre (canales, choperas, cultivos...), y donde recibe la confluencia de la Cueza (río autóctono del interior de la cuenca del Duero).

Metodología

Siguiendo las indicaciones de la Comisión Técnica del SNCZI, para el análisis y elaboración de la cartografía geomorfológico-histórica se empleó la *Guía Metodológica* elaborada ex profeso (Fernández, 2009), que se apoya fundamentalmente en dos grandes pilares:

1. El *análisis histórico*, permite contar con información de episodios realmente ocurridos, valorar la intensidad y magnitud de los mismos, los espacios afectados y los efectos generados. Su análisis es ineludible por varias razones: los datos históricos suelen abarcar un período temporal bastante más prolongado que la información de carácter meteorológica (observatorios) e hidrológica (aforos); su exámen ayuda a perfilar y delimitar el área inundable y, sobre todo, la recurrencia de los episodios aporta información de calados en lugares y momentos concretos; permite tener imágenes reales de acontecimientos ocurridos, alusiones concretas a parajes afectados, efectos ocasionados sobre infraestructuras...; a partir de sus datos se puede establecer una tipología de inundaciones; permite, además, ajustar los modelos hidrológico-hidráulicos así como validar sus conclusiones.
2. El *análisis geomorfológico* trata de reconocer e interpretar las diversas evidencias geomorfológicas asociadas a la dinámica natural de los ríos y de las inundaciones (erosivas y sedimentarias), así como valorar los diversos cambios de trazado fluvial habidos (estrangulamientos, avulsiones, rotura de diques o *levées*, ocupación de canales abandonados…). En definitiva, presta atención al análisis morfodinámico y morfoevolutivo de la corriente fluvial, analizando la geometría del canal para identificar diversas formas y depósitos formados tras la producción de episodios de inundación.

Cada uno de estos estudios cuenta con una secuencia sistemática precisa.

El análisis histórico de las inundaciones

Ha seguido un proceso metodológico que ha pasado por diferentes etapas. En concreto, ha sido necesaria la consulta y revisión de diferentes fuentes documentales, publicaciones, la realización de entrevistas a la población afectada y la validación de los datos obtenidos.

El punto de partida ha sido la elaboración de un *Catálogo de Inundaciones* que se ha desglosado en dos: uno, referido a toda la Cuenca del río Carrión (1860-1959) y otro específico del área analizada (1960-2008), de mayor precisión y cantidad de datos. Su información resulta fundamental para establecer el número, frecuencia, intensidad y duración de los episodios de inundación. Elementos de base en cualquier estudio de peligrosidad del riesgo.

En su elaboración han sido de gran ayuda la consulta del *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas* (1985), *Las Inundaciones en España* (1988), el artículo de C. Morales & M.ª T. Ortega (2002) y la consulta de la prensa diaria de *El Norte de Castilla* (1960-2008) y *El Diario Palentino* (1985-2008).

En su estructura se destacan diferentes campos para cada episodio de inundación: nivel de intensidad, número de orden, fecha (duración), causa (dinámica), ríos afectados, caudales máximos y medios, precipitación media, y efectos ocurridos (cortes de carreteras, agricultura, pueblos inundados... [Tabla 2]).

Por otra parte, para cotejar y comprobar los cambios evolutivos habidos en el trazado del río y otras morfologías más actuales se han consultado diversas fuentes: mapas geológicos de distintas fechas (1856, 1952), topográficos (1963, 1973), fotografías aéreas verticales para visión estereoscópica de diversos años (1956/57, Junta de Castilla y León…), ortofotografía digital obtenida de varias fuentes (PNOA, SigPAC, 2005, 2007), *Google Earth,* etc.

La valoración de la intensidad y los calados de los episodios se ha deducido principalmente de las entrevistas realizadas a la población ribereña de este tramo del Carrión (Villoldo, Castrillejo de la Olma, Manquillos, Perales, Ribas de Campos, Monzón de Campos y Husillos). Su información tiene una gran aplicación práctica pues ayuda a completar el inventario de sucesos catalogados, perfila temporalmente determinados eventos, delimita la extensión superficial de los mismos (sobre todo los más recientes), y refuerza la posterior comprobación *in situ,* a partir del trabajo de campo, de la zonación propia del área inundable.

N. I	Nº	Fecha	Causa	Cuenca Carrión	Tramo fluvial estudiado				
				Ríos afectados	Caudales[1]		Precipitación[2]		Carreteras cortadas Pueblos más afectados
					Qmed	Qmáx	Villoldo	Monzón	
	1	27/30-I-1960	Temporal lluvias. Deshielo	Ucieza	55,94	62,20	--	49,8	Ribas de Campos (daños en la red de acequias).
	2	8/10-II-1960	Temporal lluvias. Deshielo	Carrión, Ucieza	46,88	48,80	--	36,3	Ribas de Campos (daños en la red de acequias).
x	3	18/25-II-1960	Temporal lluvia y nieve	Carrión, Ucieza	59,43	66,80	--	51,1	---
	4	13/19- III- 60	Tormentas	Ucieza	52,93	60,00	--	17,3	Ribas de Campos y Amusco
	5	27-X a 6-XI-60	Temporal lluvias	Carrión, Valdeginate, Retortillo	65,70	73,50	--	62,0	---
x	6	17/27-XI-1960	Temporal lluvias	Carrión, Valdeginate, Ucieza	80,72	112,00	--	67,8	---
xx	7	22/30-XI-1961	Temporal lluvia y nieve. Deshielo	Carrión, Valdeginate, Ucieza, Cueza	99,13	125,00	--	73,9	---

N.I (Nivel de Intensidad): Inundaciones de intensidad alta (x) e Inundaciones de intensidad muy alta (xx)
[1] Caudales diarios en m^3/s del aforo de Villoldo. Confederación Hidrográfica del Duero.
[2] Datos de precipitación diaria en mm de Villoldo y Monzón. Delegación Meteorológica Territorial del Duero.
Ftes.: *Catálogo de Inundaciones de la Cuenca del Duero (1959-2008)*. Grupo de Investigación en Riesgos Naturales NATRISK (Universidad de Valladolid). *Catálogo de inundaciones históricas de la Cuenca del Duero*. Ministerio del Interior. Dirección General de Protección Civil y Emergencias. CNPC (1988).

Tabla 2. Extracto de dos años del Catálogo de Inundaciones del Carrión (Tramo Villoldo). Período 1960-2008.

Para determinar las causas de las inundaciones se han consultado los Boletines Meteorológicos Diarios del INM (hasta 2008, luego AEMET), dado que a partir de ellos se conoce la génesis y dinámica de las mismas, lo que permite establecer una tipología al respecto y valorar su peligrosidad, así como desarrollar criterios para la predicción y previsión de los episodios de inundación.

Finalmente, para validar los episodios computados se cotejan éstos con las precipitaciones diarias de Villoldo y Monzón de Campos, y con los datos diarios de caudales del aforo de Villoldo en el periodo 1960-2008. Esta sistemática resulta fundamental porque ayuda a concluir la duración del episodio de inundación (día de subida del caudal, días de mantenimiento de aguas altas, día de bajada del caudal), y matiza la importancia del episodio por la magnitud del caudal y la prolongación y/o intensidad de las precipitaciones.

El análisis geomorfológico de las inundaciones

Se ha realizado a partir de las fuentes documentales, cartográficas y bibliográficas así como de la información que se ha extraído directamente del trabajo de campo. El análisis se ha apoyado tanto en la cartografía analógica como digital, destacando por su gran ayuda la fotografía aérea del año 1956 (georreferenciadas y visión estereoscópica), extraordinario referente del estado del río en régimen natural o seminatural; la ortofotografía del PNOA (25 cm de resolución en formato "*ecw* en el *datum* ETRS-1989); y las imágenes LIDAR (realizadas en 2009 por Ambisat SL, para el LINDE del Carrión[1]), que aportan información de precisión y calidad (con frecuencia no visible en el campo por su escala, perspectiva, etc.), pese a las limitaciones propias de esta herramienta (sobreestimaciones de variaciones topográficas, inversiones del relieve, filtrado de la información no topográfica… [Figura 3]).

No se ha establecido un criterio de usos específico para cada una de estas fuentes, optándose en cada caso por la que ofreciera mejor información posible y la más coherente con lo observado en el campo.

El recorrido del área piloto resulta fundamental para tener observaciones directas de las diferentes secciones de los cauces del Carrión y la Cueza. Esta labor ha de realizarse con detalle y profundidad a fin de recabar el máximo de información sobre la presencia o ausencia de las diferentes formas erosivas y sedimentarias asociadas a los diversos episodios de inundación. Como apuntaron Ortega y Garzón (2006), "la cartografía de las áreas inundables debería basarse lo más posible en datos directos de campo, con los que puedan contrastarse los modelos numéricos teóricos".

[1] Estudio de zonas inundables y delimitación del dominio público hidráulico de los ríos Carrión, Valdeginate, Cueza y Ucieza.

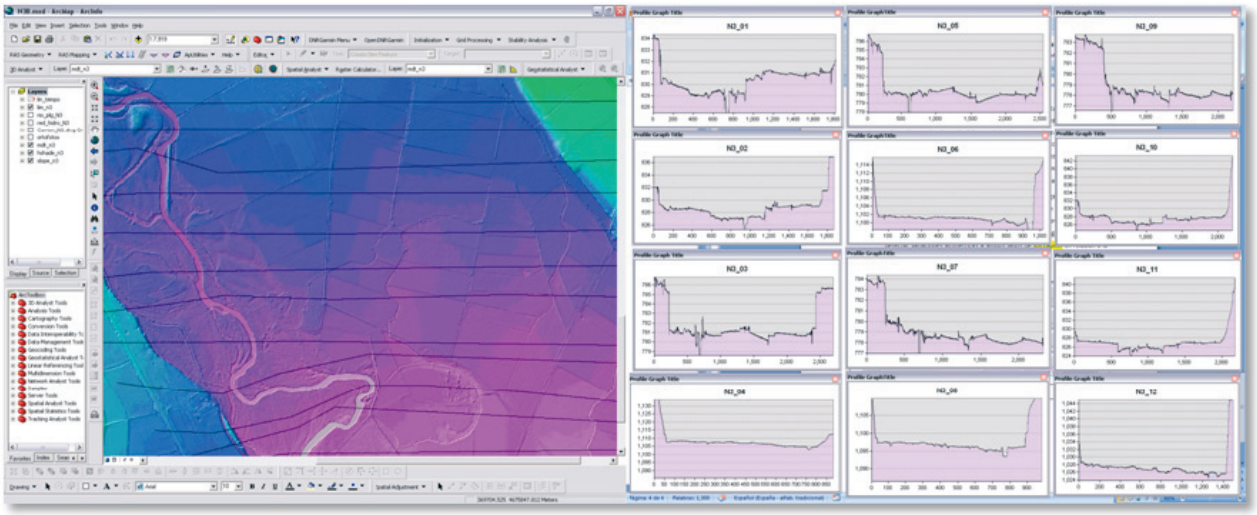


Figura 3. MDT y perfiles topográficos realzados del tramo sur del área de estudio a partir de la imagen LIDAR.

Los objetivos perseguidos son varios: reconocer *in situ* las formas de relieve como condicionante de las inundaciones; apreciar las evidencias geomorfológicas fruto de los desbordamientos; realizar perfiles para delimitar la sección de la llanura y de sus márgenes externas y apreciar posibles cambios de trazado fluvial; localizar marcas y niveles históricos; identificar variaciones altitudinales a lo largo de la orilla del cauce para identificar zonas de egresión; jerarquizar tramos en el cauce atendiendo a su mayor o menor susceptibilidad al desbordamiento; verificar algunos aspectos posiblemente sobredimensionados del análisis de las imágenes LIDAR; valorar la importancia de otros fenómenos geológicos asociados a las inundaciones (movimientos de ladera, sufusión, karstificación…); comprobar las modificaciones antrópicas realizadas sobre el cauce y sus márgenes, así como la localización de las estaciones de aforo y pluviométricas; y realizar fotografías actuales, encuestas y entrevistas a la población.

El trabajo de campo permite pues determinar la extensión y ámbito de los espacios inundables y de aquéllos que deben quedar considerados dentro de las distintas zonas a cartografiar.

Resultados

A partir de la información sistematizada en el *Catálogo de Inundaciones* se han obtenido una serie de resultados. En concreto, se ha realizado un estudio del grado de intensidad de las inundaciones, basado en los caudales, las precipitaciones acumuladas y los efectos ocurridos, que ha llevado a considerar como: *Intensidad muy alta*, aquellos episodios con caudales por encima de 90 m^3/s (el 19,5% de los episodios); *Alta,* caudales entre 70-80 m^3/s (el 24,4%); y *Media-Baja,* caudales inferiores a 70 m^3/s (el 56,1%).

La duración de los episodios se ha estimado a partir de la información disponible de cada uno de ellos, fuentes documentales y hemerotecas y de las entrevistas a la población, cotejándose siempre con los datos de caudales y precipitaciones para matizar el comienzo y finalización de cada evento. Esto ha llevado a distinguir entre *duraciones breves,* de menos de 5 días, *medias* entre 6-10 días y *altas* de más de 10 días (Figura 4).

Igualmente se ha analizado su manifestación temporal y génesis. La mayor parte se producen en el período central del invierno —diciembre-febrero— (63,4%), seguidas por las de los meses de inicio y fin del mismo —noviembre y marzo— (17,1%) siendo prácticamente nulas las estivales (2,4%). Así pues, son algo propio del otoño-invierno, debidas a las típicas precipitaciones de temporal (circulaciones zonales del oeste o noroeste, vaguadas de alta baroclinicidad sitas al oeste de la Península Ibérica) asociadas al paso del Frente Polar que provocan lluvia y/o nieve durante varios días consecutivos. A ello se unen otras causas como los deshielos, o los desembalses (Tabla 3).

Los períodos de recurrencia calculados tanto a partir de los episodios constatados como de los deducidos (sobre la información de otros puntos aguas abajo), permiten confirmar la alta frecuencia de inundabilidad de este tramo del Carrión, estimándose períodos de recurrencia siempre por debajo de los diez años (a veces mucho menos).

Período	Causa Principal								Causas Secundarias			
	Temporal lluvias		Temporal lluvia-nieve		Total temporales		Tormentas		Deshielo		Desembalse	
	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%	N.º	%
1960-1979	13	31,7	6	14,6	19	46,3	2	4,9	6	14,6	1	2,4
1980-2008	7	17,1	12	29,3	19	46,3	1	2,4	12	29,3	3	7,3
Total (*)	**20**	**48,8**	**18**	**43,9**	**38**	**92,7**	**3**	**7,3**	**18**	**43,9**	**4**	**9,8**

Tabla 3. Causas de las inundaciones en la cuenca del Carrión. Tramo Villoldo (1960-2008).
(*). El porcentaje se calcula respecto al número total de episodios habidos en el período de análisis (41 casos)

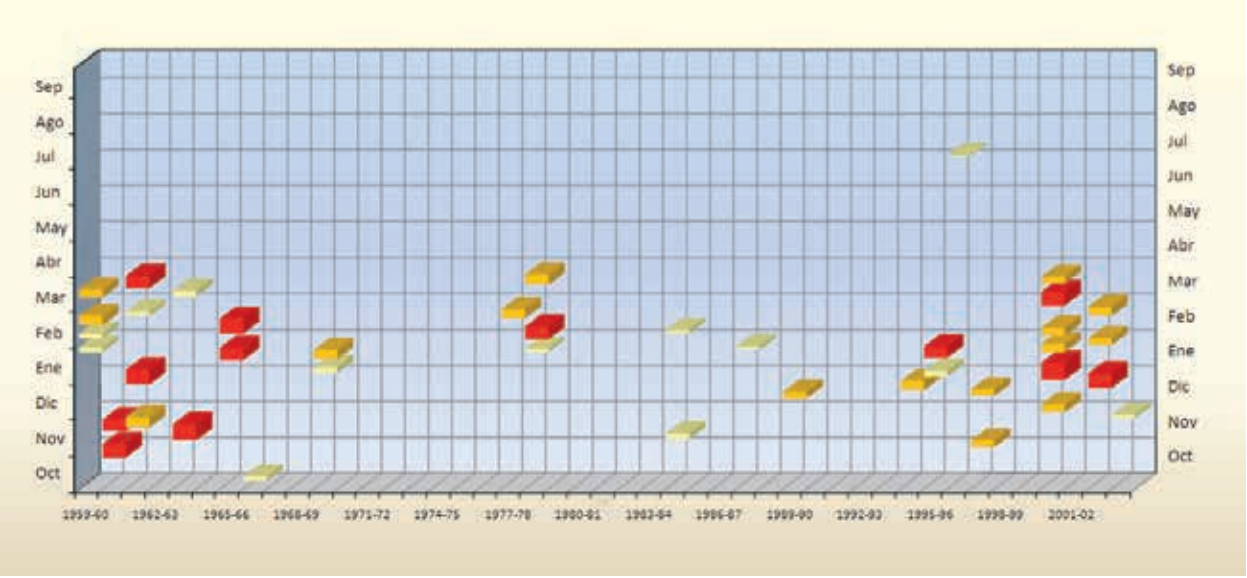


Figura 4. Distribución mensual y duración de los episodios de inundación en el río Carrión (1960-2008)
En Rojo, inundaciones de más de 10 días de duración; Naranja, 5-10 días duración; y Amarillo, menos de 5 días.

Por otro lado, se ha realizado un estudio evolutivo comparando el cauce histórico (a partir de la fotografía aérea del 56/57) con el actual (a partir de las imágenes del PNOA, LIDAR, y el trabajo de campo). Ello ha permitido identificar dos sectores con dinámicas distintas: el Carrión hasta la confluencia con la Cueza, y el Carrión después de la citada confluencia. En cada uno de estos sectores se ha efectuado el análisis morfodinámico (histórico, evolutivo, geomorfológico) y su relación con los elementos cartográficos a definir según el SNCZI (mapas a escala 1:5 000).

Toda esta información geomorfológico-histórica, obtenida del trabajo de campo y gabinete, ha quedado plasmada en los diferentes mapas elaborados (Figuras 5 a 8).

Discusión

El estudio piloto del Carrión ha permitido reconocer y valorar las bondades y problemas que representa la aplicación de los criterios de la Guía Metodológica del SNCZI (Fernández, 2009)a un río meseteño atlántico, así como el descubrir ciertas particularidades, no recogidas en la misma, que se consideran de importancia por lo que puedan aportar a la misma:

1. El estudio histórico a partir de fuentes y documentos escritos, permite obtener un *Catálogo de Inundaciones* más detallado que el deducido de las encuestas, al dar más información sobre la génesis (causa), intensidad (caudales medios y máximos), duración (fecha y número de días), recurrencia (número de años) y efectos de los episodios. Aspectos muy importantes en la plasmación cartográfica (zonación de la inundabilidad).
2. Tratar la duración de los eventos aporta a su vez información sobre su intensidad, génesis y tipología, siendo ésta muy distinta a la de otros ríos peninsulares (precipitaciones prolongadas con o sin deshielo). En la jerarquización de episodios se ha de valorar

tanto su duración como los caudales en ellos registrados.

3. Analizar las causas (dinámica atmosférica) ayuda a establecer la tipología y efectos que deparan, además de poner en evidencia que en este ámbito el modelado hidrológico no debe hacerse únicamente en función de "tormentas tipo" ni de los efectos motivados por el máximo caudal anual.
4. En la validación de episodios es fundamental comparar las fechas detectadas con los caudales y los registros pluviométricos habidos no sólo durante el episodio sino en fechas anteriores y en tramos de la cuenca aguas arriba del área de estudio.
5. Deben cartografiarse las áreas de confluencia, no sólo de grandes afluentes sino de pequeños arroyos temporales al condicionar las dimensiones de la Zona de Flujo Preferente (ZFP).
6. Deben representarse los restos de trazados antiguos (meandros abandonados, cauces no activos alejados de la corriente principal y que no forman parte del área inundable actual). Se propone incluir una *ZFP no funcional o histórica*.
7. Se han de valorar los isleos que aparecen dentro de los lóbulos de los meandros o en una determinada margen del río que, aunque pertenecientes al DPHP, se manifiesten como terrenos no inundables.
8. Sobre terrenos muy antropizados es muy difícil el reconocimiento de evidencias geomorfológicas. La ti-

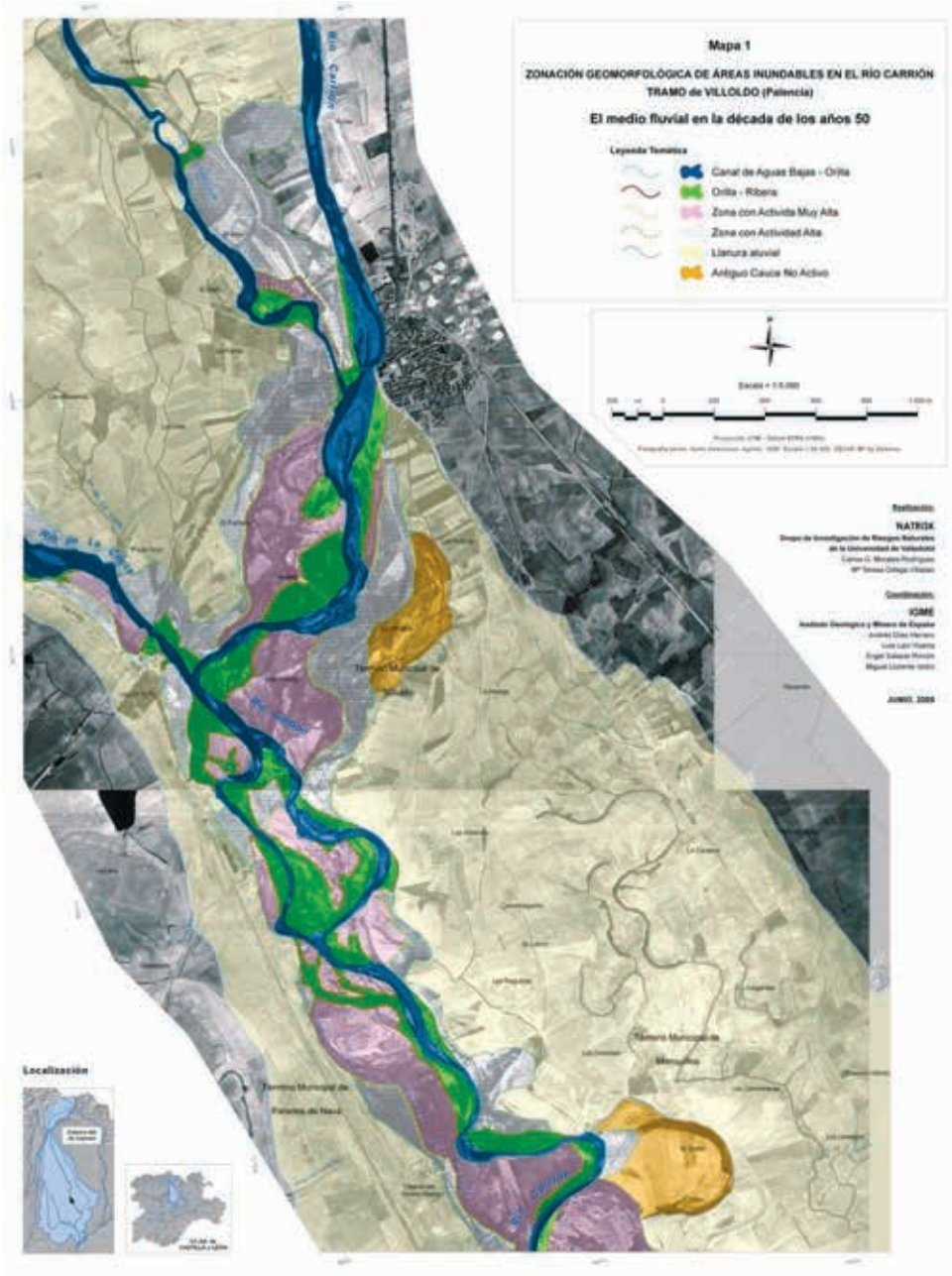


Figura 5. Zonación del medio fluvial en la década de 1950 (establecida como régimen más natural).

pología de flujos canaliformes (A, B y C de la Guía Metodológica) no siempre tiene que ver con el distinto grado de inundabilidad, ni con la mayor o menor proximidad al cauce. Puede que no haya evidencias o que apenas se intuyan y formen parte de un terreno altamente inundable. Se propone incluir la categoría de *Evidencias antropizadas* (orillas artificiales o antrópicas, *levées* y terrazas realzadas…).

9. Los cursos con cambios significativos de trazado, por dinámica natural o artificial, no suelen mantener la correspondencia de Cauce Histórico con DPHP, sobre todo si los terrenos abandonados tienen remotas posibilidades de volver a ser ocupados. Esto puede motivar numerosas dudas al delimitar acertadamente el DPHPa y el DPHPb. Se propone sopesar otras posibles dinámicas fluviales o emplear delimitaciones más comprehensivas , como un *DPH genérico*.
10. Se propone considerar otra Zonación de Inundabilidad más acorde a la realidad dinámica del río en cuestión y a los impactos socioeconómicos que pueda generar: Inundabilidad Muy alta (periodo de retorno inferior a 10 años), Alta (entre 10-50 años), Media (entre 50-100 años) y Baja (mayor a 100 años). Se desestima el empleo de Inundabilidad Máxima, al considerarse implícita en el último rango y en tanto que el término puede ser contradictorio ("máximo" haría referencia una componente espacial y no temporal).

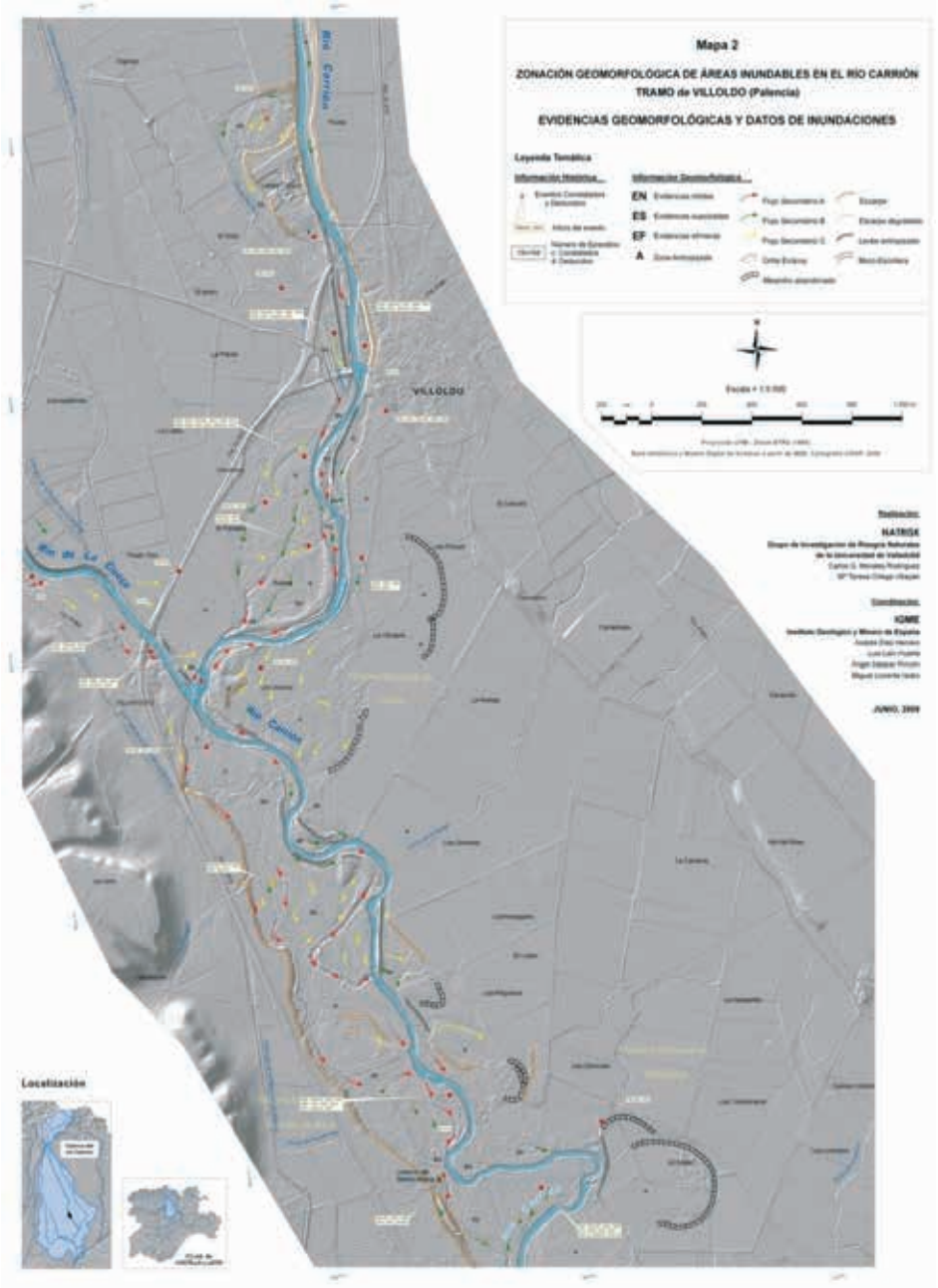


Figura 6. Evidencias geomorfológicas e información de inundaciones, histórica (eventos constatados y deducidos) y geomorfológica (flujos secundarios, evidencias nítidas...).

Todas estas apreciaciones deben interpretarse como un intento de aportar nuevos argumentos de las características y problemáticas inherentes a los ríos de interior. Es el propósito de los autores que el diseño del SNCZI contemple la mayor diversidad posible de escenarios de comportamiento.

Conclusiones

El *Piloto Carrión* ha tenido como objetivo prioritario contribuir al desarrollo metodológico del estudio y delimitación de las áreas inundables de la península Ibérica, y aportar ideas respecto a la definición y establecimiento del Dominio Público Hidráulico Probable, Zona de Flujo Preferente y Zonificación del área inundable, según establece el SNCZI.

El punto de partida ha sido la aplicación de los principios históricos y geomorfológicos recogidos en la *Guía Metodológica del SNCZI*. Ello ha permitido comenzar con una base sólida de contenidos, verificar y comprobar determinados procesos fluviales, pero también evidenciar la ausencia de tratamiento de algunos aspectos, y por lo tanto, la posibilidad de proponer otros nuevos que añadir a los existentes.

El hecho de tratarse de un espacio del interior peninsular fuertemente intervenido por el hombre, represen-

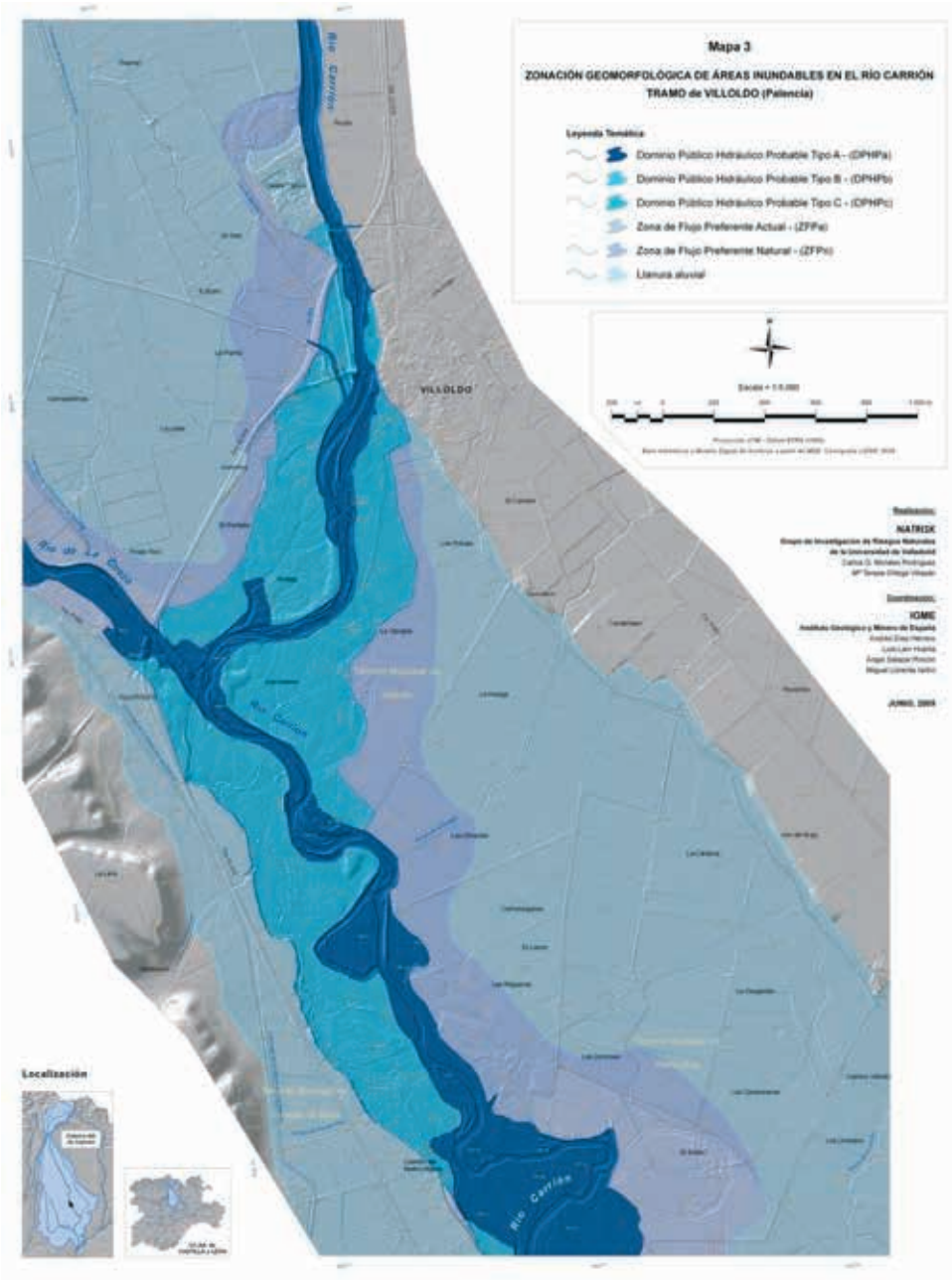


Figura 7. Zonación geomorfológica del SNCZI: Dominio Público Hidráulico Probable (en sus modalidades DPHPa, DPHPb y DPHPc), Zonas de Flujo Preferente (ZFP actual y natural), y llanura aluvial.

ta un modelo fluvial distinto al tratado como modelo en la Guía Metodológica. Las actividades económicas desarrolladas en estas llanuras aluviales han modificado sustancialmente el tipo, dimensión y disposición de las características fluviales y de sus evidencias geomorfológicas. Además, es un espacio donde el Carrión ha experimentado importantes cambios de trazado en los últimos 50 años, donde recibe el aporte de arroyos y caces, y donde tiene lugar una confluencia fluvial. Por lo tanto, su estudio contribuye a aumentar las posibilidades a contemplar en el comportamiento y dinámica de los ríos. En unos pocos kilómetros coinciden trazados diversos (rectilíneos, trenzados y meandriformes), lo que permite tener una valoración más diversificada sobre la evolución del río.

Al hilo de la investigación han ido surgiendo problemáticas diversas, particularidades propias, que se ha considerado oportuno tener en cuenta por lo que supone de posible mejora al entendimiento de la diversidad geomorfológica y la representación cartográfica de la dinámica fluvial. Algunos de los aspectos que conviene subrayar son:

— La aplicación de otros procedimientos metodológicos complementarios y/o permutables cuando se carezca

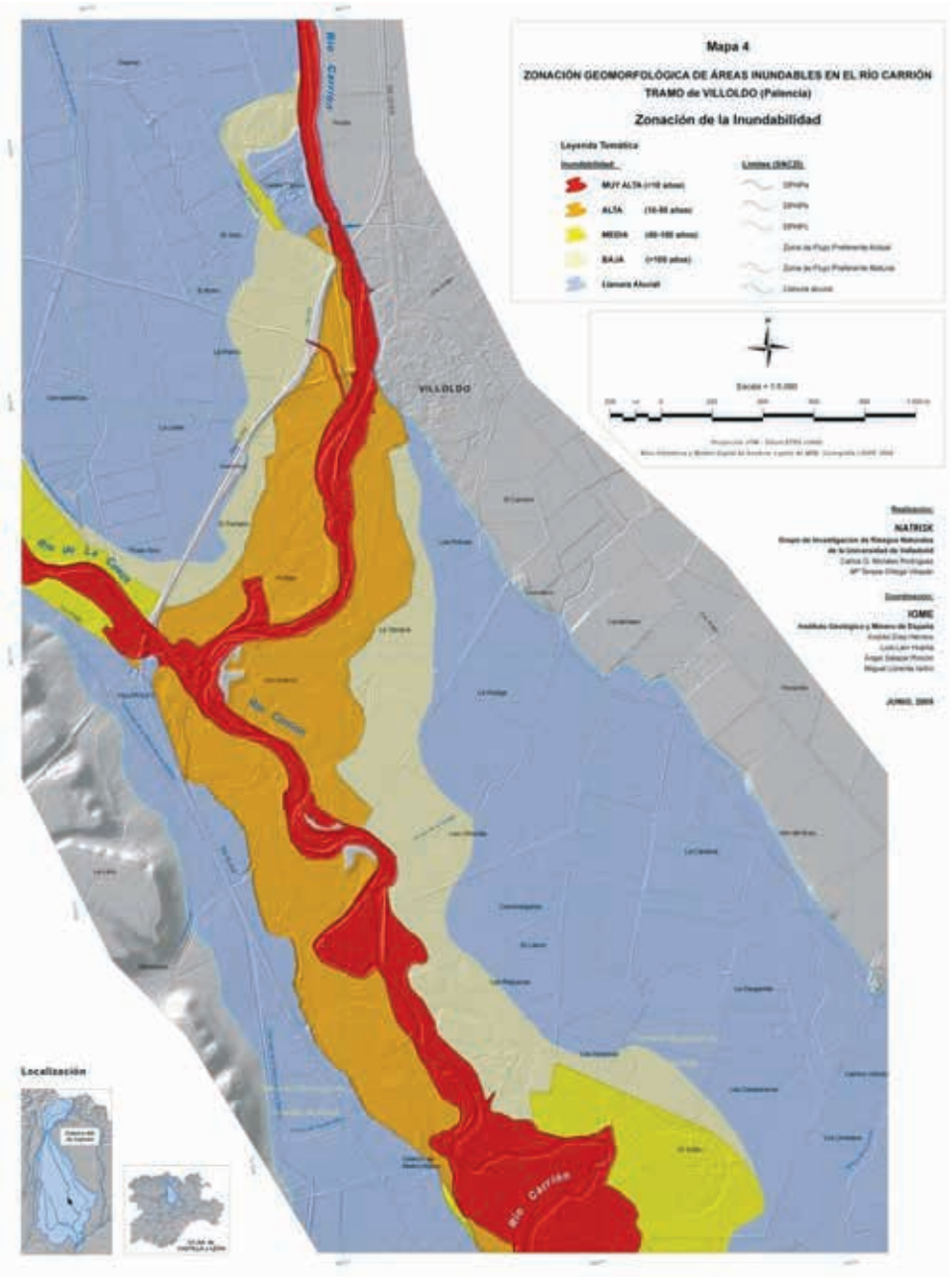


Figura 8. Zonación de la Inundabilidad: Muy alta (< 10 años), Alta (10-50 años), media (50-100 años) y Baja (> 100 años).

de cierta información (encuestas, calados, fotos…), como ha sido la consulta de la prensa diaria, pues facilita la elaboración de un Catálogo de Inundaciones con una estructura más completa (registro homogéneo y continuo en el tiempo).

— Se sugiere el tratamiento de la duración de los episodios de inundación, las causas meteorológicas que las generan, o el establecer una tipología en las mismas. Aspectos de indudable importancia al permitir valorar su intensidad, recurrencia y peligrosidad.

— Se proponen nuevos elementos cartográficos, como una gama específica para las evidencias antropizadas; la presencia de diques (naturales o artificiales), acequias y canales artificiales; la existencia de cauces antiguos no activos; el tratamiento de los espacios no inundables (isleos); la posibilidad de hablar de una ZFP histórica o no funcional; la utilización de categorías comprehensivas (DPHP genérico), etc.

— Se señala un procedimiento de conexión entre los modelos histórico-geomorfológicos con los hidrológico-hidráulicos mediante el uso de Criterios de excedencia para la construcción de las series de caudales y el análisis de las causas genéticas. Además de la posibilidad de ajustar unos y otros, pues aportaría argumentos para la prevención.

— Se plantea una nueva zonación de la inundabilidad.

El estudio realizado demuestra la importancia que tienen los estudios geomorfológico-históricos a la hora de delimitar el DPHP y la ZFP. Aunque su análisis no es exclusivo para la delimitación de tales elementos, sí ha demostrado que cartográficamente se afina con mayor precisión que la que dan los modelos hidráulicos, al menos en este sector. La posibilidad de reconocer diferentes DPHP (a, b y c) y ZFP (n y a), permiten valorar con mayor detalle el grado de inundabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por la Encomienda de gestión entre el IGME y la Dirección General del Agua. Los autores agradecen las facilidades dadas para su realización a las personas responsables y coordinadoras de la misma por ambas partes: Juan Antonio López Geta, Loreto Fernández, Carlos Martínez y Carmen Antón (IGME), y Cristina Danés, Manuel Varela y Jesús Yagüe (DGA); agradecimiento extensivo a todos los compañeros del IGME que han participado en las otras 13 actividades de la Encomienda. También deseamos agradecer la colaboración prestada en las diferentes tareas a J. Marquínez (C.H. Cantábrico), R. Goya y M.A. Cuadrado (CHD), E. Fernández y S. Anadón (Indurot), J. Lastra (AcuaNorte), P. Rodríguez (NATRISK-UVa), Ambisat S.L., y los miembros del Grupo de Inundaciones de la DGA y la comisión técnica del SNCZI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, F.J. (Coord.) (1985): *Geología y prevención de daños por inundaciones*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 421 pp.

Barnolas, M. y Llasat, C. (2007): *Metodología para el estudio de inundaciones históricas en España e implementación de un SIG en las cuencas del Ter, Segre y Llobregat*. Monografías M-90, CEDEX, Madrid, 264 pp.

Barriendos, M. (1994): *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (Siglos XV-XIX)*. Tesis Doctoral inédita, Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Barcelona.

Barriendos, M. y Martín-Vide, J. (1998): Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coast Area (14th-19th Centuries). *Climatic Change*, 38, 473-491.

Benito, G. (2006): Riesgos de inundaciones: tendencias históricas y perspectivas de acuerdo con el cambio climático. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 20(3-4)- 29-44.

Benito, G.; Barriendos, M.; Llasat, C.; Machado, M.J. y Thorndycraft, V.R. (2005): Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. En: Moreno, J.M. (Coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*, Ministerio de Medio Ambiente, 527-548.

Benito, G.; Díez, A. and Fernández de Villalta, M. (2003a): Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 58, 171-192.

Benito, G.; Díez, A. and Fernández de Villalta, M. (2004): Flood response to NAO and Solar Activity in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 66, 27-28.

Benito, G.; Machado, M.J. and Pérez-González, A. (1996): Climate change and flood sensivity in Spain. In: *Global Continental Changes: the context of Palaeohydrology*. Geological Society Special Publication, 115, 85-98.

Benito, G.; Rico, M.T.; Sánchez Moya, Y.; Sopeña, A.; Thorndycraft, V.R. y Barriendos, M. (2008b): Evaluación de los impactos climáticos y antrópicos en la hidrología de paleoinundaciones del río Guada-

lentín. En: J. Benavente y F.J. Gracia (Eds.), Trabajos de Geomorfología en España. X Reunión Nacional de Geomorfología, Cádiz, 373-376.

Benito, G.; Sopeña, A.; Sánchez-Moya, Y.; Machado, M.J. y Pérez-González, A. (2003b): Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) Turing the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1737-1756.

Benito, G.; Thorndycraft, V.R.; Rico, M.; Sanchez-Moya, Y. and Sopeña, A. (2008a): Palaeoflood and floodplain records from Spain: Evidence for long-term climate variability and environmental changes. *Geomorphology*, 101, 68-77.

Bentabol, H. (1900): *Las aguas de España y Portugal*. Comisión del Mapa Geológico de España. Viuda e Hijos de M. Tello, Madrid.

Comisión Nacional Protección Civil (1988): *Las Inundaciones en España*. Informe General. 2 volúmenes, y *Las inundaciones en la España peninsular*. Informe de Síntesis y Anejos. 2 volúmenes. CTEI.

CTEI. Dirección General de Protección Civil y Emergencias (1985): *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas*, en su apartado referente a la *Cuenca del Duero*. *Estudio de Inundaciones históricas. Mapa de Riesgos Potenciales.* Ministerio del Interior. Secretaría General Técnica.

Díez, A. y Laín, L. (1998): Aportaciones de los estudios realizados por el ITGE a la prevención del riesgo de inundaciones en España. in: Gómez, A. y Salvador, F. (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, Universitat de Barcelona, 603-612.

Díez-Herrero, A.; Benito, G. and Laín-Huerta, L. (1998): Regional Palaeoflood Databases Applied to Flood Hazards and Palaeoclimate Analysis. In: *Palaeohydrology and Environmental Change*. Chapter 24, pp. 335-347, John Wiley & Sons Ltd., Chichester (England).

Díez, A.; Benito, G.; Casas, M.A.; Barriendos, M.; Fernández, M. y Lorenzo, A. (2003): Aplicación de los SIG a las bases de datos de paleoinundaciones: Paleotagus y SPHERE-GIS. *Seminario Euromediterráneo sobre Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Gestión de Desastres. Foro Euromediterráneo sobre Prevención de Catástrofes*, Madrid,, 6 al 8 de octubre de 2003.

Díez-Herrero A.; Benito, G.; Porat, N. & Gutiérrez-Pérez, I. (2005): Upper Pleistocene palaeofloods in the Duratón River gorge (Central Spain). In: F. Gutiérrez, M. Gutiérrez, G. Desir, J. Guerrero, P. Lucha, C. Martín, J.M. García-Ruiz (Eds.), *Abstracts Volume, Sixth Intenational Conference on Geomorphology*. Fluvial Geomorphology and Palaeohydrology, pag. 113. Zaragoza (Spain) September 7-11, IAG-SEG-UZAR.

Díez-Herrero, A.; Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008): *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia n.º 1, 190 págs., Madrid.

Díez Herrero, A., Lain, L., Salazar, A., Castaño, S. y Llorente, M. (2009a, Dtors.), *Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales*. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Centro de Documentación del IGME, julio de 2009, 429 páginas.

Díez-Herrero, A.; Lain-Huerta, L. & Llorente-Isidro, M. (2009b): *A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies*. Publicacions of the Geological Survey of Spain (IGME), Series Geological Hazards /Geotechnics No. 2, 190 pp., Madrid.

Fernández, E. Coord., (2009): *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Estudios históricos y geomorfológicos. (Borrador V5), inédito, Dirección General del Agua, 138 p.

Garzón, M.G.; Garrote, J. y Ortega, J.A. (2008): *Informe-memoria de las subactividades 14.1 y 14.3*. En: Diez Herrero, A., Lain, L. y Salazar, A. (Dtors.), Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas torrenciales. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA, diciembre de 2008, 280 páginas.

Garzón, M.G.; Garrote, J. y Ortega, J.A. (2009): *Informe-memoria de las subactividades 14.2 y 14.4*. En: Diez Herrero, A., Lain, L. y Salazar, A. (Dtors.), Actividad 14. Asesoramiento para la incorporación de fuentes de datos, métodos y criterios geológicos en el análisis y cartografía de áreas inundables por avenidas

torrenciales. Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España (IGME), para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA , julio de 2009, 146 pág.

Lastra, J., Fernández, E., Díez, A. y Marquínez, J. (2008): Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*. 45: 277-293.

Llorente, M. (2007): Impacto del Cambio Climático en las inundaciones. *Jornadas sobre gestión de zonas inundables*, Gijón.

Llorente, M.; Díez-Herrero, A. y Laín, L. (2006): La experiencia del IGME en cartografía de peligrosidad de avenidas torrenciales e inundaciones: de Casiano de Prado a PRIGEO. En: Díez, A.; Laín, L. y Llorente, M. (Eds.), *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, págs. 41-63, Madrid.

Llorente-Isidro, M.; Díez-Herrero, A.; Laín-Huerta, L. & Lastra, J. (2009): Climate Change and Flood Hazard Analysis in Spain. *Workshop on Climate Change and Flooding, Working Group F on Floods*. 8-10 September, Karlstad (Sweden). Session 3: Climate change challenges for risk management and civil protection in relation to floods: focus on prevention and preparedness. Swedish Civil Contingencies Agency.

Marquínez, J., Díez, A., Fernández, E., Lastra, J. y Llorente, M. (2008): "Aspectos geomorfológicos en la modificación del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables". Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008. *X Reunión Nacional de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología*, Cádiz, pp. 377-380.

Morales, C. & Ortega, Mª T. (2002): "Las inundaciones en Castilla y León". *Eria,* 59. Revista cuatrimestral de Geografía (servicio de publicaciones de la Universidad de Oviedo, pp. 305-332.

Morales, C.G. y Ortega, M.T. (2009): *Memoria científico-técnica de métodos histórico-geomorfológicos y mapas de zonación 1:5.000*. En: Diez Herrero, A., Lain, L., Llorente, M. Y Salazar, A. (Dtors.), Estudio piloto del río Carrión (Tramo de Villoldo). Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Madrid, Comisión Mixta de Seguimiento de la Encomienda DGA-IGME y Grupo de Inundaciones de la DGA , junio de 2009, 123 páginas + 4 mapas DIN A-0 a escala 1:5.000.

Moreno, J.M. (Coord., 2005): *Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Centro de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 39 pp.

Oliva, M.; López-Bustins, J.-A.; Barriendos, M.; Muedra, C.; Martín-Vide, J. (2006): Reconstrucción histórica de la Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) e inundaciones en el levante peninsular (1500-2000). *V Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Zaragoza 18 a 21 de septiembre de 2006.

Ortega, J.A. (2007): *Paleocrecidas, avenidas recientes e hidroclimatología en la cuenca media y baja del río Guadiana*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 535 pp.

Ortega, J.A. y Garzón, G. (2003): Palaeohydrology of the Lower Guadiana River Basin. In: *Palaeofloods, Historical Data and Climatic Variability: Aplications in Flood Risk Assesment*, CSIC, Madrid, 33-38.

Ortega, J.A. y Garzón, G. (2004): Influencia de la oscilación del Atlántico norte en las inundaciones del Río Guadiana. In: *Riesgos Naturales y antrópicos en Geomorfología*, CSIC, Madrid, 117-126.

Ortega, J.A. y Garzón, G. (2006): "Interpretación de los depósitos de avenida como clave para establecer la dinámica de la llanura de inundación". En Pérez Alberti y J. López Bedoya (Eds.): *Geomorfología y Territorio*. Actas De la IX Reunión Nacional de Geomorfología. Universidad de Santiago de Compostela. Pp. 629-644.

Ortega, J.A. y Garzón, G. (2009): A contribution to improved flood magnitude estimation in base of palaeoflood record and climatic implications- Guadiana River (Iberian Peninsula). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 229-239.

Rico Sinobas, M. (1850): *Fenómenos meteorológicos en la Península Ibérica desde el siglo IV hasta el XIX*. Manuscrito, 23 4 15, Archivo de la Real Academia de Medicina de Madrid.

Rico, M.T. (2004): *Las paleocrecidas en la cuenca media del río Segre durante el Pleistoceno superior-holoceno: registros morfosedimentarios y análisis hidrológico*. Tesis doctoral inédita, Zaragoza, 398 pp.

Trigo, R.M.; Pozo-Vázquez, D.; Osborn, T.J.; Castro-Díez, Y.; Gámis-Fortis, S. and Esteban-Parra, M.J. (2004): North Atlantic Oscillation influence on

precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 24, 925-944.

Vaquero, J.M. (2004): Solar Signal in the number of floods recorded for the Tagus River Basin over the Last Millenium. Comment on "Magnitude and frequency in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium" by G. Benito *et al* 2003. *Climatic Change*, 66, 23-26.

Villarroya, C. y Sánchez, F.J. (2006): La delimitación del dominio público hidráulico y las zonas inundables en el Proyecto Linde. En Díez, A., Laín, L. y Llorente, M. (Eds.): *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicación*. Publicaciones del IGME, Serie Medio Ambiente, Riesgos Geológicos nº 7, Madrid. 65-72.

Yagüe, J. (2007): El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *Jornadas sobre Gestión de Zonas Inundables*, Gijón, 12 y 13 de noviembre de 2007. DGA (MMA).

Bases de datos y redes de control periódicas citadas

DATOS DIARIOS DE PRECIPITACIÓN de los observatorios de Villoldo y Monzón de Campos, para la serie de observación de que dispone cada uno.

DATOS DE CAUDALES DIARIOS del aforo Villoldo para la serie de observación de que dispone.

EL NORTE DE CASTILLA, Periódico regional. Prensa diaria revisada desde enero de 1960 a diciembre de 2008, con un total de 17.885 periódicos.

EL DIARIO PALENTINO. Periódico provincial. Prensa diaria revisada desde enero de 1985 a septiembre de 2008, con un total de 8.760 periódicos.

FOTOGRAFÍAS AÉREAS Y ORTOFOTOS
- Vuelo de 1956/57, a escala 1:33.000 del A.M.S. americano.
- Varios vuelos de la Junta de Castilla y León a diferentes escalas.
- Vuelo de 2003 del SIGPAC a escala 1: 15.000.
- PNOA: Ortofotografía (2004, 2007).

IMÁGENES LIDAR. Confederación Hidrográfica del Duero. Vuelo 2008.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:25.000). Instituto Geográfico Nacional (IGN). Año 2000.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:50.000). Instituto Geográfico Nacional (IGN). Diferentes años/ediciones (1973, 1992). Hojas: 235 y 273.

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (escala 1:50.000). Centro Geográfico del Ejército. Diferentes años/ediciones (1973, 1992). Hojas: 235 y 273.

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA (escala 1:50.000). Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Varios años (Segunda serie 1.ª edición/Serie Magna). Hojas: 235 y 273.

MAPA HIDROLÓGICO DE CASTILLA Y LEÓN (escala 1:400.000). Junta de Castilla y León - Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Dirección General de Urbanismo y Calidad Ambiental) – 1990.

SEISnet. SISTEMA ESPAÑOL DE INFORMACION DE SUELOS SOBRE INTERNET. www.microleis.com

SEGUNDO INVENTARIO NACIONAL FORESTAL (1986-1996). ICONA. M.º de Medio Ambiente. Varios volúmenes.

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INTERCAMBIO Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Margarita Gómez Sánchez

En este capítulo, se recoge una síntesis de los trabajos llevados a cabo en la Actividad n.º 1 *Diseño y aplicación de un sistema de intercambio de información hidrogeológica,* de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Directora de la actividad

Margarita Gómez Sánchez. Instituto Geológico y Minero de España

Equipo de trabajo

Instituto Geológico y Minero de España (por orden alfabético)

Juan Carlos Gumiel Gutíerrez
Román Hernández Machado
Alfredo Iglesias López
Juana López Bravo
M.ª Eugenia Lozano
Amalia de Mera Merino
Fernando Pérez Cerdán
Ángel Prieto Martín
Pablo Sastre Olmos
Leticia Vega Martín

DISEÑO Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INTERCAMBIO Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA

INTRODUCCIÓN

A través de esta actividad del acuerdo para la Encomienda de Gestión (EG) de la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se ha alcanzado el principal objetivo perseguido y que consistía en que pudieran compartir con ambos organismos, tanto la nueva información hidrogeológica que se elaboraría a partir de las actividades de la EG, como la información ya existente y generada por el IGME, de interés para el MARM, sobre aguas subterráneas y de la que este organismo es depositario.

Por lo tanto, el desarrollo fundamental se centró en establecer la metodología de intercambio y traspaso IGME-MARM de la información hidrogeológica y medioambiental, relacionadas con las aguas subterráneas, definiéndose los mecanismos necesarios de organización, normalización y transferencia.

Los tipos de información que, fundamentalmente, se manejaron dentro de la activad condicionaron las tareas que se llevaron a cabo en el proyecto:

a) Información hidrogeológica de nueva creación, elaborada en la Encomienda de Gestión IGME-MARM: de tipo cartográfico, bases de datos, documental e imágenes. Esta información se generó de manera coordinada y de acuerdo con una sistemática y normalización, que permitió dotar de una integridad propia a la Encomienda. Por esta razón se hizo preciso facilitar, a los responsables de las restantes Actividades de la EG, una metodología de organización y estructura de la información que fuera aplicada en los diversos trabajos que se iban a realizar. Con este fin, se constituyó como un marco general de actuación en el que se consideró fundamental alcanzar la coordinación el resto de las actividades de la EG, en cuanto a unificar, normalizar y sistematizar los formatos de recopilación y transferencia de la información. Al finalizar las 14 actividades de la encomienda, se pretendía obtener un resultado conjunto y homogéneo.

b) Información hidrogeológica histórica, existente en el IGME, de interés para el MARM: de tipo cartográfico, bases de datos, documental e imágenes. Esta información, en principio, presentaba dificultades añadidas al tratarse de información con características y formatos diferentes, por la necesidad de establecer mecanismos de asignación y selección de la información por 'masa de agua subterránea', o por precisar el diseño de mecanismos especiales para la puesta a disposición del MARM.

Como consecuencias, el desarrollo de la actividad, ha permitido disponer de un sistema de intercambio de información hidrogeológica dinámico y actualizado (INTERHIDRO), a través del cual se facilita al MARM la adquisición de todo tipo de información relativa a las aguas subterráneas disponibles en el IGME (generada o no en la Encomienda de Gestión MARM-IGME) mediante selección condicionada puntual y espacial, pudiendo ser visualizada y descargada en el momento y lugar que se solicita.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

La metodología seguida, ha tenido dos partes bien diferenciadas, pero estrechamente relacionadas entre si. En la primera se han llevado a cabo tareas relativas a la organización, sistemática, nomenclatura y formatos de la información (Encomienda de Gestión e Información IGME) con el fin de obtener un mejor intercambio: consulta y descarga, y en la segunda, el diseño y desarrollo propiamente dicho de la aplicación Web INTERHIDRO (Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica), que permitiría tanto la carga y catalogación de la información, su consulta, espacial y temática; así como, finalmente, la descarga en los formatos correspondientes.

Durante la fase de planificación inicial y de diseño de la metodología del proyecto, fue prioritario el estable-

cimiento y definición de una serie de especificaciones y criterios básicos que deberían ser seguidos en la organización de la información geocientífica, principalmente en aquella información que sería de nueva creación. Se trataba de conseguir al finalizar la encomienda, que todas las actividades que la componían constituyeran un conjunto integrado y cohesionado.

Estos planteamientos, en las primeras fases cualquier proyecto, permiten establecer una adecuada estructura y sistemática de la información, algo que ya es imprescindible para el soporte de los datos en el ámbito informático, facilitando tanto la realización de los trabajos como la obtención y explotación de los resultados del proyecto.

Además, la actividad en su inició, y relacionado con las tareas de coordinación con el resto de las actividades de la EG, estableció como labor prioritaria definir una información común de referencia para toda la encomienda, mediante la revisión, análisis, organización y distribución de la información cartográfica de base e información de otro tipo, de interés para la EG.

Por otra parte, casi paralelamente, se inició el imprescindible bloque de trabajo, que daría lugar al diseño y desarrollo de la aplicación del Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica INTERHIDRO.

Metodología relativa a la información

Información general de referencia

El IGME puso a disposición de todos los participantes en las Actividades de la Encomienda de Gestión un repositorio (INTERHIDRO en INFOSERVIDOR), con la información básica de partida procedente principalmente del IGME, el MARM y las Confederaciones Hidrográficas, que fueron identificadas como las fuentes fundamentales de información. Otras fuertes de información consideradas de interés fueron el CEDEX o el IGN.

En la figura 1 se pueden observar algunos ejemplos de base cartográfica y mapa digital de elevaciones, generados para distintas masas de agua de diversas demarcaciones, para los trabajos de la Actividad 2. ('Caracteriza-

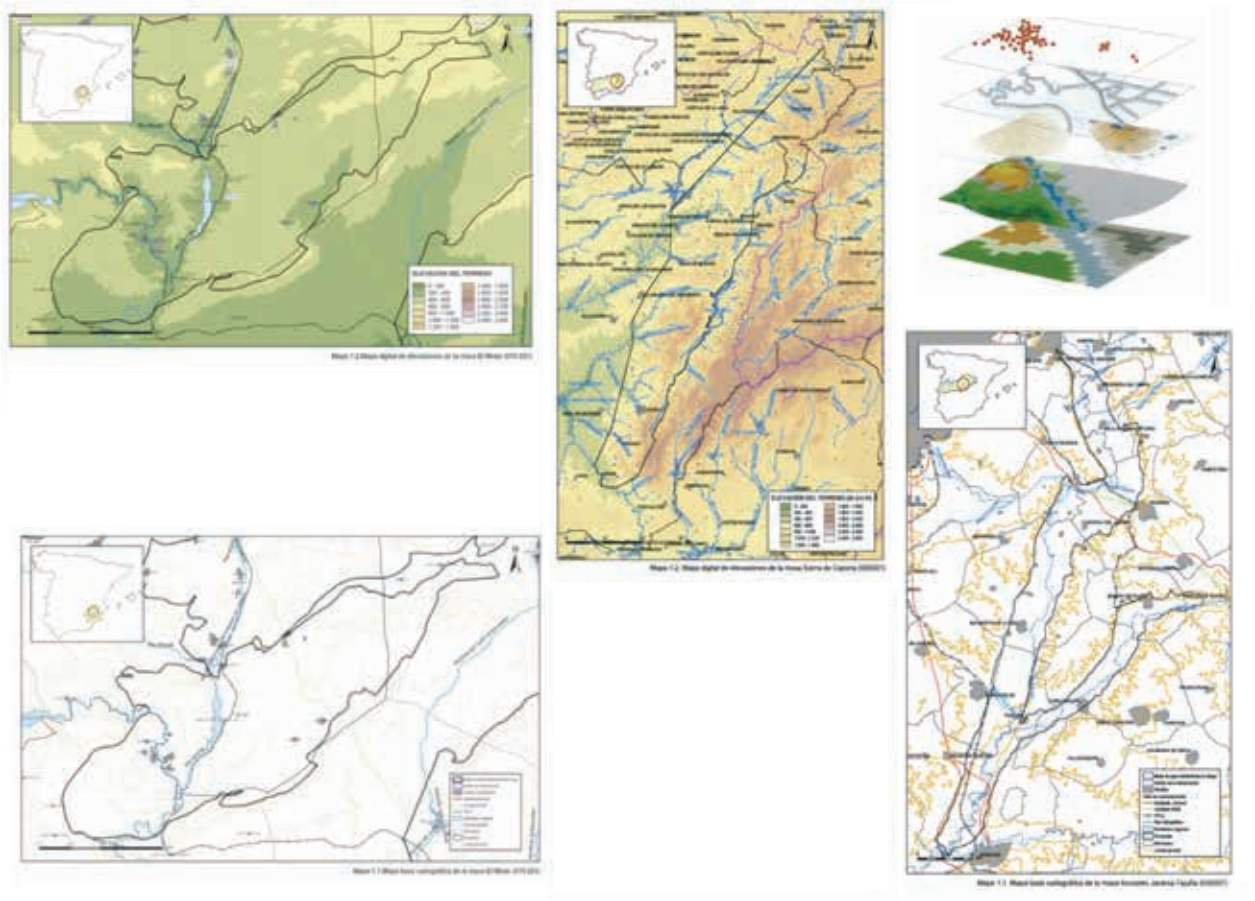


Figura 1. Ejemplos de base cartográfica y mapa digital de elevaciones elaborados para distintas masas de agua de diversas demarcaciones de la Actividad 2

ción adicional de masas en riesgo de no cumplir con los objetivos medioambientales 2015').

En principio, y como norma general, se respetaron la nomenclatura y la estructura de datos original de la información básica de referencia.

Información hidrogeológica de nueva creación

Desde el comienzo de la EG se preveía que las actividades definidas darían lugar a un gran volumen de información, de diferente tipología y con características previsiblemente diversas, que debería ser gestionada para su posterior transferencia e intercambio entre el IGME y el MARM.

La diversidad y complejidad de la información que en cada una de las actividades se iba a generar, unido a que estas comenzaron escalonadamente en el tiempo, hacía prácticamente imposible que, al inicio del proyecto, se pudiera establecer una estructura y sistemática definitiva, definida en profundidad y detallada.

La metodología, que se definió entonces, trató de facilitar la integración y cohesión de toda la información generada, mediante unas pautas básicas de normalización para la organización, la estructura y los formatos de la información,. Con este objeto se elaboró una normativa que fue distribuída a todos los participantes de la EG.

El establecimiento de estas pautas pretendía disminuir los problemas que pudieran producirse cuando finalmente se tratara de relacionar y unir la información procedente de las diversas actividades de la EG. Esta metodología se basó en la aplicada por el MARM para el intercambio de la información de los artículos 3, 5 y 8 de la Directiva Marco del Agua en marzo de 2007.

A partir de esa idea, se propuso, por una parte, que la información generada por cada actividad se entregara al IGME, organizada según la estructura básica de directorios recogida en la tabla 1.

En la figura 2 se completa la propuesta de una estructura de directorios genérica, de manera que cada actividad pueda incorporar la información organizada según sean su 'unidad' o 'unidades de trabajo espacial', tal como se definían en el documento mencionado: por ejemplo puede ocurrir que dentro de una misma actividad se genere una información a nivel nacional, y el resto por demarcaciones o bien que se pueda trabajar indistintamente a nivel de masa o de demarcación.

La sistemática de nomenclatura de la información, por su parte, se definió en función de la actividad de la EG, en que era generada la información, el ámbito espacial de referencia de cada (masa de agua subterránea o demarcación), el contenido del fichero, elemento gráfico, y finalmente otra serie de códigos que completaría su identificación. La tabla 2 recoge, de forma resumida, un ejemplo la sistemática de denominación de ficheros.

DIRECTORIOS	CONTENIDO
SHAPES	Capas (shapes) que garantizan el reflejo gráfico georreferenciado de la información. La información asociada al elemento gráfico se simplifica al máximo, únicamente queda el código identificativo numérico del elemento correspondiente (polígono, punto o línea).
BASES	La información alfanumérica asociada a la información gráfica se introduce en una base de datos ACCESS, asegurando el enlace con el elemento geográfico en la capa gráfica, mediante el código identificativo del punto, polígono o línea de que se trate.
MXD	Los proyectos o composiciones de mapa que contienen el layout y sus layers asociadas. Estos ficheros tendrán extensión .mxd.
METADATOS	La información relativa al origen de los datos, procesos realizados, versión, responsables.
DOCUMENTOS	Documento (doc o pdf) donde se documenta la información recogida en los anteriores directorios: descripción de tablas y diccionario de datos. Diversa documentación, informes finales, memorias e imágenes que se generen dentro de la actividad correspondiente.

Tabla 1. Estructura básica de directorios

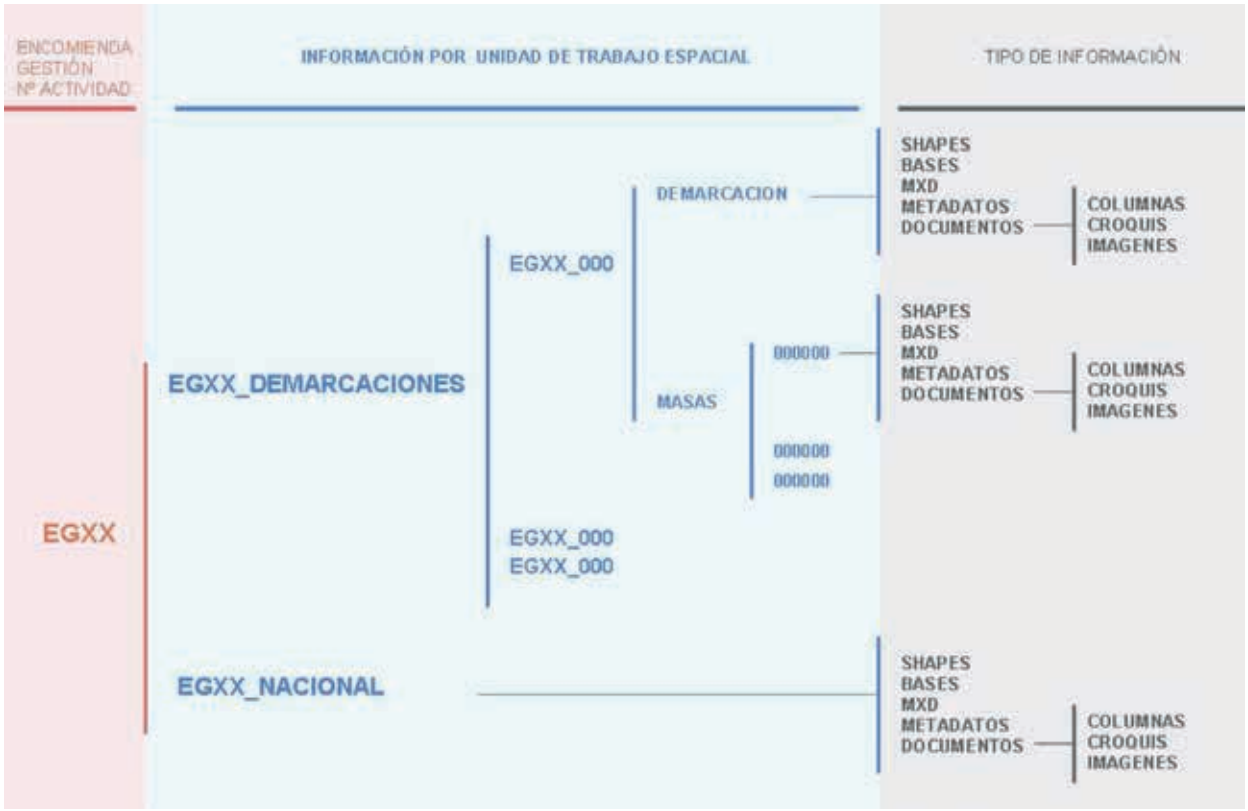


Figura 2. Esquema de organización de directorios

DIRECTORIO	UNIDAD DE INFORMACIÓN	PROYECTO (Tabla 5)	ACTIVIDAD (Tabla 6)	CÓDICGO UNIDAD DE TRABAJO (Tabla 7)	RELATIVO AL CONTENIDO (Tabla 3)	TIPO GEOMÉTRICO DEL ELEMENTO GRÁFICO DE INFORMACIÓN (Tabla 9)	TIPO DE INFORMACIÓN DEL MXD O DEL DOCUMENTO (Tabla 10)	NÚMERO DE ORDEN DEL MXD O DOCUMENTO	NOMBRE COMPLETO DEL FICHERO	JEMPLOS DE NOMENCLATURA DE FICHEROS
SHAPE	Masa de agua subterránea	EG	XX	000000	nnn	m	- - - -	- - - -	EGXX_000000_nnn_m	EG02_080005_VUL_A.shp
	Demarcación geográfica	EG	XX	000	nnn	m	- - - -	- - - -	EGXX_000_nnn_m	EG06_08_VUL_A.shp
	Término nacional: cuencas intercomunitarias	EG	XX	- - - -	nnn	m	- - - -	- - - -	EGXX_nnn_m	EG05_VUL_A.shp

Tabla 2. Sistemática de nomenclatura de ficheros. Ejemplo: shapes

Esta normativa, sencilla y básica facilitó la *identificación y catalogación* de la información para la organización de su almacenamiento y posterior búsqueda y consulta.

Información hidrogeológica del IGME

En lo referente a la información hidrogeológica y medioambiental relativa a las aguas subterráneas, generada por el IGME de interés para su inclusión en el sistema INTERHIDRO, se identificaron las siguientes bases documentales y factuales:

Sistema de información documental SID_Centro de Documentación: Informes y Mapas

Referido a la *Base_guías de información del fondo documental* con las referencias bibliográficas sobre los documentos generados en los trabajos desarrollados por el IGME en los campos de la investigación minera, geología, hidrogeología, ingeniería medioambiental, geofísica y ciencias de la tierra en general. Cada referencia se acompaña de un fichero asociado con el informe a texto completo e imágenes. La cobertura temporal abarca desde 1970, aunque hay trabajos de

años precedentes y consta de un total de 13.155 registros.

A cada documento se le asignó un índice geográfico que ha permitido su posterior búsqueda mediante consultas espaciales. Gracias a este índice es posible seleccionar y consultar la información documental hidrogeológica, desde la aplicación INTERHIDRO, también mediante criterios de localización (municipios, masas de agua, etc.…).

Información hidrogeológica puntual del IGME

—*Inventario de puntos acuíferos.* Inventario nacional de puntos acuíferos del IGME, con datos de situación (coordenadas UTM, cota, cuenca hidrográfica, masa de agua subterránea, provincia, municipio), naturaleza del punto, características constructivas, utilización del agua, etc. La procedencia de esta información corresponde a los proyectos de investigación hidrogeológica del IGME, realizados desde 1966 hasta ahora y supera, en la actualidad, los 130.000 registros.
—*Sondeos históricos del IRYDA.* Base de datos históricos de los sondeos hidrogeológicos realizados, en las distintas provincias de España, por el I.R.Y.D.A. (Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario), anteriormente INC (Instituto Nacional de Colonización, 1956). Los datos hacen referencia a situación, año de construcción, organismo instructor, profundidad del sondeo, nivel de agua medido, método de perforación, etc. También pueden visualizarse los informes y columnas litológicas de los sondeos, de carácter hidrogeológico. Los primeros sondeos registrados en la base datan de los años 50 y los más actuales de los años 90. El número total de registros recogidos en esta base para INTERHIDRO son 2.237
—*Ortoimágenes: Imágenes Landsat 7.* Se han incluido en INTERHIDRO la colección de imágenes Landsat 7, organizadas por hoja 1: 200.000 para España: península ibérica e Islas. Las imágenes Landsat 7 fueron obtenidas a partir de un grupo de satélites lanzados por Estados Unidos (NASA), en abril de 1999 con el objeto fundamental de actualizar la base de datos de imágenes de todo el planeta. Las imágenes recibidas por el Landsat 7 son procesadas por el USGS. El número de hojas 1:200.000 incluidas son 93.

METODOLOGÍA RELATIVA AL DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA. INTERHIDRO

Durante el desarrollo de la Encomienda de Gestión MARM-GME se definió la metodología de intercambio y traspaso de información hidrogeológica y medioambiental entre estos dos organismos. Se establecieron los mecanismos de organización, normalización y transferencia de la información relacionada con las aguas subterráneas, tanto para aquella generada a lo largo de la EG, como para la elaborada por el IGME, en sus proyectos o la información hidrogeológica de carácter histórico.

Esta metodología tuvo una primera fase de documentación y catalogación, principalmente, de la información de nueva generación, fundamentalmente, y de asignación de índices espaciales a la información de carácter documental.

Simultáneamente se llevaba a cabo la fase de diseño y desarrollo de las herramientas y utilidades de selección (alfanumérica y espacial), búsqueda y descarga de la información, en función del tipo y origen de la información.

Catalogación de la Información

Con el objeto de facilitar la búsqueda y consulta selectiva, desde Internet, de los ficheros y documentos generados en las actividades de la Encomienda de Gestión, se han catalogado y documentado adjudicándoles un conjunto de características y propiedades, tanto de carácter libre (L), como preestablecidos (P). Entre otras son:

— Actividad de la Encomienda a que pertenecen (P)
— Demarcación y/o masa de agua subterránea, descripción de la información (P)
— Descripción (L)
— Autor o responsable de la actividad (L)
— Empresa u organismo que ha realizado la actividad (L)
— Palabras clave (P)
— Comentarios (L)
— Tipo de información (P)

Esta catalogación ha podido realizarse de dos formas:

1) Interactivamente, mediante un formulario on line (figura 3), desde el módulo de carga de la aplicación INTERHIDRO, gracias al cual era posible documentar y subir al sistema la información desde el ordenador personal del responsable o técnico que elaboró los trabajos.
2) Desde el propio IGME, dentro de los trabajos realizados por la Actividad 1, a través de una herramienta desarrollada en .net (figura 4). Finalmente, la mayor

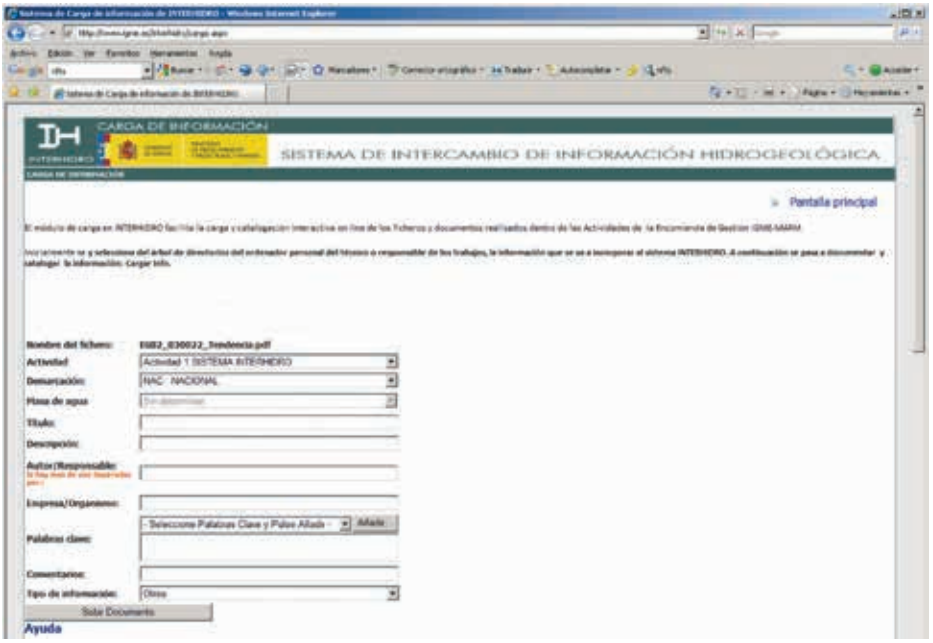


Figura 3. Formulario de catalogación y carga de la Información de la Encomienda de Gestión desde INTERHIDRO

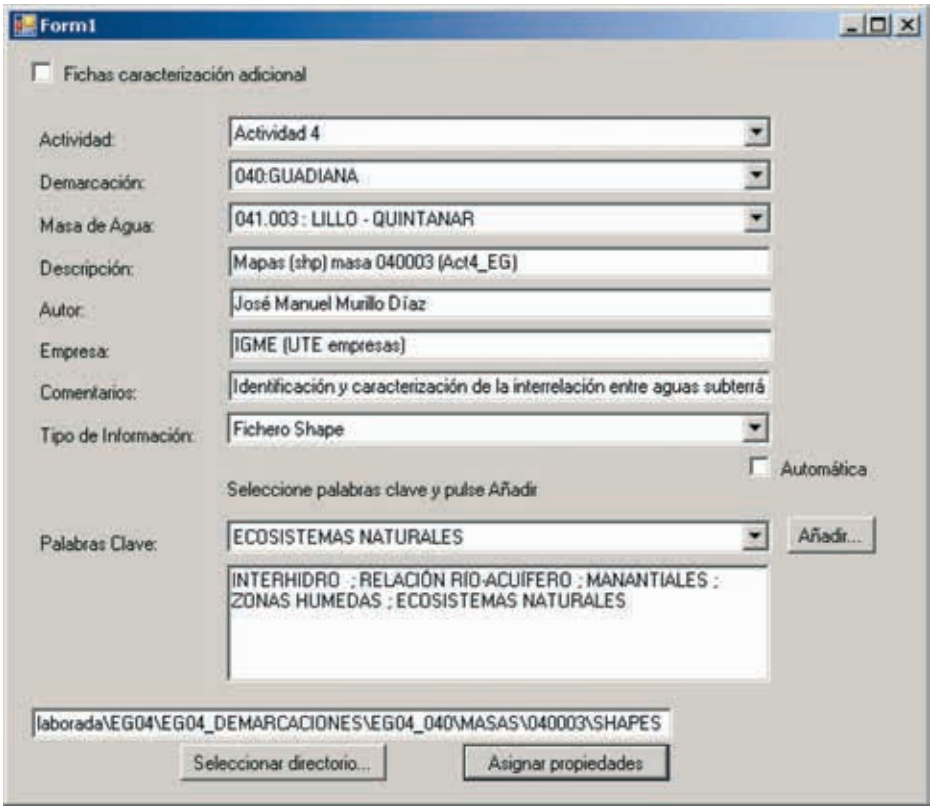


Figura 4. Formulario para la catalogación de la información de la Encomienda de Gestión desde la aplicación interna IGME. Ejemplo

parte de la información de la EG ha sido catalogada y cargada desde esta Actividad.

Especificaciones Técnicas

La aplicación INTERHIDRO sirve como herramienta de búsqueda para todos los usuarios autorizados para su utilización.

Orígenes de datos

La búsqueda se realiza contra varios orígenes de datos que a su vez están en distintos formatos, con distintos esquemas y en servidores distribuidos, siendo extensible a otros orígenes distintos. Los formatos de estos orígenes de datos son cuatro:

— *Documentos del centro de documentación. SID. (IGME).* La base de datos de documentos (SID) está almacenada en SQL Server, tiene una estructura relacional y se diseñó en el año 2000. Para INTERHIDRO se han desarrollado las interfaces de consulta. La geometría se ha geocodificado asociando a cada uno de los más de 12.000 documentos un municipio, provincia, comunidad o país. La aplicación traduce de unas unidades espaciales a otras.
— *Puntos de agua y Sondeos del IRYDA. (IGME).* Bases de datos espaciales de puntos utilizando como repositorio de datos SQLServer 2008 y almacenando su geometría en los nuevos tipos de datos de Microsoft geometry.
— *Ortoimágenes: imágenes Landsat 7. (IGME).* Base de datos ACCESS y sistema de ficheros. La geometría se almacena mediante geocodificación utilizando la distribución 1:200.000.

Información hidrogeológica y medioambiental y fichas de caracterización adicional. Encomienda de Gestión MARM (DGA)-IGME.

Sistema de ficheros que almacena los atributos mediante las propiedades que proporciona NTFS y las herramientas de indexado de Microsoft Index Server. La geometría se almacena mediante geocodificación utilizando masas de agua y demarcaciones.

Tecnologías utilizadas

Las tecnologías utilizadas son:
— *Almacenamiento.* SQL-Server 2008 con campos geométricos, SQL-Server2000, Sistema de ficheros NTFS.
— *Desarrollo:* Se ha desarrollado un modelo en capas utilizando Visual Basic .NET 2010 Microsoft Visual Studio 2010 Versión 10.0.30319.1 con Microsoft.NET Framework Versión 4.0.30319.
Para el acceso a datos se ha utilizado servicios WEB. Para el desarrollo del cliente se ha utilizado herramientas AJAX y Silverligth.
El cliente espacial se ha desarrollado mediante las herramientas ARC-GIS para Silverlight y ARCGIS Server.
— *WEB.* El servidor WEB utilizado es IIS en Windows Server 2003

RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha desarrollado el Sistema INTERHIDRO, un Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica on line, para la catalogación y almacenamiento estructurado, gestión, consulta y descarga de información hidrogeológica que se ha desarrollado. INTERHIDRO representa el primer Sistema de Intercambio de Información MARM-IGME, a través de la Web.

La URL de acceso al Sistema de Intercambio de Infor-

Figura 5. Página principal de INTERHIDRO.

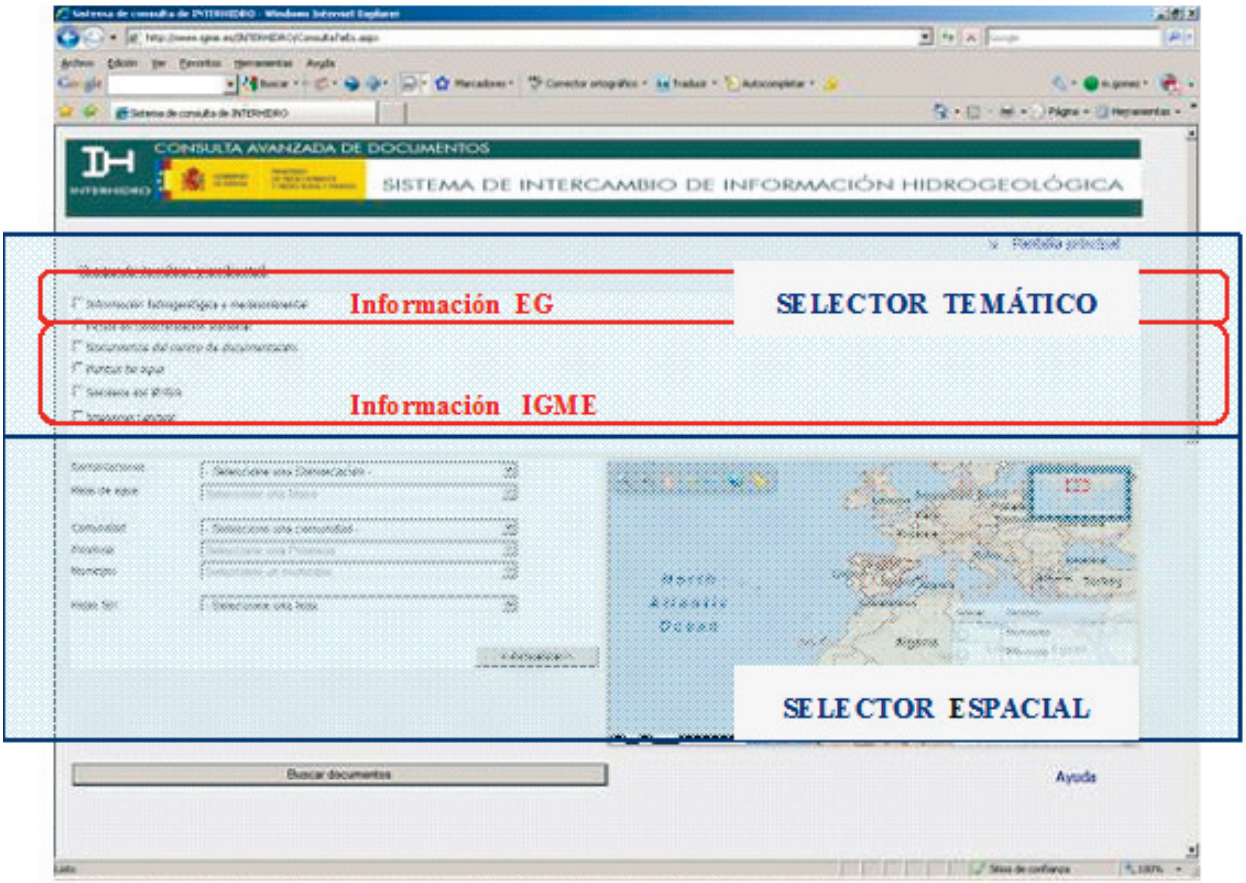


Figura 6. Módulo de INTERHIDRO de consulta y descarga de información hidrogeológica y ambiental de la EG y del IGME.

mación Hidrogeológica INTERHIDRO es: http://www.igme.es/interhidro/. El acceso a esta aplicación Web está limitado y restringido a los usuarios del MARM y a las Confederaciones Hidrográficas.

A través de INTERHIDRO, el IGME comparte y pone a disposición de la Dirección General del Agua (MARM) tanto la información hidrogeológica elaborada en la Encomienda de Gestión, como la información sobre aguas subterráneas generada por el IGME, de la que este organismo es depositario y que puede ser de interés para el MARM.

Como Sistema de Información los dos aspectos fundamentales sobre los que se construye INTERHIDRO son:

— Información hidrogeológica y medioambiental digital atendiendo a 4 tipologías diferenciadas: cartográfica, documental, bases de datos y raster.
— Conjunto de herramientas y funcionalidades que permiten la organización y explotación de la información.

Además, desde la página inicial de INTERHIDRO, se proporciona información general acerca de esta aplicación, en el contexto general de la Encomienda, explicando tanto sus objetivos principales, funcionalidades, como la información que se incluye en el sistema: información generada en las actividades de la EG e información hidrogeológica del IGME.

Asimismo, desde esta página, se accede a los dos módulos que se han desarrollado en INTERHIDRO:

Módulo de carga y catalogación. Diseñado para documentar e incorporar la información de la EG a INTERHIDRO, directamente, a través de Internet, desde los ordenadores personales de los técnicos o responsables de las Actividades.

Módulo de consulta y descarga. Presenta la posibilidad de realizar consultas temáticas y/o consultas espaciales sobre toda la información integrada en INTERHIDRO (EG e hidrogeológica IGME) mediante un Selector/Visor espacial y temático, atendiendo tanto a los ámbitos espaciales hidrogeológicos (Demarcaciones, masas de agua

subterránea) o administrativos (Comunidad, provincia,…) como al tipo de información que se solicita (Encomienda de Gestión MARM-GME-, Información documental, Información hidrogeológica puntual, ortofotos)

En cada módulo se incluye una 'ayuda' específica que amplia la explicación sobre la utilización de estas aplicaciones.

Por último, además se incluye una dirección de correo electrónico para cualquier consulta o duda que se pueda presentar durante la utilización de INTERHIDRO.

Actualmente el interés principal de los potenciales usuarios de INTERHIDRO se centra en el *módulo de consulta y descarga* pues el *módulo de carga y catalogación* fue diseñado y realizado para las fases iniciales de la Encomienda de Gestión.

Dentro del módulo de consulta y descarga se tienen las siguientes posibilidades de búsqueda:

— ***Selección temática*** de la información hidrogeológica y medioambiental está organizada como perteneciente a la Encomienda de Gestión o al IGME, y de acuerdo con el tipo de información a consultar.
— ***Selección espacial*** de la información, puede combinarse o no con la selección temática. Se considera a la masa de agua subterránea como la unidad principal de referencia (y por defecto también la demarcación) para las distintas tipologías de información, siguiendo el marco de aplicación de la Directiva Marco del Agua 2000/60/CE (DMA) donde se encuadra la EG. Así mismo, se puede seleccionar la información por unidades administrativas (comunidad autónoma y/o provincia y/o municipio) o por hojas 1:50.000 (numeración IGN).

CONSIDERACIONES FINALES

Sistema INTERHIDRO

— Dentro de esta actividad se ha desarrollado la aplicación Web INTERHIDRO que representa el primer Sistema de Intercambio de Información Hidrogeológica entre el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y el Instituto Geológico y Minero de España, a través de Internet.
— A través de una única aplicación Web, se tiene acceso simultáneamente tanto a la información hidrogeológica del IGME como a la generada en la Encomienda de Gestión MARM-IGME (2007-2010)
— El Sistema INTERHIDRO, permite establecer diferentes criterios de *búsqueda* tanto *temática* como *espacial*, por lo que presenta dos componentes principales:
  • Selección de información hidrogeológica y temática
  • Selección espacial
— INTERHIDRO permite realizar consultas búsqueda en paralelo sobre todas las informaciones hidrogeológicas y temáticas al mismo tiempo.
— La selección espacial se realiza en INTERHIDRO, cada vez, *sobre una* de las clases de ámbitos espaciales previstos: hidrogeológicos, administrativos o división de hojas 1:50.000.
— Es indiferente el orden de selección de los criterios espaciales y temáticos cuando se está elaborando la consulta que se va a ejecutar.
— Es posible consultar la información temática sin atender a la selección espacial, cuando la información que se busca no está ligada a un entorno geográfico concreto.
— Un aspecto relevante en la elaboración del proyecto, ha sido el establecimiento de una *metodología y sistemática de trabajo* que por una parte, permitiera que los trabajos desarrollados en la Encomienda tuvieran una entidad a su finalización, constituyendo un conjunto integrado y cohesionado. Y que por otra facilitará su integración en la aplicación de búsqueda, consulta y descarga.

Otros trabajos desarrollados

El IGME, desde mediados de 2007 y previamente a la aprobación definitiva de la EG comenzó la colaboración con la Subdirección General de Planificación y Uso Sostenible del Agua, DGA (MARM), que finalizaba el desarrollo del Sistema Integral del Agua, S.I.A, constituido por el Visor Cartográfico y el Libro Digital del Agua, (que fue presentado finalmente en diciembre de 2007), cuyas URL son:
http://www.mma.es/portal/secciones/aguas_continent_zonas_asoc/sia/
http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/sia/infovisor.htm
http://www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/sia/infolibrodigital.htm

La colaboración del IGME fundamentalmente se enmarcó en los siguientes aspectos:
— Facilitar al MARM la información cartográfica digital del mapa litoestratigráfico y de permeabilidades 1:200.000, como cartografía digital, servicios WMS y Kmz (Google Earth). http://mapas.igme.es/gis/services/Cartografia_Tematica/IGME_Permeabilidad_200/MapServer/WMSServer?service=wms&request=getcapabilities&version=1.1.

http://mapas.igme.es/gis/rest/services/Cartografia_Tematica/IGME_Permeabilidad_200/MapServer/kml/mapImage.kmz.

— Revisar de los contenidos hidrogeológicos del visor cartográfico y geológico de En la figuras 7, 8 y 9 se incluyen unos ejemplos de la colaboración del IGME.
— Colaborar en la definición del modelo de datos para el intercambio de información de los planes hidrológicos de las demarcaciones y, específicamente, en los módulos siguientes, relacionados con las aguas subterráneas

Masas de Agua Subterránea
Metodologías de Aguas Subterráneas
Estaciones de Aguas Subterráneas
Presiones Aguas Subterráneas
Caracterización Adicional de las Masas de Agua Subterránea

Figura 7. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

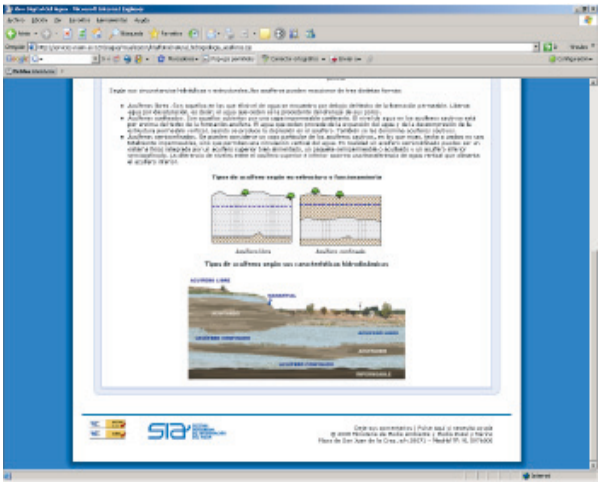


Figura 8. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

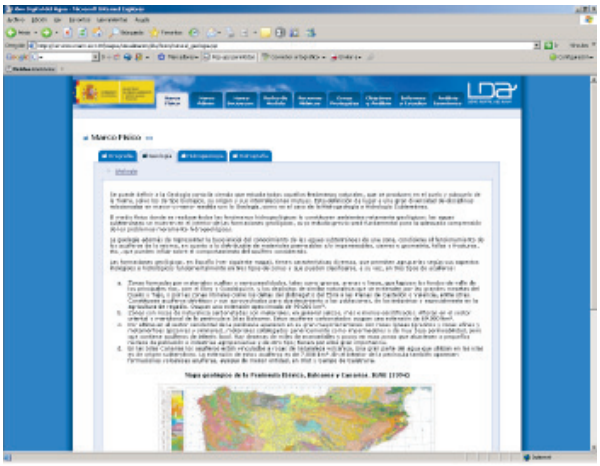


Figura 9. Aportación del IGME al Libro Digital del Agua (SIA) del MMARM

ESTUDIOS ESPECÍFICOS DE APOYO A LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

Relación de estudios realizados

Actualización hidrogeológica de la MASb 011.006 Xinzo de Limia

Evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las Masb de la Demarcación Hidrográfica del Tajo: 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar

Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME

Propuesta de zonificación, basada en criterios geológicos e hidrogeológicos, de la cuenca alta del río Guadiana

Estudio hidrometeorológico y análisis del efecto del periodo húmedo 2009/10 en los acuíferos de la cuenca alta del río Guadiana

Estudio de la evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana a partir de diferentes escenarios meteorológicos y de explotación

Propuesta de declaración de sobreexplotación de un conjunto de masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

Estudio de definición de la transferencia subterránea de la MASb Boquerón con otras masas definidas en la demarcación hidrográfica del Júcar.

Caracterización básica de las masas de agua subterránea de la confederación hidrográfica del Júcar

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA MASb 011.006 XINZO DE LIMIA

Mónica Meléndez Asensio
José Ángel Díaz Muñoz

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Actualización hidrogeológica de la MASb 011.006 Xinzo de Limia (Ourense),* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Mónica Leonor Meléndez Asensio
José Ángel Díaz Muñoz
Ana Sevillano Matilla (Tratamiento GIS)

Colaboración:

Empresa CRN para realización de trabajos auxiliares

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA MASb 011.006 XINZO DE LIMIA

INTRODUCCIÓN

La zona estudiada se sitúa en el noroeste de la Península Ibérica; en la provincia de Orense y más exactamente en la región geográfica de Limia, dentro del marco de la Demarcación Hidrográfica Miño-Sil. Fisiográficamente, se trata de una cuenca hidrográfica, de unos 700 km^2, delimitada por las elevaciones montañosas de San Maqueda, Queixa y Larouco, Pena, entre otras. Éstas presentan una disposición perimetral, cuyas altitudes varían entre los 800 y 1300 m s.n.m. encontrándose en su interior una zona de relieve suave y subhorizontal con cotas comprendidas entre los 610 y 640 m s.n.m (figura 1).

La llanura limiana (cuenca terciaria de Xinzo de Limia), que se corresponde con la masa de agua subterránea (MASb) 011.006 Xinzo de Limia, presenta una superficie de 253 km^2 constituyendo una cubeta definida sobre un eje N-S de 18 km de longitud y otro de disposición NE-SO de 28 km. En su interior se pueden diferenciar las depresiones denominadas de Antela de Abavides que, separadas por un promontorio granítico, confluyen en la localidad de Xinzo de Limia.

En el sector noreste de la cuenca, en parte de los terrenos que hoy ocupan los cultivos de Limia, así como otras actividades, estuvo ubicaba la *Laguna de Antela* (figura 2); Se tiene constancia de que en aguas altas todo el terreno permanecía inundado, mientras que

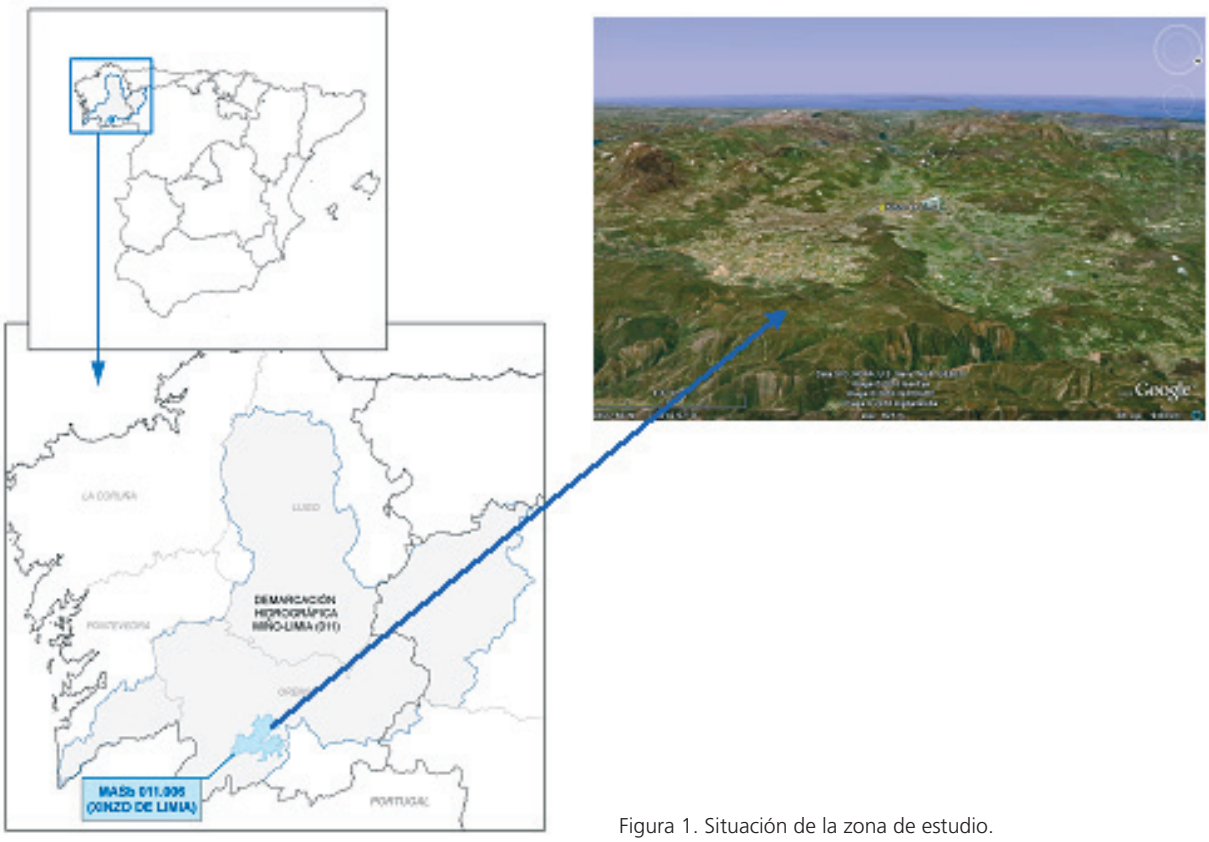


Figura 1. Situación de la zona de estudio.

en épocas secas se podían ver varias lagunas, charcos y juncares (Fontán, 1845; Dantín, 1942). Aunque las obras que dieron lugar a su desecación comenzaron en 1958 y quedaron prácticamente terminadas en 1963, fue una labor planeada a principios del siglo XIX. La primera vez que se abordó esta tarea fue en 1827, pero tuvo que ser abandonada poco tiempo después de su comienzo; en 1868 hubo un segundo proyecto por iniciativa privada, pero fracasó debido a problemas sociales y políticos, siendo en el año 1949, el último intento fallido. Unos años después, en 1956, el Instituto Nacional de Colonización (INC) decidió acometer la desecación, mediante la aprobación de una Ley en la que las obras de saneamiento y colonización de la laguna se declaraban de alto interés nacional. La solución adoptada consistió en la realización de un dren en el margen derecho de la laguna, con dos bifurcaciones en cabecera, el encauzamiento del emisario y la modificación del río Limia desde su confluencia con el emisario hasta Puente Linares. Después de su estudio se adoptó establecer una pendiente uniforme de 0,0002 para el sistema de drenaje. El caudal específico de desagüe de la laguna obtenido fue de 0,150 m^3/s, con lo que se determinaron caudales de 15, 25, 30 y 60 m^3/s para los dos tramos de canal-dren, emisario y encauzamiento del Limia, respectivamente. Quedando prácticamente terminadas las obras a principios de los años 60 del siglo XX.

Figura 2. Mapa de la ubicación de la Laguna de Antela, Fontán (1845) y aspecto de la Laguna de Antela vista desde Morgade. Fotografía del INC. (http://www.antela.org/Laguna_de_Antela.html)

La presencia de lignitos en la depresión terciaria fue objeto de sucesivas investigaciones que generaron gran cantidad de información geológica e hidrogeológica de alta calidad e importancia. Destaca la ejecución de numerosos sondeos, la realización de campañas geofísicas así como la elaboración de modelos conceptuales sobre la estructura geológica y funcionamiento hidrogeológico. La recopilación, análisis e interpretación de dicha documentación ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

Uno de los últimos trabajos realizados en el marco hidrogeológico tuvo como objetivo inicial conocer la respuesta de acuíferos frente a las propuestas de transformación en regadío. Los estudios realizados consistieron en el análisis de los descensos piezométricos producidos en las épocas de extracción, así como la capacidad de recuperación del acuífero y el grado de afección de estas extracciones a los cauces superficiales; para ello se realizaron tres modelos de simulación matemática para cada una de las subcuencas (Depresión de Antela, Depresión de Abavides y Parte Baja). Este estudio fue solicitado por la Xunta de Galicia (2002), a través de la Consejería del Medio Rural.

OBJETIVOS

Este estudio se ha realizado como labor de apoyo en la elaboración del Plan Hidrológico de Cuenca de la Demarcación Hidrográfica del Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, a solicitud del Organismo de Cuenta. El objetivo principal consiste en la elaboración de un modelo conceptual de funcionamiento de la masa de agua subterránea 011.006 Xinzo de Limia atendiendo a los aspectos y tareas que se describen a continuación:

- Revisión, análisis e interpretación de la documentación hidrogeológica existente así como la adquisición de nuevos datos " in situ", que complementen la documentación para la definición del modelo hidrogeológico
- Delimitación correcta de los límites de la masa de agua Xinzo de Limia, a fin de evaluar los recursos hídricos disponibles, establecer la correcta protección y estar en disposición de realizar una gestión hídrica adecuada.
- Alcanzar el mayor grado de conocimientos posible respecto a la caracterización de la masa de agua definiendo su funcionamiento hidrogeológico, en lo que se refiere a recarga, descarga y relación aguas superficiales-subterráneas.

METODOLOGÍA

En primer lugar se procedió a la recopilación y análisis de la información existente y en especial aquella que derivada de estudios recientes. Con posterioridad, en mayo de 2010, se realizó un reconocimiento del terreno y toma de datos en algunos de los puntos incluidos en la red de nitratos de la Confederación Hidrográfica; en ellos se midieron Presión (mBar), Temperatura (C), Profundidad al agua (m), Conductividad real (µS/cm), Conductividad específica (µS/cm), Salinidad (PSU), Total de sólidos disueltos (ppm), Resistividad (ohm-cm) y densidad del agua (g/cm^3).

En esa misma campaña de campo se realizaron perfiles de conductividad/temperatura en diez sondeos previamente seleccionados (figura 3). Para su ejecución se utilizó una sonda modelo Aqua TROLL 200 que registra la conductividad, la temperatura el nivel de agua y la presión. En el momento de su ejecución, mediante un ordenador portátil, se realizó la programación previa de los parámetros que se deseaba medir así como del intervalo de registro de medidas y de otros datos necesarios para la correcta realización de las medidas. El intervalo de medida fue de 1 minuto, realizándose una medida cada 10 m

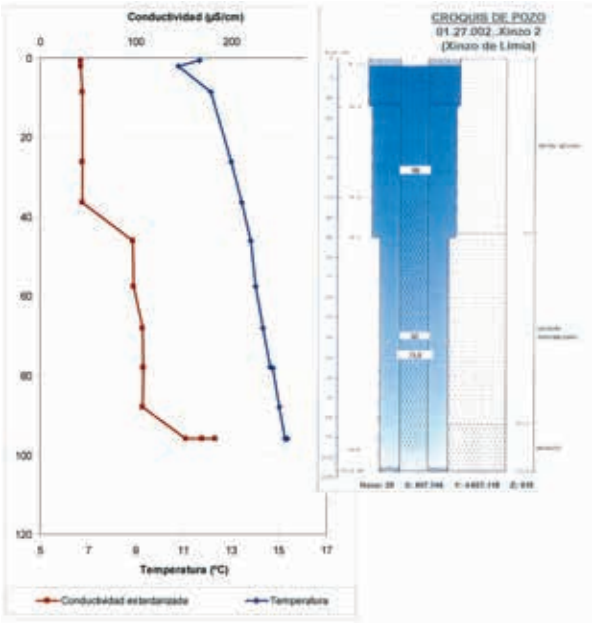


Figura 3. Perfil Xinzo-2 (Red oficial de control piezométrico)

El objetivo perseguido consistió en determinar la posible afección al agua subterránea de los diferentes acuíferos en relación con los retornos de riego, la observación de las variaciones de determinados parámetros considerados indicativos de la calidad del acuífero superior en fun-

ción de la profundidad, así como discernir la existencia de flujos subterráneos ascendentes, aguas de diferentes calidades o manifestaciones termales en la base de la cuenca.

Otro de los aspectos contemplados ha sido la identificación, caracterización y cuantificación de los volúmenes hídricos relacionados con las variables climáticas. Para ello se elaboró el estudio hidroclimático con los datos de precipitación total mensual y temperatura media mensual de las series históricas facilitadas por la Agencia Estatal de Meteorología (intervalo de enero de 1970 hasta diciembre del 2008; lo que supone un total de 39 años de registros).

Se llevaron a cabo diferentes actividades dentro de este apartado. Una vez seleccionadas las estaciones pluviométricas y termométricas, se procedió a la restitución y completado de las series de datos pluviométricos y termométricos, para lo que se utilizo el paquete HIDROBAS.

El análisis de la pluviometría se llevó a cabo mediante la elaboración de las isoyetas para los años tipo medio, seco y húmedo, utilizado la topografía como referencia para su trazado, ya que existe una buena correlación entre altitud y pluviometría. El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó mediante el método de Thornthwaite, que proporciona el valor de la ETP mensual a partir de la temperatura media mensual y la latitud de la estación. La evapotranspiración real (ETR) y la lluvia útil o escorrentía total se estudió por tres métodos diferentes (Método del balance mensual de agua en el suelo según Thornthwaite y según los métodos empíricos de Turc y Coutagne). Con los datos obtenidos y teniendo en cuenta los años tipo anteriormente indicados se realizó la distribución de las isolíneas de lluvia útil; y a partir de estos mapas de lluvia útil, considerando la superficie que existe entre las isolíneas, se ha obtenido un valor medio de lluvia útil para los años medios en la zona de estudio.

Por lo tanto, considerando que la aportación principal y única es el agua procedente de la precipitación (lluvia útil), el cálculo de la aportación tiene en cuenta la proporcionalidad entre la superficie de la cuenca y la lluvia útil. En definitiva, esta aportación corresponde al máximo volumen de agua que entra en la zona de estudio procedente de la precipitación, y que posteriormente, podrán formar parte de las aguas superficiales o de las aguas subterráneas.

Existe un conocimiento profundo de la geología de la zona, fruto de los estudios e investigaciones realizadas. Los materiales existentes en la cuenca corresponden a la sedimentación paulatina desde los inicios de la conformación de la cubeta, durante su progresivo hundimiento como efecto de subsidencia diferencial y hasta la colmatación existente en la actualidad.

Dentro de este apartado se pretende contribuir al conocimiento mediante la elaboración de un modelo geológico tridimensional realizado a partir de la información existente. Para ello, se procede a la integración de diversos tipos de datos, correspondientes a diferentes fuentes, en un modelo geológico tridimensional que pueda ser explotado desde un sistema de información geográfico convencional por un lado y por sistemas específicos de tratamiento de datos tridimensionales por otro. Se parte de una información geológica muy abundante y de alto detalle, consistente en columnas geológicas, mapas de isopacas e isobatas y perfiles estructurales de las principales unidades. Se dispone, además, de planos parciales de isopacas para cada uno de los muros de las tres unidades principales, plano de isobatas del basamento (o muro de la unidad inferior).

Los conocimientos geológicos han permitido definir tres grandes unidades litológicas de interés para este estudio: dos unidades detríticas, denominadas superior e inferior, y una unidad intermedia constituida por arcillas, arcillas orgánicas y lignitos. Estas tres unidades son las que figuran en la interpretación de las columnas de sondeos así como en la integración tridimensional realizada. En un principio el proceso de integración 3D se elabora mediante un proyecto en el programa ArcView y los resultados obtenidos se incorporan a un proyecto en Vulcan 3D con mayor potencial para la visualización tridimensional y la generación de perfiles y de cálculos volumétricos. El resultado final ha consistido en la generación de un bloque tridimensional donde se ha representado el MDT y el muro de las tres formaciones para cada uno de los programas anteriormente indicados, con las posibilidades de explotación, consulta y representación asociadas a cada uno de ellos.

Se ha trabajado con un total de 109 sondeos (figura 4); de los cuales se dispone de datos correspondientes al muro de la unidad superior en 60 de ellos, del muro de la intermedia en 59 y del muro de la inferior en 106. Los perfiles estructurales existentes han sido otros de los datos de carácter tridimensional que han ayudado a la definición geométrica de las distintas

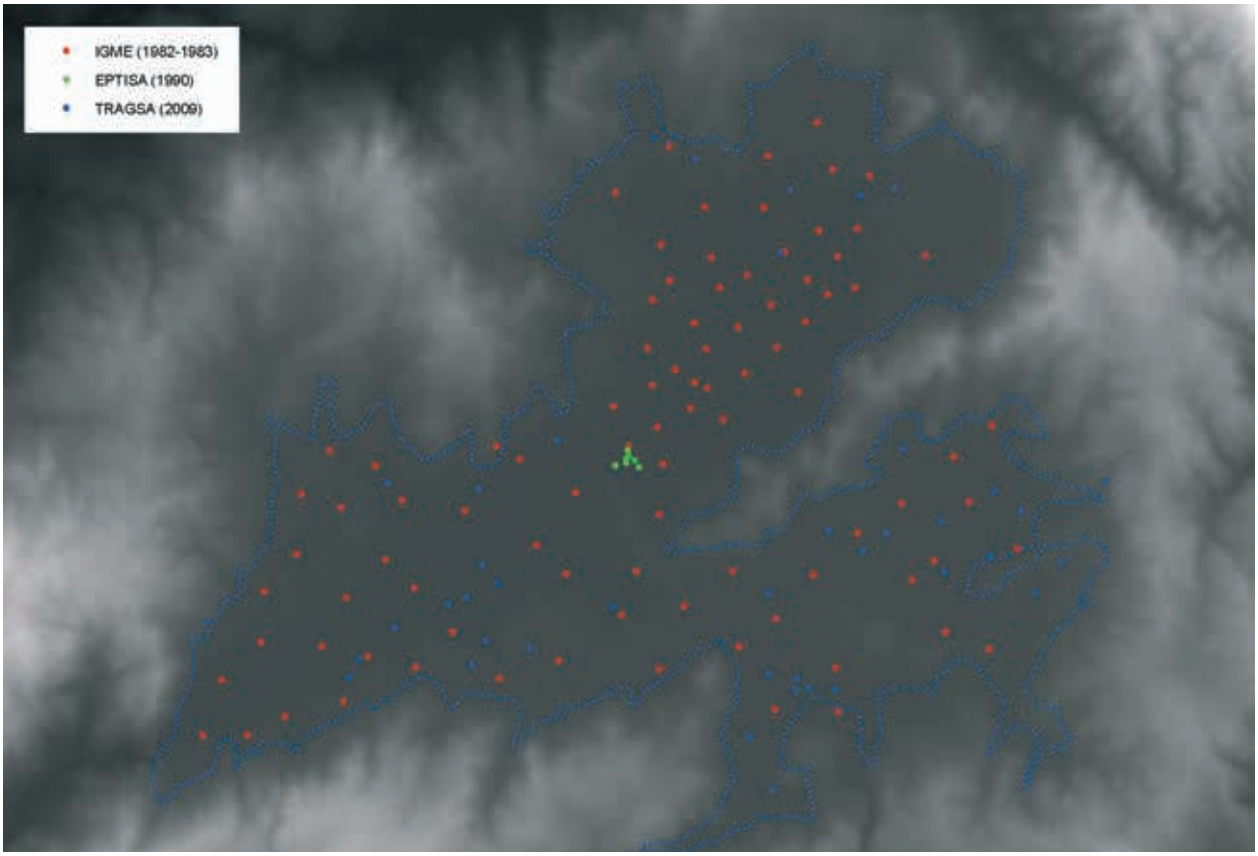


Figura 4. Sondeos sobre el MDT

unidades y ha permitido la revisión de los diferentes sondeos.

El tratamiento de toda la información obtenida se ha realizado mediante ArcView, generándose para cada uno de los muros de cada unidad un modelo digital de elevaciones con objeto de poder integrarlos en un sistema de información geográfico convencional. De esta manera se puede realizar la representación de cada uno de estos niveles, tal y como se intenta representar en la figura 5.

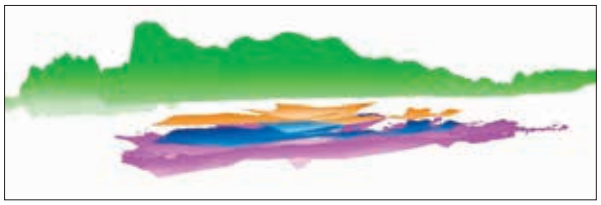


Figura 5. Representación 3D del MDT y del muro de las tres capas simuladas

La información así generada y con los formatos existentes, podrá ser de gran utilidad en un futuro para la realización de un modelo matemático que integre la totalidad de la MASb.

RESULTADOS OBTENIDOS

Marco socioeconómico y uso del territorio

El principal uso del suelo desde la desecación de la Laguna de Antela y su entorno es la agricultura. El cultivo predominante es la patata que se combina con el cultivo de cereales, mayoritariamente trigo, practicando la rotación patata/cereal/cereal. Se ha contabilizado (según el proyecto CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) Land Cover) una superficie labrada del orden de 20.000 ha, (figura 6), de las cuales, teniendo en cuenta la rotación se puede establecer que en unas 4.000-6.000 has se cultiva patata, en 12.000-14.000 has, cereal y en unas 2.000 ha, forrajeros. Parte de los propietarios están agrupados en nueve comunidades de regantes, dos de ellas, Antela y Antioquía, han pasado por un proceso de transformación y modernización; otras cuatro, Corno do Monte, Lamas-Ganade, Alta Limia y San Salvador de Sabucedo, prevén esta modernización a corto plazo mientras que las otras tres, Trasmiras, Sarreaus, Val do Ouro, se producirá más largo plazo. La superficie total correspondiente a las comunidades de regantes es del orden 10.000 ha; el

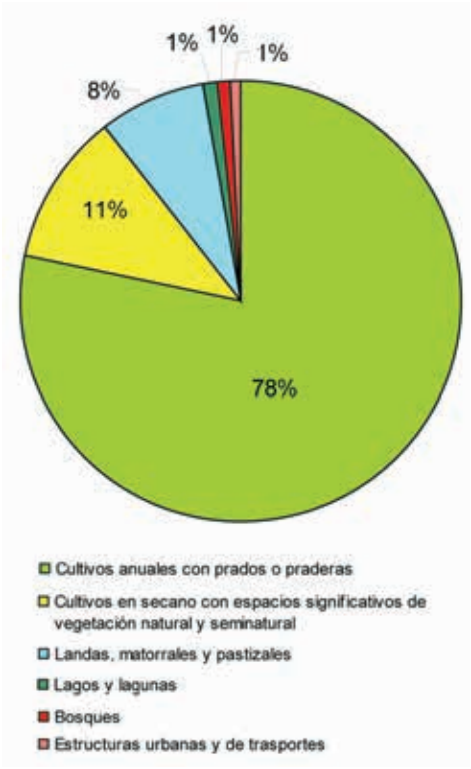


Figura 6. Usos del suelo obtenidos del proyecto CORINE

resto de la superficie labrada, con menor porcentaje de cultivo de patata, es propiedad de particulares que mantienen el sistema tradicional. El riego del tubérculo se realiza como máximo durante 45 días al año distribuidos entre el 15 de junio y el 15 de agosto. El consumo de agua puede alcanzar un máximo de 200 L/m^2 (2 000 m^3/ha), en función del régimen pluviométrico estival y del cultivo considerado, en ocasiones, el riego de superficies cultivadas con maíz puede alcanzar mayores valores (288 L/m^2)

La modernización de los regadíos supone, entre otros aspectos, el cambio en el sistema de riego; mientras que el riego tradicional se realiza tomando agua directamente de los cursos superficiales o a través pozos de gran diámetro y poca profundidad, entre 3 y 5 m (figura 7), los nuevos sistemas captan agua mediante sondeos de profundidades entre 50 y 80 m situados a cierta distancia de los cauces, para evitar su afección (figura 8).

El escenario actual es que en la comunidad de regantes de Antioquía el riego se realiza mediante sondeos; la comunidad de regantes de Antela, también modernizada, obtiene agua del Canal Dren Principal mediante una estación de bombeo y una red de riego. El resto de la superficie cultivada se riega mediante concesiones en ríos y pozos privados, cuyo alcance es imposible de determinar. A corto plazo (3-4 años) se espera que estén en funcionamiento cuatro comunidades más (Corno do Monte, Lamas-Ganade, Alta Limia y San Salvador de Sabucedo), en un escenario más lejano se

Figura 7. Pozo de gran diámetro para captación-depósito de agua

Figura 8. Sondeo en una comunidad de regantes modernizada

podrían entrar las otras tres, Trasmiras, Sarreaus y Val do Ouro.

Estudio hidroclimático

El análisis de la serie 1970-2008 ha permitido establecer un valor de temperatura media anual para la zona de 13,9 °C. Los valores medios anuales de precipitación según la tipologia del año obtenidos son los siguientes: la precipitación para un tipo de año medio es de 927 mm/año, para el tipo de año seco es de 696 mm/año y para el tipo de año húmedo 1176 mm/año.

Para la valoración de la recarga se ha estudiado la distribución de la precipitación en la cuenca mediante mapas de isoyetas elaborados para años tipo (seco, medio y húmedo) (figura 9); además se ha calculado ETP, mediante el método de Thornthwaite, obteniéndose una cifra de 678 mm. El valor obtenido de la lluvia útil tras la aplicación de los distintos métodos, para los años medios en la zona de estudio es de 473 mm. Al igual que para las precipitaciones, los valores mínimos de lluvia útil se presentan en la zona noroeste, en la zona de Allariz y la zona central de la cubeta de Xinzo de Limia, y los máximos en la zona sureste, en la divisoria de cuencas situada en la zona de Valderrei. Cabe destacar la gran diferencia existente entre los valores obtenidos, dependiendo de si se consideran años medios, secos o húmedos.

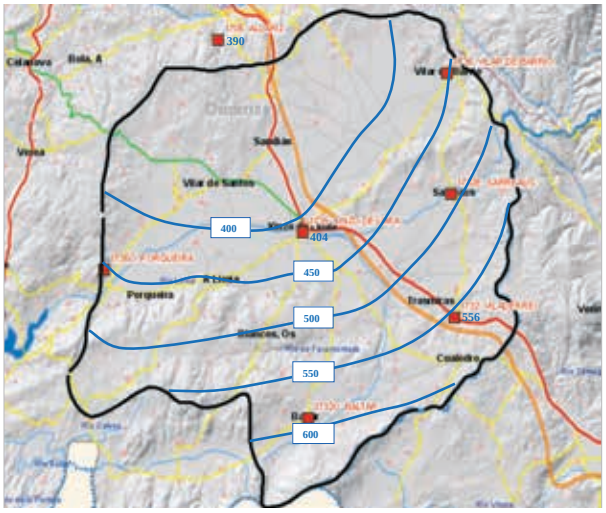
El resultado correspondiente al cálculo de la ETR según el método realizado se muestra en la tabla 1.

VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL			
Método	**año medio**	**año seco**	**año húmedo**
Turc	35-45 %	23-31 %	46-50 %
Coutagne	34-43 %	24-30 %	44-48 %
Balance hídrico Thornthwaite	44-53 %	31-40%	57-60%

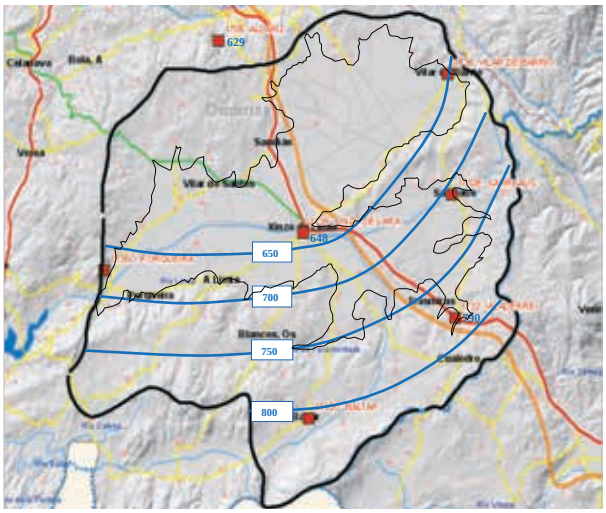
Tabla 1. Valores de evapotraspiración real

Hidrología superficial

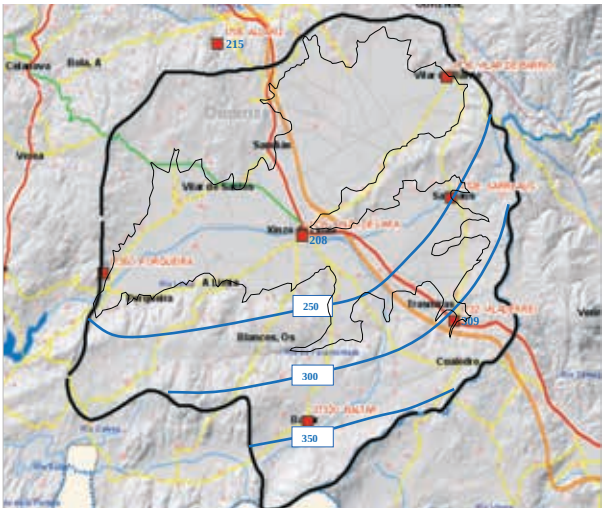
Los recursos hídricos se han calculado considerando una superficie de la cuenca hidrográfica hasta la estación de aforo de Puente Linares de 686 km^2; la aportación total para años medios se ha estimado



Lluvia útil para el año medio (mm/año): Subcuenca y MASb



Lluvia útil para el año seco (mm/año) Subcuenca y MASb.



Lluvia útil para el año húmedo (mm/año) Subcuenca y MASb.

Figura 9. Distribución de Lluvia útil (mm/año) Subcuenca y MASb.

en 324,5 hm³/año. Sin embargo, si únicamente se tiene en cuenta la lluvia caída sobre la superficie de la masa, las aportaciones directas serán proporcionalmente menores, habiéndose calculado un valor de 119,7 hm³/año. De lo que se puede deducir que más del 63% de los recursos hídricos totales se generan en la zona perimetral granítica y del orden del 37% en sobre la superficie de la propia masa.

Los principales cauces superficiales son el denominado Canal Dren Principal de la Laguna de Antela, que proviene del lóbulo mas septentrional de la depresión de Antela y el río Limia, que nace en al nordeste de la masa, donde se sitúan las mayores altitudes, como resultado de la confluencia de pequeños arroyos y regatos. Poco después de su nacimiento, este río recibe los aportes de los ríos Faramontaos y Nocedo, que incorporan un caudal significativo; a unos 7 km después de atravesar la localidad de Xinzo de Limia confluye con el Canal Dren Principal, y se dirige en dirección suroeste, pasando por Puente Linares; en dicha localidad la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil dispone de una estación de aforo en el cauce del río Limia. (figura 10).

Marco geológico

Los materiales que conforman el entorno de la cuenca corresponden a las series Paleozoicas y Precámbricas del sinclinorio de Verín y parte del macizo granítico de Allariz. La MASb esta constituida por materiales detríticos cuaternarios y miocenos y se pueden diferenciar tres tramos, el superior e inferior compuesto por materiales sedimentarios en niveles de arenas con niveles de gravas y pasadas de arcillas y limos; y un tramo intermedio que se acuña hacia los bordes, formado mayoritariamente por materiales arcillosos y lignitos. El contacto entre formaciones suele ser gradual, siendo frecuentes los cambios laterales de facies, tal como se aprecia en la correlación de los diferentes sondeos consultados.

Como síntesis de toda la información geológica existente y sondeos realizados y con el objetivo de contribuir al mayor conocimiento global de la estructura y de la disposición estratigráfica de las formaciones se ha elaborado un modelo tridimensional. Dicho modelo puede ser explotado utilizando un sistema de información geográfica convencional y además, mediante

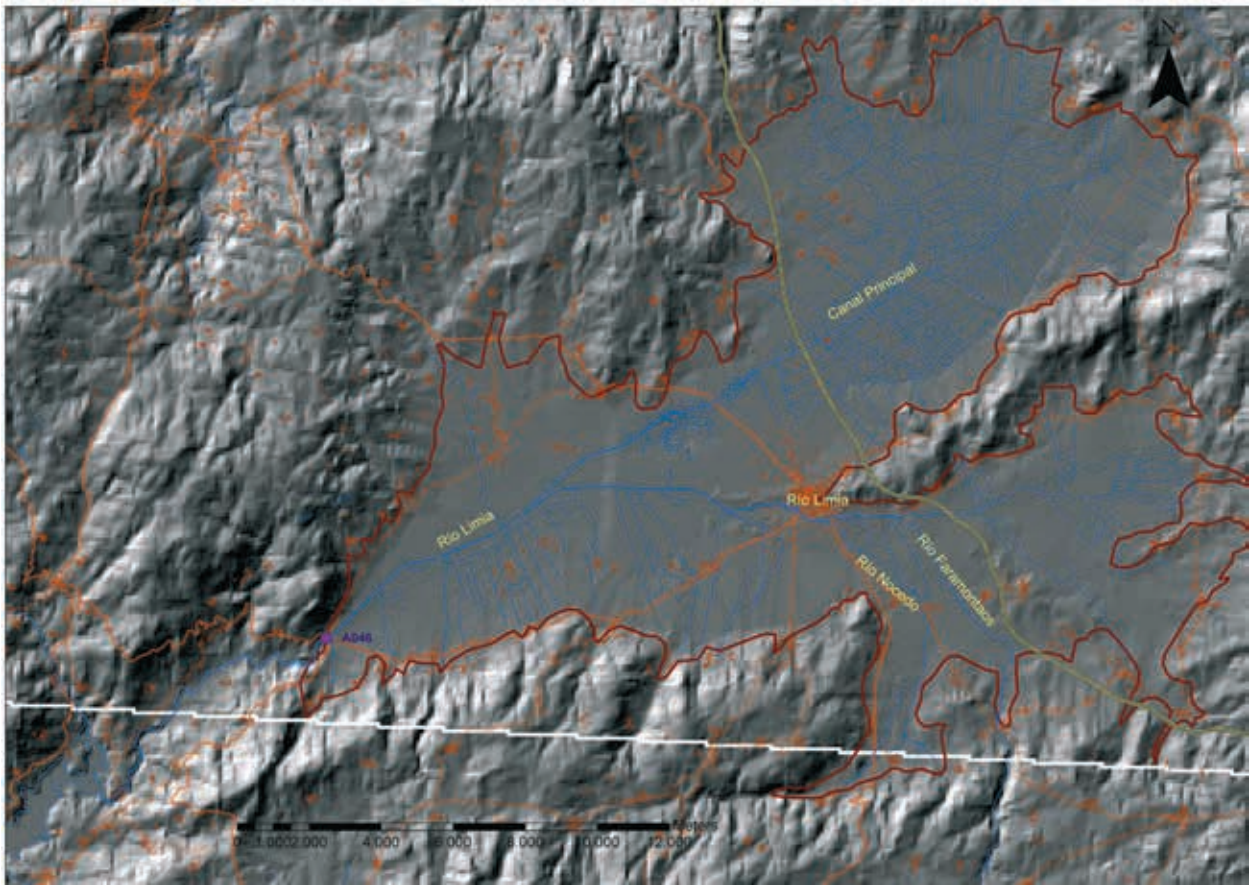


Figura 10. Situación de la estación Puente Linares. Red SAIH

sistemas específicos de tratamiento de datos tridimensionales.

Hidrogeología

La masa de agua subterránea (MASb) 011.006 Xinzo de Limia se corresponde con la antigua Unidad Hidrogeológica 01.27, dentro del ámbito territorial de la Demarcación Hidrográfica, y está delimitada en todos sus bordes por la MASb Cuenca Baja del Miño (011.002). Desde el punto de vista del sistema de explotación de los recursos hídricos la MASb se encuentra dentro del sistema denominado Limia. La extensión en superficie de esta masa coincide con el área situada a cotas más bajas; está bordeada por relieves montañosos constituidos por materiales graníticos y metamórficos.El límite subterráneo corresponde al sustrato impermeable constituido por los mismos materiales que estructuralmente conforman la cubeta. Cabe destacar que la definición actual de la MASb se ajusta a los materiales detríticos permeables. Si embargo, considerando el carácter semi endorreico de la cuenca, parte del área de recarga de la masa se localiza en el territorio pre-mioceno que bordea la masa. Se estima que este hecho debe ser valorado en la gestión de los recursos hídricos, así como en las actuaciones encaminadas a la proteción de garantizar la buena calidad del agua vertiente (figura 11).

En esta masa de agua se han definido dos acuíferos detríticos independizados, en su mayor parte,por un nivel arcilloso-lignífero. Este nivel no presenta una extensión geográfica completa al no estár representado en los bordes de la misma (figura 12), permitiendo la existencia de conexión entre ambos acuíferos, en las zonas en las que no existe dicho nivel. El acuífero superior está formado por arenas con niveles de gravas y pasadas de arcillas y limos. Presenta un espesor medio de 60-80 m alcanzando valores de 100-120 m, en el sector meridional de la antigua Laguna de Antela. Se trata de un acuífero libre cuyo nivel freático, muy próximo a la superficie del terreno, aflora en ocasiones, generando lagunas y zonas encharcadas. El inferior, litológicamente similar y con una potencia máxima de 120 m, presenta un régimen de semiconfinamiento, condicionado por el nivel intermedio que actúa como acuitardo. Una manifestación del semiconfinamiento del acuífero y de la

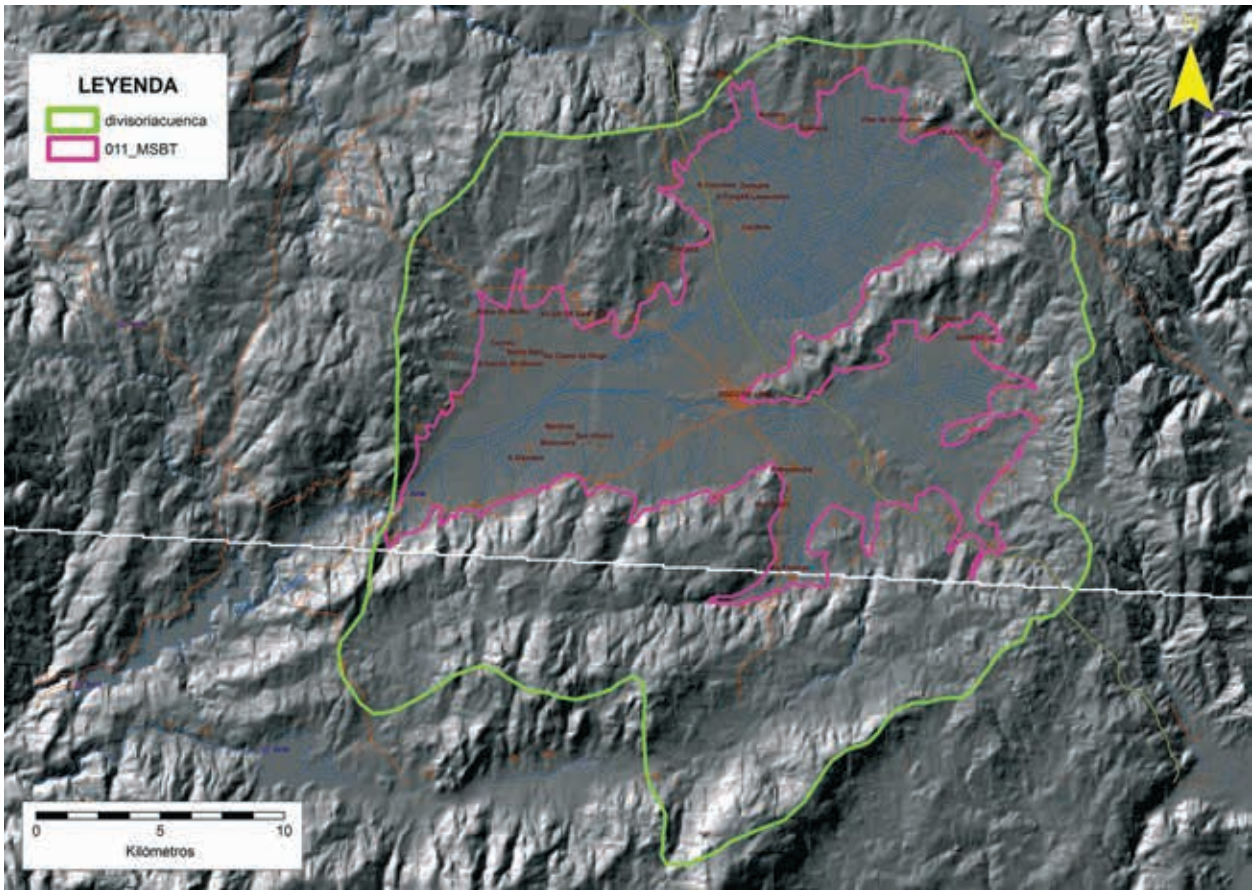


Figura 11. Delimitación de la MASb y área de recarga

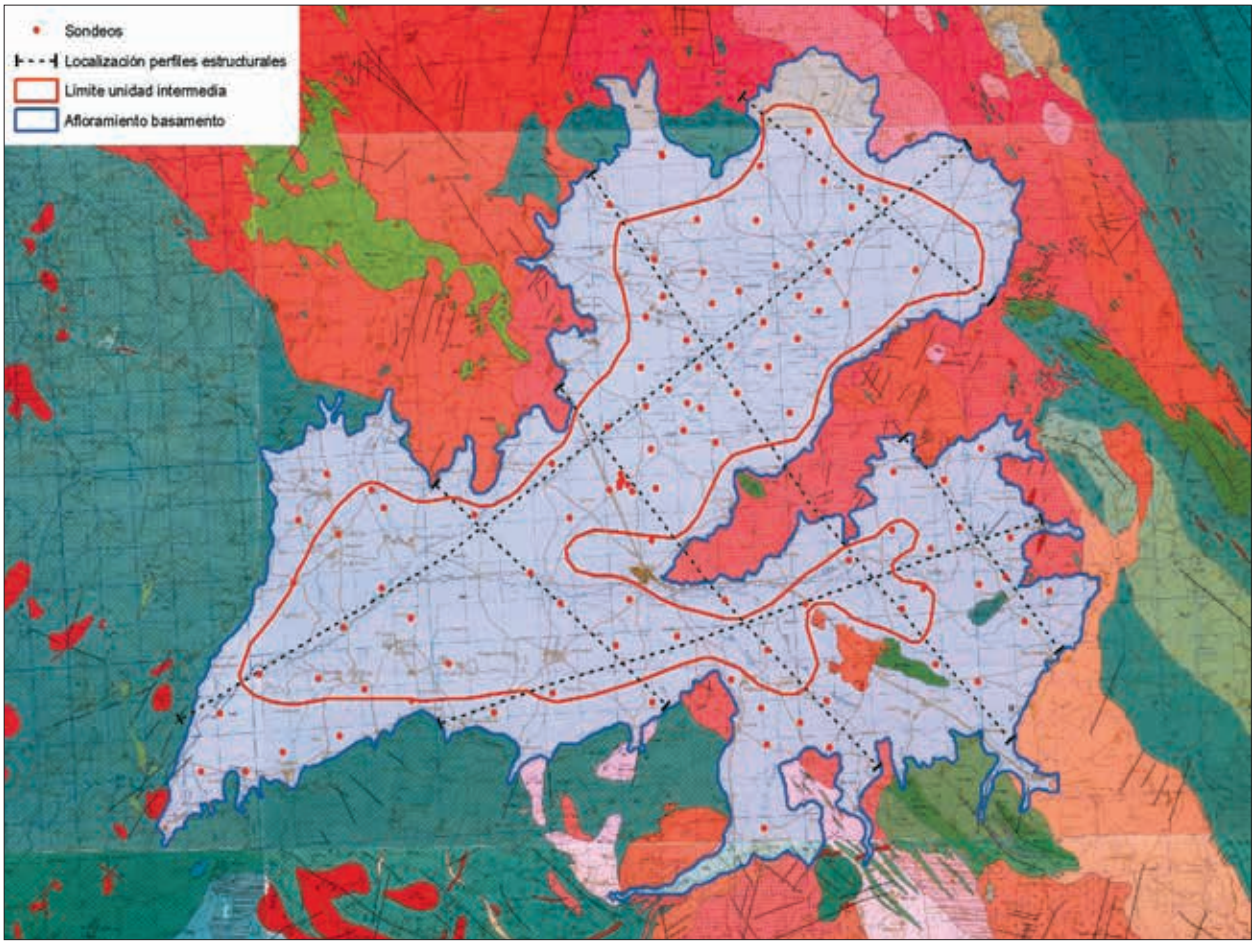


Figura 12. Límite de unidad intermedia

situación en carga de los niveles piezométricos es la existencia de dos sondeos surgentes en el centro de la depresión de Antela. La conexión hídrica está supeditada a la existencia o ausencia de la capa lignitífera intermedia de forma que en las zonas de borde donde los dos acuíferos están en contacto existe un flujo descendente que recarga el acuífero inferior, mientras que hacia el centrode la cuenca existe un flujo ascendente del acuífero inferior hacia el superior a través del acuitardo que lo separa, (figura 13).

Cálculo de reservas hídricas subterráneas

Teniendo en cuenta el volumen calculado a partir del modelo 3D y una porosidad media del 4,6%, se ha realizado una estimación del volumen de reservas hídricas en la Unidad Superior obteniéndose un valor de 380 hm^3. Y mediante la realización de perfiles topográficos y la discretización de dicha unidad de acuífero en franjas de 20 en 20 m, se ha procedido al cálculo de volúmenes de agua en las tres formaciones geológicas (tabla 2).

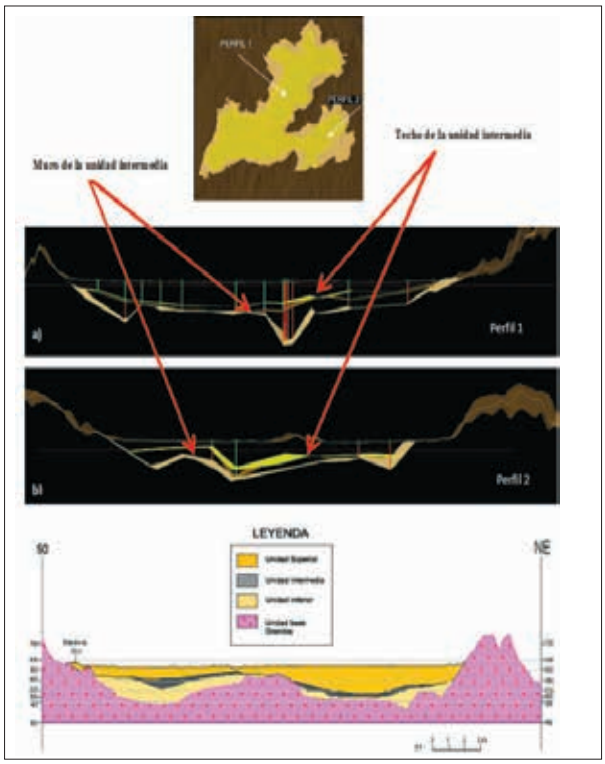


Figura 13. a) Perfiles estructurales b/ perfil topográfico con orientación SO-NE, disposición de las unidades y zócalo granítico

	Rango de cotas m s.n.m.	Volúmenes de la unidad superior		Reservas de agua	
		hm³	hm³ acumulados	hm³ por rangos de cota	hm³ acumulados por rangos de cota
Cota base Unidad Superior: 496 m	496-500	4,12	4,12	0,19	0,19
	500-520	173,54	177,66	7,95	8,14
	520-540	509,57	687,23	23,34	31,48
	540-560	861,09	1548,32	39,44	70,91
	560-580	1.606,79	3.155,11	73,59	144,50
Cota río Limia: 601 m	580-600	2.480,25	5.635,35	113,60	258,10
	600-620	2.516,10	8.151,46	115,24	373,34
	620-640	156,23	8.307,69	7,16	380,49
Cota más alta: 660 m	640-660	6,93	8.314,62	0,32	380,81
	TOTAL	**8.315,00**		**380,81**	

Tabla 2. Volúmenes correspondientes a las tres litologías consideradas.

Figura14. Afloramiento del nivel freático en una explotación de áridos

Relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas. Sistemas lagunares asociados al acuífero

Como ya se mencionó anteriormente, es importante recordar que en la zona norte, existió históricamente una laguna denominada Laguna de Antela. Dicho humedal, de carácter permanente, presentaba cierta estacionalidad de forma que en aguas altas todo el terreno permanecía inundado, mientras que en época de aguas bajas la superficie cubierta por el agua quedaba reducida, dando un aspecto de lagunas desagregadas. Las oscilaciones intra e interanuales estaban relacionadas con las condiciones climáticas y, por ende, con las fluctuaciones del nivel freático regional.

En la actualidad únicamente se localizan lagunas o zonas encharcadas en un pequeño sector situado al noroeste de Xinzo de Limia. Por otra parte, se han generado nuevos encharcamientos como consecuencia de la extracción de áridos mediante el proceso de dragado, en las proximidades de Rairiz de Veiga. El origen de estas zonas húmedas se establece en la proximidad del nivel freático a la superficie, de forma que cualquier nueva vaguada creada, por causas naturales o por la acción antrópica puede dejar al descubierto el nivel freático (figura 14). La situación del nivel piezoemétrico es determinante en las variaciones que se producen en la relación "aguas superficiales-aguas subterráneas", ya que pequeñas oscilaciones en la piezometría generan cambios en el sentido de dicha relación.

Hidroquímica

Entre los aspectos más destacables del quimismo de las aguas subterráneas cabe indicar que la unidad inferior presenta una mineralización mayor que la correspondiente a la unidad superior, estableciéndose una conexión entre ambas a través del acuitardo, y por lo tanto, una

mezcla de aguas (figura 15). Los estudios realizados hasta la fecha han permitido establecer que la circulación de agua, probablemente, tenga lugar en sentido ascendente, es decir, el acuífero superior recibe aportes de la unidad inferior; si bien, esta afirmación debería ser corroborada mediante las investigaciones pertinentes.

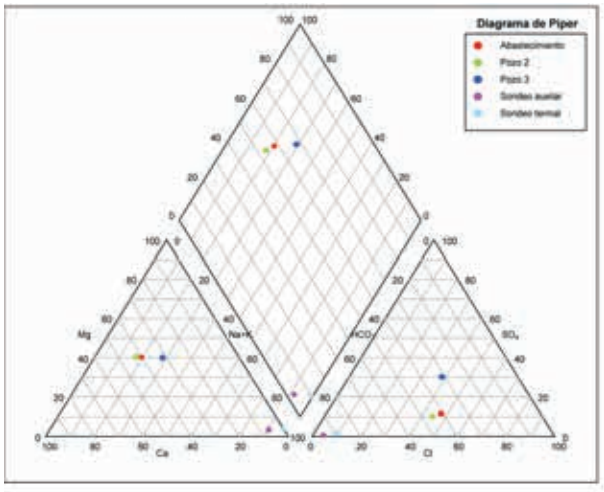


Figura15. Diagrama de Piper.

Balance hídrico

Para la realización de un balance hídrico en el área de estudio se han establecido como entradas de agua al sistema (masa de agua subterránea), la precipitación y los retornos de regadío y como salidas, las extracciones para usos agrícola, humano e industrial, el drenaje del acuífero por los ríos, la evapotranspiración de áreas cultivadas con o sin riego y la evaporación.

La recarga de ambos acuíferos procede de la infiltración del agua de precipitación. Mientras que el acuífero superior se recarga directamente a partir la lluvia útil, el inferior lo hace únicamente en las zonas de borde donde existe conexión entre los dos acuíferos. Además de la precipitación caida sobre la superficie que ocupan los materiales detríticos se deben considerar los aportes procedentes de la escorrentía generada en las zonas más elevadas de la cuenca, debido a que, el drenaje de estas zonas se produce a través de la misma red hidrográfica. Las salidas del sistema tienen lugar a través de los cauces superficiales que, además de evacuar el agua superficial, reciben la descarga de los acuíferos presentes. La orografía de la cuenca con muy baja pendiente, condiciona ausencia de manantiales y que los afloramientos del nivel freático se produzcan en forma de charcos, lagunas o zonas húmedas. La circulación general del sistema, tanto para la escorrentía superficial como subterránea presenta una dirección noreste-suroeste en la depresión de Antelaño Limia y este-oeste en la depresión de Abavides (Figura 16). Por otra parte, se considera que no existen aportes de agua subterránea procedentes de las masas colindantes debido a la baja permeabilidad de los materiales que las forman (figura 17).

Para finalizar se adjunta una tabla-resumen en la que se desglosan los volúmenes de agua considerados para las diferentes entradas y salidas (tabla 3).

ENTRADAS	**hm³**
1. Aportación al sistema	324,4
2. Aportación subterránea de MASb contiguas	-
3. Aportación cauces superficiales	-
4. Retorno Regadío	1,5-2,2
	325,9-326,6
SALIDAS	**hm³**
1. Bombeos (agricultura, industria y abastecimientos)	15-22
2. Salidas subterráneas hacia MASb contiguas	0,0
3. Drenaje del acuífero por los ríos	307,2
4. Humedales	1,3
	323,7-330,5
Total (Entradas-Salidas)	**2,2-3,9**

Tabla 3. Resumen del balance hídrico.

Aguas termales

La presencia de aguas termales en la masa se puso de manifiesto durante la investigación minera llevada a cabo en los años 80, ha sido posteriormente estudiada (Seara, 2009). Dos de los sondeos perforados durante dicha investigación son surgentes en la actualidad y denotan cierta termalidad; en uno de ellos, denominado Sondeo Termal, el agua aflora en superficie con una temperatura de 25 °C y aunque en el otro (Sondeo Auxiliar) la temperatura en superficie es fria se ha podido comprobar que en profundidad alcanza una temperatura mayor que la de las aguas subterráneas. No se ha podido acceder a la columna litológica del Sondeo Termal, si bien debido a su profundidad de más de 200 m se estima que alcanza el acuífero inferior y el basamento paleozoico. En una de la labores de investigaciónse ha procedido a realizar un perfil de conductividad eléctrica del agua desde la superficie hasta la base del sondeo que ha puesto de manifiesto un brusco ascensodesde el m 180 asciende llegando a alcanzar la cifra 1500 µS/

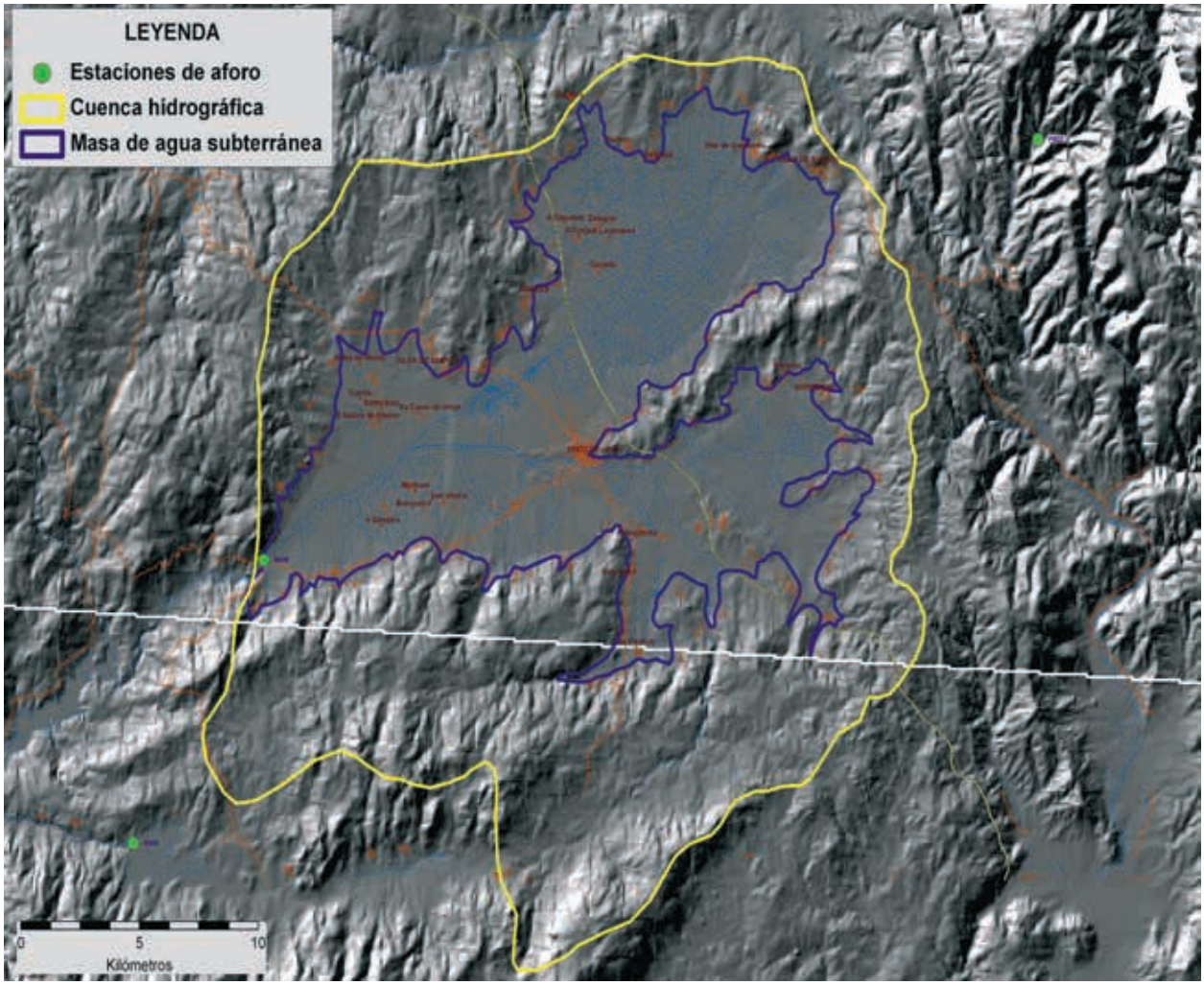


Figura 16. Delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Limia hasta la estación de aforo de Puente Linares, junto con la traza de la MASb 011.006 Xinzo de Limia.

Figura 17. Aspecto de los materiales colindantes.

cm (figura 18), valor bastante superior a los medidos en el entorno. La temperatura evoluciona de forma uniforme con la profundidad habiéndose medido un valor máximo de 28,2 °C en la base del sondeo. Estos datos llevan a considerar que en esta zona existe un aporte de agua termal, de mayor mineralización, procedente, probablemente, del basamento paleozoico. El sondeo auxiliar está situado muy próximo al anterior, los valores de conductividad electrica alcanzan la cifra de 900 µS/cm y la temperatura del agua asciende progresivamente hasta un valor de 26,2 °C, corroborando la hipótesis de que existe un aporte de agua de mayor conductividad y temperatura en la base del sondeo.

Vulnerabilidad

En la encomienda de gestión se realizó el estudio referente a la vulnerabilidad de los materiales frente la contaminación del agua subterránea; en la figura 19 se muestra la zonificación de los mismos, siendo los valores en esta masa entre moderados y muy elevados.

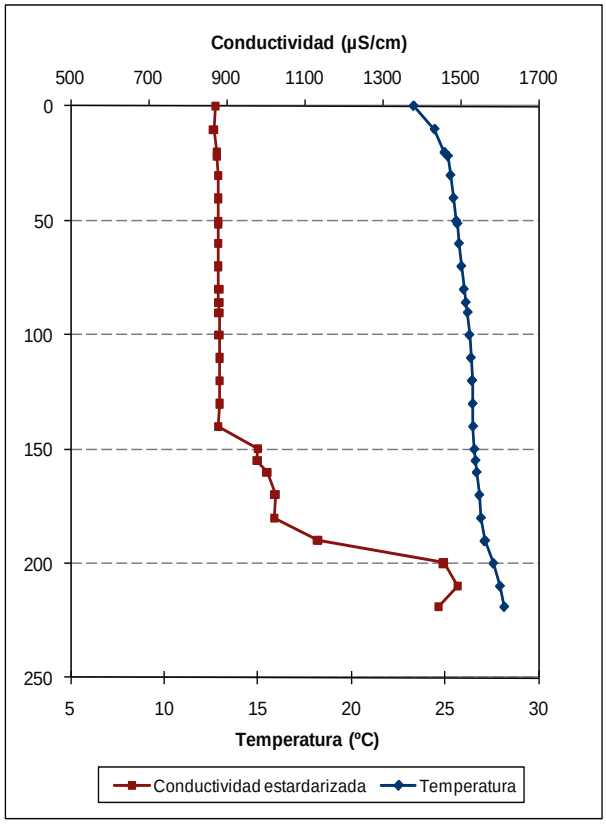


Figura 18. Aspecto actual del Sondeo Termal y perfil de temperatura y conductividad

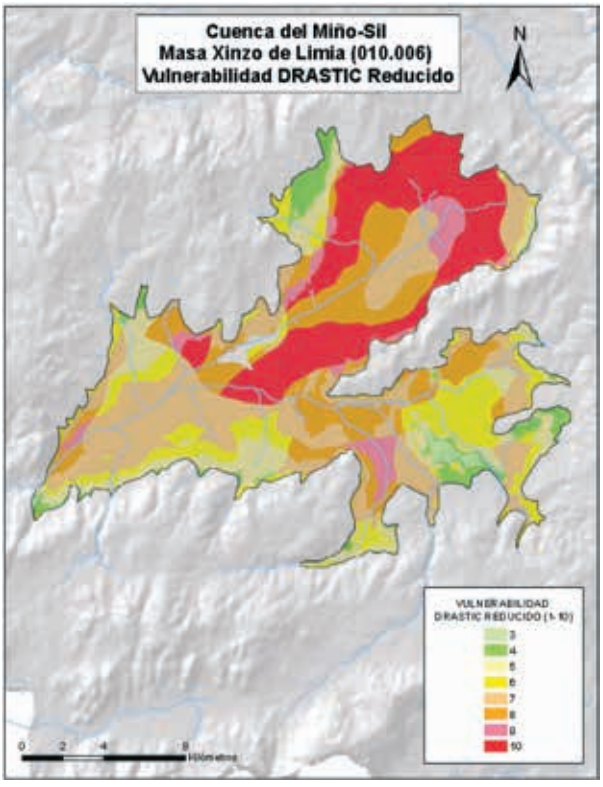


Figura 19. Mapa de Vulnerabilidad. (FTe: Encomienda de Gestión DGA-IGME 2007-2010).

CONSIDERACIONES GENERALES

Los primeros estudios realizados en la depresión terciaria de Xinzo de Limia datan del s. XIX y tenían como objeto la desecación de la laguna denominada *Laguna de Antela*, de carácter endorreico y que se interpreta como un afloramiento de las aguas subterráneas. Finalmente, la desecación de la laguna se llevó a cabo, por el Instituto Nacional de Colonización, entre finales de los años 50 y principios de los 60, con la finalidad de transformar el suelo en uso agrícola. Con posterioridad, a finales del s. XX, en relación con la presencia de lignitos en profundidad se desarrollaron varias investigaciones por parte del Instituto Geológico y Minero de España y Endesa, principalmente. Durante el transcurso de las mismas, se realizaron gran número de sondeos así como de perfiles geofísicos que permitieron elaborar el modelo geológico de la cuenca. Debido la presencia de aguas subterráneas, y con el fin de su posible explotación minera, se procedió a la elaboración de un estudio hidrogeológico, en el que se obtuvieron datos de parámetros hidrogeológicos y piezometría y se estableció un modelo hidrogeológico conceptual. Los estudios posteriores, encaminados al uso y gestión del agua subterránea para regadío, han

sido realizados en su mayor parte por la Xunta de Galicia y han permitido mejorar el conocimiento de las características hidrogeológicas de la MASb. Además, han puesto a disposición numerosos piezómetros de control que permiten realizar un seguimiento de la evolución piezométrica. Por otra parte, cabe destacar, las redes de control del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, que cuentan con una estación SAICA en el río Limia en Puente Linares y respecto a las aguas subterráneas, dos puntos de la red de estado cuantitativo y dos puntos de la red de estado cualitativo.

La gran cantidad de información generada en el transcurso de las investigaciones ha permitido realizar una síntesis geológica y la elaboración de un modelo geológico 3D, mediante la aplicación de nuevas tecnologías. Este elemento que engloba toda (o la mayor parte) de la documentación generada sobre la zona constituye una herramienta básica que podrá ser utilizada para la modelización hidrogeológica de toda la MASb así como en la gestión del agua subterránea.

El modelo hidrogeológico conceptual elaborado a partir de la interpretación geológica de la cuenca, ha sido posteriormente corroborado con nuevos sondeos junto con las observaciones de campo realizadas. Se considera, por tanto que cada una de las dos unidades detríticas definidas en el modelo geológico constituyen sendos acuíferos, denominados *acuífero inferior* y *acuífero superior*, independizados hidráulicamente por el nivel lignitífero-arcilloso en la zona central de la cuenca, habiéndose definido mediante la interpretación de las columnas de sondeos, la extensión de este nivel. En el área en que ambos acuíferos están en contacto se produce la recarga del acuífero inferior a través del acuífero superior.

El modelo geológico realizado, junto con la estimación de un valor de porosidad media del 4,6%, ha permitido realizar un cálculo orientativo del volumen de reservas de agua en la unidad superior de 380 hm^3 de los que, se calcula que unos 58 hm^3 podrían corresponder a recursos renovables anualmente.

El límite actual de la MASb se restringe a los materiales permeables de edad terciaria-cuaternaria y se ajusta al contacto con las rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Sin embargo, considerando el carácter semiendorreico de la cuenca, toda el agua caída en la superficie limitada por la divisoria de aguas superficiales es drenada de forma superficial o subterránea a través de esta masa. Este hecho debe ser considerado en dos aspectos: a) para en el cálculo del volumen de agua correspondiente a la recarga del acuífero, ya que se deben contabilizar todos los aportes procedentes de la precipitación dentro del área correspondiente a la cuenca superficial y b) desde el punto de vista de la protección cualitativa de las aguas subterráneas, ya que cualquier contaminante vertido dentro del dicho área podría afectar al agua subterrránea..

El balance hídrico se ha realizado para la totalidad de la MASb, considerando los aportes por precipitación correspondientes a toda la cuenca hidrográfica del río Limia hasta la estación de aforos de Puente Linares; los cuales para un año medio se estiman en unos 325 hm^3. El principal uso del agua es el agrícola, y representa como máximo un 7% de la lluvia útil. En la actualidad, los excedentes hídricos de la cuenca se drenan a través del río Limia, La estación SAIH, gestionada por la Confederación Hidrográfica del Norte, situada en Puente Linares, permite el control de los recursos hídricos de la cuenca.

Para mejorar y completar el conocimiento de la MASb se considera necesario realizar un análisis pormenorizado de toda la información existente relativa a la hidroquímica de las aguas subterráneas y complementarla con muestreos a distintas profundidades a fin de estudiar, analizar e interpretar correctamente las diferencias de conductividad encontradas en los perfiles realizados. Por otro lado, a fin de garantizar la no afección relacionada con el uso agrícola del suelo, se considera de interés el control periódico de las aguas subterráneas haciendo especial hincapié en los parámetros asociados a dicho uso.

Una evaluación preliminar de la vulnerabilidad a la contaminación ha llevado a la observación de que la mayor parte de la superficie de la MASb presenta valores entre vulnerabilidad moderada y muy elevada, por lo que se considera necesario la protección adecuada de las aguas subterráneas ya que cualquier vertido realizado podría incidir de forma negativa sobre la calidad de las mismas, generando posibles restricciones al uso.

La presencia de aguas hipotermales en dos sondeos surgentes que atraviesan el acuífero inferior podrían estar relacionadas con aportes termales procedentes del zócalo ígneo, si bien se necesitaría la realización de una investigación de mayor detalle, que incluya, entre otros trabajos, la ejecución de sondeos que profundicen en el zócalo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dantín, J. (1942). Regiones naturales de Espana. Tomo I. C.S.I.C., Instituto Juan Sebastián Elcano, Madrid.

Díez Montes, A., González Menéndez, L., Martínez Catalán, J.R. y Gallastegui, G. (2010).

Mapa geológico digital continúo a escala 1:50.000 de Galicia Occidental. IGME.

ENDESA (1991): Estudio de factibilidad de la explotación del yacimiento de lignitos de Ginzo de

Limia (Orense). *Empresa Nacional de Electricidad*., 132 p. y vol. V anejos. Madrid.

Fernández Rubio, R. y Asociados Consultores (1982): Yacimiento de lignitos de Ginzo de

Limia. (Orense). Estudio hidrogeológico preliminar. 314 p. Madrid.

Fernández Rubio, R. y Asociados Consultores (1986): Estudio hidrogeológico infraestructural Lagoa Dántela (Orense). 183 p. y 9 mapas. Madrid.

Fontán Rodríguez, D. (1845). *Carta geométrica de Galicia*, Lemercier, Paris.

IGME (1974a): Mapa Geológico 1:50.000, Celanova (nº 263), Ginzo de Limia (nº 264). *Inst. Geol. y Min. de España.*Memoria y Hoja. Madrid.

IGME (1982a): Investigación de lignitos en las cuencas limnicas Gallegas (Cuenca Ginzo de Limia). *Inst. Geol. y Min. de España*. 86 p.

IGME (1982b): Sondeos para evaluación previa de reservas lignitiferas en Ginzo de Limia (Orense). *Inst. Geol. y Min. de España*. 53 p.

IGME (1986): Informe sobre el posible emplazamiento de residuos sólidos urbanos de Xinzo de Limia (Orense). *Inst. Geol. y Min. de España*. 15 p.

Julivert, M., Marcos, A. y Truyols, J. (1972). Bulletin de la Societé Géologique et Minéralogique de Bretagne, 4, 1-7.

Seara Valero, J.R. (2009): Estudio Geológico y geofísico del Acuífero Termal de la Subcuenca de Antela, Provincia de Ourense.Fase 1, Dpto. Xeociencias Mariñas e Ordenación do Territorio.

Facultad de Ciencias de Ourense. Universidad de Vigo. 123 p. Vigo.

Xunta de Galicia (2002): Estudio Hidrogeológico para la Transformación en Regadío de la

Comarca de "A Limia", (Ourense). Conselleria de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.

Xunta de Galicia (2003a): Características técnicas y resultados de los sondeos de captación de aguas subterráneas para el abastecimiento del regadío de la margen izquierda del canal principal de la Laguna de Antela. Concejos de Sandias, Sarreaus y Xinzo de Limia. Conselleria de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.

Xunta de Galicia (2003b): "Características técnicas y resultados de los sondeos de captación de aguas subterráneas para la mejora y consolidación de los regadíos en la comarca de A

Limia, Ourense . Zona Laguna de Antela" Conselleria de Agricultura, Gandería e Política Agroalimentaria.

Xunta de Galicia (2006): "Proyecto de medidas correctoras-compensatorias y primer año de

vigilancia ambiental (2006) del proyecto de transformación en regadío del secano de la Laguna de Antela". Conselleria de Medio Rural.

Xunta de Galicia (2007 a,b,c): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zonas de Parte Alta, Parte Baja Zona y Entre Ríos. Conselleria de Medio Rural.

Xunta de Galicia (2008): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zona de Porqueira. Conselleria de Medio Rural.

Xunta de Galicia (2009ª, b, c, e d, e): Informe sobre los resultados de los piezómetros realizados en la comarca de "A Limia" (Ourense). Zonas de Sarreaus,Trasmiras, Val de Ouro, Fontoiro (Villar de Barrio) y Medorra (Xunquera de Ambia). Conselleria de Medio Rural.

Zapata Tejedor, F. (1967): Desecación y saneamiento de la laguna de Antela. *Revista de Obras Públicas*, 115, tomo I (3026): 465-472

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DISPONIBLES EN LAS MASb DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO: 030.008 LA ALCARRIA, 030.015 TALAVERA, 030.018 OCAÑA Y 030.022 TIÉTAR

José María Ruiz Hernández

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Tajo: 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

José M.ª Ruiz Hernández
Carolina Guardiola Albert

Colaboración:

Juan de Dios Gómez Gómez IGME
Empresa CRN para realización de trabajos auxiliares

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA DISPONIBLES EN LAS MASb DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO: 030.008 LA ALCARRIA, 030.015 TALAVERA, 030.018 OCAÑA Y 030.022 TIÉTAR

INTRODUCCIÓN

A petición de las distintas Confederaciones Hidrográficas se han desarrollado actuaciones complementarias, como apoyo a los correspondientes Planes Hidrológicos de Cuenca en desarrollo. En este contexto, la Confederación Hidrográfica del Tajo solicitó el estudio de evaluación de los recursos de agua subterránea disponibles en las masas de agua subterránea 030.008 La Alcarria, 030.015 Talavera, 030.018 Ocaña y 030.022 Tiétar.

En síntesis, los trabajos realizados para cada una de ellas consistieron en:

— Revisar las cifras de recarga de cada MASb, partiendo de los datos de SIMPA-2 y la información bibliográfica disponible
— Revisar y actualizar los datos de extracciones
— Analizar y cuantificar las conexiones con masas de agua superficial y ecosistemas asociados
— Analizar los valores existentes de flujos interanuales medios requeridos para conseguir los objetivos medioambientales.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

El esquema metodológico de conceptos sobre recursos subterráneos empleados en la evaluación del estado cuantitativo de las MASb se resume en la figura 1.

Los aspectos claves en la cuantificación de los recursos renovables y disponibles se basan principalmente en el conocimiento de la recarga, las extracciones y la relación aguas superficiales y subterráneas para determinar la dependencia de la mismas sobre la evaluación de los caudales ambientales.

Recarga

Generalmente, en la mayoría de los estudios y trabajos en los que se ofrecen datos de balances hidrogeológicos en relación con la estimación de los recursos subterráneos, el concepto de recarga, responde únicamente a los procedentes de la recarga directa de las precipitaciones o recarga por agua de lluvia y se asimilan al término de recurso natural renovable.

La estimación de los recursos subterráneos naturales se lleva a cabo fundamentalmente a partir de dos metodologías:

— A partir de los balances hidrogeológicos tradicionales de los acuíferos y que han sido consultados en la revisión bibliográfica. En estos estudios, a partir de la precipitación y con una estimación de la lluvia útil (precipitación menos evapotranspiración real), se

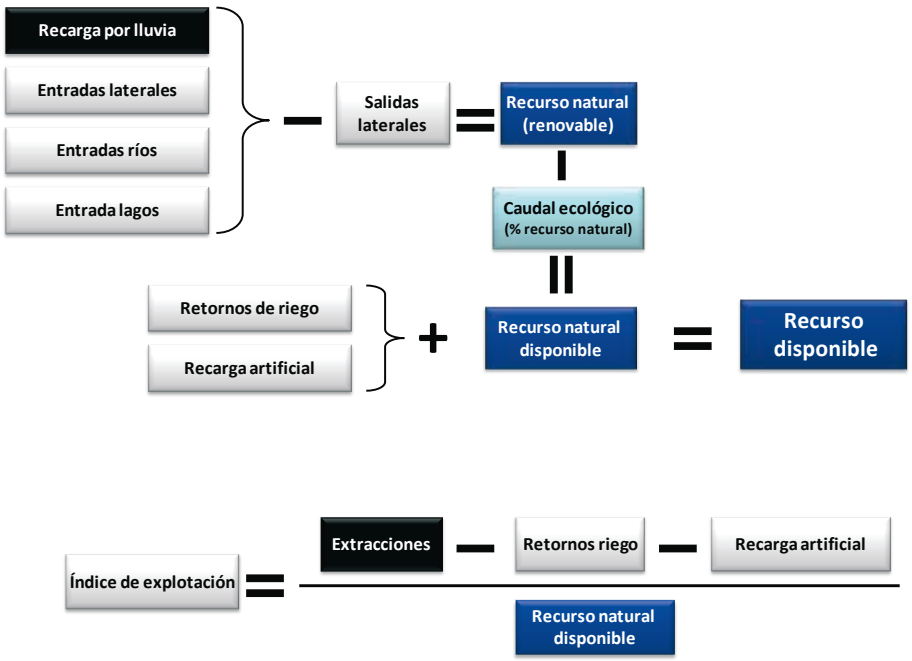


Figura 1. Esquema de evaluación del estado cuantitativo

aceptaba una hipótesis de porcentaje de infiltración según la litología y se multiplicaba por la superficie permeable de la unidad de estudio y se contrastaba con datos de caudales de manantiales y de ríos.

— A partir de modelos de simulación y transformación de lluvia en aportaciones o escorrentía mediante la calibración con datos principalmente foronómicos. Se asume que los resultados de estos modelos, con todas sus limitaciones, dan información de los caudales de base de los ríos, que en régimen natural, corresponderían a los drenajes o salidas de los acuíferos y por tanto a los recursos subterráneos renovables.

Uno de los trabajos que se llevó a cabo en este estudio consistió en la revisión de las cifras de recarga de cada MASb, partiendo de los datos del modelo SIMPA-2 y de la información bibliográfica disponible de estudios hidrogeológicos regionales.

En el apartado correspondiente a los recursos subterráneos de cada masa de agua subterránea estudiada, se detallaba la revisión bibliográfica llevada a cabo de datos de recarga mediante cuadros resumen y gráficos (ver figura 2), y se analizan con los de SIMPA-2 (ver figura 3).

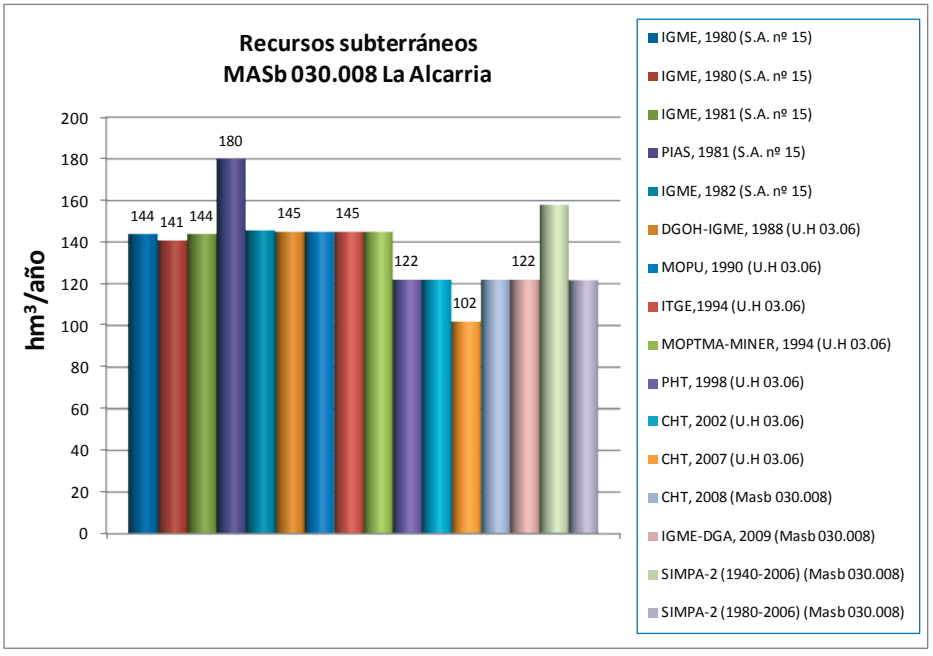


Figura 2. Valores de recarga por infiltración de agua de lluvia obtenidos de la revisión bibliográfica en las diferentes unidades en las que ha sido considerado el acuífero de La Alcarria (MASb 030.008).

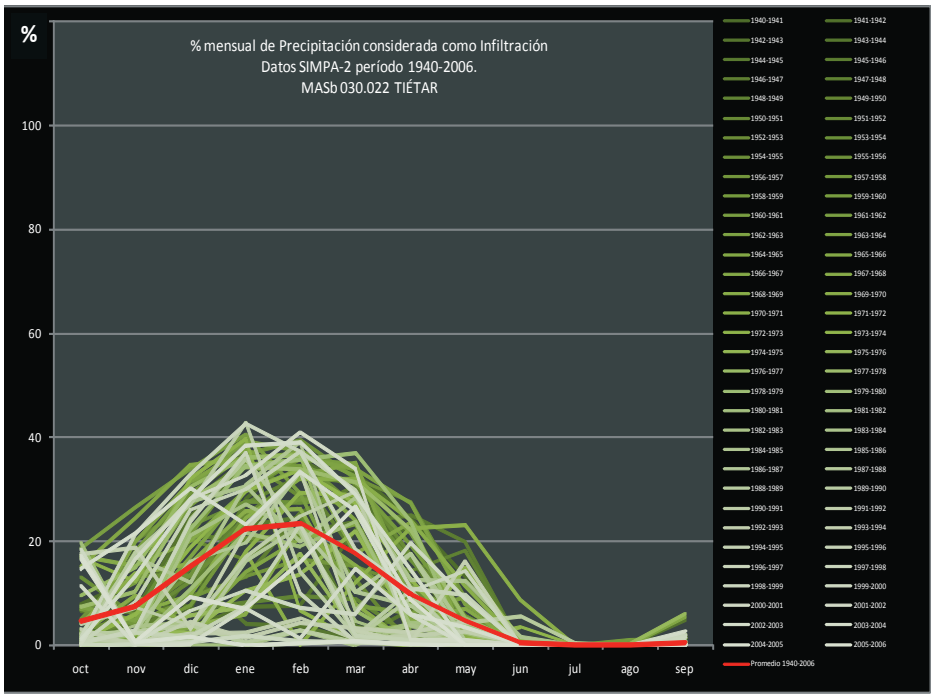


Figura 3. Porcentaje de la precipitación que se considera como infiltración al acuífero mensualmente en todo el período de simulación según SIMPA-2 (MASb 030.022).

De la valoración de los distintos resultados obtenidos se puede extraer:

— En la masa de La Alcarria, los valores de recarga consultados y los ofrecidos por el modelo son similares.
— En la masa de Talavera, los valores del modelo parecen subestimados. Esto se debe a que considera un 8% de infiltración frente al 10-12% de estudios anteriores, y que el propio modelo no tiene en cuenta los aportes laterales ni la recarga a través de cauces ni depósitos cuaternarios.
— En la masa de Ocaña, llama la atención las estimaciones tan bajas realizadas con el SIMPA-2 (11-15 hm^3/año). Una de las explicaciones puede ser que el límite de la masa de Ocaña no incluye la mayor parte de la cuenca hidrográfica del arroyo Martín Román, hacia el cual descarga subterráneamente el acuífero. Al no considerarse las salidas del acuífero al arroyo (la estación de aforos se encuentra fuera de la MASb en la unión con el río Tajo), la recarga estimada ha tenido que "compensar" esta falta de salidas calculándose más baja. Igualmente los porcentajes de infiltración respecto a la precipitación estimados por SIMPA2 (3%) contrastan con los utilizados en la bibliografía (10-15 %) para este acuífero y en general para acuíferos carbonatados.
— En la masa de Tiétar, parece que los valores que ofrece SIMPA2 están sobrevalorados. A pesar de tratarse de materiales detríticos terciarios con un alto contenido en arcillas, considera hasta un 15 % de infiltración de la precipitación. Igualmente, el modelo no tiene en cuenta el flujo subsuperficial o hipodérmico, no distinguiendo entre infiltración "profunda" y la que se produce en áreas de menor permeabilidad dando lugar a una escorrentía subsuperficial que alcanza más o menos rápido los cauces. En el período 1980-2006 los recursos se cifran en 210 hm^3, cifra más acorde al máximo establecido en otros estudios.

Extracciones o usos de agua subterránea

Las principales fuentes de información que se han utilizado para la realización de estos trabajos en los aspectos de cuantificción de los volúmenes de aguas subterráneas empleadas para regadío y abastecimiento, por los procedentes de coberturas gráficas y de tablas y bases de datos disponibles.

Coberturas gráficas:

— SigPac: registro público de carácter administrativo con información de las parcelas con usos o aprovechamientos agrarios definidos en 2009.
— Parcelario de zonas regables públicas: zonas de riego de iniciativa pública en 2009.
— Tomas de riego privado o captaciones de agua superficial para riego: datos sobre los volúmenes estimados de riego privado con agua superficial de Comisaría de Aguas.

Tablas y bases de datos:

— Alberca 2010: inventario de los derechos de uso de aguas subterráneas, por lo que, a falta de datos de extracciones reales, se dispone de los volúmenes comprometidos y en trámite de los expedientes de aprovechamiento recogidos por la Confederación Hidrográfica. A partir de esta base de datos, se han obtenido los volúmenes anuales por municipio para los distintos tipos de uso presentes del conjunto de captaciones, así como el número de éstas.
— Base de Datos "Pozos": Inventarios de puntos de agua realizados por parte de la CHT entre los años 1995 y 2001. Se han obtenido los volúmenes anuales extraídos por municipios para los distintos usos de las captaciones. La valoración y comparación con el resto de información se realiza en el apartado correspondiente de cada MASb.
— Encuesta de infraestructuras y equipamientos locales (EIEL) de 2008.
— Registro de captaciones para consumo humano: captaciones de abastecimiento a población (localización y volúmenes) de la Actividad 9 de la Encomienda IGME-DGA (figura 4).

Para la estimación de las extracciones de aguas subterráneas en las diferentes masas de agua objeto de estudio, se han seguido tres líneas metodológicas de trabajo dependiendo del tipo de información aportada por cada una de las fuentes de información disponibles realizando un tratamiento de convergencia de datos usando el término municipal como unidad de trabajo.

Estas líneas de trabajo han sido:

a) Estimación de regadíos de aguas subterráneas según usos de parcelas de riego del SigPac mediante SIG a través de cálculos de superficies mediante una hipótesis de trabajo planteada.
b) Calculo de extracciones de aguas subterráneas para abastecimiento a población y regadío mediante la utilización bases de datos.
c) Contraste de datos generados y de los procedentes de la recopilación bibliográfica y valoración de los resultados.

Estimación de extracciones según usos de parcelas de riego mediante GIS

Se planteó la siguiente hipótesis de trabajo: las parcelas de riego catalogadas en el SigPac que no poseen una toma de riego privado superficial, que no pertenecen a una zona regable de iniciativa pública y que están a más de 100 metros de un cauce y/o una infraestructura tipo canal o acequia, podrían pertenecer a riego con agua subterránea (figura 5). Esta hipótesis de trabajo es muy conservadora, puesto que se han considerado unas distancias de tan sólo 100 m.

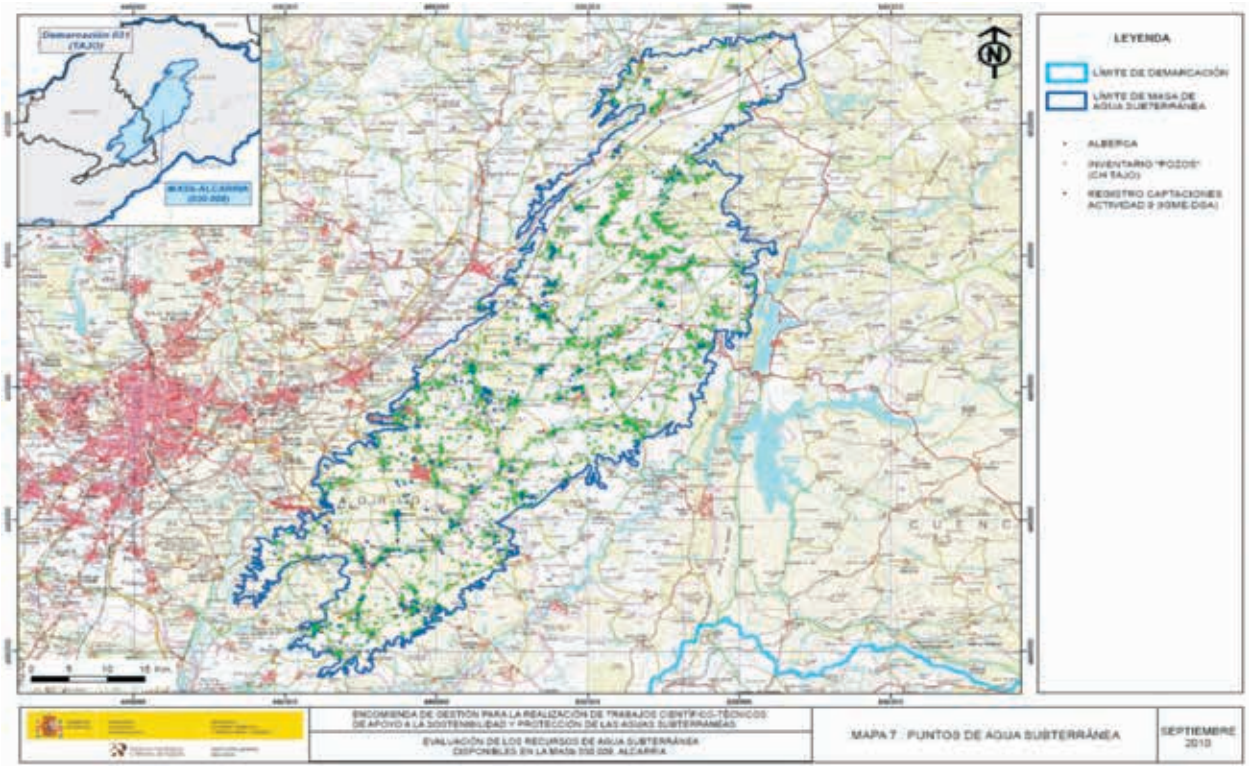


Figura 4. Ejemplo de mapa de puntos de agua (MASb 030.008)

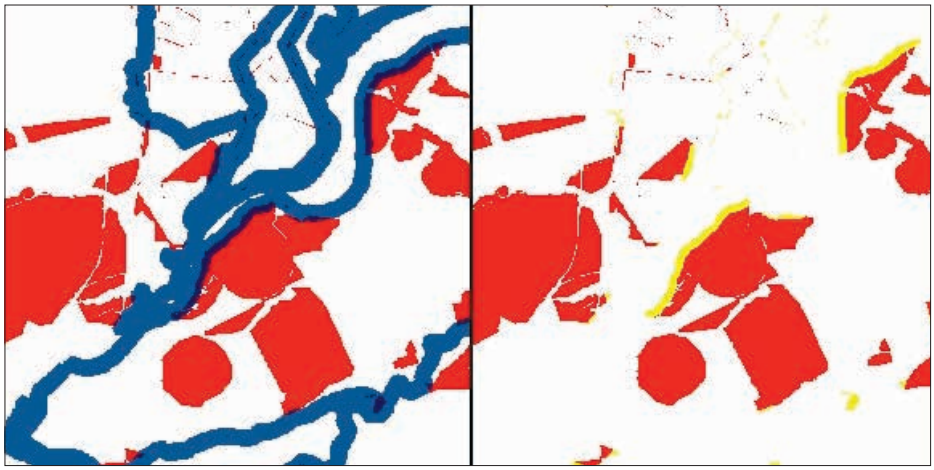


Figura 5. Eliminación de parcelas SigPac, sin toma de riego privado y no perteneciente a zonas de riego público con buffer de 100 metros de la red de canales y acequias.

a cauces, canales y acequias. Lo ideal hubiera sido poder disponer de coberturas de cauces, acequias y canales con sus cotas altimétricas, que al cruzarse con un modelo digital de elevaciones, podría haberse considerado como criterio, además de la distancia, el de cota o altura por encima de la cual, los riegos existentes tendrían que considerarse con aguas subterráneas al quedar desconectadas de las infraestructuras de riego por gravedad.

El resultado final de este proceso consiste en una cobertura de datos SigPac, que se ha cuantificado por término municipal y por tipología de cultivo, con objeto de poder evaluar el volumen de riego estimado con aguas subterráneas, aplicando los datos de dotaciones por tipo cultivo según el ETI (CHTAJO, 2008). Las cifras obtenidas mediante la hipótesis planteada representan el máximo teórico de utilización de aguas subterráneas que podría darse (figura 6)

Ha resultado de interés observar la evolución en el tiempo de las zonas agrícolas de riego por teledetección de varios años (figuras 7 y 8), a partir del estudio realizado por TRAGSA para la CHT.

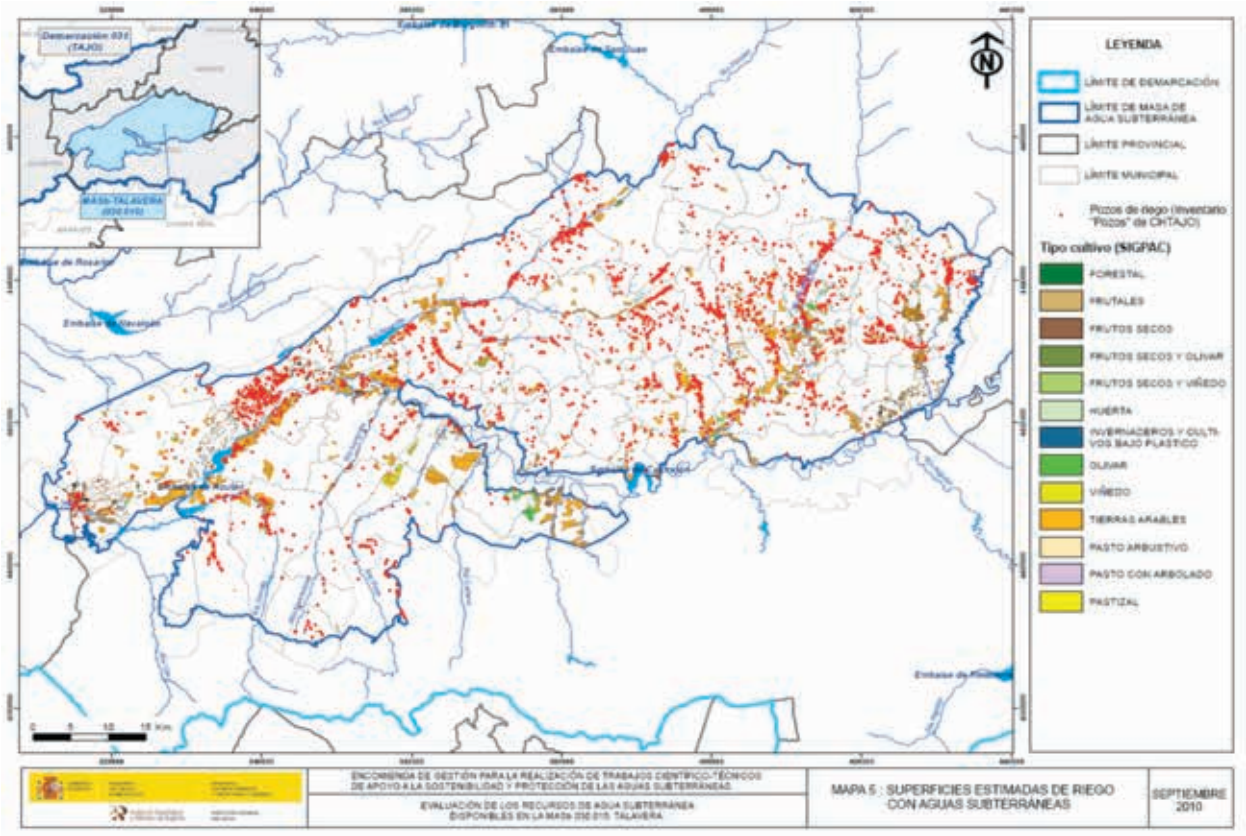


Figura 6. Superficies estimadas de riego con aguas subterráneas (MASb 030.015)

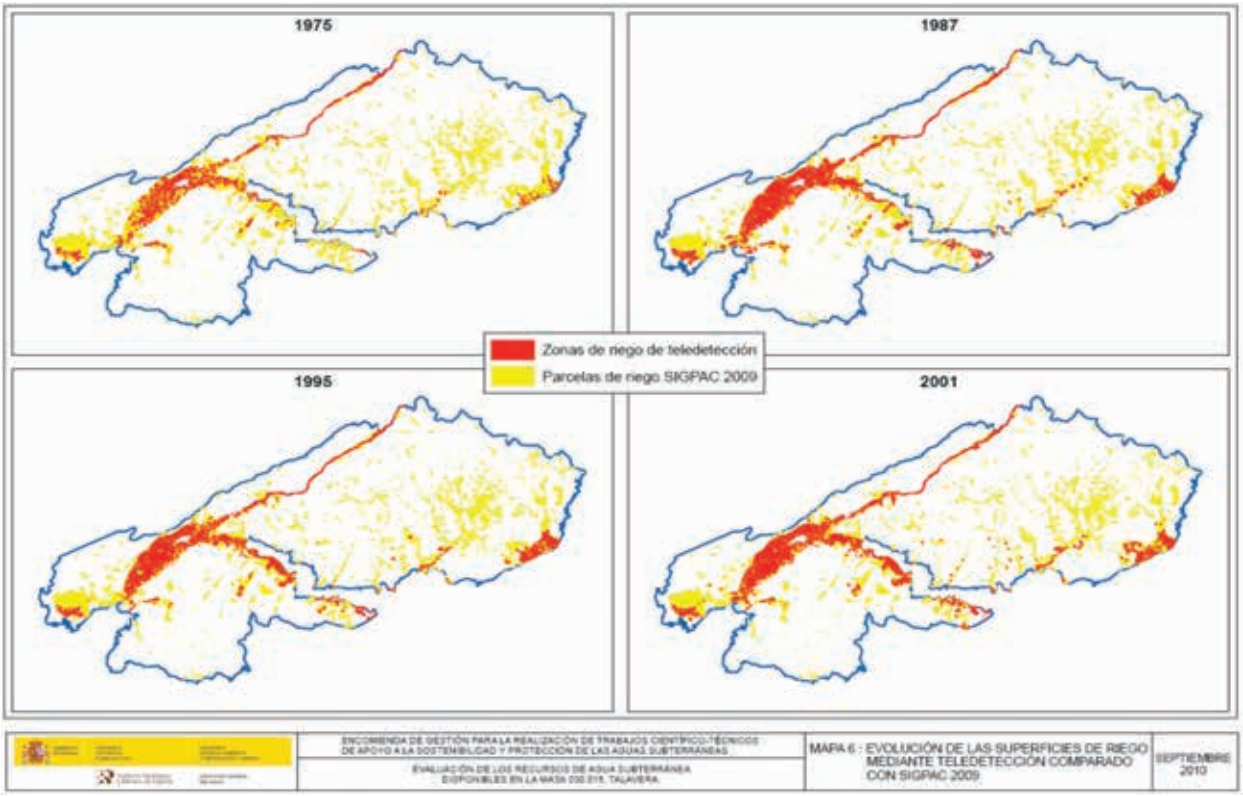


Figura 7. Evolución de las superficies de riego mediante teledetección (MASb 030.015)

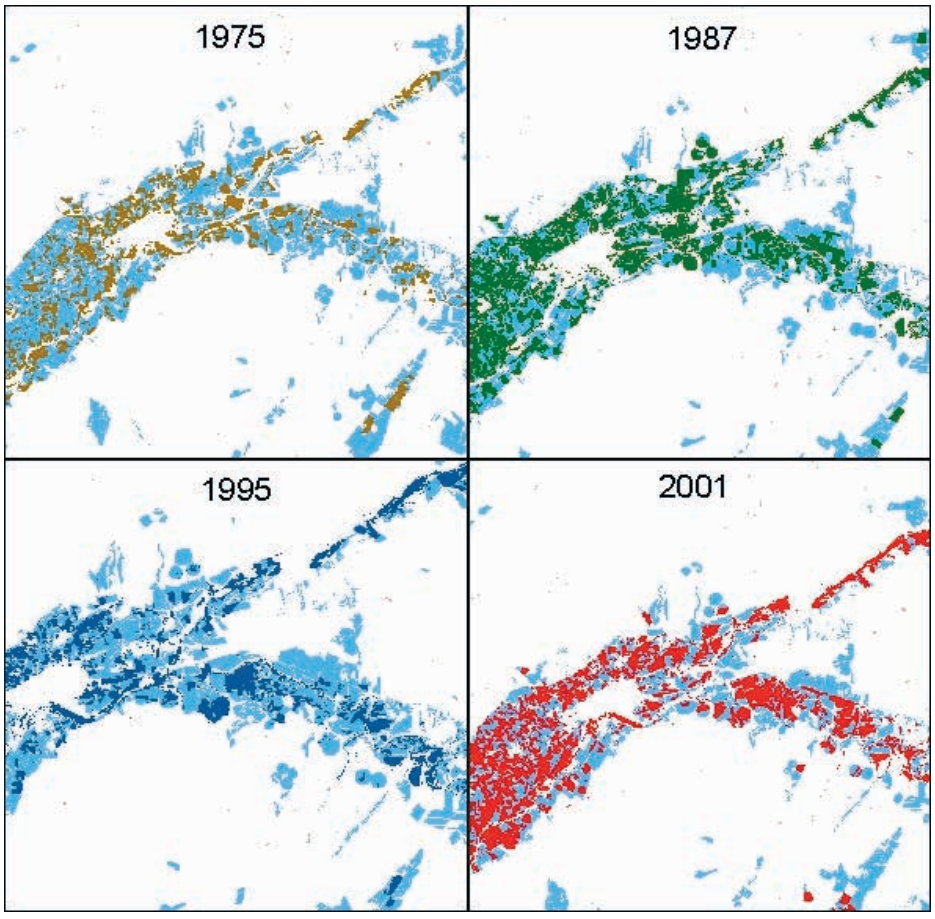


Figura 8. Detalle de superficies en regadío obtenidas mediante Teledetección frente a las Sigpac (azul claro

Se aprecia en general una buena persistencia, a lo largo del tiempo, de las zonas de regadío, que además se corresponden bastante bien con la distribución de las parcelas del SigPac y por tanto se observa una estabilidad de las zonas de regadíos reales respecto a las parcelas declaradas como regadío. Esto valida y da robustez al parcelario de SigPac de 2009 en cuanto al uso de regadío, como fuente principal de la información gráfica sobre regadíos.

Resumen de estimaciones de extracciones o usos

A continuación se presentan resumidos los resultados obtenidos para riego y abastecimiento tras el tratamiento de la información disponible (tablas 1 y 2). En los cuadros de síntesis del apartado final de resultados obtenidos se valoran los mismos y su fiabilidad tras contrastarlos con los procedentes de diferentes fuentes de información.

RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS TRAMOS DE RÍO RELACIONADOS CON ACUÍFEROS

Partiendo de los trabajos realizados en la actividad 4 de la Encomienda DGA-IGME sobre la "Identificación de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, y descarga por manantiales" se llevó a cabo una valoración y revisión de los resultados obtenidos para cada MASb (tabla 3).

La valoración de resultados para las distintas masas estudiadas es:

— **030.008 La Alcarria:** Se aprecian descensos importantes de caudal en el río Tajuña en periodo de riegos, debido a los regadíos de la vega. De la cuantificación de la relación río-acuífero en los tramos más al norte de la MASb se desprenden

Tabla 1. Resumen de estimaciones de extracciones de agua subterránea para riego según las distintas fuentes de información tratadas.

EXTRACCIONES DE AGUA PARA RIEGO (volúmenes en m³/año)						
FUENTE DE INFORMACIÓN		UNIDADES	ALCARRIA	TALAVERA	OCAÑA	TIÉTAR
SigPac	SUP_TOTAL	Ha	4.642	42.512	1.118	23.831
	VOL_TOTAL	m³/año	19.713.334	141.807.217	4.797.748	102.367.013
	SUP_SUB	Ha	1.942	22.182	822	8.806
	VOL_SUB	m³/año	8.213.344	92.972.890	3.539.058	37.955.097
ALBERCA 2010	USO_RIEGO	m³/año	2.939.567	31.384.614	10.873.199	3.035.367
	SUP_REGABLE	Ha	1.404	8.592	5.650	932
Inventario POZOS		m³/año	3.032.463	42.187.066	24.500.404	948.027

Tabla 2. Resumen de extracciones de agua subterránea para abastecimiento según las distintas fuentes de información tratadas.

VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN PARA ABASTECIMIENTO (m³/año)					
FUENTE DE INFORMACIÓN		ALCARRIA	TALAVERA	OCAÑA	TIÉTAR
ESTUDIO_JCLM (1997)	VOL_JCLM (m³/año)	612	10.838.000	2.273.000	827
ENCUESTA EIEL 2005-2008	Nº_CAPTACIONES	142	266	35	39
ACTIVIDAD 9-REGISTRO DE CAPTACIONES IGME	Nº_CAPTACIONES	424	372	110	26
	VOL_ANUAL (m³/año)	3.025.485	21.192.292	3.666.803	251.026
ALBERCA 2010	USO_ABASTEC (m³/año)	1.358.413	2.764.830	34.365	544.638
Inventario POZOS	USO_ABASTEC (m³/año)	3.200.790	22.049.169	4.072.143	282.122

MASb	Nº tramos ríos identificados con acuíferos	Nº de tramos realizado cuantificación	Cuantificación			
			Nombre del tramo	parámetro de agotamiento (mes^{-1})	promedio escorrentía subterránea Hm^3/año	% del total del caudal del río
030.008 Alcarria	4	3	Río Badiel	0.00996 (o semiagot. de 2.32 meses)	3.47	54
			Río Tajuña		38.3	
			Tramo Río Ungría	0.00425 (o semiagot. de 5.44 meses)	12.36	78
030.015 Talavera	6	3	Río Vallehermoso	0,02179 (o semiagot. de 1,06 meses)	0,16	11,05
			Río Pusa	0,00344 (o semiagot. de 6,72 meses)	7,97	22,61
			Río Sangreras	0,04545 (o semiagot. de 0,51 meses)	0,24	3,52
030.018 Ocaña	1	1	Arroyo Martín Román	0,0116 (o semiagot. de 1,99 meses.	6,44	71.13
030.022 Tiétar	8	4	Tramos río Tiétar I y II	0,053 (o semiagot. de 0,44 meses)	808.1	15.44
			Tramos río Tiétar III y IV	0,034 (o semiagot. de 0,67 meses.	261,5	19,9
			Tramos río Santa María I, II y III	0,025 (o semiagot. de 0,92 meses.	6,74	18,5
			Tramo del río Alcañizo	0,0034 (o semiagot. de 6,84 meses.	11,5	20,6

Tabla 3. Resultados obtenidos por MASb

unos porcentajes procedentes del drenaje del acuífero carbonatado alrededor del 60-70% de caudal de los ríos.

— **030.015 Talavera:** la información foronómica de la red oficial de aforos no ha podido utilizarse para la cuantificación, ya que todas las estaciones se encuentran en régimen influenciado, y las diferencias de caudales entre estaciones aguas abajo y arriba son en ocasiones negativas y sobre todo en períodos de estiaje, poniendo de manifiesto el alto grado de afección existente sobre el régimen de caudales. De los hidrogramas de las estaciones de la red oficial en régimen natural, el dato útil lo representa el porcentaje de escorrentía subterránea respecto al caudal total del río que varía, para los ríos Pusa, Vallehermoso y Sangrares, del 4 al 22 % dependiendo del grado de conexión con el acuífero detrítico. Para el río Pusa, con mayor recorrido por el acuífero terciario y mayores caudales, recibe una escorrentía subterránea mayor, del orden del 20 % del caudal del mismo. Esta cifra, como en el caso del acuífero detrítico del Tiétar, puede valer como general para establecer la conexión del acuífero con estos ríos y permitir establecer un orden de magnitud para mantener los objetivos medioambientales.

— **030.018 Ocaña:** Existen dudas asociadas a la cuantificación a partir de los datos de la única estación de aforos existente. La estación de aforos del Arroyo Martín Román, aparte de estar fuera del límite de la MASb por lo que puede ser una causa de la subestimación de recurso por parte de SIMPA2, presenta un descenso en los caudales muy marcado, posiblemente influenciados por las tomas directas para riegos de la zona. El valor promedio drenado por las calizas del Páramo, a partir de la información foronómica es de 6.5 Hm^3/año, muy inferior a los datos recopilados en la bibliografía por lo que se plantean dudas sobre el actual modelo conceptual de funcionamiento.

— **030.022 Tiétar:** el porcentaje de aportación subterránea al caudal del río, a partir de la descomposición del hidrograma, va del 15 al 20 %. Al disponer de estaciones de aforo al final de ríos o arroyos como el Alcañizo, que no están influenciados y que discurren exclusivamente por materiales terciarios, sus valores de aportes subterráneos, son extrapolables al resto del acuífero. Se ha de tener en cuenta que gran parte de los flujos subterráneos en esta MASb, tienen un carácter subsuperficial o hipodérmico que regresana la red superficial más o menos rápidamente.

CAUDALES ECOLÓGICOS O RESTRICCIONES MEDIOAMBIENTALES

Respecto a los caudales ecológicos o restricciones ambientales, hasta que no se estimen en todos los tramos de ríos relacionados con espacios o ecosistemas a proteger en período de estiaje (puesto que son los acuíferos los que mantiene los caudales de base en verano), no es posible determinar el requerimiento ambiental por MASb. Por ello se ha de recurrir a establecer como restricción medioambiental un porcentaje de los recursos subterráneos. Actualmente se están llevando a cabo los trabajos necesarios para su determinación y se reflejarán en el Plan Hidrológico de Cuenca.

Como se describe en el esquema metodológico de conceptos de recursos subterráneos anteriormente expuesto, el recurso susceptible de explotación es el denominado recurso natural disponible obtenido del recurso natural menos las necesidades ambientales (IPH art. 5.2.4.1). Como inicio, y en espera de contar con datos más precisos, se recomienda atribuir esta restricción medioambiental al 20% del recurso natural en todas las MASb para evitar que las masas de agua superficial asociadas no alcancen un buen estado por su régimen hidrológico como se cita en el art. 5.1.2.1.1.2 de la I.P.H. Este porcentaje ha sido también empleado en las Demarcaciones del Duero y Ebro para el cálculo del recurso disponible.

RESULTADOS OBTENIDOS

A partir de la valoración de resultados que se ha llevado a cabo de las distintas fuentes de información disponibles sobre recursos subterráneos y sobre las distintas estimaciones realizadas sobre usos o extracciones, se elaboraron los siguientes cuadros para cada una de las masas estudiadas. Debido a la cantidad de información recopilada y tratada de diferentes fuentes de datos, se recomienda la consulta del informe para conocer la metodología aplicada y las limitaciones y fiabilidad de los datos empleados, aunque se haya intentado aquí un ejercicio de sintetizar en un cuadro los que se estiman mejores.

Igualmente en cada una de las masas estudiadas se incluyen como anejos las siguientes tablas y mapas, realizados a partir de un proyecto GIS para cada una ellas y de las bases de datos generadas por cada una de las fuentes de información utilizadas.

Tablas

— Volúmenes estimados de extracciones para regadío y para abastecimiento a partir del tratamiento de la información disponible por Término Municipal
— Volúmenes autorizados y Volúmenes en trámite por TT.MM de la MASb extraídos de la base Alberca 2010.

Mapas:

— Mapa 0: Situación de la MASb (Topografía base)
— Mapa 1: Situación de la MASb (Modelo digital del terreno)
— Mapa 2: Unidades de delimitación de acuífero (Sistema acuífero, UH y MASb)
— Mapa 3: Litológico
— Mapa 4: Tratamiento de información de regadíos
— Mapa 5: Superficies estimadas de riego con aguas subterráneas
— Mapa 6: Evolución de las superficies de riego mediante teledetección comparado con SigPac 2009
— Mapa 7: Puntos de agua subterránea.
— Mapa de estaciones de control y medida de caudales (act. 4 Encomienda DGA-IGME)
— Mapa sinóptico de la relación río-acuífero (act. 4 Encomienda DGA-IGME)

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.008 La Alcarria								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm³/año)	**Observaciones (ver apartado B)**	**Usos o extracciones (hm³/año)**			**Observaciones (ver apartado C)**	**Recurso natural disponible (Hm³/año)**	**Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)**	**Índice de explotación**
		riego	**abto.**	**TOTAL**				
120-140	Se estima que un 75-80 % de la escorrentía total corresponde a escorrentía subterránea La infiltración se puede estimar en un 12-18 % de la precipitación Los valores de recarga consultados y los ofrecidos por SIMPA-2 para el período 1980-2006 son convergentes.	4	3	7-8	Regadío: a partir de ALBERCA 2010 completados hasta la superficie estimada por SigPac de riego con aguas subterráneas. Abto.: convergencia del inventario POZOS y Registro de captaciones DGA-IGME. TOTAL: ALBERCA 2010 da un resultado total de 9 hm³/año entre V autorizados y en trámite.	96-112	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.06-0.08

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.015 Talavera								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm³/año)	**Observaciones (ver apartado B)**	**Usos o extracciones (hm³/año)**			**Observaciones (ver apartado C)**	**Recurso natural disponible (Hm³/año)**	**Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)**	**Índice de explotación**
		riego	**abto.**	**TOTAL**				
180-200	Los valores de SIMPA-2 están subestimados respecto a los valores a los valores utilizados en anteriores estudios y respecto a los coeficientes de infiltración considerados. El % de infiltración más utilizado estaría en torno al 10 % de la precipitación (en el SIMPA-2 se considera menor)	35-40	15-20	50-60	Regadío: la superficie y el volumen estimados mediante la hipótesis de trabajo con SigPac resultan muy elevados. Se consideran más acordes las cifras ofrecidas por el inventario "POZOS" y por el ALBERCA 2010 para uso exclusivo de regadío, aunque sean algo inferiores. Abto.: se consideran convergentes las cifras ofrecidas por el Registro de captaciones DGA-IGME y las del inventario "POZOS". TOTAL: de la división por TT.MM englobados en la MASb realizada mediante el tratamiento de los datos de la base de ALBERCA 2010, las cifras totales de volúmenes autorizados y en trámite, alcanzan los 44 hm3/año, cifra algo menor que la obtenida.	144-160	Se ha considerado como restricciones medioambientaless el 20 % del recurso natural	0.31-0.42

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.018 Ocaña								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm³/año)	**Observaciones (ver apartado B)**	**Usos o extracciones (Hm³/año)**			**Observaciones (ver apartado C)**	**Recurso natural disponible (hm³/año)**	**Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)**	**Índice de explotación**
		riego	**abto.**	**TOTAL**				
35-40	SIMPA-2 parece que infravalora los valores de recursos subterráneos (11-15 hm3/año) por diversas causas (aplica un % muy bajo de infiltración). Los valores de recursos de la bibliografía son más elevados (55-65 hm3/año) aunque existen varias dudas. Se recomienda llevar a cabo tareas de control hidrométrico en manantiales y cauces y control de extracciones para mejorar la estimación.	8-10	2-3	10-13	Regadío: tras la valoración de distintas fuentes se consideran más apropiados los datos de ALBERCA 2010. Los aportados por el tratamiento de SigPac parecen escasos debido a que existen regadíos con aguas subterráneas de la MASb fuera del límite de la misma. Por otra parte los valores del inventario POZOS parecen excesivos. Abto.: se consideran convergentes los valores utilizados en estudios anteriores con los del Registro de captaciones DGA-IGME y el inventario POZOS. TOTAL: los datos de ALBERCA 2010 de los TT.MM que se han considerado incluidos en la MASb y los consultados de la revisión bibliográfica son coherentes.	28-32	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.31-0.45

Cuadro síntesis de evaluación de RECURSOS DISPONIBLES, EXTRACCIONES e INDICE DE EXPLOTACIÓN de la MASb 030.022 Tiétar								
Recurso natural subterráneo (recarga media hm³/año)	**Observaciones (ver apartado B)**	**Usos o extracciones (hm³/año)**			**Observaciones (ver apartado C)**	**Recurso natural disponible (Hm³/año)**	**Observaciones (ver apartado 6 de la memoria)**	**Índice de explotación**
		riego	**abto.**	**TOTAL**				
150-170	Los valores de SIMPA-2 se consideran sobreestimados (210-260 hm3) debido a que no se distingue entre recarga que alimenta al acuífero en profundidad y escorrentía subsuperficial o hipodérmica ,y a que considera como infiltración un porcentaje muy elevado (15 %) de la precipitación. Considerando los valores de la bibliografía (150-200 hm3) se opta por una cifra más baja al descontar una parte como recarga "rechazada" por escorrentía subsuperficial o hipodérmica. Se podría aplicar el método del número de curva para cuantificar este aspecto.	15-20	1-2	16-22	Regadío: La estimación llevada a cabo mediante la hipótesis de trabajo utilizando SigPac es elevada, teniendo en cuenta el uso importante de las aguas superficiales en la MASb (se debería modificar la hipótesis de cálculo de 100 a 200 m de distancia a cauces y/o infraestructuras de riego). Se propone una estimación en base a la superficie obtenida del SigPac y a las dotaciones obtenidas del ALBERCA (uso agrícola) Abto.: Todas las fuentes de información empleadas dan una cifra convergente y muy baja. TOTAL: Se estima un total de utilización basado en el peso del uso para regadío, con las incertidumbres expresadas, aunque los datos de ALBERCA 2010 arrojan unos volúmenes totales en trámite y autorizados de sólo unos 5 hm3.	120-135	Se ha considerado como restricciones medioambientales el 20 % del recurso natural	0.12-0.18

CONSIDERACIONES FINALES

Se adjunta en la tabla 4 la síntesis de la evaluación de los recursos disponibles, extracciones e índice de explotación de las MASb estudiadas. Tanto para la evaluación de recursos subterráneos, como para las extracciones se ha contado con información bibliográfica y con la obtenida del tratamiento de la información disponible (coberturas, bases de datos etc.). En cada apartado especifico de cada MASb se ha realizado una valoración de resultados en la que se describen la metodología aplicada, las limitaciones y fiabilidad de los datos empleados.

A continuación se resumen una relación de trabajos que se proponen para mejorar los aspectos relacionados con la evaluación de recursos, extracciones y cuantificación de la relación río-acuífero en las MASb estudiadas:

En la MASb 030.008 La Alcarria:

— Revisión sobre el terreno de las extracciones fundamentalmente en el río Tajuña
— Establecimiento de una red de hidrometría de caudales en distintos puntos de ríos y arroyos.
— Establecimiento de una red hidrométrica en manantiales que permita cuantificar el volumen de descarga de la MASb.
— Se ha contar con un indicador de sequía relacionado con las aguas subterráneas, debido al alto porcentaje que sobre los ríos y arroyos representan las aguas subterráneas, que podría consistir en la toma automática de caudales de descarga de manantiales representativos, en el nacimiento de ríos, como los de Las Fuentes de la Alcarria.

En la MASb 030.015 Talavera:

— Se deberían de llevar a cabo medidas experimentales del coeficiente de infiltración sobre distintos emplazamientos representativos de los materiales de la MASb lo que aportaría valores distribuidos del mismo para ser utilizados en la cuantificación de recursos.
— Actualización sobre el terreno de extracciones de aguas subterráneas para abastecimientos de grandes urbanizaciones, abastecimientos autónomos e industria.
— Para intentar mejorar el conocimiento de la relación río-acuífero se deberían actualizar los inventarios de vertidos de aguas residuales y de tomas directas en los ríos principales.

En la MASb 030.018 Ocaña:

— Como la información del coeficiente de infiltración es un parámetro clave para la valoración del recurso natural renovable por recarga del agua de lluvia, se propone la realización de medidas experimentales in situ y la aplicación de métodos hidrodinámicos e hidroquímicos para la estimación de la recarga en el páramo.
— Establecer una red hidrométrica de control de las aguas subterráneas para lo cual se pueden emplear las secciones medidas por el IGME desde el año 1981.
— Establecimiento de un indicador de sequía en la MASb a partir de los caudales drenados por el acuífero tras la revisión e inventario de los manantiales existentes en la masa que drenen tanto al arroyo Martín Román como al río Tajo.
— Revisión de las extracciones que se realizan en la MASb, así como de los aprovechamientos mediante tomas directas en el Arroyo Martín Román.

En la MASb 030.022 Tiétar:

— Aplicación del método de estimación del número de curva para distinguir entre el flujo subsuperficial o hipodérmico que da lugar a una escorrentía que alcanza más o menos rápido los cauces super-

MASb	Recurso natural subterráneo (recarga media hm³/año)	Usos o extracciones (hm³/año)			Recurso natural disponible (hm³/año)	Índice de explotación
		riego	abto.	TOTAL		
030.008 La Alcarria	120-140	4	3	7-8	96-112	0.06-0.08
030.015 Talavera	180-200	35-40	15-20	50-60	144-160	0.31-0.42
030.018 Ocaña	35-40	8-10	2-3	10-13	28-32	0.31-0.45
030.022 Tiétar	150-170	15-20	1-2	16-22	120-135	0.12-0.18

Tabla 4. Evaluación de Recursos disponibles, extracciones e índice de explotación.

ficiales y la recarga por infiltración que alimenta al acuífero en profundidad.

— Se debe realizar un estudio claro de los aprovechamientos en esta MASb tanto de regadío como de abastecimientos porque las cifras de volúmenes totales consultadas varían bastante

— Aunque existen numerosas zonas húmedas catalogadas como LICs y ZEPAs (hasta 27) no hay información disponible para la cuantificación de la relación con el acuífero asociado. Se podría realizar un estudio básico de estas zonas húmedas implantando una infraestructura mínima para permitir el control de parámetros como la profundidad del agua en las mismas y niveles de agua subterránea en puntos próximos, para su caracterización hidrogeológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Confederación Hidrográfica del Tajo (1998) Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, de aprobación del Plan Hidrológico del Tajo.

Confederación Hidrográfica del Tajo (2002) La cuenca del Tajo en cifras. 2º edición. 150 pp.

Confederación Hidrográfica del Tajo-OPH (2002). Normas para el otorgamiento de autorizaciones de investigación o concesiones de agua subterránea para cada unidad hidrogeológica. Tomo 6. UnidadHidrogeológica 03.06 La Alcarria.

Confederación Hidrográfica del Tajo (2005). Informe Resumen de los artículos 5 y 6 de la DMA. En: http://www.chtajo.es/otros/directiva_marco.htm.

Confederación Hidrográfica del Tajo (2007) Plan especial de actuación en situaciones de alerta y eventual sequía de la cuenca hidrográfica del Tajo.

Confederación Hidrográfica del Tajo (2007) Estudio general sobre la demarcación hidrográfica del Tajo.Parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo. (Ver. Julio 2007)

Confederación Hidrográfica del Tajo (2008). Esquema provisional de temas importantes. Parte española

DGOH-IGME (1988). Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. (código S.I.D: 37036)

IGME (1981). Síntesis de datos hidrogeológicos y de calidad destinados al Plan hidrogeológico de la cuenca del Tajo. Informe técnico G- 11/81. (Código S.I.D: 35076)

IGME (1983). Proyecto para estudios de gestión y conservación de acuíferos en las cuencas del Tajo, alto Guadiana, Guadalquivir e Islas Baleares. Informe síntesis de gestión del agua en la cuenca del Tajo para El Plan Hidrológico Nacional. Tomo II(Código S.I.D: 35146)

IGME (1985). Síntesis hidrogeológica de Castilla-La Mancha.

IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Actividad 2: del Acuerdo para la Encomienda de Gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

ITGE (1979). Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Tajo. Informe técnico nº 3. Cuenca del Tajuña. Usos actuales y futuros del agua. (Código S.I.D: 35032).

ITGE (1980). Proyecto de investigación hidrogeológica de la cuenca del Tajo. Estudio hidrogeológico de La Alcarria. Sistema nº 15. Informe Técnico nº C.A.4. (Código S.I.D: 35047)

ITGE (1981) P.I.A.S Estudio hidrogeológico de la cuenca del Tajo. (Código S.I.D: 35084)

ITGE (1983). Estudio hidrogeológico de detalle del páramo de Brihuega. Sistema acuífero nº 15. (Código S.I.D: 35120)

ITGE (1997). Convenio entre la Consejería de Obras Publicas de Castilla-LaMancha y el ITGE para apoyo a la elaboración de un plan director regional de abastecimiento de agua a poblaciones. 3 V. (Código S.I.D: 37082)

Kaber Y. (1984) Hidrogeología regional de la cuenca del río Tajuña (provincias de Madrid y Guadalajara). Tesis doctoral.

Maestro, M.ª T.et al. (1986) Contribución al conocimiento geológico de las calizas de los Páramos. En: Jornadas sobre el karst en Euskadi. Tomo II. Págs.: 275-285.

Servicio Geológico del MOPU (1990). Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares.

Villarroya F. y Rebollo L.F (1978). Funcionamiento hidrogeológico del Karst de La Alcarria: la mesa de Chinchón-Villarejo de Salvanés (Madrid). En: Estudios Geológicos n.º 34, 3. Págs.:231-240.

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA CADA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA

Luis Martínez Cortina

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estimación de los recursos disponibles para cada Masa de Agua Subterránea de la Cuenca Alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno
José María Ruiz Hernández
José Ángel Díaz Muñoz
Raquel Morales García

ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA CADA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El proceso de planificación hidrológica establecido a partir de la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, plantea la exigencia de determinar los recursos disponibles para cada una de las masas de aguas subterráneas identificadas.

Uno de los objetivos del presente trabajo ha sido esa determinación de los recursos disponibles en las masas de aguas subterráneas de la cuenca alta del río Guadiana (en adelante CAG). Esta cuantificación es una tarea compleja, no sólo por las dificultades e incertidumbres propias de los procesos hidrológicos a cuantificar, sino también por las especiales características y situación de la cuenca, y por la difícil aplicación conceptual de las definiciones oficiales de recursos renovables y disponibles. La CAG se caracteriza hidrológicamente por la significativa interrelación entre las aguas superficiales y las subterráneas. Sus características geológicas y de relieve otorgaban a esta zona semiárida su principal singularidad: la presencia de más de un centenar de humedales, generalmente en zonas deprimidas del terreno, en un conjunto que bajo el nombre de La Mancha Húmeda, y con una superficie máxima de encharcamiento de unos 250 km^2, fue declarado por la UNESCO, en 1980, Reserva de la Biosfera.

En los años 70 del pasado siglo, la mejora y abaratamiento de las técnicas de perforación de pozos, el gran avance de la ciencia hidrogeológica, y especialmente la invención de la bomba de turbina, ejercieron de motores iniciales de un desarrollo intensivo del regadío con aguas subterráneas, que originó una imparable escalada de las extracciones de agua. Esto trajo consigo, en el contexto de los años 1970s y 1980s, un notable progreso económico y social en la región, impulsado por el sector agrícola como ocupación primordial y con una importante actividad industrial girando en torno a la agricultura. Junto a estos beneficios, se produjeron cambios muy importantes en la hidrología general de la cuenca. La principal consecuencia negativa de estos cambios fue el grave impacto ecológico sufrido por muchas de las zonas húmedas, situadas principalmente en la Llanura Manchega, en la zona central de la CAG. Hoy día, los caudales en El Vicario, punto de cierre de la CAG, han quedado reducidos a la escorrentía superficial que se produce en episodios meteorológicos muy húmedos, como el que se produjo en 2010.

La singularidad de la zona y de los procesos ocurridos ha motivado que la CAG sea objeto de interés desde muy distintos campos del conocimiento, y lugar de referencia a nivel nacional e internacional por sus implicaciones hidrológicas, medioambientales y socioeconómicas. Asimismo, la CAG ha sido protagonista de un gran número de leyes y otras decisiones administrativas que han intentado, con mayor o menor éxito, racionalizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En este contexto, la cuantificación de los recursos hídricos subterráneos de la CAG, tanto en lo que se refiere a los almacenados, como a los que se recargan anualmente, o a los que podrían —o deberían— aprovecharse, ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más planteados desde el punto de vista del conocimiento hidrogeológico.

El presente trabajo no se limita a una determinación cuantitativa de los recursos disponibles, sino que incide en la importancia de conocer y considerar adecuadamente los conceptos a los que los valores numéricos responden. La determinación de los recursos disponibles no es algo que pueda basarse exclusivamente en criterios hidrológicos, por lo que se ha optado previamente por acercarse de la forma más precisa posible desde un punto de vista hidrogeológico a la cuantificación de los recursos subterráneos, y por realizar un análisis crí-

tico de las definiciones oficiales de recursos renovables y disponibles. Se insiste así en la importancia conceptual de los términos que se están cuantificando y en el conocimiento del comportamiento del sistema, pues se considera que las cifras por sí solas no representan suficientemente el conocimiento del mismo.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

Las estimaciones, consideraciones y conclusiones con respecto a los diferentes aspectos aquí recogidos son fruto de los trabajos y estudios que el IGME viene realizando en la CAG desde principios de los años 1970, de la información bibliográfica disponible procedente de diversos autores, universidades, organismos e instituciones, de la información aportada por la Confederación Hidrográfica del Guadiana, y de la experiencia y conocimiento de la zona por parte de los autores.

En el desarrollo del trabajo se plantea un marco general de la CAG, que resume brevemente algunos aspectos geográficos, climatológicos e hidrogeológicos, una descripción del funcionamiento hidrológico del sistema, y finalmente la cuantificación de los recursos subterráneos de las masas de aguas subterráneas de la CAG.

Descripción general de la zona de estudio

Marco geográfico

La CAG (figura 1) se localiza en la submeseta meridional castellana, en la zona más oriental de la cuenca hidrográfica del mencionado río. Comprende la cuenca drenada por el río Guadiana hasta la zona ocupada actualmente por el embalse de El Vicario, en las cercanías de Ciudad Real.

Atendiendo a su divisoria de aguas superficiales, ocupa una extensión de unos 18.900 km^2, de los más de 55.500 km^2 que componen la demarcación española de la cuenca hidrográfica del río Guadiana. La CAG distribuye su superficie entre las provincias de Ciudad Real (casi el 50%), Cuenca (casi el 25%), Toledo y Albacete, todas ellas pertenecientes a la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha.

Orográficamente se caracteriza por un suave relieve, por lo que la zona central es conocida como Llanura Manchega. En toda esa zona la cota está ligeramente por encima de los 600 m s.n.m., mientras que hacia las zonas de serranía la cota aumenta, hasta alcanzar los 1.200 m s.n.m.

Marco climatológico

La CAG tiene un clima de tipo mediterráneo-continental, marcado por su lejanía al mar y el relativo aislamiento que producen las cadenas montañosas que la circundan.

Los registros de temperatura se caracterizan por marcadas oscilaciones térmicas, con valores que pueden alcanzar hasta -10 ºC en invierno y 40 ºC en verano.

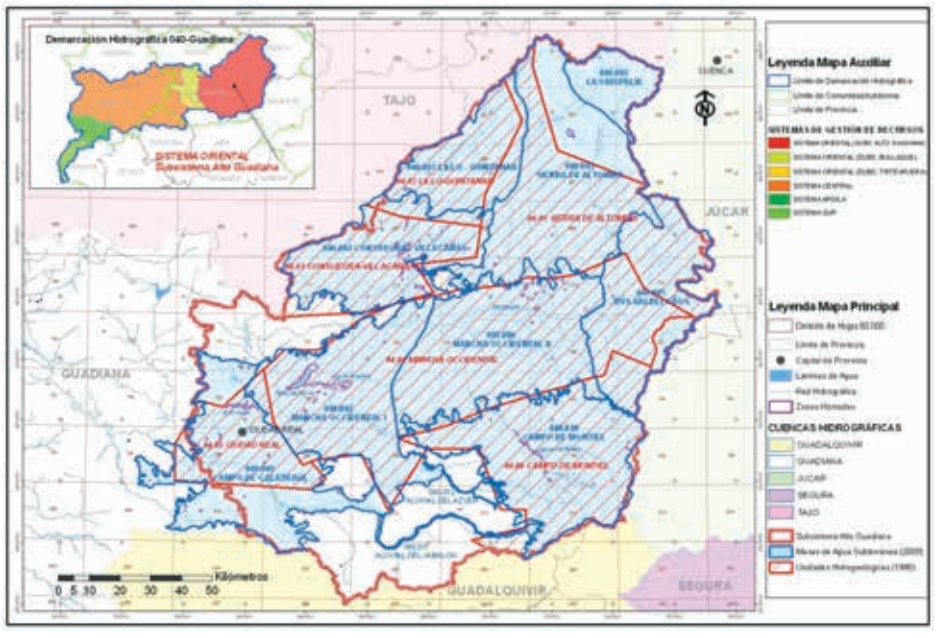


Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Guadiana, con la división en unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea.

Las temperaturas medias de los meses de enero y julio están en torno a los 5 °C y 25 °C respectivamente. La temperatura media de la región es del orden de 14 °C.

La precipitación media anual se sitúa en torno a los 425 mm/año. Si consideramos su contribución específica a la escorrentía es la más seca entre las cuencas y subcuencas españolas de un tamaño comparable, con una escorrentía total media que apenas alcanza los 30 mm/año.

El reparto de la precipitación es muy desigual, tanto interanualmente como estacionalmente. Hay años con una precipitación media inferior a los 250 mm, mientras que en el extremo opuesto hay años con precipitaciones superiores a los 600 mm. Estadísticamente hay más años con valores inferiores a la precipitación media, pero los años húmedos se desvían más de la media.

Las precipitaciones más importantes suelen tener lugar en los meses de noviembre a enero, con otro máximo relativo en abril y mayo. Para el conjunto de la cuenca puede extrapolarse una precipitación media en abril o noviembre de unos 50–60 mm/mes. Por su parte, los meses más secos son julio y agosto, con valores medios del orden de 5–15 mm/mes. Es bastante frecuente que las lluvias tengan un carácter tormentoso, con fuertes aguaceros de escasa duración localizados geográficamente en una zona relativamente reducida.

La variabilidad espacial de la precipitación a lo largo de la cuenca, en cuanto a valores medios, no es demasiado alta. La mayor parte tiene valores históricos medios entre 400 y 500 mm/año. Es en las zonas más elevadas, en las cabeceras de los ríos, donde se sobrepasan estos valores.

Así, en la zona central (Mancha Occidental I y II), el valor medio anual se sitúa en torno a los 400–425 mm. Hacia la zona occidental (Rus-Valdelobos), y en zonas cercanas al Campo de Montiel, la precipitación media está en torno a los 450 mm/año. A medida que nos alejamos de la Llanura Manchega y aumenta la cota topográfica, lo hace también el valor de la precipitación media histórica. Al norte llegan a alcanzarse valores medios de unos 500 mm/año en la zona de cabecera del río Riansares, y 550-600 mm/año en las cabeceras de Záncara y Gigüela. En Montiel, con una precipitación media de unos 450 mm/año, se superan los 500 mm/año en las zonas más elevadas, como las cabeceras de los ríos Azuer y Cañamares, o en la zona oriental y suroriental.

Marco hidrogeológico administrativo

Desde un punto administrativo, los acuíferos de la CAG han sido clasificados según varias divisiones y denominaciones en los últimos 30 años, atendiendo a diferentes criterios geológicos, hidrogeológicos, o simplemente de gestión hidrológica. Estas divisiones se iniciaron en los años 1970s con la clasificación en sistemas acuíferos establecida por el Programa Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PNIAS), basado principalmente en la cartografía hidrogeológica. En 1988 se adoptó la división en Unidades Hidrogeológicas, definidas con una mezcla de criterios administrativos e hidrogeológicos. Por último, la DMA estableció como unidad de gestión la masa de aguas subterráneas (MASb).

En la tabla 1 puede verse resumida esta evolución de la clasificación hidrogeológica administrativa de los acuíferos de la CAG.

En lo que respecta a la evaluación de los recursos hídricos subterráneos, estas diferentes clasificaciones dificultan el análisis de los estudios históricos existentes, pues las distintas estimaciones no suelen estar referidas a ámbitos territoriales coincidentes.

Funcionamiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana

Comportamiento en régimen natural

El funcionamiento hidrológico de la CAG en régimen natural, está caracterizado por la gran interrelación existente entre las aguas superficiales y las subterráneas.

La zona central del sistema, que en la actualidad comprende principalmente las MASb de Mancha Occcidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, es conocida como la Llanura Manchega por sus características topográficas, y resulta clave en el funcionamiento de todo el sistema, actuando básicamente como colector del mismo.

Las entradas de agua en dichas masas centrales proceden de la recarga directa de la lluvia, de los flujos laterales de otros acuíferos con niveles piezométricos más altos (más importantes en el caso de Mancha Occidental II), y de la infiltración de los ríos, cuando sus cauces están por encima del nivel piezométrico (Záncara, Guadiana al salir del Campo de Montiel, Azuer). Las salidas en régimen natural se producían por drenaje del acuífero en las zonas de descarga (particularmente importantes

Sistemas acuíferos (S.A. n.º) (1979)	Sup. (km²)	Uds. hidrogeológicas (UH) (1988)	Sup. (km²)	Masas de agua subterránea (MASb) (2006)	Sup. (km²)
S-19 (S.A. n.º 19) Sierra de Altomira	4.370	UH 04.01 Sierra de Altomira	2.706	040.001 Sierra de Altomira	2.575
				040.002 La Obispalía	489
S-20 (S.A. n.º 20) Mancha de Toledo	3.400	UH 04.02 Lillo-Quintanar	1.013	040.003 Lillo-Quintanar	1.101
		UH 04.03 Consuegra-Villacañas	1.202	040.004 Consuegra-Villacañas	1.605
S-23 (S.A. n.º 23) Mancha Occidental	5.000	UH 04.04 Mancha Occidental	5.126	040.005 Rus-Valdelobos *	1.716
				040.006 Mancha Occidental II	2.396
				040.007 Mancha Occidental I	2.002
		UH 04.05 Ciudad Real	1.050	040.009 Campo de Calatrava	2.022
S-24 (S.A. n.º 24) Campo de Montiel	2.700	UH 04.06 Campo de Montiel	2.582	040.010 Campo de Montiel	2.198
	15.470		13.682		16.109

Tabla 1. Evolución de la división administrativa de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana (sistemas acuíferos, unidades hidrogeológicas, masas de agua subterránea).

* El ámbito geográfico de la masa de aguas subterráneas de Rus-Valdelobos comprendía zonas que correspondían a las unidades hidrogeológicas de Sierra de Altomira, Mancha Occidental y Campo de Montiel.

en los Ojos del Guadiana y Tablas de Daimiel), y por evapotranspiración desde las zonas húmedas y las riberas de los ríos. En esta situación natural la circulación del agua subterránea tenía un sentido general hacia el oeste. La figura 2 (García Rodríguez y Llamas, 1992) muestra un perfil longitudinal muy esquemático de la zona central, desde las zonas de descarga en el oeste (Mancha Occidental I) a las áreas de recarga en el este (Rus-Valdelobos). La superficie libre señalada para 1972 puede considerarse representativa de una situación del sistema (respecto a niveles) cercana a la natural.

Las interacciones con las MASb adyacentes, especialmente con las de Sierra de Altomira al norte y Campo de Montiel al sur, son complejas, con conexiones no muy claramente definidas, debido a las complicadas características geométricas, hidrogeológicas y estructurales de las zonas de contacto. Además, en el extremo oriental del sistema, donde se sitúa la MASb Rus-Valdelobos, existe un límite hidrogeológico con la MASb Mancha Oriental (cuenca del Júcar), que cambia ligeramente de posición según las variaciones de los niveles piezométricos.

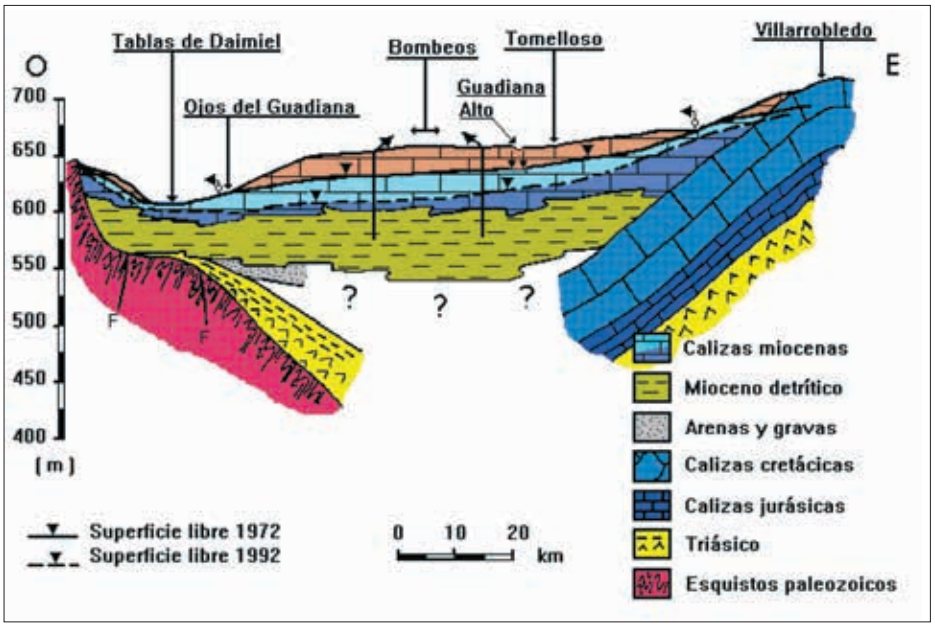


Figura 2. Perfil longitudinal de la Llanura Manchega (García Rodríguez y Llamas, 1992)

Al sur del sistema, la MASb de Campo de Montiel es un acuífero de tipo kárstico, muy fracturado, constituido principalmente por materiales jurásicos. Funciona como un acuífero libre, con un comportamiento del flujo subterráneo muy condicionado por las fracturas existentes y su dirección, mientras que su piezometría se caracteriza por oscilaciones notables relacionadas con episodios de lluvias importantes o secuencias secas. La lluvia constituye su fuente de recarga, mientras que la descarga se produce principalmente a través de manantiales situados principalmente en los bordes oeste y sur de la masa, o bien inmersos dentro de la misma, dando lugar a ríos como el Guadiana Alto, Azuer, Cañamares o Jabalón. La mayor parte del flujo subterráneo se transfiere hacia la Llanura Manchega, bien superficialmente a través de la escorrentía generada en el Guadiana Alto, o bien a través de la transferencia lateral hacia los acuíferos de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, cuantitativamente importante, como se verá posteriormente en los balances hídricos.

Por lo que respecta a las masas situadas al norte de la Llanura Manchega, la MASb de la Sierra de Altomira se recarga principalmente por la infiltración del agua de lluvia y de la escorrentía superficial, mientras que la descarga natural se produce por drenaje hacia los ríos, a través de manantiales, y por descargas laterales hacia la Llanura Manchega y hacia las masas de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas. En su parte más septentrional el drenaje tiene lugar hacia el río Gigüela, mientras que en su zona meridional el agua circula hacia los ríos Záncara, Saona y Rus, y hacia las comentadas masas adyacentes. En las MASb de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas, la recarga se produce por infiltración de la lluvia, y en algunas zonas por infiltración de ríos, especialmente durante el estiaje. El sentido de circulación del agua en los acuíferos triásico y mioceno tiene una clara componente hacia los ríos Riansares y Gigüela. En el acuífero cámbrico la circulación es hacia el norte, con drenaje hacia el río Amarguillo. Otras descargas del sistema se producen por evapotranspiración en zonas encharcadas y por escorrentía subterránea hacia la Llanura Manchega.

La capacidad de autorregulación de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana

Partiendo de una hipotética situación histórica en la que no se extraía agua de los acuíferos, el sistema en su conjunto (considerada su divisoria hidrogeológica), puede considerarse en una situación *media* de equilibrio, con unas entradas procedentes de la recarga de la lluvia y de la infiltración de los ríos en tramos en que estos son influentes; y unas salidas equivalentes constituidas por las descargas a ríos y zonas húmedas en las zonas de drenaje del sistema, y por la evapotranspiración desde el propio acuífero, en zonas con el nivel freático cercano a la superficie. Estas descargas contribuían a mantener unos determinados valores de la escorrentía subterránea en el caudal de los ríos y una cierta superficie de zonas húmedas.

En esta situación natural del acuífero, las secuencias húmedas o secas producen ligeros ascensos o descensos de los niveles piezométricos en torno a la posición de equilibrio. Esto se traduce en pequeñas variaciones de las descargas de los acuíferos, y por tanto del caudal circulante por los ríos. El consiguiente aumento o disminución de las áreas inundadas y de descarga, incide a su vez en la existencia de un mayor o menor volumen de evapotranspiración, que viene a compensar en cierta medida el balance del sistema, contribuyendo a mantener los niveles próximos a unos valores medios. Este comportamiento es representativo de la capacidad de autorregulación de los acuíferos de la CAG.

Esta autorregulación se pone también de manifiesto cuando en dichos acuíferos comienza a realizarse un aprovechamiento de las aguas subterráneas. Inicialmente se produce un descenso (en principio pequeño si las extracciones lo son), de los niveles piezométricos, y una disminución de las descargas a los ríos y zonas húmedas, lo que se traduce en un menor caudal circulante por los ríos y una reducción de la superficie de humedales. A su vez, esto conlleva una disminución de la salida por evapotranspiración.

Mientras existe conexión entre los acuíferos y las corrientes superficiales y zonas húmedas, se mantiene este comportamiento autorregulador.

Comportamiento en régimen perturbado

Con la intensa explotación de las aguas subterráneas, producida especialmente en la Llanura Manchega a partir de la década de los 70 del pasado siglo, el funcionamiento del sistema ha sufrido importantes modificaciones. El descenso de los niveles piezométricos (figura 3) ha hecho que en las masas centrales del sistema el acuífero haya quedado descolgado de las corrientes superficiales. A partir de ese momento se rompe el comportamiento autorregulador anteriormente analizado.

Esta desconexión supone la desaparición de la aportación subterránea del acuífero al caudal de los ríos.

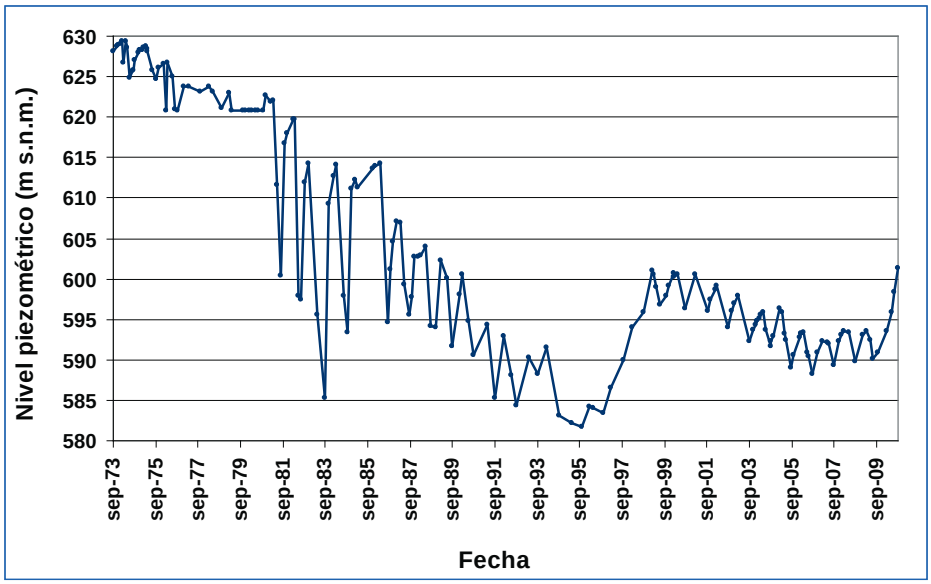


Figura 3. Evolución piezométrica en un punto de control del IGME (1930-40040) cercano a los Ojos del Guadiana (término municipal de Villarrubia de los Ojos).

Así, las áreas húmedas se han reducido drásticamente, y muchas zonas y ríos que antes recibían la descarga del acuífero, han pasado a ser áreas de recarga, donde se produce infiltración. El esquema de flujo se encuentra ahora condicionado en muchos lugares por los descensos de nivel producidos. Por ejemplo, la formación de conos de bombeo en la parte central y occidental de la Llanura Manchega hace que el flujo se dirija desde los contornos del sistema hacia dicha zona central. En esta situación perturbada, que es la que se ha producido en la zona central del sistema (masas de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos) los cauces se limitan a recoger la escorrentía superficial, que con frecuencia se infiltra totalmente en los acuíferos sin llegar al final de la cuenca, al embalse de El Vicario.

Es importante diferenciar este comportamiento de las masas centrales de la CAG con las MASb laterales. Dadas sus características, las masas situadas al norte de las tres anteriores (La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas) no han tenido una extracción de aguas subterráneas significativas en comparación con las de la Llanura Manchega, salvo en las zonas más próximas a la misma, y los problemas de alteraciones sobre el régimen natural son más moderados.

En el caso de la MASb del Campo de Montiel, su carácter kárstico y fracturado produce un comportamiento muy condicionado por la pluviometría y caracterizado por notables oscilaciones piezométricas. A su vez, estas oscilaciones condicionan de forma muy estacional la situación de las zonas húmedas de la masa, y en concreto de las Lagunas de Ruidera, un conjunto de lagunas escalonadas que discurren en dirección noroeste dentro del Campo de Montiel. El acuífero no ha sufrido alteraciones drásticas con respecto a su funcionamiento en régimen natural, como sucedía en las masas centrales de la cuenca. Las importantes oscilaciones de los niveles piezométricos obedecen más en este caso a las secuencias pluviométricas que a las extracciones de agua, que se mantienen en valores moderados. Desde un punto de vista cuantitativo, el descenso generalizado de niveles en las masas de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, a las que descarga lateralmente el acuífero del Campo de Montiel, ha inducido un cierto incremento de dicha transferencia (IGME, 2008), que se cuantifica de forma aproximada en el apartado de balances hídricos.

LA CUANTIFICACIÓN DE LOS RECURSOS SUBTERRÁNEOS. RESULTADOS OBTENIDOS

La cuantificación de los recursos subterráneos de la CAG ha sido, tradicionalmente, uno de los principales retos en el ámbito del conocimiento hidrológico del sistema.

En los numerosos trabajos desarrollados hasta la fecha sobre la CAG, o sobre alguna zona parcial de la misma, pueden encontrarse diversos intentos de confeccionar balances hídricos o de cuantificar de alguna manera los recursos hídricos subterráneos. Es difícil comparar unos con otros o tratar de realizar una síntesis basada en varios de ellos, debido a los distintos ámbitos geográficos de cada trabajo, y a la diferente forma de plantear los términos y el concepto del balance. Así, términos como *recarga*, *recarga de la lluvia*, *infiltración*, *recarga natural*, *recarga neta*, *recarga eficaz*, *recarga indirecta*, *recursos renova-*

bles, *recursos disponibles*, *escorrentía subterránea*, *componente base*, *flujo base*, *aportación subterránea* y otros, son utilizados sin la existencia de un criterio científico común claro, lo que suele inducir a confusión. Tampoco las definiciones oficiales ayudan a clarificar este tema, pues no siempre parecen responder a los conceptos a los que tratan de hacer referencia.

Así, los términos y definiciones establecidos de forma oficial en los instrumentos de Planificación Hidrológica, derivados de definiciones bastante genéricas procedentes de la DMA, no siempre tienen una interpretación hidrogeológica clara. De ahí que, en general, su estimación no se esté haciendo de una forma homogénea y que no siempre esté claro el concepto representado por las cifras obtenidas.

Sin embargo, los balances hídricos que desglosan de forma detallada cada una de las entradas y salidas de agua en las MASb constituyen la mejor herramienta para analizar cuantitativamente los recursos subterráneos del sistema, y para evaluar las repercusiones que las acciones antrópicas tienen en su funcionamiento. En concreto, y desde un punto de vista hidrogeológico, permitirán estimar cómo y en qué cantidad se ven afectados los diferentes términos del balance ante la explotación de los acuíferos.

Estimación de balances hídricos en la cuenca alta del Guadiana

Partiendo de los modelos numéricos realizados durante el proyecto europeo GRAPES, y considerando también otros trabajos desarrollados tanto por el IGME como por otros organismos y fuentes, se han estimado los balances hídricos detallados de cada una de las MASb de la CAG en tres situaciones distintas (tablas 2 y 3).

Los dos primeros balances (columnas de *régimen natural* y de *situación 1950s*) están referidos a situaciones históricas del sistema. La primera correspondería al funcionamiento del sistema en régimen natural, sin extracciones ni ningún otro efecto antrópico ejercido sobre el mismo. La segunda correspondería a la situación de equilibrio alcanzada por el sistema después de una extracción mantenida en el tiempo de unos 60 Mm^3/año, que puede considerarse representativa de los años 50 del pasado siglo, anterior al gran desarrollo del regadío con aguas subterráneas. Por último, la tercera situación estimada sería representativa aproximadamente de la situación actual.

Resulta muy interesante comparar los balances hídricos en las dos primeras situaciones históricas. Esa comparación nos permite estimar la repercusión de ese primer escalón de extracciones en la disminución de las descargas a los ríos y en el descenso de la evapotranspiración, relacionado a su vez de forma bastante directa con la disminución de la superficie de las zonas húmedas.

Estos cambios se producen de forma apreciable únicamente en las masas centrales de la cuenca, en las que se concentraban prácticamente todas las extracciones. Por eso, las situaciones en régimen natural y en los años 1950s se desglosan solamente en esas masas, que son las consideradas en la tabla 3.

Sobre estos balances hay que puntualizar que consideran la teórica división hidrogeológica, que como se indicó anteriormente no es fija, y por tanto no consideran posibles transferencias laterales con otras cuencas. Si consideramos las divisorias de cuencas existirían intercambios principalmente desde el Tajo y hacia el Júcar. Sería en este caso necesaria la mejora del conocimiento para acotar la incertidumbre existente, aunque en base a diversas estimaciones no parece que este intercambio pueda tener una incidencia significativa en los balances. Por su parte, la tabla 4 representa el balance hídrico del conjunto cerrado de toda la CAG, en el que las transferencias laterales entre masas quedan lógicamente anuladas entre si.

En este balance total puede verse que la aportación de los acuíferos a la escorrentía al final de la cuenca (El Vicario) en régimen natural, venía dada principalmente por las descargas procedentes del Gigüela, del Záncara, y del tramo Ojos del Guadiana-Tablas de Daimiel, cercanas cada una de ellas a los 100 Mm^3/año. En régimen natural, esta escorrentía subterránea suponía aproximadamente el 70 % de la aportación al flujo total, lo que da una idea de la gran importancia que las aguas subterráneas tienen en el funcionamiento de la cuenca. En años secos esta importancia relativa de la componente subterránea aumentaba aún más.

Como puede verse en los balances de la situación actual, la aportación del tramo Ojos del Guadiana–Tablas de Daimiel ha desaparecido totalmente, mientras que las correspondientes a los ríos Záncara y Gigüela han quedado reducidas a algunos tramos de las masas situadas al norte de la Llanura Manchega. Como además la zona central de la cuenca es en esta situación área de infiltración en su totalidad, los caudales en El Vicario

MASA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (MASB)	LA OBISPALÍA				SIERRA ALTOMIRA				LILLO-QUINTANAR				CONSUEGRA-VILLAC.				CAMPO DE MONTIEL			
Términos del balance hídrico	RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.		RN/50s		ACT.	
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
Recarga lluvia	15	–	15	–	80	–	80	–	28	–	28	–	35	–	35	–	132	–	132	–
Evapotranspiración	–	–	–	–	–	10	–	7	–	2	–	2	–	34	–	23	–	21	–	18
Acuífero→Río (Záncara)	–	6	–	6	–	24	–	17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero→Río (Gigüela)	–	7	–	7	–	15	–	9	2	11	–	8	5	3	7	–	–	–	–	–
Acuífero→Río (Riansares)	–	–	–	–	–	8	–	5	2	20	–	16	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero→Río (Saona)	–	–	–	–	–	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero→Río (Amarguillo)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	5	2	1	–	–	–	–
Acuífero→Río (Córcoles)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	3	2	2
Acuífero→Río (Guadiana Alto)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3	53	4	46
Acuífero→Río (Azuer + Cañamares)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18	–	14
Transferencia lateral (La Obispalía)	–	–	–	–	2	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Transferencia lateral (Altomira)	–	2	–	2	–	–	–	–	3	–	3	–	1	–	1	–	–	–	–	–
Transferencia lateral (Lillo-Quintanar)	–	–	–	–	–	3	–	3	–	–	–	–	2	–	3	–	–	–	–	–
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	–	–	–	–	–	1	–	1	–	2	–	3	–	–	–	–	–	–	–	–
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2	–	2	–	–	–	–
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	–	–	–	–	–	15	–	17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	37	–	43
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	–	–	–	–	–	3	–	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5	–	7
Extracciones (descontados retornos)	–	–	–	–	–	–	–	20	–	–	–	2	–	–	–	22	–	–	–	8
TOTAL	15	15	15	15	82	82	82	82	35	35	31	31	44	44	48	48	137	137	138	138

Tabla 2. Balance hídrico en régimen natural y en la situación actual, correspondiente a las MASb de La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar, Consuegra-Villacañas y Campo de Montiel.

MASA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (MASB)	MANCHA OCCIDENTAL I						MANCHA OCCIDENTAL II						RUS-VALDELOBOS					
Términos del balance hídrico	RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual	
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
Recarga lluvia	70	–	70	–	70	–	108	–	108	–	108	–	32	–	32	–	32	–
Evapotranspiración	–	57	–	54	–	–	–	53	–	46	–	–	–	18	–	16	–	–
Acuífero → Río (Záncara)	–	10	–	7	–	–	5	57	5	41	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero → Río (Gigüela)	9	64	7	55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero → Río (Rus)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	3	1	2	1	–
Acuífero →Río (de Ojos G. a Tablas D.)	–	94	–	81	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero →Río (Guadiana, tras Tablas D.)	–	5	–	4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero → Río (Córcoles)	–	–	–	–	–	–	2	13	2	7	–	–	–	–	–	–	–	–
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	–	–	–	–	–	–	72	2	70	2	56	–	–	–	–	–	–	–
Transferencia lateral (Altomira)	–	–	–	–	–	–	15	–	15	–	17	–	3	–	3	–	3	–
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	2	–	2	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	–	–	–	–	–	–	–	134	–	130	–	66	–	–	–	–	–	–
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	134	–	130	–	66	–	–	–	–	–	–	–	–	20	–	19	–	12
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	–	–	–	–	–	–	20	–	19	–	12	–	–	–	–	–	–	–
Transferencia lateral (Campo de Montiel)	–	–	–	–	–	–	37	–	37	–	43	–	5	–	5	–	7	–
Extracciones (descontados retornos)	–	–	–	26	–	147	–	–	–	30	–	170	–	–	–	4	–	31
TOTAL	231	231	228	228	147	147	259	259	256	256	236	236	41	41	41	41	43	43

Tabla 3. Balance hídrico en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual, correspondiente a las MASb de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos.

Tabla 4. Balance hídrico del conjunto de masas de la cuenca alta del Guadiana, en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual.

	Régim. natural		Situación 50s		Situación actual	
	ENT.	**SAL.**	**ENT.**	**SAL.**	**ENT.**	**SAL.**
Recarga lluvia	500	–	500	–	500	–
Evapotranspiración	–	195	–	183	–	50
Acuífero → Río (Riansares)	2	28	2	28	–	21
Acuífero → Río (Gigüela)	16	100	14	91	7	24
Acuífero → Río (Rus)	1	3	1	2	1	–
Acuífero → Río (Saona)	–	3	–	3	–	–
Acuífero → Río (Záncara)	5	97	5	78	–	23
Acuífero → Río (Amarguillo)	1	5	1	5	2	1
Acuífero → Río (Córcoles)	4	16	4	10	2	2
Acuíf. → Río (Guadiana Alto, en Montiel)	3	53	3	53	4	46
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	72	2	70	2	56	–
Acuífero → Río (de Ojos G. a Tablas D.)	–	94	–	81	–	–
Acuífero → Río (Guadiana, tras Tablas D.)	–	5	–	4	–	–
Ac. → Río (Azuer + Cañam., en Montiel)	–	18	–	18	–	14
Acuíf. → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	–
Extracciones (descontados retornos)	–	–	–	60	–	400
TOTAL	620	620	619	619	581	581

están hoy día prácticamente reducidos a la escorrentía superficial en periodos de importantes lluvias.

Los balances deben ser interpretados con mucha cautela y sin perder de vista la realidad conceptual que representan. No hay que olvidar que tratan de representar situaciones medias no reales. Desde el punto de vista cuantitativo aportan valores que por si solos no definen adecuadamente el comportamiento verdadero. Por ejemplo, en las relaciones acuífero-río, simplifican mediante un único *valor medio* relaciones que en muchas zonas de la cuenca cambian el comportamiento relativo (río ganador o perdedor), según la secuencia meteorológica o la época del año.

Las incertidumbres en cuanto a su aproximación a la realidad son aún mayores en el caso del tercer balance, que trata de representar la situación actual del sistema. Su estado profundamente perturbado hace aún más difícil hablar de valores medios. Siguiendo la filosofía comparativa de los dos estados anteriores se ha pretendido representar el punto de equilibrio (entendido como balances y niveles piezométricos constantes, y por tanto sin variación en el almacenamiento, equilibrando entradas y salidas) que alcanzaría el sistema si se mantuvieran en el tiempo las acciones actuales sobre el mismo (considerando unas extracciones totales en la CAG de unos 400 Mm^3/año). No es una situación, por tanto, que represente a un momento concreto del sistema, pero aporta una aproximación teórica a la cuantificación actual de los balances hídricos.

La estimación de recursos renovables en la cuenca alta del Guadiana

A partir de los balances hídricos estimados anteriormente sería sencillo determinar los recursos renovables de cada MASb, siempre y cuando el concepto que se pretende transmitir con ese término estuviera claramente establecido.

Sin embargo, tanto la definición que parece esbozar la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (contenida dentro de la definición de recursos disponibles), como el concepto que parece derivarse etimológicamente del término, no parecen ser interpretables de una forma clara y única. La IPH señala que "El recurso disponible se obtendrá como diferencia entre los recursos renovables (recarga por la infiltración de la lluvia, recarga por retorno de regadío, pérdidas en el cauce y transferencias desde otras MASb) y los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina". La IPH parece así asimilar los

recursos renovables al conjunto de todas las entradas que recibe la MASb. Debido a esta falta de claridad en conceptos y definiciones, van a analizarse tres interpretaciones diferentes del término, que en cualquier caso pondrán en evidencia la relativa representatividad del valor estimado.

Para ello se va a considerar como ejemplo la MASb del Campo de Montiel en régimen natural. Su balance hídrico (agrupando las infiltraciones y drenajes de los diferentes ríos), sería el indicado en la tabla 5.

ENTRADAS (Mm³/año)		SALIDAS (Mm³/año)	
Recarga lluvia	132	Drenaje acuífero	74
Infiltración ríos	5	Evapotranspiración	21
		Salidas laterales	42
TOTAL ENTRADAS	137	TOTAL SALIDAS	137

Tabla 5. Balance hídrico de la masa de agua subterránea del Campo de Montiel, en régimen natural.

— *Interpretación 1*: Sería la que parece derivarse de la lectura de la IPH, y que en las tablas de balances hídricos del apartado anterior correspondería con el *Total* de las columnas de entradas. Así, el recurso renovable entendido como el total de las entradas sería de 137 Mm³/año.

Hay que hacer aquí la consideración de que los retornos, principalmente del regadío, se han englobado en los balances hídricos dentro del término de salida por bombeos, descontándolos de los mismos. La IPH los considera parte de los recursos renovables, por lo que estrictamente habría que incrementar las extracciones en una cierta cantidad y considerar ese mismo incremento como entrada por retornos. Existe mucha incertidumbre al respecto, pero los retornos podrían estimarse en un 10% de la cifra de extracciones.

— *Interpretación 2*: Otra posible interpretación sobre la estimación de los recursos renovables consistiría en detraer de la cifra de entradas totales, las salidas por evapotranspiración y las salidas laterales a otras masas (o al mar cuando fuera el caso). De esta forma, el recurso renovable se asimilaría a la descarga del acuífero en manantiales y a las corrientes superficiales en tramos de ríos ganadores, lo que supondría la aportación del acuífero a la escorrentía (escorrentía subterránea). La cifra de recursos renovables sería en este caso de 74 Mm³/año.

— *Interpretación 3*: Una tercera posibilidad de interpretar los recursos renovables vendría dada por la diferencia entre la recarga procedente de la lluvia y la evapotranspiración a la atmósfera. En cierto modo, y especialmente si lo consideramos para una cuenca o subcuenca cerrada en su conjunto, es el valor que más se puede identificar etimológicamente con el concepto de recurso subterráneo renovable. Representaría, por así decirlo, el recurso neto que se renueva en la relación con la atmósfera. La infiltración de los ríos, las descargas del acuífero, o las entradas y salidas laterales constituyen procesos hidrológicos en los que el recurso procede previamente de la escorrentía superficial, de la propia recarga del acuífero, de las descargas del mismo, etc. En el caso de la CAG estos procesos son, además, especialmente relevantes, siendo habitual que lo que se drena del acuífero en una masa se infiltre en otra, y vuelva a descargarse en superficie aguas abajo.

Sin embargo, y desde un punto de vista del recurso hídrico subterráneo, ese balance neto entre la recarga de la lluvia y la evapotranspiración que se va a la atmósfera, sí que constituye *el nuevo agua* generada, que actúa de *motor* contribuyendo a desencadenar el resto de procesos que tienen lugar en el acuífero.

En valores medios a largo plazo, y con ligeras matizaciones, la recarga media procedente de la lluvia puede considerarse constante, pues no se considera en este trabajo el posible efecto del cambio climático. A este respecto, la incertidumbre con respecto a los escenarios futuros es muy alta, especialmente en la CAG, que por sus características concentra las recargas importantes en años muy húmedos. Así, una previsible distribución más extrema de la pluviometría puede incrementar los valores de dichas puntas de recarga, compensando en cierta medida la disminución de las precipitaciones. En todo caso hay que señalar que la IPH considera para la Demarcación del Guadiana una disminución con respecto a la aportación natural del 11%, para incorporar el efecto del cambio climático. Por su parte la evapotranspiración varía en función de la situación del sistema y supone en términos del balance una pérdida del recurso generado hacia la atmósfera, si bien, especialmente en cuencas como la CAG es un indicador de la buena salud hidrológica de las zonas húmedas. Como se decía anteriormente esta diferencia entre recarga de la lluvia y evapotranspiración tiene aún mayor sentido de renovabilidad si consideramos la cuenca en su conjunto.

En este tercer caso, los recursos renovables de la masa del Campo de Montiel en régimen natural serían de 132-21 = 111 Mm^3/año.

La utilidad conceptual de los recursos renovables, en cualquiera de las formas anteriormente definidas es muy relativa y limitada. Estas cuantificaciones que reducen los elementos del balance a un valor numérico aislado no representan cuantitativamente la evolución del comportamiento del flujo subterráneo. Pueden resultar interesantes y descriptivos en algunos casos, pero tienen el peligro de reducir a un solo número procesos más complejos. Además pueden inducir a ciertos errores de interpretación, cuando se utilizan estos valores con determinados fines, sin considerar de forma adecuada el comportamiento del sistema y lo que representan conceptualmente.

En cualquier caso, si se interpretan los recursos renovables como el conjunto de todas las entradas a las masas, en la forma que parece desprenderse de la IPH (*Interpretación 1*), los valores en régimen natural para cada una de las MASb de la CAG, serían, a tenor de las tablas de balances hídricos anteriores, y hecha la salvedad de los retornos, los indicados en la tabla 6.

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso renovable (Mm^3/año)
Sierra de Altomira	82
La Obispalía	15
Lillo-Quintanar	35
Consuegra-Villacañas	44
Mancha Occidental I	231
Mancha Occidental II	259
Rus-Valdelobos	41
Campo de Montiel	137

Tabla 6. Estimación de recursos subterráneos renovables, en régimen natural, para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana (No sumables para la cuenca en conjunto).

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas anteriormente, parece aconsejable insistir en el escaso significado que las cifras por si solas tienen si no se considera adecuadamente lo que las mismas representan y el funcionamiento conjunto de todo el sistema. Uno de los errores detectado a menudo, y especialmente cuando se consideran trabajos aislados de algunos de los acuíferos, unidades hidrogeológicas o masas del sistema, es asimilar la suma de los recursos anteriores a una especie de recursos conjuntos de toda la cuenca. Es evidente que los recursos renovables de las cifras anteriores, considerados como las entradas en cada masa (*Interpretación 1*), están contabilizados varias veces en distintas masas (por ejemplo, parte de lo que entra como recarga de la lluvia en el Campo de Montiel es transferido lateralmente a Mancha Occidental II, y contabilizado como recurso renovable en ambas masas). Los reiterados procesos de descargas e infiltraciones del flujo subterráneo que tienen lugar en la CAG condicionan también estas cifras.

Si en lugar de considerar de forma independiente cada masa, consideramos el conjunto de toda la CAG, y aplicamos sobre él la definición oficial de recursos renovables entendida como en el cálculo anterior (*Interpretación 1*), puede verse que el recurso renovable en situación natural sería de 620 Mm^3/año, y aún así habría que hacer las mismas consideraciones con respecto a la contabilización de recursos.

Desde este punto de vista del conjunto de la cuenca, resulta particularmente interesante analizar el balance "recarga de la lluvia menos evapotranspiración" (*Interpretación 3*), de acuerdo con lo comentado en este apartado. Puede verse que ese valor, para el conjunto de la CAG, era de unos 305 Mm^3/año en régimen natural, y está en torno a los 450 Mm^3/año en la situación actual.

La estimación de recursos disponibles en la CAG

La aplicación de la definición oficial de recursos disponibles de la IPH en la CAG, está condicionada por la situación de los acuíferos centrales de la cuenca. Según dicha definición, a los recursos renovables habría que restarles los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos. Pero dichos flujos sólo pueden existir en la zona central de la CAG si se vuelve a producir la conexión entre acuíferos y corrientes superficiales. Obviamente, esto se produciría de forma más rápida cuanto menores sean las extracciones, y por tanto cuanto más próximos a 0 estén los recursos disponibles.

En situaciones como ésta, el cálculo de los recursos disponibles a través de la definición no parece viable sin considerar otros factores y condicionantes en la toma de decisiones. Parece así adecuado recomendar unos valores para los recursos disponibles que tengan en cuenta la situación y el conocimiento general existente, y sin perder de vista el funcionamiento de los procesos hidrológicos anteriormente descritos y el objetivo último

de recuperación hidrológica y medioambiental del sistema hídrico de la CAG.

Con estas consideraciones, la recomendación consistiría en establecer los recursos disponibles en dos fases. En una primera fase, y partiendo de la situación actual, el recurso total disponible en el conjunto de la CAG se establecería en unos 275 Mm^3/año. Con esta cifra total de extracciones se producirían (como valor medio, a medio plazo) ascensos de 1 metro anual en los niveles piezométricos de las zonas en las que los descensos han sido mayores. Un reparto adecuado de estos recursos disponibles podría ser el mostrado en la tabla 7.

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso disponible (Mm^3/año)
Sierra de Altomira	20
Lillo-Quintanar	2
Consuegra-Villacañas	15
Mancha Occidental I	95
Mancha Occidental II	110
Rus-Valdelobos	25
Campo de Montiel	8

Tabla 7. Recomendación de recursos subterráneos disponibles para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana.

Sobre estas cifras podrían hacerse matices que incrementaran los recursos disponibles en algunas de las masas laterales en zonas que tuvieran escasa repercusión para la zona central de la cuenca (norte de Altomira, Lillo-Quintanar, La Obispalía). Por otra parte, para la masa del Campo de Montiel, de muy distinto funcionamiento como se ha explicado, se ha considerado un valor cercano al utilizado realmente en los últimos años, aunque dicho valor del recurso disponible podría incrementarse en secuencias húmedas, prestando especial atención a la ubicación de las extracciones.

Con esta cuantificación de recursos disponibles se produciría una recuperación importante de niveles piezométricos, pero sería necesaria una segunda fase aún más restrictiva en cuanto a recursos disponibles, para poder recuperar la conexión del acuífero con corrientes superficiales y zonas húmedas, al menos de una forma estacional, en secuencias húmedas. Ese valor podría estar, en principio, en torno a los 150 Mm^3/año para el conjunto de la cuenca, y con los mismos matices de posibilidad de ciertos incrementos en las masas laterales.

CONSIDERACIONES FINALES

Como intento de acercarse de la forma más precisa posible, desde un punto de vista hidrogeológico, a la cuantificación de los recursos subterráneos de las MASb, se ha estimado el balance hídrico para cada una de ellas (considerando todas las entradas y salidas) en tres situaciones diferentes del sistema: en régimen natural, supuesto que no se ejerce ninguna acción antrópica sobre el sistema; en la situación poco influenciada que representaría la moderada extracción *histórica* realizada con norias hasta finales de los años 1950s; y por último en la situación actual, o más exactamente, en el punto de equilibrio que se alcanzaría manteniendo aproximadamente las extracciones actuales y su distribución, que representa una situación profundamente perturbada del sistema respecto a las dos anteriores.

Con respecto a la cuantificación de recursos subterráneos renovables y disponibles en los términos definidos en los documentos oficiales de Planificación Hidrológica, se han realizado una serie de consideraciones al respecto de dichas definiciones y de la dificultad de su aplicación. En este sentido parece necesaria una mayor claridad en la definición de los recursos renovables, y en cualquier caso, se debe tener en cuenta el sentido conceptual de la cifra obtenida en relación a la definición que se considere.

En lo que respecta a los recursos disponibles también se han señalado limitaciones importantes en su aplicación con criterios hidrogeológicos. Su determinación difícilmente puede establecerse sin considerar factores con pesos importantes en la toma de decisiones: sociales, económicos, políticos, legales, etc. En todo caso, se propone que la estimación de los recursos subterráneos disponibles parta de un conocimiento hidrogeológico cualitativo, que considere adecuadamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en un sistema y su evolución; y cuantitativo, representado por balances hídricos detallados y su evolución. Sólo en este marco puede darse sentido a términos que traten de cuantificar los recursos mediante valores aislados.

Con estas consideraciones, y con las matizaciones que se han hecho a lo largo del texto, se ha realizado una recomendación sobre los recursos disponibles, que a grandes rasgos pasa por establecer una primera fase con unos recursos disponibles del orden de 275 Mm^3/año para el conjunto de MASb de la CAG, y con una cierta distribución de los mismos. Esto llevaría a una notable recuperación de los niveles piezométricos, que

tendría un límite aunque estas cifras de aprovechamiento del recurso se mantuvieran en el tiempo.

Es importante tener claro desde el principio que para la recuperación hidrológica y medioambiental definitiva del sistema, la cifra final de extracciones mantenidas en el futuro tendrá que ser aún bastante más restrictiva. Como referencias, por debajo de 200 Mm^3/año se produciría previsiblemente la aportación del acuífero en algunas zonas de descarga, al menos estacionalmente en secuencias húmedas; mientras que haría falta llegar hasta unos 60 Mm^3/año para mantener la situación de los años 50 del pasado siglo. En el rango comprendido entre esas cifras irían aumentando paulatinamente los caudales de descarga, las épocas en las que los ríos se comportarían como ganadores, y la superficie de las zonas húmedas. Sin embargo, si las extracciones se mantienen en los niveles inicialmente mencionados de 275 Mm^3/año, el esfuerzo será inútil desde el punto de vista de recuperación de zonas húmedas, porque para los efectos de funcionamiento de las mismas es indiferente que el nivel piezométrico esté a 15 metros que a 40 metros.

El comportamiento y evolución del sistema, en esa primera fase de reducción real de las extracciones, está claramente definido, dentro de los márgenes de incertidumbre propios de cualquier proceso hidrológico. El periodo de transición hacia esa segunda fase más ambiciosa, permitiría analizar la evolución real del sistema dentro de las particularidades del escenario que se vaya desarrollando, comprobando el cumplimiento de las tendencias esperadas. A su vez, esto permitirá acotar algunas de las incertidumbres existentes, relacionadas, por ejemplo, con la incidencia de posibles cambios relativos en la distribución geográfica de las extracciones, aumento relativo de las extracciones procedentes del acuífero profundo, repercusión de un posible incremento de las extracciones en las zonas periféricas del sistema, mayor precisión en determinar la relación final entre las extracciones mantenidas y la recuperación alcanzada, incidencia del cambio climático, etc. De esta manera, en la segunda fase podrían tomarse decisiones más ajustadas a las necesidades del sistema.

Es evidente que si las extracciones se reducen desde el principio aún más de las cifras indicadas, o antes se consigue pasar a esa segunda fase más restrictiva, más cerca se estará de la recuperación hídrica y medioambiental del sistema. En cualquier caso, parece *hidrológicamente justo* que en la valoración de los recursos disponibles en esta primera fase de recuperación se tenga en cuenta el incremento que ha habido en la *disponibilidad* de agua no evapotranspirada a la atmósfera como consecuencia de la situación perturbada en la que se encuentra el sistema, permitiendo que ese incremento, estimado en unos 125-150 Mm^3/año, se destine precisamente a la recuperación del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

García Rodríguez, M. y Llamas, M. R. (1992). Aspectos hidrogeológicos en relación con la génesis y combustión espontánea de las turbas de los Ojos del Guadina. *Actas del III Congreso Geológico de España*. Salamanca, 23-26 junio, tomo 2: 285-293.

IGME (2008), *Marco hidrológico del Campo de Montiel en el contexto de un modelo de gestión participativa de una masa de aguas subterráneas.* Convenio de colaboración entre el IGME y la Conferderación Hidrográfica del Guadiana. Instituto Geológico y Minero de España, 40 pp.

PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN, BASADA EN CRITERIOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS, DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

María Elena Galindo Rodriguez

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Propuesta de zonificación, basada en criterios geológicos e hidrogeológicos, de la Cuenca Alta del río Guadiana,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

María Elena Galindo Rodríguez
Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno

Colaboración:

Empresa IDRENA para realización de trabajos auxiliares

PROPUESTA DE ZONIFICACIÓN, BASADA EN CRITERIOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS, DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es realizar una subdivisión en aquellas masas de agua subterránea del Alto Guadiana, que puedan presentar zonas con comportamientos hidrogeológicos diferenciados. Ante la ausencia de metodologías previas para este tipo de trabajo, se procedió a crear una, que permitiera definir y delimitar posibles áreas aisladas hidrodinámicamente.

Las masas de agua subterránea (MASb) objeto de estudio son: 040.001 Sierra de Altomira, 040.002 La Obispalía, 040.003 Lillo-Quintanar, 040.004 Consuegra-Villacañas, 040.005 Rus-Valdelobos, 040.006 Mancha Occidental II, 040.007 Mancha Occidental I y 040.010 Campo de Montiel.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada se ha basado en el establecimiento y definición de criterios geológicos e hidrogeológicos que permitan caracterizar y determinar posibles límites hidrogeológicos dentro de las distintas MASb. Estos límites precisarán de estudios posteriores capaces de determinar la desconexión hidráulica entre las subzonas propuestas.

Como producto final, consecuencia de esta metodología, se elaboró un mapa con las distintas subzonas establecidas y sus límites, así como unas tablas con los criterios utilizados para la delimitación de cada subzona. En la figura 1 se esquematizan las distintas subzonas resultantes.

Para la realización de esta propuesta de zonificación dentro de cada MASb se utilizó como mapa base, el mapa geológico de la zona (figura 2). La identificación y delimitación de estos límites, se han establecido en base a la presencia de una serie de factores geológicos que pudieran determinar cierta posibilidad de cierre.

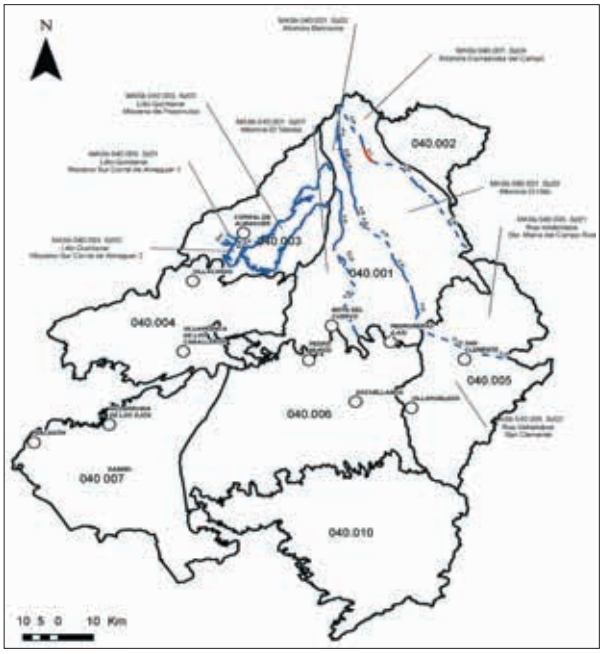


Figura 1. Delimitación de posibles subzonas

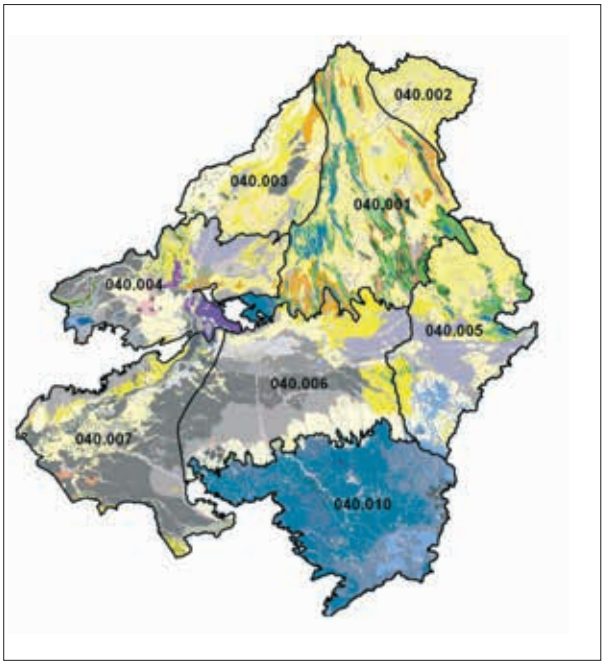


Figura 2. Mapa base

Para ello, se ha dotado de un peso, o grado de fiabilidad de cierre, a cada uno de los factores geológicos observados en los distintos cortes geológicos consultado en las hojas MAGNAS 1:50.000. Como apoyo a éstos, además, se han tenido en cuenta una serie de criterios hidrogeológicos, (parámetros hidráulicos, presencia de manantiales, confinamiento, etc.), con el fin de ratificar la fiabilidad de los cierres establecidos.

A cada uno de los límites de las distintas subzonas definidas, se le ha asignado un código de color en función de la fiabilidad de cierre, indicándose mediante iniciales el factor geológico e hidrogeológico detectado. Dicho límite se realizará con trazo continuo cuando se establece a partir de información constatada y en trazo discontinuo cuando el límite definido es supuesto. En aquellos casos en que se observa la presencia de confinamiento en el acuífero, se indicará con un trazado alternante de rayas y puntos.

Respecto al código de color definido según el grado de fiabilidad, se ha asignado el rojo para valores muy altos de fiabilidad de cierre, el verde para valores altos y el azul para valores medios. De esta forma, si se observa un cabalgamiento que pone en contacto materiales permeables, se representará con un trazado en color azul y con las iniciales c.p.

Todos los criterios de cierre valorados en cada una de MASb en las que se ha propuesto la mencionada zonificación y la ponderación de su fiabilidad, se han descrito en unas tablas definidas para cada una de las subzonas, indicando la presencia o ausencia de los factores geológicos e hidrogeológicos y su efectividad de cierre. También se presenta una columna de referencia de la información, en la que se indica la fuente bibliográfica donde consultar los criterios observados. (tabla 1)

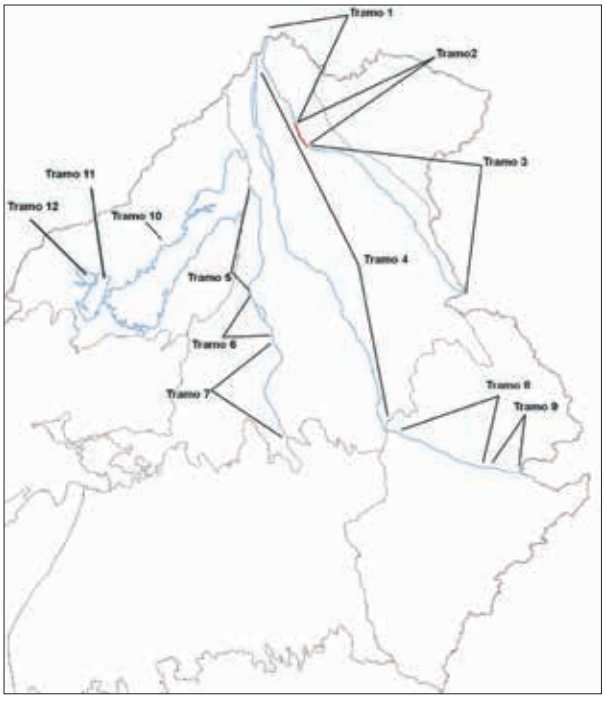


Figura 3. División de los límites en tramos.

Igualmente, para facilitar la identificación en el mapa del factor detectado en cada cierre, se han subdividido los cierres en tramos (figura 3) indicando mediante las iniciales, los criterios de cierre observados en cada uno.

CRITERIOS DE CIERRE

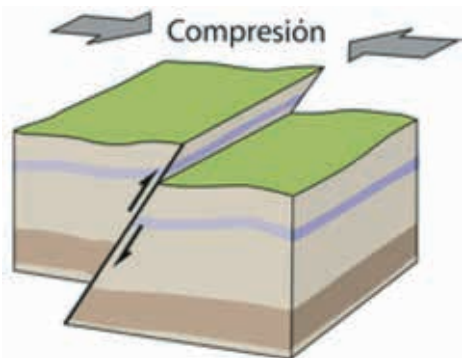
Los criterios de cierre están constituidos por los siguientes factores geológicos:

Fiabilidad de cierre MUY ALTA

Está constituida por:

— *Diapiros salinos sin karstificación (d.s)*. Son estructuras geológicas intrusivas, formadas por masas de evaporitas (en muchos casos acompañadas de arcillas) que proceden de niveles estratigráficos muy plásticos sometidos a gran presión, que ascienden por las capas sedimentarias de la corteza terrestre, atravesándolas y deformándolas. Adquieren forma de cilindro, seta o gota y suelen ser de gran tamaño. Implican un límite al flujo de las aguas subterráneas (barrera hidrogeológica), por lo que se les confiere una fiabilidad de cierre elevada. Su nomenclatura en el mapa, si aparece, es d.s.

— *Estructuras compresivas (c.i. y f.i.imp):* Las estructuras compresivas se refieren a *fallas inversas y cabalgamientos* entre materiales permeables e impermeables**.**



MASb																							
			Diapiros salinos sin Karstificación (D.s)		ESTRUCTURAS COMPRESIVAS						FALLAS NORMALES						Discordancia erosiva (D.e)		Referencia Información
	Código Color	Factor Geológico			Ponen en contacto materiales impermeables con permeables				Ponen en contacto materiales permeables														
					Fallas Inversas (F.i.imp)		Cabalgamientos (C.i.)		Fallas inversas (F.i.p)		Cabalgamientos (C.p.)		Ponen en contacto materiales permeables confinados con impermeables (F.imp)		Ponen en contacto materiales permeables confinados con impermeables con presencia de manantiales (F.imp.m)		En acuíferos libres (F)					
			Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No		
Fiabilidad de cierre	Muy Alta	Límites estructurales compresvos entre materiales permeables e impermeables																				
	Alta	Límites estructurales compresivos entre materiales permeables																				
	Media	Fallas normales o discordancias erosivas																				

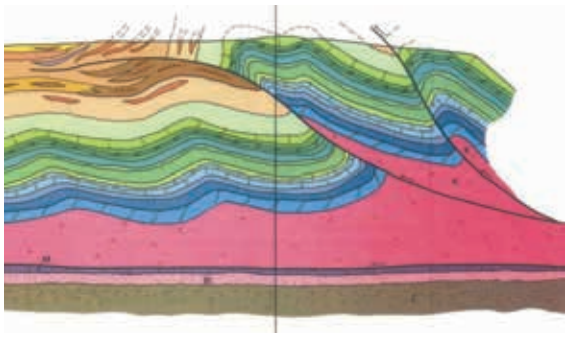
Tabla 1. Criterios de cierre

Tabla de apoyo

MASb																									
			Parámetro																						Referencia Información
	Código Color	Factor Hidrogeológico	T		Piezometría		Direcciones preferentes		Zonas aflorantes con barera imp.		Zonas aflorantes de recarga con flujos opuestos		Porosidad		Confinamiento		Manantial		Calidad Química				
			Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No			
Fiabilidad de cierre	Muy Alta	Transmisividad, piezometría, direcciones preferentes, zonas aflorantes con barrera impermeable																							
	Alta	Zonas de recarga aflorantes con flujos opuestos, porosidad																							
	Media	Manantiales, calidad química, confinamiento																							

Una *falla inversa* es una ruptura de los estratos a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica inferior son empujadas hacia arriba, por encima de los estratos anteriormente suprayacentes, debido a un régimen de esfuerzos compresivos en el que se produce acortamiento de terreno.

Un *cabalgamiento* es un tipo de falla inversa, generalmente con un plano de falla de bajo ángulo (menor de 45º), donde los materiales del bloque levantado montan sobre los del bloque hundido. Los cabalgamientos también se deben a regímenes compresivos o de acortamiento y requieren de mayores esfuerzos, pudiendo tener carácter regional.



El desarrollo de fallas inversas y cabalgamientos implica una serie de procesos que favorecen la impermeabilización de la zona de fractura, como son: desarrollo de espejos de falla, desarrollo de minerales de la arcilla y recristalización de minerales como resultado de la milonitización.

Para este estudio se han considerado estos cierres vinculados a confrontación entre *materiales permeables con impermeables* (ej, arenas con margas y yesos) como muy alta fiabilidad de cierre. Su nomenclatura en el mapa sería *f.i.imp* para la falla inversa y *c.i.* para el cabalgamiento.

Fiabilidad de cierre ALTA

Está constituida por:

— *Fallas normales impermeables (f.imp, y f.imp. m.c): Una falla normal* es una ruptura de los estratos a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica superior son empujadas hacia abajo, por debajo de los estratos suprayacentes, debido a un régimen de esfuerzo distensivo en el que hay un acortamiento de terreno.

Las fallas normales presentan menor grado de milonitización / cataclasis por lo que pueden presentar menor resistencia al cierre hidrodinámico de una zona. Por tanto se le da una fiabilidad de cierre inferior al de las fallas inversas.

A las fallas normales que ponen en contacto materiales permeables confinados con materiales impermeables *(f.imp)*, así como a las fallas que tienen presencia de manantiales de agua subterránea de origen conocido que ascienden a favor del plano de fractura *(f.imp.m.c.)*, se les ha dotado de una fiabilidad de cierre alta.

Fiabilidad de cierre MEDIA

Está constituida por los siguientes factores geológicos:

— *Fallas inversas (f.i.p) y cabalgamientos (c.p)* vinculados a confrontación entre materiales permeables, tendrán fiabilidad de cierre media debido a la posibilidad de que la zona de contacto entre los materiales permeables no esté impermeabilizada y desconectada.
— *Fallas normales en acuíferos libres* entre materiales permeables *(f)*.
— *Fallas normales que ponen en contacto materiales permeables* confinados y con presencia de manantiales de aguas subterráneas de origen desconocido *(f.imp.m.d.)* que ascienden a favor del plano de fractura.
— *Discordancia Erosiva (d.e)*: Se denomina así a la superficie de erosión o a cualquier otra solución de continuidad que separa unos estratos más jóvenes de otros más antiguos. En general, representa una interrupción en la sedimentación durante la cual los materiales pueden sufrir procesos de erosión, deformación y precipitación química impermeabilizantes en mayor o menor grado. Este es el caso de los paleosuelos, de las costras ferruginosas y siliciclásticas.

CRITERIOS HIDROGEOLÓGICOS DE APOYO AL CIERRE DE LAS ZONAS DEFINIDAS PARA CADA MASb.

Los criterios de apoyo al cierre están constituidos por los siguientes factores hidrogeológicos:

Fiabilidad de cierre MUY ALTA

— *Transmisividad***.** Zonas próximas entre sí que tengan valores de transmisividad que presenten grandes di-

ferencias, implican comportamientos hidrogeológicos diferentes.

— *Piezometría***.** Zonas que presenten piezometrías distintas, implican comportamientos hidrogeológicos diferentes; tanto por variaciones en los niveles (diferencia de valores para condiciones hidrogeológicas diversas), como por el comportamiento de las isopiezas en su distribución (isolineas con orientaciones muy distintas).

— *Direcciones preferentes de flujo***.** Las direcciones preferentes de flujo pueden marcar zonas con comportamientos hidrogeológicos distintos, indicados por direcciones y sentidos de flujo separados y sin influencia entre ellos. Por ejemplo, paleocanales, karstificaciones asociadas a la alineación de fracturas, etc.

— *Zonas aflorantes con barrera impermeable.* Se produce cuando un afloramiento actúa de barrera impermeable, produciendo 2 áreas de recarga diferenciadas a ambos lados del mismo. Por ejemplo, un plutón granítico aflorante que define áreas de recarga a cada lado.

Fiabilidad de cierre ALTA

— *Zonas aflorantes de recarga con flujos opuestos.* Se da cuando hay una zona de recarga en la que el flujo sigue sentidos opuestos a cada lado de la misma; ya sea debido a la fracturación de la zona aflorante, a la estratificación, etc. Un ejemplo sería el núcleo de un anticlinal a partir del cual el agua se infiltra y se desplaza en sentidos opuestos.

— *Porosidad.* Al igual que en el caso de la transmisividad serían zonas próximas entre sí, con valores de porosidad (entendida como porosidad eficaz) muy distintos, que daría lugar a comportamientos hidrodinámicos e hidrogeológicos diferentes.

Fiabilidad de cierre MEDIA

— *Confinamiento.* Hace referencia a una posible zonación en la vertical, en el caso de presencia de un acuífero que en unas zonas sea confinado y en otras sea libre. El comportamiento hidrodinámico del acuífero generalmente es independiente la parte confinada de la libre.

— *Presencia de manantiales.* Se consideran aquellos que indican un afloramiento del agua en una discontinuidad geológica, relacionada con una falta de conexión entre materiales permeables con materiales impermeables, es decir, indican la presencia de una barrera de baja permeabilidad entre dos zonas hidrogeológicas.

— *Calidad Química.* Composiciones químicas muy diferenciadas de zonas próximas pueden indicar modelos de funcionamiento hidrogeológico diferentes. Este factor es de especial interés si va asociado a alguno de los factores descritos anteriormente.

RESULTADO DE LA ZONIFICACIÓN

Tras analizar la documentación consultada se ha procedido a zonificar las masas de agua subterránea de la cuenca alta del río Guadiana.

Del total de las ocho masas de agua subterránea consideradas, se han encontrado criterios para proponer la zonificación en tres: la MASb 040.001 Sierra de Altomira, la 040.003 Lillo-Quintanar y la 040.005 Rus-Valdelobos.

Con los datos disponibles, en las MASb 040.002 La Obispalía, 040.004 Consuegra-Villacañas, 040.006 Mancha Occidental II y la 040.007. Mancha occidental I, no se han encontrado evidencias que permitan establecer una zonificación efectiva. Según la bibliografía consultada, en la MASb 040.010 Campo de Montiel, los procesos de fracturación, asociados a procesos diapíricos, y los procesos de plegamiento, podrían definir un cierto aislamiento local, sin embargo no se puede confirmar que constituyan zonas independientes.

En total se han diferenciado 9 subzonas, las cuales se reparten entre las siguientes MASb:

**MASb. 040.001. Sierra de Altomira:*
—Subzona 01 Altomira-El Toboso
—Subzona 02 Altomira-Belmonte
—Subzona 03 Altomira-El Hito
—Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo

**MASb. 040.003. Lillo-Quintanar*
—Subzona 01 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 1
—Subzona 02 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 2
—Subzona 03 Lillo-Quintanar. Mioceno de Pozorrubio

**MASb. 040.005. Rus-Valdelobos*
—Subzona 01 Rus-Valdelobos. Sta María del Campo Rus
—Subzona 02 Rus-Valdelobos. San Clemente

A continuación se detallan los criterios utilizados para establecer las mencionadas subzonas.

MASb. 040.001. SIERRA DE ALTOMIRA

Subzona 01 Altomira-El Toboso (figuras 7 y 8).

La información consultada ha sido la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 689, 715.
—Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.
—Plan de geología continua GEODE
—Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 623 km^2 aproximadamente, el carácter químico general del agua es sulfatada cálcica y sulfatada bicarbonatada-cálcica y está limitada por los límites de la propia MASb y por las estructuras de los tramos 5, 6 y 7.

En el tramo 5 se observa un cabalgamiento que afecta a los materiales jurásicos. En el tramo 7 el cabalgamiento corta los materiales jurásicos, cretácicos y llega a afectar a los del Terciario.

En el tramo 6 la falla inversa pone en contacto la formación impermeable del Triásico (Keuper) con las formaciones jurasicas y cretácicas, haciendo que el Triásico impermeable llegue casi hasta la superficie del terreno. Además, en el tramo 5 afloran manantiales, figura 8.

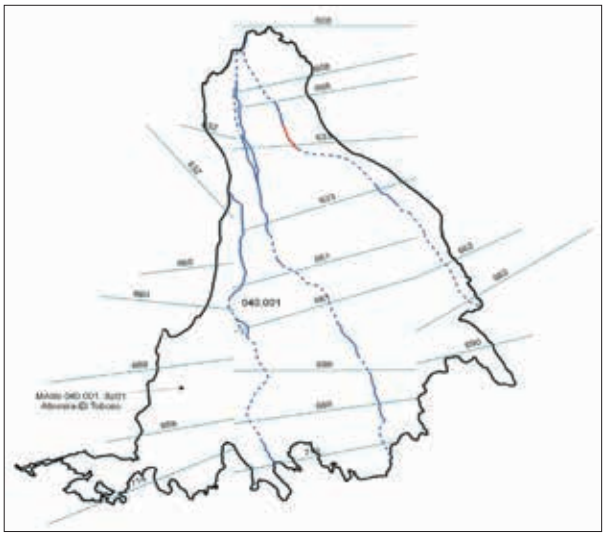


Figura 7. MASb 040.001. Subzona 01 Altomira-El Toboso Cortes Geológicos

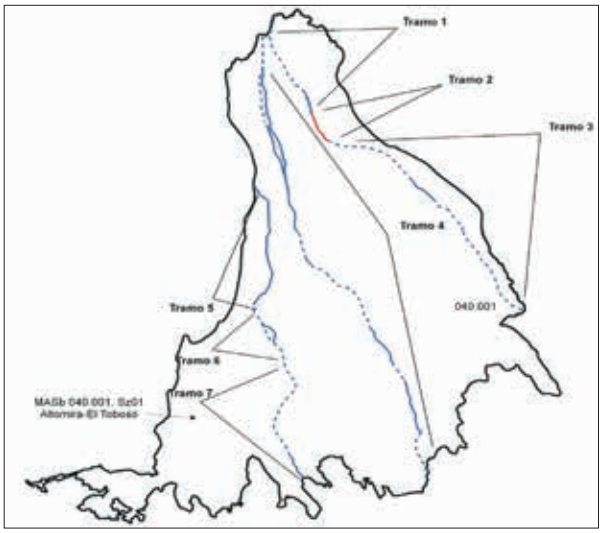


Figura 8. MASb 040.001. Subzona 01 Altomira-El Toboso. Tramos

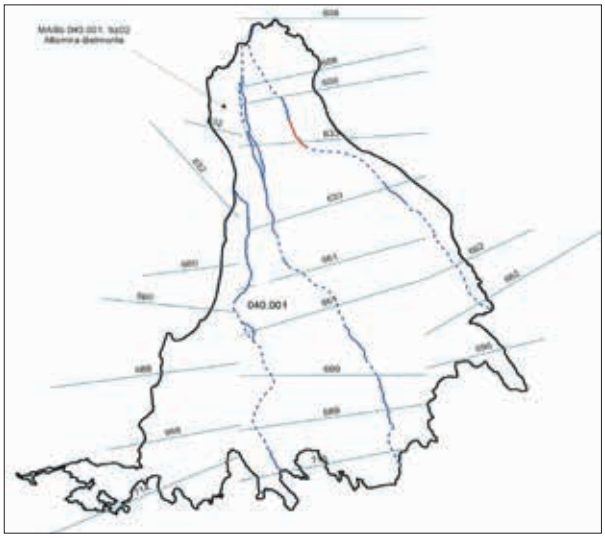


Figura 9. MASb 040.001. Subzona 02 Altomira-Belmonte. Cortes geológicos.

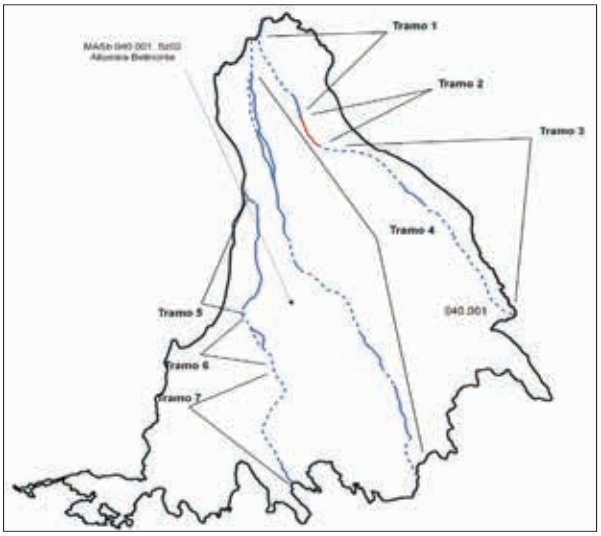


Figura 10. MASb 040.001. Subzona 02 Altomira-Belmonte. Tramos.

Subzona 02 Altomira-Belmonte (figuras 9 y 10)

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 689, 715.
—Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.
—Plan de geología continua. GEODE
—Base de Datos Aguas XXI del IGME.

Esta subzona tiene una superficie de 731 km^2 aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sulfatada-cálcica. La subzona está delimitada por los tramos 4, 5, 6 y 7.

En el tramo 4 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas y cretácicas, si bien en la parte media del tramo, a la altura del corte geológico del MAGNA 633 II-II', el cabalgamiento pone en contacto los materiales jurásicos con los del Terciario.

En el tramo 5 se observa un cabalgamiento que afecta a los materiales jurásicos. En el tramo 7, el cabalgamiento corta los materiales jurásicos, cretácicos y llega a afectar a los terciarios. En el tramo 6, la falla inversa detectada pone en contacto la formación impermeable del Triásico (Keuper) con las formaciones jurasicas y cretácicas, haciendo que el Triásico llegue casi hasta la superficie del terreno.

Además, en los tramos 4 y 5 afloran manantiales, figura 10.

Subzona 03 Altomira-El Hito (figs. 11 y 12)

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 608, 633, 661, 662, 689, 715.
—Plan de geología continua. GEODE
—Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 975 km^2 aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es bicarbonatada cálcica, y sulfatada cálcica. Está delimitada por los tramos 1, 2, 3 y 4.

Los tramos 1 y 3 están afectados por un cabalgamiento que afecta a los materiales del Triásico, Cretácico y Terciario. En el tramo 2 hay presencia de cabalgamientos que pone en contacto materiales del Paleógeno inferior con materiales del Mioceno inferior. Este cabalgamiento también afecta materiales cretácicos. El cabalgamiento a lo largo del tramo 4 afecta a materiales del Jurásico y del Cretácico, si bien en la parte media del tramo, a la altura del corte geológico del MAGNA 633 II-II', el cabalgamiento pone en contacto los materiales jurásicos con los del Terciario

En materiales permeables, en los tramos 1, 3 y 4 aparecen manantiales, figura 12.

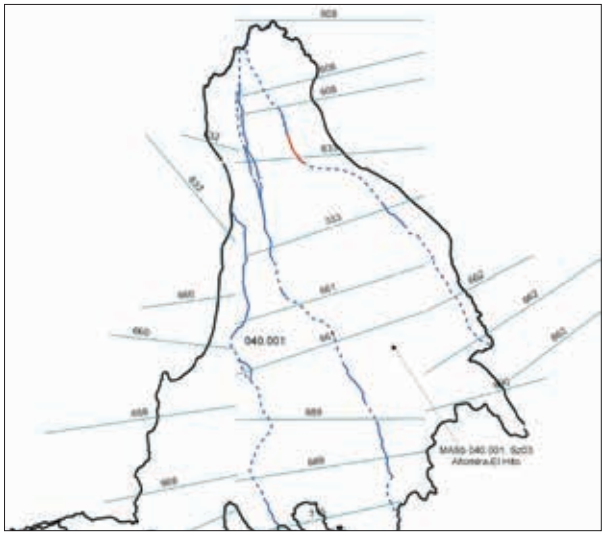


Figura 11. MASb 040.001. Subzona 03 Altomira-El Hito. Cortes Geológicos

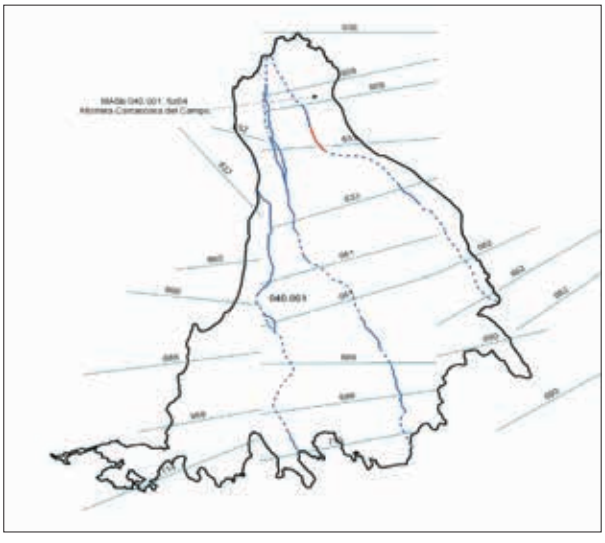


Figura 12.MASb 040.001. Subzona 03 Altomira-El Hito. Tramos.

Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo (figuras. 13 y 14).

La información consultada es la siguiente:
—Hojas MAGNA 1:50.000 nº 633, 662 y 608.
—Plan de geología continua. GEODE
—Base de Datos Aguas XXI del IGME

Esta subzona consta de 245 km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es sulfatada cálcica. La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 1, 2 y 3.

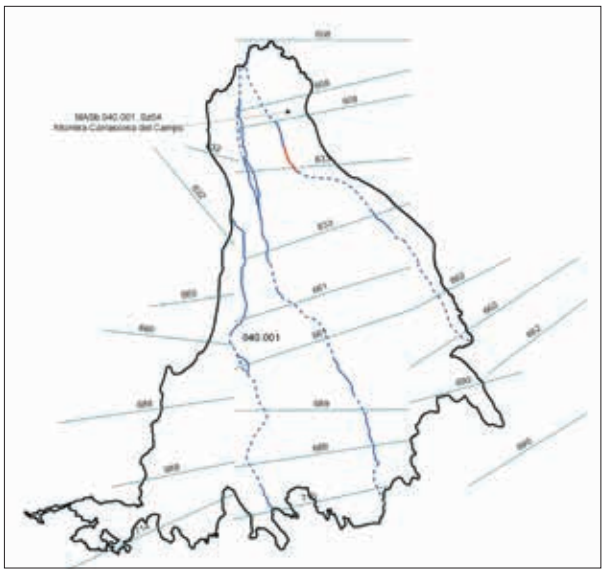


Figura 13. MASb. 040.001. Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo. Cortes geológicos.

Figura 14. MASb. 040.001. Subzona 04 Altomira-Carrascosa del Campo. Tramos.

Los tramos 1 y 3 están afectados por un cabalgamiento que corta a los materiales del Triásico, Cretácico y Terciario. En el tramo 2 hay presencia de cabalgamientos que pone en contacto materiales del Paleógeno inferior con materiales del Mioceno inferior. Este cabalgamiento también afecta materiales cretácicos.

En materiales permeables, en los tramos 1 y 3 aparecen manantiales, figura 14.

MASb 004.003 Lillo-Quintanar

Subzona 01 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur Corral de Almaguer 1. (figura 15)

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 nº 659.
—Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.

Esta subzona consta de 7 km² aproximadamente. No hay datos disponibles de calidad química. Toda la subzona está limitada por el tramo 12, el cual se trata de una discordancia erosiva

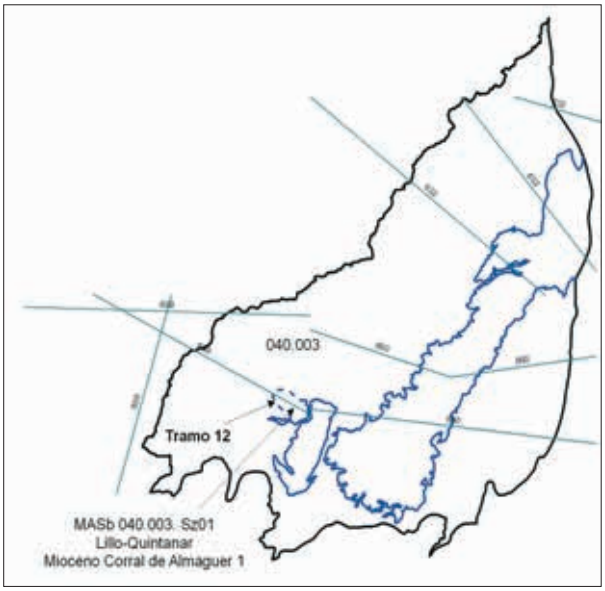


Fig. 15. MASb 040.003. Subzona 01 Lillo-Quintanar Mioceno Sur Corral de Almaguer 1

Subzona 02 Lillo-Quintanar. Mioceno Sur corral de Almaguer 2 (fig. 16)

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 660.
—Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.

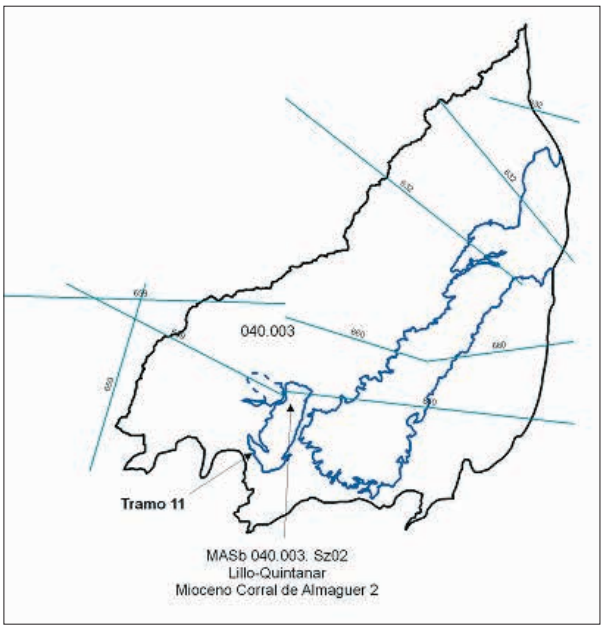


Figura 16. MASb 040.003. Subzona 02 Lillo-Quintanar Mioceno Corral de Almaguer 2

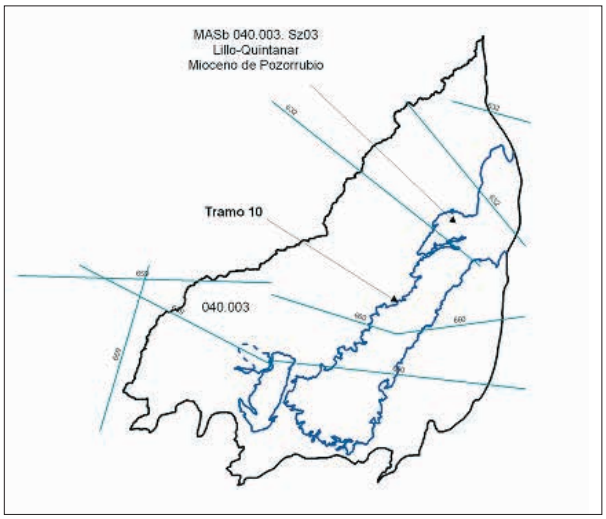


Figura 17. MASb 040.003. Subzona 03 Lillo-Quintanar Mioceno de Pozorrubio

Esta subzona consta de 25 Km² aproximadamente. No hay datos disponibles de calidad química. Toda la subzona está limitada por el tramo 11, el cual se trata de una discordancia erosiva.

Subzona 03 Lillo-Quintanar. Mioceno de Pozorrubio (figura 17)

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 660 y 632.
—Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Demarcación Hidrográfica del Guadiana. 2009. Apoyo a la caracterización de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. MAS: 040.003 Lillo-Quintanar.
—Plan de geología continua. GEODE
—Base de Datos Aguas XXI del IGME.

Esta subzona consta de 235 Km² aproximadamente, el carácter químico general predominante del agua es sulfatada-bicarbonatada cálcica. Toda la subzona está limitada por el tramo 10, el cual se trata de una discordancia erosiva. Además encontramos manantiales como apoyo al criterio de cierre.

MASb. 040.005. RUS-VALDELOBOS

Subzona 01 Rus-Valdelobos. Sta María del Campo Rus. (figura 18)

Figura 18. MASb 040.005 Subzona 01 Rus-Valdelobos Sta. María del Campo Rus

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 716.
—Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.

Esta subzona tiene una superficie de 638 Km^2 aproximadamente. El carácter químico general predominante del agua es sulfatada cálcica. La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 8 y 9.

En el tramo 8 las fallas inversas cortan a las formaciones jurásicas y cretácicas poniéndolas en contacto con los materiales terciarios. En el tramo 9 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas.

Subzona 02 Rus-Valdelobos. San Clemente

La información consultada es la siguiente:

—Hojas MAGNA 1:50.000 n.º 716.
—Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las UUHH de la CAG. Confederación Hidrográfica del Guadiana. MMA. 2004.

Esta subzona consta de 1078 km^2 aproximadamente, el carácter químico general del agua predominante en la parte norte es de composición sulfatada cálcica. Hacia el sur pasa a predominar el carácter bicarbonatado cálcico.

La subzona está limitada por los límites de la propia masa de agua y por las estructuras de los tramos 8 y 9, figura 19.

En el tramo 8 las fallas inversas cortan a las formaciones jurásicas y cretácicas poniéndolas en contacto con los materiales terciarios. En el tramo 9 se identifica un cabalgamiento que afecta a las formaciones jurásicas.

Se ha realizado una consulta a la tabla de datos de análisis químicos de la Base de Datos Aguas XXI del IGME para el periodo 2000-2002. Se ha obtenido un total de 380 análisis que corresponden a 118 puntos de muestreo. Se ha procedido a la caracterización del agua en esos puntos, si bien no ha podido extraerse un criterio "sensu stricto" que ayude a justificar la zonación.

De igual forma, se ha realizado una consulta a la tabla de datos piezométricos de la Base de Datos Aguas XXI del IGME con el objetivo de elaborar la superficie piezométrica del acuífero mesozoico de la Sierra de Altomira (figura 20). Se optó por utilizar las medidas correspondientes al año 2010, con un total de 14 medidas.

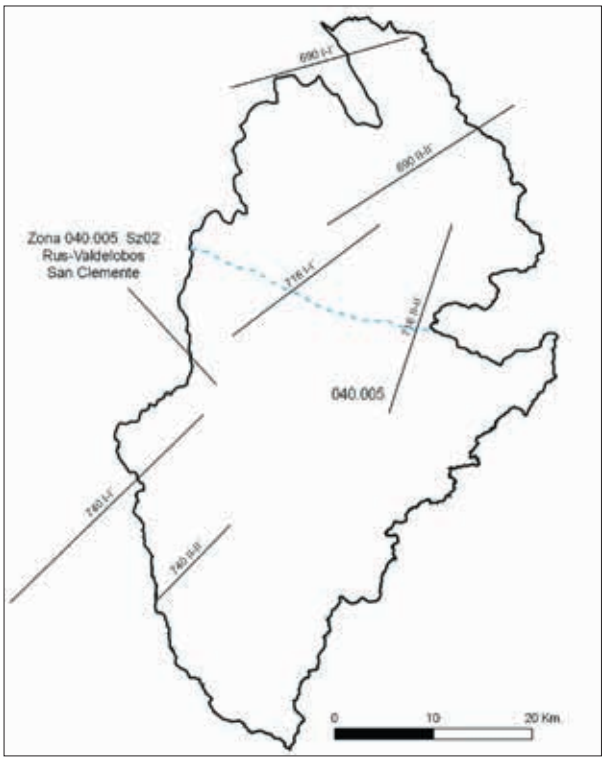


Figura 19. MASb 040.005 Subzona 02 Rus-Valdelobos San Clemente

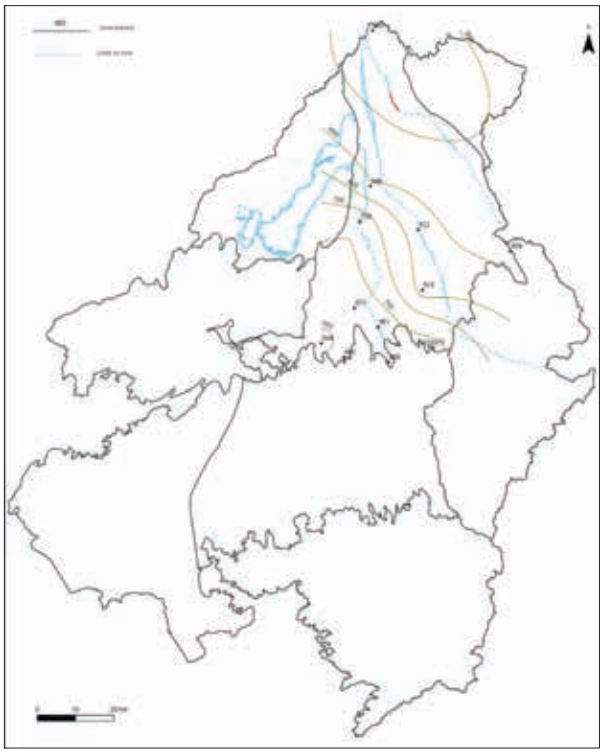


Figura 20. Piezometría de la Sierra de Altomira

No se ha podido disponer de un número suficiente de puntos, por lo que se han interpolado los datos para trazar las isopiezas, lo cual ha impedido la obtención de resultados concluyentes, si bien se observa una tendencia de flujo de dirección N-S, coincidente con la orientación de las principales discontinuidades que forman los límites.

CONSIDERACIONES FINALES

La metodología utilizada se ha basado en el establecimiento y definición de criterios geológicos e hidrogeológicos que permitan caracterizar y determinar posibles límites hidrogeológicos dentro de las distintas MASb.

Los criterios de cierre definidos según los factores geológicos observados son: *1. fiabilidad de cierre muy alta*: diapiros salinos sin karstificación, fallas inversas y cabalgamientos en materiales impermeables; *2. fiabilidad de cierre alta*: fallas normales en materiales impermeables; y *3. fiabilidad de cierre media***:** fallas inversas y cabalgamientos en materiales permeables; fallas normales en materiales permeables y discordancias erosivas.

Como apoyo a estos criterios geológicos se han tenido en cuenta una serie de criterios hidrogeológicos: *1. fiabilidad de cierre muy alta***:** transmisividad, piezometría, direcciones preferentes de flujo, zona aflorantes con barrera impermeable; *2. fiabilidad de cierre alta***:** zona aflorante de recarga con flujos opuestos, porosidad; y *3. fiabilidad de cierre media*: confinamiento, presencia de manantiales y calidad química.

Como producto final, consecuencia de esta metodología, se elaboró un mapa con las distintas subzonas establecidas y sus límites, así como unas tablas con los criterios utilizados para la delimitación de cada subzona.

De las 8 masas de agua subterránea estudiadas, sólo se ha podido determinar una posible zonificación en tres de ellas, obteniéndose un total de 9 subzonas, con la siguiente distribución: en la MASb 040.001 Sierra de Altomira, se han establecido 4 subzonas; en la MASb 040.003 Lillo-Quintanar se proponen 3 subzonas y en la MASb 040.005 Rus-Valdelobos se han zonificado 2 subzonas. En la MASb 040.010 Campo de Montiel, algunos estudios indican un cierto aislamiento local, pero no se puede afirmar que constituyan zonas independientes de límites concretos.

En el resto de las masas de agua objeto de este estudio no se han encontrado evidencias de una posible zonificación efectiva.

Habría que añadir que la zonificación obtenida debería ser contrastada con estudios hidrogeológicos posteriores, con el fin de delimitar y justificar la desconexión hidráulica entre las subzonas propuestas.

Para un mejor conocimiento de la zonificación realizada y otras futuras se recomienda la realización de ensayos de bombeos a ambos lados de los límites de zona en las masas de agua 040.001 Sierra de Altomira y en la 040.005 Rus-Valdelobos, así como ampliar la red de medidas piezométricas, en el sistema acuífero de la Sierra de Altomira y Rus-Valdelobos, con el fin de poder realizar mapas piezométricos de mayor detalle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IGME Memoria y Cartografía geológica 1:50.000 MAGNA de las hojas:

607 Tarancón 1975
608 Huete 1999
609 Villar de Olalla 1999
631 Ocaña 1975
632 Horcajo de Santiago 1976
633 Palomares del Campo 1999
634 San Lorenzo de la Parrilla 1999
659 Lillo 1979
660 Corral de Almaguer, en edición
661 Villarejo de Fuentes 1999
662 Valverde del Júcar 1999
687 Villacañas en edición
688 Quintanar de la Orden, en edición
689 Belmonte 1999
690 Sta. María del Campo Rus 1976
712 Madridejos, en edición
713 Alcázar San Juan, en edición
714 Campo de Criptana, en edición
715 El Provencio, en edición
716 San Clemente 1998
738 Villarta de San Juan 1988
740 Villarrobledo 1977
741 Minaya 1978
759 Piedrabuena 1989
760 Daimiel 1988
761 Llanos 1976
763 Sotuélamos 1975
764 Munera 1988

785 Almagro 1988
786 Manzanares 1988
788 El Bonillo 1976
789 Lezuza 1975
814 Villanueva de la Fuente 1977
815 Robledo 1979

IGME. Plan GEODE de geología continua.

IGME Base de Datos Aguas XXI

Muñoz Martín, A (1997) Evolución geodinámica del borde oriental de la Cuenca del Tajo desde el Oligoceno hasta la actualidad". Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (1998) Evaluación de recursos de la Unidad Hidrogeológica 04.02. Lillo-Quintanar.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2001). Mejora del conocimiento hidrogeológico de la cuenca alta hasta las U.U.H.H. 04.02 y 04.04.

Martínez Cortina, L (2001) Estimación de la recarga en grandes cuencas sedimentarias mediante modelos numéricos de flujo subterráneo. Aplicación a la Cuenca Alta del Guadiana. Tesis doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2003) Mejora del conocimiento cuantitativo de los recursos hídricos de la cabecera del río Guadiana

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estudio de protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Alta del Guadiana.

Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente (2004) Estudio de evaluación de recursos en la U.H. 04.03. Consuegra-Villacañas.

Montero, E. Rincón, P. J. (2004).Condicionantes geológicos estructurales de la unidad hidrogeológica del Campo de Montiel.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009) Mejora del conocimiento hidrológico e hidrogeológico del Alto Guadiana.

IGME-DGA (2009) Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015. Actividad 2: del Acuerdo para la Encomienda de Gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua) al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DEL EFECTO DEL PERIODO HÚMEDO 2009-2010 EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

Miguel Mejias Moreno

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio hidrometeorológico y análisis del efecto del período húmedo 2009-2010 en los acuíferos de la Cuenca Alta del río Guadiana,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: : equipo Instituto Geológico y Minero de España

Miguel Mejías Moreno
Luis Martínez Cortina
María Elena Galindo Rodríguez

Colaboración:

Empresa IDRENA para realización de trabajos auxiliares

ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DEL EFECTO DEL PERIODO HÚMEDO 2009-2010 EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADIANA

INTRODUCCIÓN

El estudio recoge un análisis preliminar del efecto que ha tenido el periodo húmedo acaecido en la primera mitad del año hidrológico 2009/10, en los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana. Partiendo de los datos de los que se ha podido disponer a corto plazo (pluviometría, temperatura y niveles piezométricos) se ha elaborado en primer lugar un estudio hidrometeorológico, con el objetivo de obtener las isoyetas y la lluvia útil por masas de agua subterránea (MASb) para cada tipo de año climatológico. Posteriormente se ha realizado un cálculo estimativo de la infiltración para algunas MASb y un análisis zonal de la evolución piezométrica.

Se pretende que este análisis siente las bases de un estudio futuro más amplio y con mayor proyección temporal, en el que se estudie con detalle las peculiaridades de la recarga en las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana en secuencias húmedas, en la situación actual de régimen alterado. En el estudio hidrometeorológico se han incluido todas las MASb que componen el Subsistema Alto Guadiana, así como la MASb 040.008 Bullaque.

METODOLOGÍA

Estudio hidrometeorológico. Datos de partida

Los datos de partida corresponden a 88 estaciones meteorológicas pertenecientes a la zona mencionada, situadas en las provincias de Albacete, Ciudad Real, Cuenca y Toledo. Dichas estaciones se reparten entre las masas de agua subterránea, figura 1. Corresponden a dos variables: precipitación y temperatura, y provienen de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La primera variable contiene a su vez dos series: una de carácter mensual para el período 1960-2010, que incluye a las 88 estaciones, y otra de carácter diario en el período comprendido entre noviembre de 2009 y abril de 2010 que contiene datos de 10 estaciones. Las medidas de temperatura poseen carácter mensual y comprenden el período 1960-2010.

Una parte importante de las series, tanto de precipitación como de temperatura, están incompletas. El completado de datos se ha llevado a cabo mediante correlación lineal. Los datos diarios de precipitación corresponden

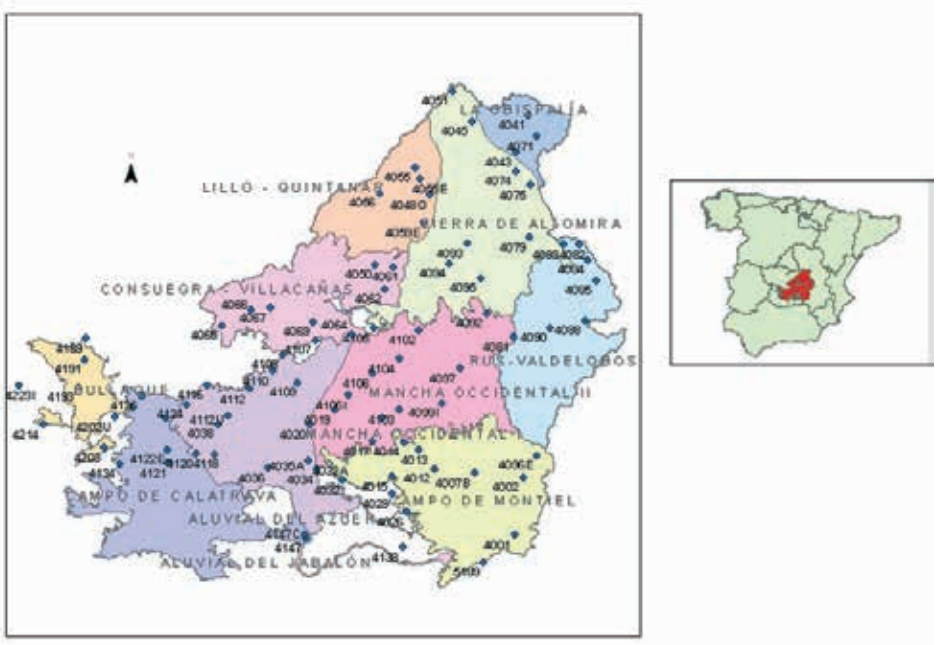


Figura 1. Estaciones termopluviométricas y masas de agua subterránea

a las siguientes estaciones: Arenales de San Gregorio, Argamasilla de Alba (Pachecas), Argamasilla de Alba, Carrizosa, Las Tablas de Daimiel, Ossa de Montiel 2, San Clemente, Socuéllamos (Las Rejas), Tomelloso y Villarta de San Juan. Abarcan el período comprendido entre noviembre de 2009 y abril de 2010, con el objeto de recoger las intensas precipitaciones que tuvieron lugar en la primera mitad del año hidrológico 2009/2010, si bien en algunas de ellas no estaban todavía disponibles los datos completos del periodo mencionado, como se muestra en la tabla 1.

ESTACIÓN	INICIO	FIN
OSSA DE MONTIEL 2	01/11/2009	31/03/2010
ARGAMASILLA DE ALBA	01/11/2009	31/03/2010
ARGAMASILLA ALBA (PACHECAS)	01/11/2009	30/04/2010
SOCUELLAMOS (LAS REJAS)	01/11/2009	28/02/2010
TOMELLOSO	01/11/2009	31/03/2010
LAS TABLAS DE DAIMIEL	01/11/2009	31/03/2010
CARRIZOSA	01/11/2009	01/05/2010
SAN CLEMENTE	01/11/2009	01/05/2010
ARENALES DE SAN GREGORIO	01/11/2009	01/05/2010
VILLARTA DE SAN JUAN	01/11/2009	01/05/2010

Tabla 1. Datos diarios de precipitación

Tratamiento de los datos

Precipitación

Con el objetivo de completar las series mensuales se ha realizado un estudio de las correlaciones entre los datos de cada estación. A partir de la cercanía geográfica y teniendo en cuenta la topografía, se ha comprobado cuál es la estación completa, o más completa, que mejor se correlaciona con cada estación incompleta, elaborando para cada punto una serie de gráficos como el que se muestra en la figura 2. Así, los coeficientes de correlación hallados permiten ir rellenando los huecos de cada serie incompleta, a partir de los datos de la serie completa que mejor se correlaciona con ella.

Una vez rellenados los meses sin datos, se procedió a elaborar los mapas de isoyetas de la zona de estudio para año climatológicamente: seco, medio y húmedo. La herramienta utilizada fue el programa ArcGIS. Para realizar las interpolaciones se utilizó el método Spline 3, incorporado en el propio ArcGIS, consistente en calcular, para cada grupo de cuatro datos, el polinomio de grado 3 de menor curvatura que pasa por los datos conocidos, y utilizar la ecuación que describe dicho polinomio para obtener la precipitación en todos los puntos intermedios. El criterio para distinguir los tipos climatológicos de cada año es el utilizado habitualmente y reflejado en la tabla 2.

PRECIPITACIÓN ANUAL, p	TIPO DE AÑO
$p < 0{,}85 \times \lambda$	Seco
$0{,}85 \times \lambda < p < 1{,}15 \times \lambda$	Medio
$1{,}15 \times \lambda < p$	Húmedo

Tabla 2. Criterio para distinguir años seco, medio y húmedo. El símbolo λ denota el promedio de toda la serie

Además, la precipitación mensual ha sido recopilada por años hidrológicos en tablas como la tabla 3, que han generado gráficas como la que se muestra en la figura 3.

Respecto a los datos diarios de precipitación se han elaborado gráficas como la de la figura 4, con el objeto de

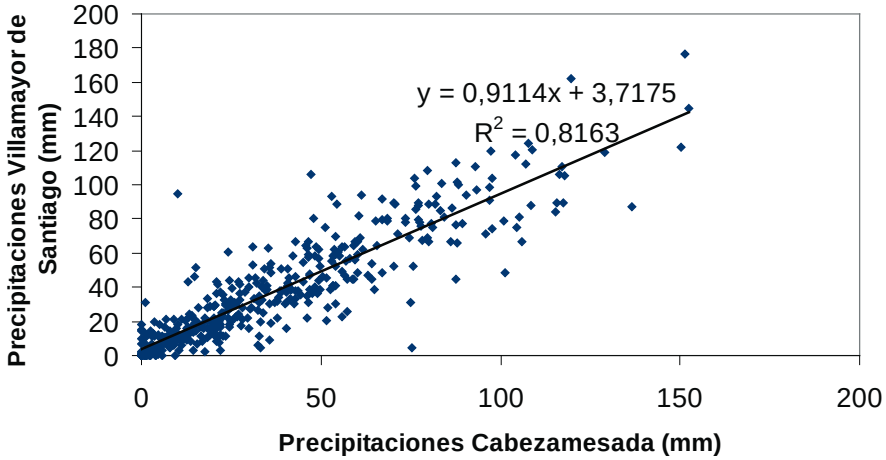


Figura 2. Ejemplo de correlación entre datos de precipitaciones: estaciones de Villamayor de Santiago (4059E) y Cabezamesada (4056)

ESTACIÓN MEMBRILLA			
AÑO HIDROLÓGICO	**PRECIPITACIÓN (mm)**	**DESVIACIÓN**	**AÑO TIPO**
1960-1961	469,9	43,7	HÚMEDO
1961-1962	618,8	270,8	HÚMEDO
1962-1963	542,3	421,5	HÚMEDO
1963-1964	493,8	523,7	HÚMEDO
1964-1965	382,6	514,7	MEDIO
1965-1966	597,5	720,5	HÚMEDO
1966-1967	279,5	608,4	SECO
1967-1968	372,9	589,7	MEDIO
1968-1969	527,3	725,4	HÚMEDO
1969-1970	340,4	674,1	MEDIO
1970-1971	427,2	709,7	MEDIO
1971-1972	343,7	661,8	MEDIO
1972-1973	289,0	559,2	SECO
1973-1974	517,6	685,1	HÚMEDO
1974-1975	346,1	639,6	MEDIO
1975-1976	371,0	619,0	MEDIO
1976-1977	394,1	621,5	MEDIO
1977-1978	488,8	718,7	HÚMEDO
1978-1979	520,6	847,6	HÚMEDO
1979-1980	323,6	779,6	SECO
1980-1981	320,6	708,6	SECO
1981-1982	359,6	676,6	MEDIO
1982-1983	327,4	612,3	SECO
1983-1984	325,3	546,0	SECO
1984-1985	311,6	466,0	SECO
1985-1986	422,8	497,2	MEDIO
1986-1987	358,3	463,8	MEDIO
1987-1988	411,0	483,2	MEDIO
1988-1989	407,0	498,6	MEDIO
1989-1990	358,5	465,5	MEDIO
1990-1991	235,9	309,7	SECO
1991-1992	399,8	317,9	MEDIO
1992-1993	298,4	224,7	SECO
1993-1994	192,8	25,9	SECO
1994-1995	202,9	-162,8	SECO
1995-1996	533,8	-20,7	HÚMEDO
1996-1997	456,6	44,3	HÚMEDO
1997-1998	489,5	142,2	HÚMEDO
1998-1999	191,5	-57,9	SECO
1999-2000	375,8	-73,8	MEDIO
2000-2001	350,4	-115,0	MEDIO
2001-2002	398,1	-108,5	MEDIO
2002-2003	339,0	-161,1	MEDIO
2003-2004	495,1	-57,7	HÚMEDO
2004-2005	246,8	-202,5	SECO
2005-2006	372,5	-221,6	MEDIO
2006-2007	469,0	-144,2	HÚMEDO
2007-2008	394,8	-141,1	MEDIO
2008-2009	369,9	-162,8	MEDIO
Promedio	**391,6**		

Tabla 3. Precipitación, desviación acumulada y año tipo para cada año hidrológico de la serie y media de precipitación de la serie para la estación de Membrilla (4034)

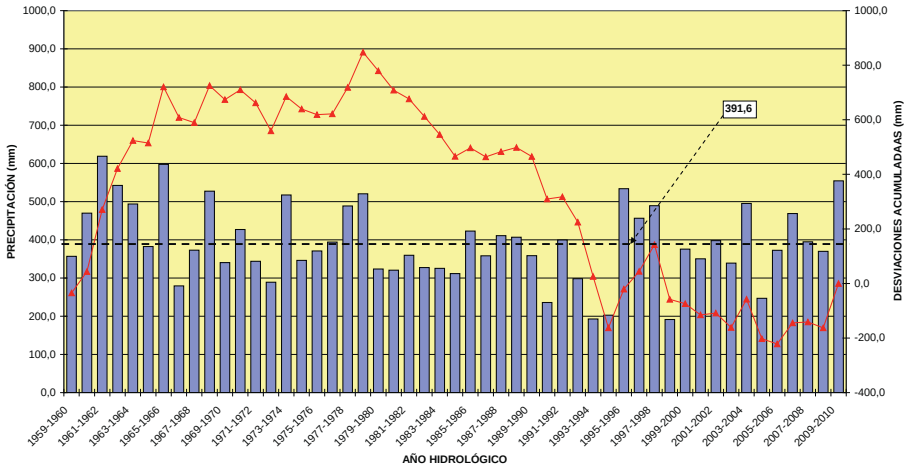


Figura 3. Gráfica resumen de años hidrológicos en la estación de Membrilla (4034)

superponer la evolución piezométrica diaria a los valores de precipitación diaria de la estación pluviométrica más próxima al piezómetro.

Temperatura

El completado de los datos de temperatura se ha llevado a cabo de forma similar al de los datos de precipitación mensual, generando y comparando correlaciones como la que aparece en la figura 5. La comparación entre la figura 2 y la figura 5 pone de manifiesto la diferencia entre las correlaciones de datos de precipitaciones y de temperatura. En los primeros, el coeficiente de correlación (r) suele alcanzar valores entre 0,85 y 0,94, disminuyendo en alguna ocasión hasta 0,7; mientras que en los datos de temperatura nunca resulta menor de 0,98. El completado de esta variable, lógicamente, se ha llevado a cabo para las estaciones termopluviométricas, aquellas de la tabla 2 que presentan un porcentaje elevado de datos de temperatura.

Cálculo de la lluvia útil

Con los datos de precipitación y temperatura completados se ha calculado la precipitación por MASb para cada año tipo y la lluvia útil, primer objetivo de este trabajo. En primer lugar se ha calculado la evapotranspiración potencial (ETP), mediante el método de Thornthwaite, a partir de la cual se derivan los valores de evapotranspiración real (ETR) y lluvia útil en cada estación y para cada año hidrológico. Un ejemplo de este cálculo se muestra en la tabla 4. La capacidad de campo utilizada ha sido de 75 mm, valor obtenido a partir de las referencias bibliográficas consultadas.

Estimación de la infiltración por MASb

Datos de partida

Los datos de partida abarcan el período 1960-2010, tienen carácter diario y corresponden a 14 estaciones

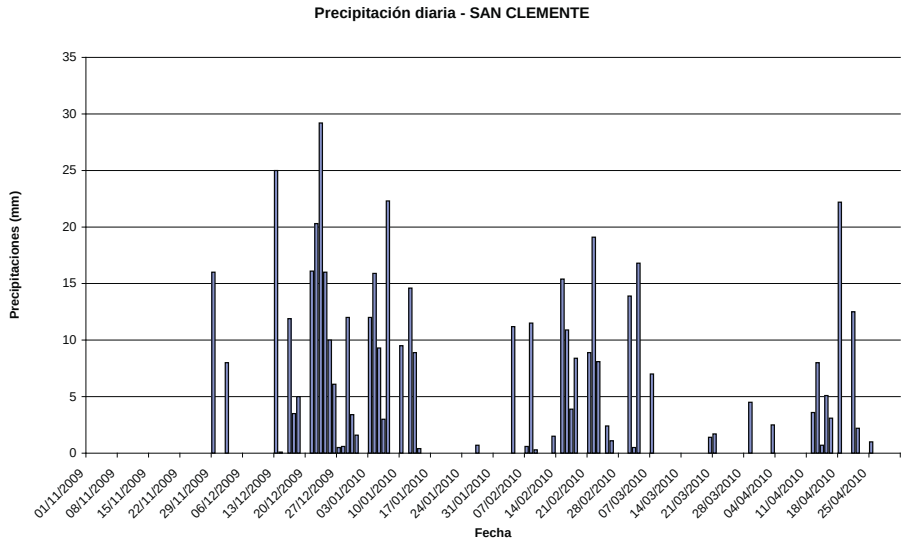


Figura 4.- Datos diarios de precipitación en la estación de San Clemente (4090)

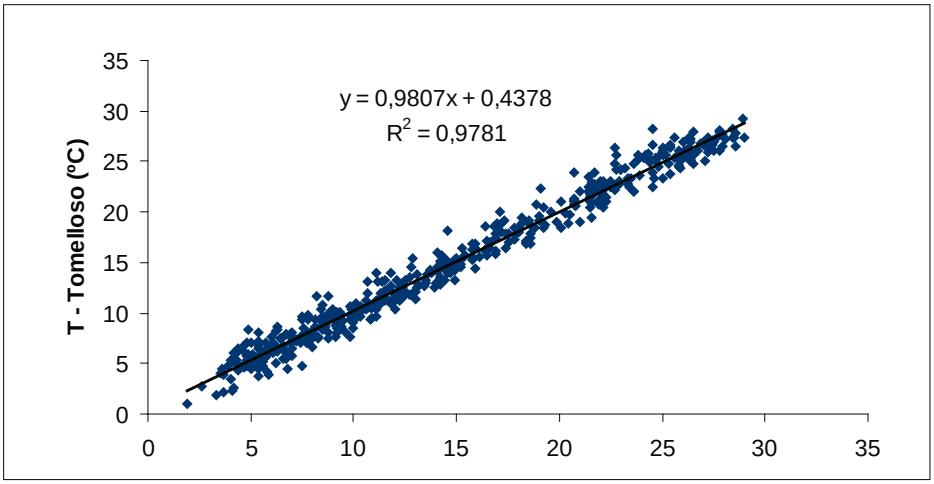


Figura 5. Ejemplo de correlación entre datos de temperatura: Tomelloso (4103) y Argamasilla de Alba (4013)

meteorológicas pertenecientes a la cuenca alta del Guadiana y encuadradas dentro de las distintas masas de agua subterránea como se indica en la tabla 5.

Los datos de precipitación proporcionados por AEMET resultaron bastante completos. Sin embargo, los de temperatura presentaban bastantes lagunas, por lo que se optó por unir todas las series incompletas para poder obtener una sola serie completa. Esta decisión se apoya en las excelentes correlaciones entre series de temperatura, casi todas con $R^2 \approx 1$, halladas en los datos y utilizadas en el apartado anterior. Por tanto, se ha utilizado la misma temperatura para todas las estaciones, de modo que la evapotranspiración potencial (ETP) es idéntica en todas ellas.

Año	Mes	T (°C)	ETP (mm)	P (mm)	P-ETP (mm)	H (mm)	Δ	ETR (mm)	Ll. út. (mm)
1960	10	10,3	34,7	100,1	65,4	65,4	65,4	34,7	0,0
1960	11	8,1	21,2	22,4	1,2	66,7	1,2	21,2	0,0
1960	12	2,3	3,7	41,3	37,6	75,0	8,3	3,7	29,3
1961	1	2,6	4,5	20,6	16,1	75,0	0,0	4,5	16,1
1961	2	6,2	14,6	0	-14,6	60,4	-14,6	14,6	0,0
1961	3	9,9	35,2	22,7	-12,5	47,9	-12,5	35,2	0,0
1961	4	13,7	59,4	32	-27,4	20,4	-27,4	59,4	0,0
1961	5	17,8	96,2	25,8	-70,4	0,0	-20,4	46,2	0,0
1961	6	20,4	117,1	1,4	-115,7	0,0	0,0	1,4	0,0
1961	7	23,9	148,1	22,5	-125,6	0,0	0,0	22,5	0,0
1961	9	22,3	110,2	22,9	-87,3	0,0	0,0	22,9	0,0

Tabla 4. Ejemplo de cálculo de ETR y lluvia útil: estación de Alameda de Cervera (4106) año hidrológico 1960-1961. ETP: evapotranspiración potencial; P: precipitación; H: humedad en el suelo; Δ: incremento; ETR: evapotranspiración real; Ll.út.: lluvia útil

NOMBRE ESTACIÓN	CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE MASA	CÓDIGO MASA
RUIDERA	4012	CAMPO DE MONTIEL	040.010
PANTANO DE PEÑARROYA	4014	CAMPO DE MONTIEL	040.010
NAHARROS	4041	LA OBISPALÍA	040.002
PUEBLA DE ALMORADIEL	4050	CONSUEGRA - VILLACAÑAS	040.004
CABEZAMESADA	4056	LILLO - QUINTANAR	040.003
VILLAFRANCA DE LOS CABALLEROS	4069	CONSUEGRA - VILLACAÑAS	040.004
VILLARES DEL SAZ	4075	SIERRA DE ALTOMIRA	040.001
VILLALGORDO DEL MARQUESADO	4079	SIERRA DE ALTOMIRA	040.001
SAN CLEMENTE	4090	RUS-VALDELOBOS	040.005
SOCUELLAMOS	4097	MANCHA OCCIDENTAL II	040.006
ALAMEDA DE CERVERA	4106	MANCHA OCCIDENTAL II	040.006
VILLARTA DE SAN JUAN	4109	MANCHA OCCIDENTAL I	040.007
CARRION DE CALATRAVA	4120	MANCHA OCCIDENTAL I	040.007
ALCOLEA DE CALATRAVA	4134	CAMPO DE CALATRAVA	040.009

Tabla 5. Estaciones meteorológicas estudiadas y masas de agua a que pertenecen

Cálculo de la infiltración

Para el estimar el valor de la infiltración en las masas de agua consideradas se ha aplicado una variante del método de Thornthwaite a las series termopluviométricas disponibles, mediante el programa THORDOS, que permite calcular los valores diarios de evaporación y lluvia útil, y la descomposición de ésta entre infiltración y escorrentía. Los principios en que se basa son los siguientes:

— Se calculan los valores diarios de la evaporación potencial, de forma similar a como se suelen determinar los valores mensuales de la misma, en las aplicaciones tradicionales del método de Thornthwaite.
— Se realizan balances diarios en los que se hacen intervenir las siguientes magnitudes: reserva almacenada en el suelo al final del día anterior, precipitación registrada en el día y evapotranspiración potencial diaria.
— Además de los correspondientes registros diarios de precipitación y temperatura media, los datos que se deben suministrar al programa son:

  • Índices F de iluminación mensual, expresados en unidades de 12 horas, dependientes de la latitud de la zona.
  • Valores supuestos para RMIN y RMAX, fijados en función de la naturaleza litológica del terreno y del grado de desarrollo del suelo vegetal. Valor estimado para la reserva inicial (RINI) del suelo fijado, teniendo en cuenta la pluviosidad de los días inmediatamente anteriores al de comienzo del periodo de cálculo. Para un periodo de cálculo suficientemente largo se toma 0 como valor inicial.

Respecto a la división de la lluvia útil entre escorrentía e infiltración, se han utilizado los parámetros α que se muestran en la tabla 6, que producen la relación entre lluvia útil e infiltración. Estos valores se han obtenido de forma experimental y se han aplicado con resultados satisfactorios en diferentes entornos hidrogeológicos.

Por último, para los parámetros de reserva útil máxima y mínima, RMAX y RMIN, se han utilizado los valores 110 y 90 mm respectivamente, que representan promedios bastante aproximados a la realidad según estudios elaborados anteriormente.

El cálculo de la fracción de superficie sensible a infiltración de cada masa de agua subterránea se ha realizado tomando la siguiente referencia: *Protección y mejora de la calidad de las aguas subterráneas en las unidades hidrogeológicas de la Cuenca Alta del Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana, EPTISA, INIMA. 2003*.

LU (mm)	α	INF (mm)
5	0,85	4,25
15	0,71	10,65
25	0,623	15,575
35	0,56	19,6
45	0,508	22,86
55	0,465	25,575
65	0,426	27,69
75	0,394	29,55
85	0,363	30,855
95	0,336	31,92

Tabla 6.- Parámetros α para el cálculo de la infiltración

En este trabajo se sintetiza la información cartográfica de la cuenca alta del Guadiana, a escala 1:50.000, relativa a geología e hidrogeología, lo que ha permitido ir calculando la extensión de las superficies permeables. Así, se han obtenido los factores que se muestran en la tabla 7. Se ha considerado que los materiales clasificados como de permeabilidad media son permeables a efectos del cálculo.

Código	Nombre	Factor
040.001	Altomira	0,58
040.002	Obispalía	0,28
040.003	Lillo-Quintanar	0,62
040.004	Consuegra-Villacañas	0,53
040.005	Rus-Valdelobos	0,79
040.006	Mancha Occidental II	0,75
040.007	Mancha Occidental I	0,77
040.009	Calatrava	0,64
040.010	Montiel	0,76

Tabla 7.- Factores de permeabilidad

Análisis zonal de la evolución piezométrica

Como se ha mencionado en la introducción, durante el año hidrológico 2009/2010, se ha producido un episodio de precipitaciones notablemente superiores a los valores medios, hasta el momento de elaborar este in-

forme, durante los 6 primeros meses del año hidrológico (de octubre 2009 a marzo de 2010). La precipitación media en este periodo supera en la mayoría de las estaciones analizadas los 400 mm, con valores superiores a 500 mm en muchos casos. Es decir, durante la primera mitad del año hidrológico 2009/10 ya se ha producido una precipitación equivalente e incluso superior al valor medio anual de la serie histórica. Esta lluvia ha tenido lugar con especial intensidad en los meses de diciembre de 2009 y enero y febrero de 2010.

La distribución e intensidad de las precipitaciones en este corto periodo de tiempo da lugar a una situación climatológica que se produce con poca frecuencia y que, desde luego, influye de manera muy específica en la recarga de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana.

Así, entre marzo de 2009 y marzo de 2010 (periodos de aguas altas) se ha producido una recuperación media en las MASb centrales de la CAG de casi 4 m. Si se compara el periodo marzo de 2009 a junio de 2010, la recuperación piezométrica media para las mismas MASb supone casi 6 m. Y si se comparan los dos últimos periodos de aguas bajas, 2009-2010, el incremento medio de nivel es de 10,34 m.

Con el objetivo de analizar con cierto detalle cómo se produce esta recarga, se ha realizado un análisis comparativo de la evolución piezométrica diaria en 10 piezómetros situados en las MASb: Mancha Occidental I, dos piezómetros (193020048 y 193040040); Mancha Occidental II, cinco puntos (213010123, 213010122, 222950028, 222880012 y 212880017); Rus-Valdelobos, 1 punto (232870015) y Sierra de Altomira, 2 puntos (222830001 y 222830032), con la precipitación diaria en 1, 2 o 3 estaciones pluviométricas, según los casos, más próximas al punto de control en cuestión.

RESULTADOS OBTENIDOS

Resultados del estudio hidrometeorológico

Los mapas de isoyetas y lluvia útil, para años climatológicamente seco, medio y húmedo, se muestran en las figuras 6 a 11. La tabla 8 resume la información de dichos mapas, conteniendo, para cada MASb, los valores de precipitación y lluvia útil para cada tipo de año. Esta tabla se ha confeccionado multiplicando el resultado de la herramienta Zonal Statistics de ArcGIS por el área de píxel de la capa raster generada por la interpolación Spline.

La tabla 9 recoge los valores medios de precipitación anual en mm por MASb en función de la clasificación en año tipo climatológico.

Resultados de la estimación de la infiltración

La aplicación de la metodología descrita ha proporcionado para cada estación los valores de infiltración que se muestran en la tabla 10. Esta infiltración, una vez multiplicada por la superficie total y por el factor de superficie permeable hallado según la referencia mencionada, produce una recarga total para cada masa de agua, tabla 11.

Código	MASb	AÑO SECO		AÑO MEDIO		AÑO HÚMEDO	
		Precipitación (hm^3)	Lluvia útil (hm^3)	Precipitación (hm^3)	Lluvia útil (hm^3)	Precipitación (hm^3)	Lluvia útil (hm^3)
040.001	Sierra de Altomira	702,9	64,8	1068,8	230,1	1469,2	475,5
040.002	La Obispalía	169,9	28,7	272,1	86,6	377,2	173,3
040.003	Lillo - Quintanar	238,0	25,1	446,7	87,3	609,6	188,9
040.004	Consuegra - Villacañas	394,1	23,7	569,9	81,4	795,5	208,2
040.005	Rus - Valdelobos	526,7	45,9	739,9	181,3	986,6	319,7
040.006	Mancha Occidental II	651,5	28,7	939,5	158,1	1282,0	397,2
040.007	Mancha Occidental I	512,6	22,1	793,7	132,2	1102,0	369,9
040.008	Bullaque	180,2	19,9	283,2	74,9	406,5	184,3
040.009	Campo de Calatrava	575,3	42,4	840,5	171,7	1181,4	460,8
040.010	Campo de Montiel	681,1	62,2	1015,3	226,7	1363,1	507,6
040.011	Aluvial del Jabalón	13,3	1,2	20,1	4,5	26,4	9,3
040.012	Aluvial del Azuer	2,9	0,2	4,7	0,9	6,2	2,2

Tabla 8. Datos de precipitación y lluvia útil, en hm3, por masas de agua subterránea

Código	MASb	Superficie (km²)	P año seco (mm)	P año medio (mm)	P año húmedo (mm)
040.001	Sierra de Altomira	2567,1	274	416	572
040.002	La Obispalía	497,4	341	547	758
040.003	Lillo - Quintanar	1.109,4	215	403	550
040.004	Consuegra - Villacañas	1.570,1	251	363	507
040.005	Rus - Valdelobos	1.565,7	336	473	630
040.006	Mancha Occidental II	2.393,5	272	393	536
040.007	Mancha Occidental I	2.004,0	256	396	550
040.008	Bullaque	565,1	319	501	719
040.009	Campo de Calatrava	1.961,7	293	428	602
040.010	Campo de Montiel	2.179,6	312	466	625
040.011	Aluvial del Jabalón	45,6	291	440	578
040.012	Aluvial del Azuer	10,6	278	444	586

Tabla 9. Datos de precipitación media, en mm, por masas de agua subterránea y año tipo

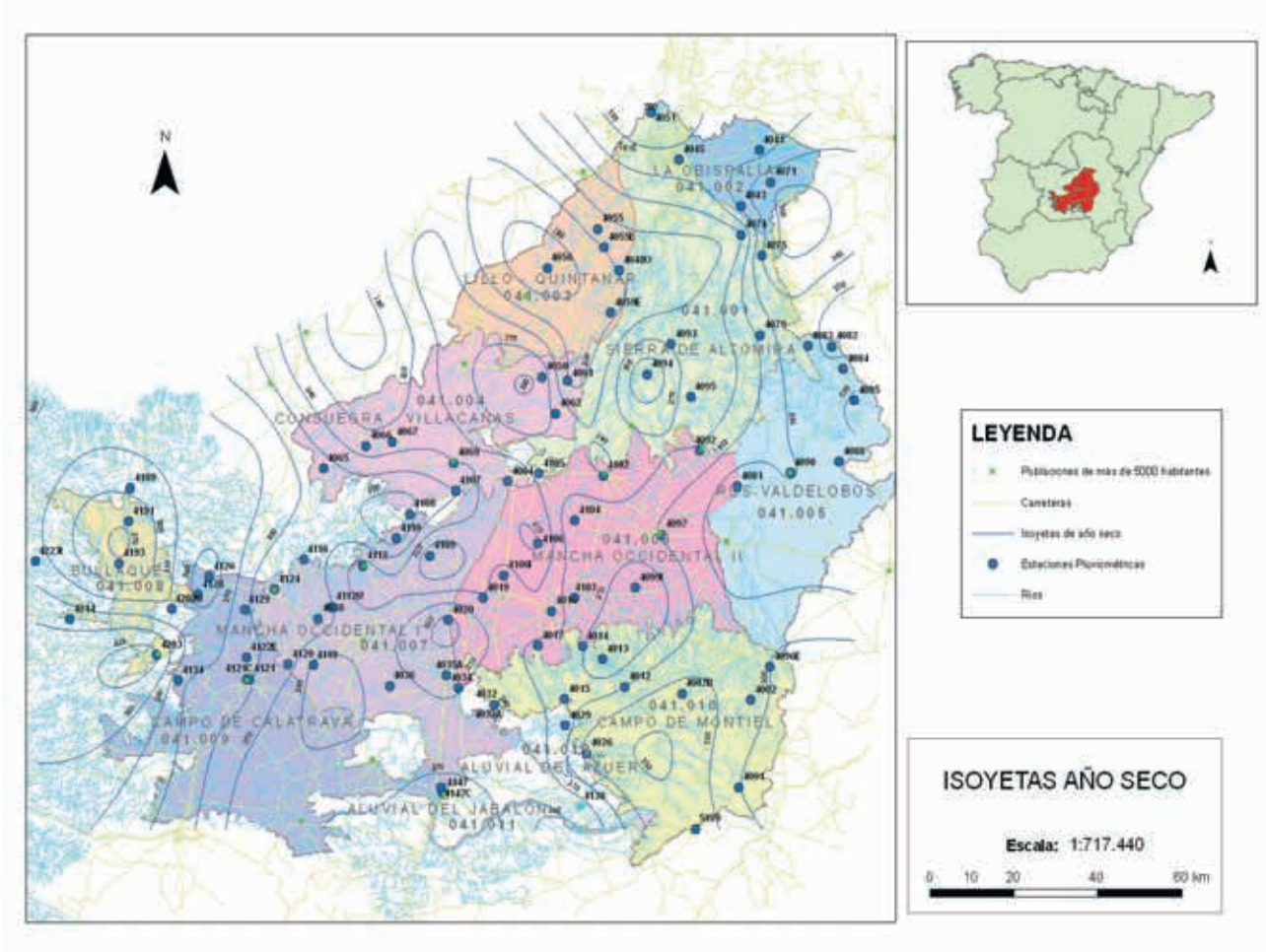


Figura 6. Isoyetas para año seco

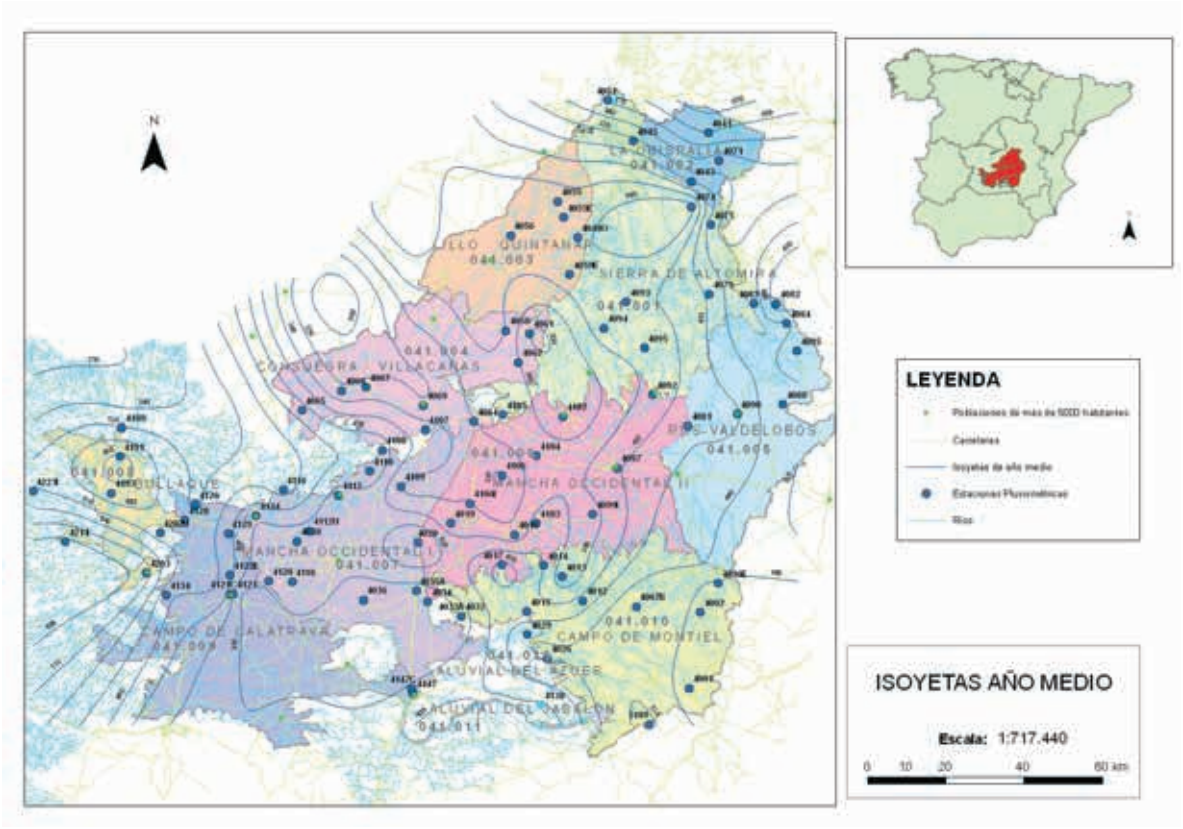


Figura 7. Isoyetas para año medio

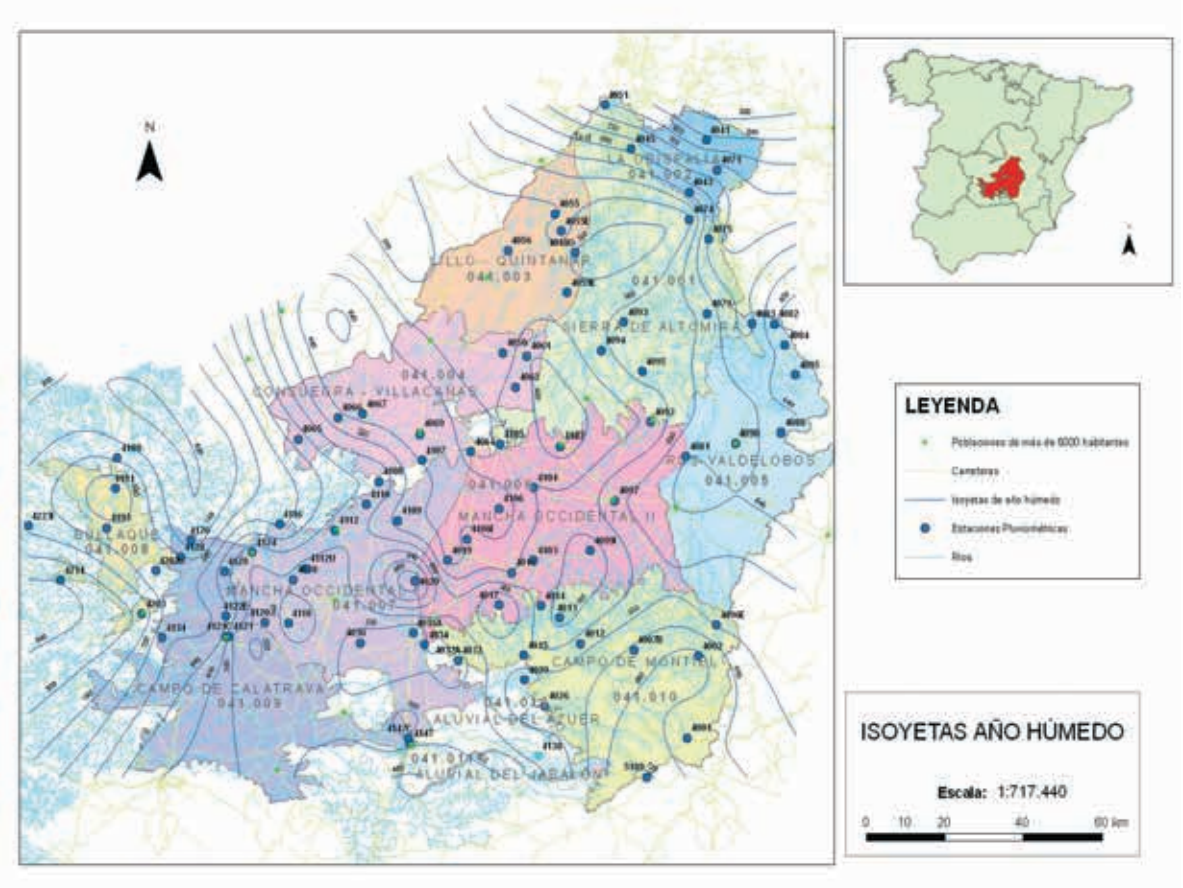


Figura 8. Isoyetas para año húmedo

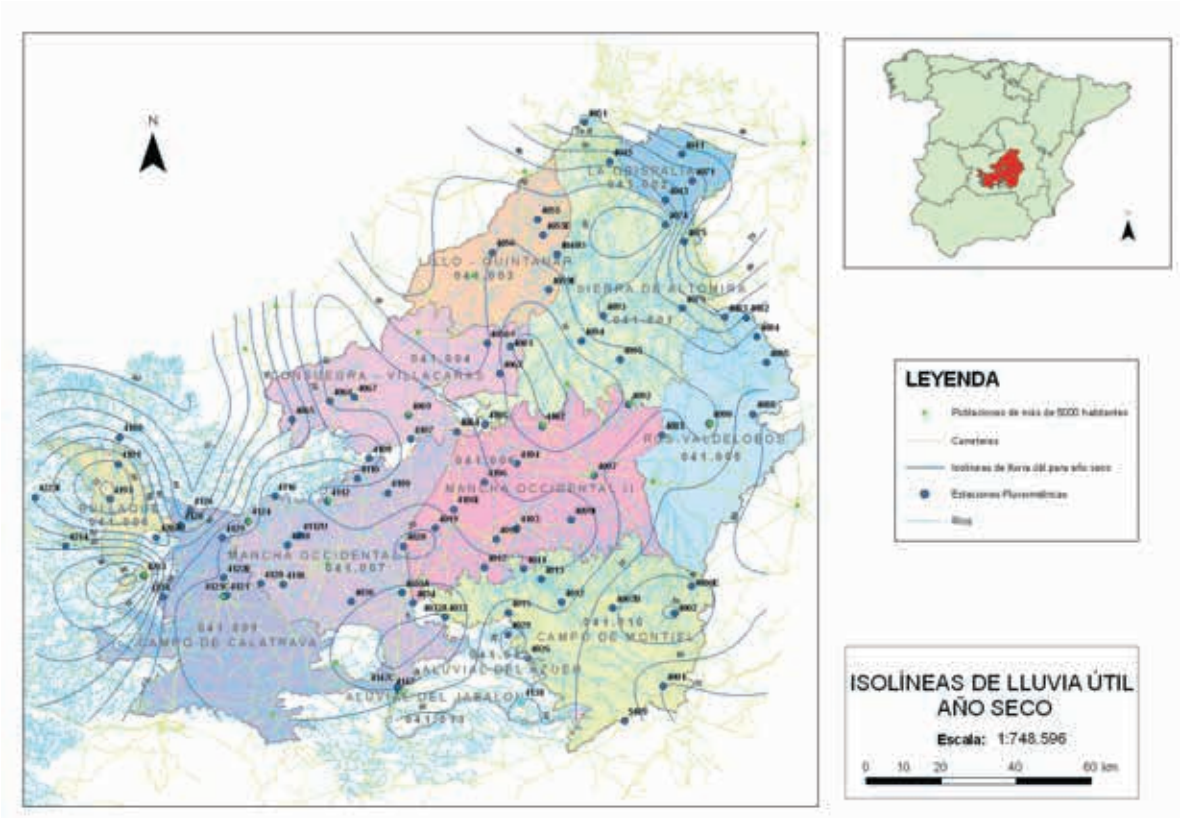


Figura 9.- Isolíneas de lluvia útil para año seco

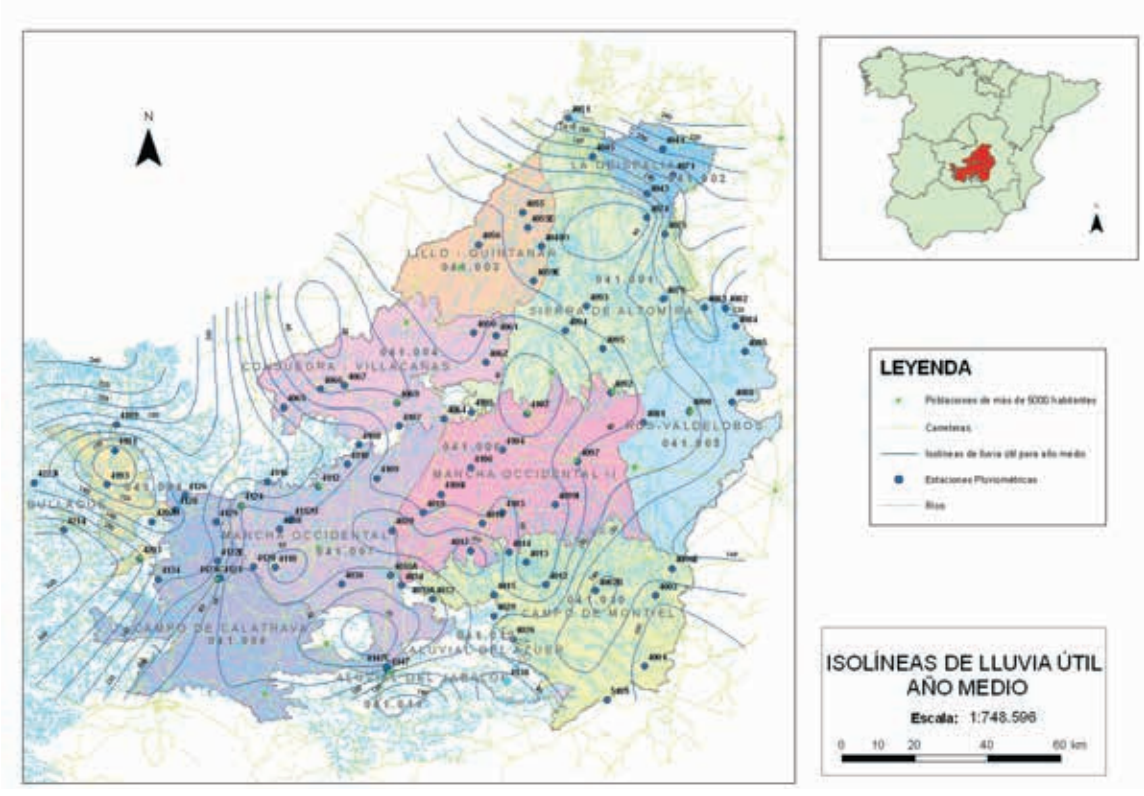


Figura 10.- Isolíneas de lluvia útil para año medio

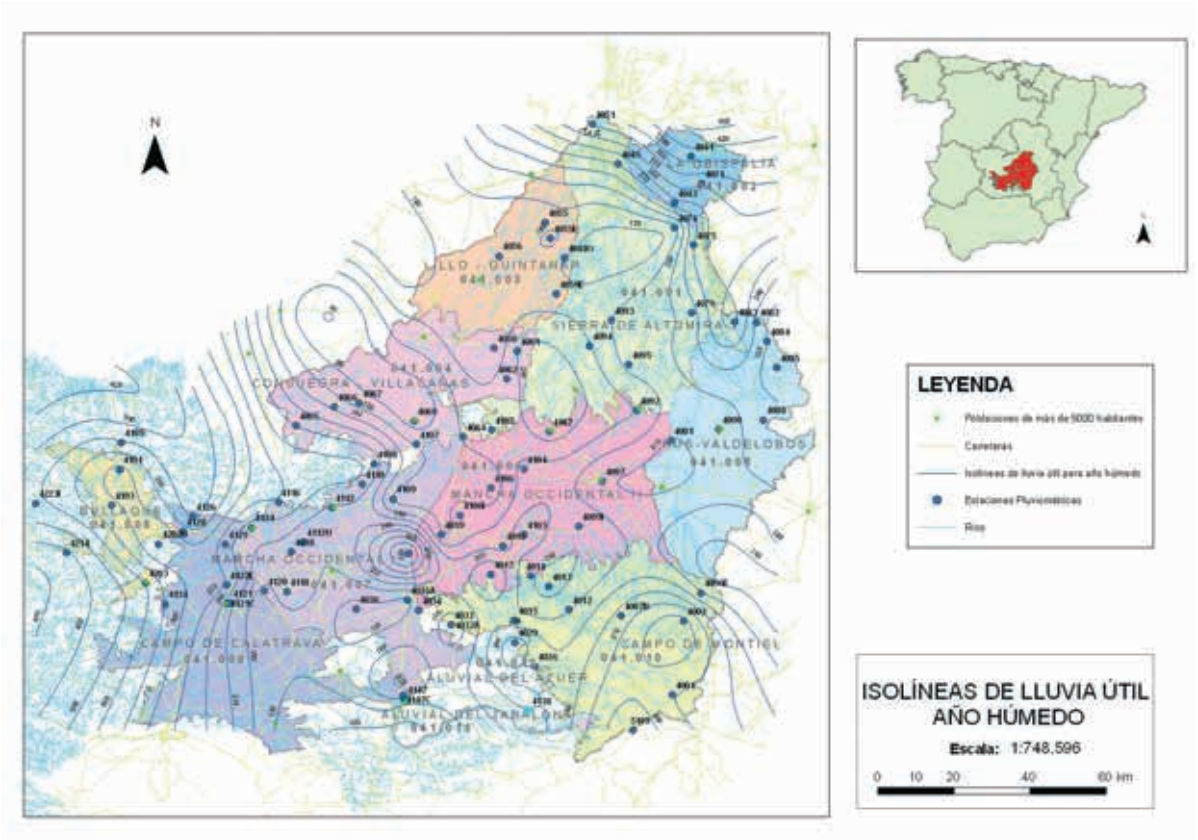


Figura 11.- Isolíneas de lluvia útil para año húmedo

Nombre	Código	P(mm)	T(°C)	ETP(mm)	ETR(mm)	LU(mm)	INF(mm)	ESC(mm)
Villares del Saz	4075	519,9	14,25	802,36	370,25	149,58	122,99	26,59
Villalgordo del Marquesado	4079	467,9	14,25	802,36	331,58	136,28	106,89	29,39
Naharros	4041	634,5	14,25	802,36	390,09	244,43	195,05	49,38
Cabezamesada	4056	422,2	14,25	802,36	333,64	88,51	75,28	13,23
Puebla de Almoradiel	4050	412,7	14,25	802,36	330,54	82,14	69,56	12,58
Villafranca de los Caballeros	4069	344	14,25	802,36	306,44	37,52	31,45	6,07
San Clemente	4090	455,3	14,25	802,36	350,39	104,76	87,81	16,95
Socuéllamos	4097	437,7	14,25	802,36	340,9	96,81	80,89	15,92
Alameda de Cervera	4106	346,4	14,25	802,36	297,28	49,12	42,41	6,71
Villarta de San Juan	4109	394,1	14,25	802,36	313,79	80,35	69,81	10,54
Carrión de Calatrava	4120	409,9	14,25	802,36	315,95	93,77	78	15,77
Alcolea de Calatrava	4134	493,1	14,25	802,36	324,8	168,26	134,62	33,64
Ruidera	4012	441,2	14,25	802,36	340,86	100,39	84,86	15,53
Pantano de Peñarroya	4014	428,1	14,25	802,36	342,87	85,23	72,67	12,57

Tabla 10. Resultados del cálculo de infiltración anual por estaciones pluviométricas. P: precipitación; T: temperatura; ETP: evapotranspiración potencial; ETR: evapotranspiración real; LU: lluvia útil; INF: infiltración; ESC: escorrentía

Código	Nombre	Infiltración (hm^3/año)
040.001	Sierra de Altomira	143,7
040.002	La Obispalía	27,5
040.003	Lillo-Quintanar	49,3
040.004	Consuegra-Villacañas	35,4
040.005	Rus-Valdelobos	110,0
040.006	Mancha Occidental II	110,5
040.007	Mancha Occidental I	117,4
040.010	Campo de Montiel	133,0

Tabla 11. Resultado del cálculo de recarga por masas de agua

Resultados del análisis zonal de la evolución piezométrica

La tabla 12 resume los piezómetros y las estaciones pluviométricas utilizadas para su comparación, con la precipitación diaria en el período comprendido entre el 1 de noviembre de 2009 y finales de febrero, marzo o abril de 2010, en función de los datos diarios de precipitación disponibles.

ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA		PIEZÓMETRO	MASb
Argamasilla de Alba	4016	213010123	MOII
		213010122	MOII
Argamasilla Alba (Pachecas)	4017	213010123	
		213010122	
Socuéllamos (Las Rejas)	4019 I	222950028	MOII
Tomelloso	4103	213010123	
		213010122	
		222950028	
Las Tablas de Daimiel	4112 U	193020048	MOI
		193040040	MOI
San Clemente	4090	232870015	RV
		222880012	MOII
		222830001	SA
		222830032	SA
Arenales de San Gregorio	4104	212880017	MOII
Villarta de San Juan	4109	193040040	

Tabla 12. Piezómetros y estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis diario de la evolución piezométrica

En las figuras 12 a 27 se puede observar el mencionado análisis comparativo. Así, del punto 213010123, situado en el sector sudoccidental de la MASb Mancha Occidental II, se compara su evolución piezométrica diaria con la precipitación diaria registrada en las estaciones meteorológicas: 4016 Argamasilla de Alba, 4017 Argamasilla de Alba Pachecas y 4103 Tomelloso. El piezómetro controla el acuífero inferior cretácico-jurásico. Entre el 29 de noviembre y el 2 de diciembre de 2009 se inician las fuertes precipitaciones, con valores superiores a 10 mm/día. Las precipitaciones más importantes se producen entre el 23 de diciembre de 2009 y el 3 de enero de 2010. A primeros de noviembre de 2009 el nivel piezométrico se encontraba a una profundidad de 58,74 m y se inicia una recta de recuperación que no presenta picos marcados de ascenso en los días más lluviosos, sino una tendencia continuada. A finales de mayo de 2010 el nivel se encontraba a 55,61 m, es decir una recuperación de 3,13 m, figuras 12, 13 y 14.

El punto 213010122 se sitúa muy próximo al anterior, pero controla el acuífero superior de edad neógeno. Su evolución se compara con la precipitación diaria en las mismas estaciones que el punto anterior. Evidentemente, con los mismos valores de precipitación la tendencia de evolución es muy similar en ambos. El nivel se encontraba a una profundidad de 60,80 m a primeros de noviembre, e inicia una recta de recuperación hasta alcanzar una subida de 3,35 m, también del mismo orden que el 213010123, figuras 15, 16 y 17.

El piezómetro 222950028 se sitúa en la zona centro meridional de la misma MASb. Controla el acuífero inferior, de edad jurásico. Se analiza su evolución con respecto a las estaciones: 4019I Socuéllamos Las Rejas y 4103 Tomelloso. En estas estaciones las precipitaciones superiores a 10 mm/día se inician entre el 30 de noviembre y el 2 de diciembre de 2009, con un máximo superior a 30 mm el 23 de diciembre de 2009.

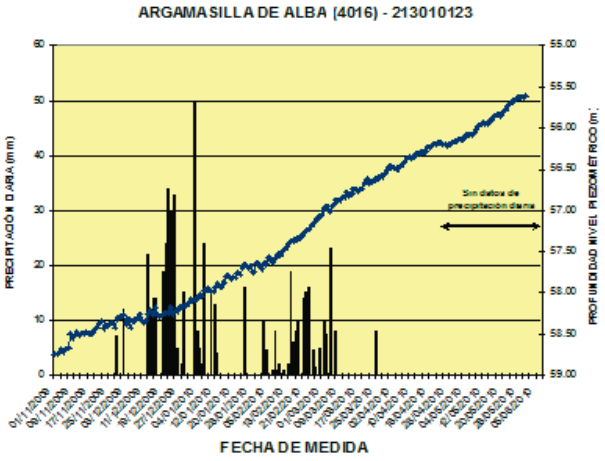


Figura 12. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

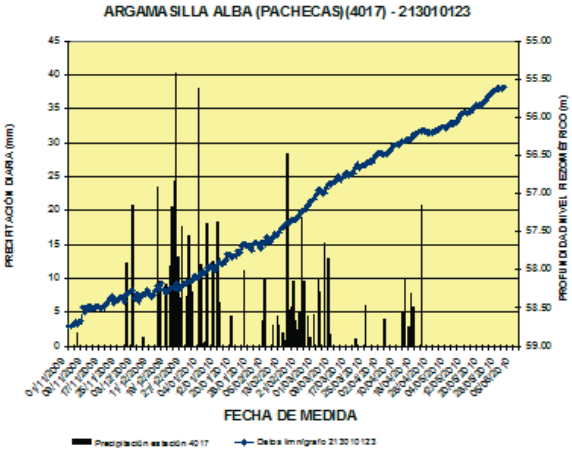


Figura 13. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

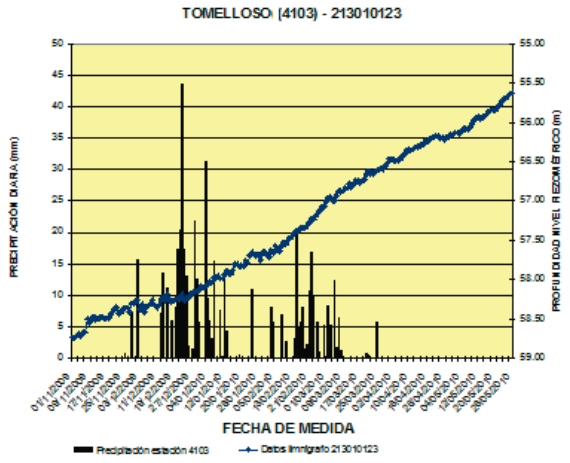


Figura 14. Evolución piezométrica diaria del punto 213010123

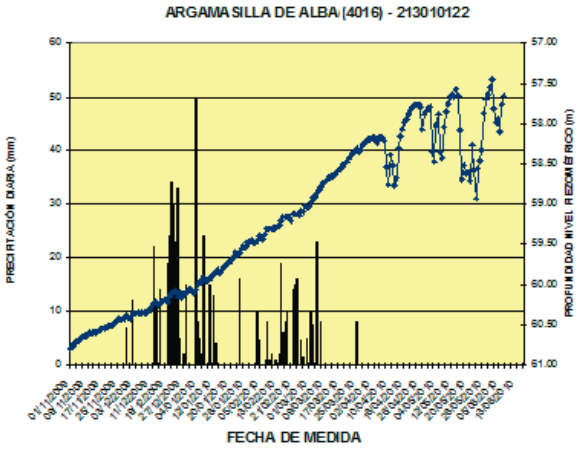


Figura 15. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

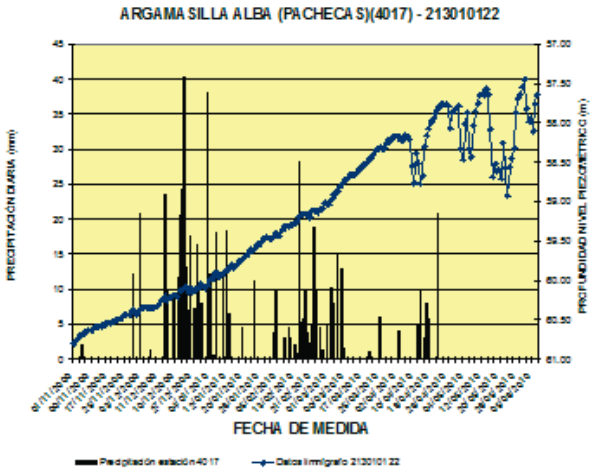


Figura 16. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

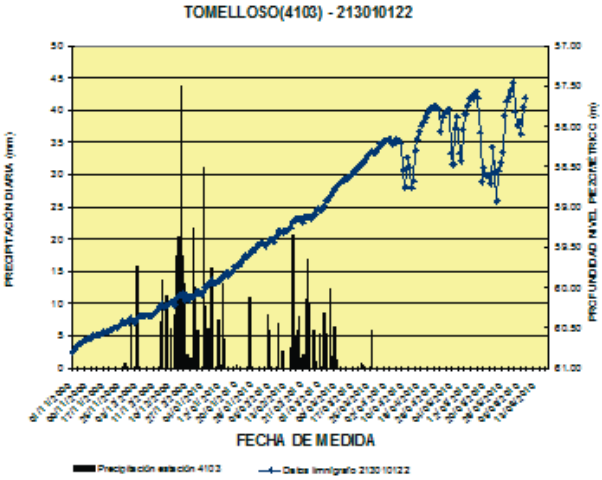


Figura 17. Evolución piezométrica diaria del punto 213010122

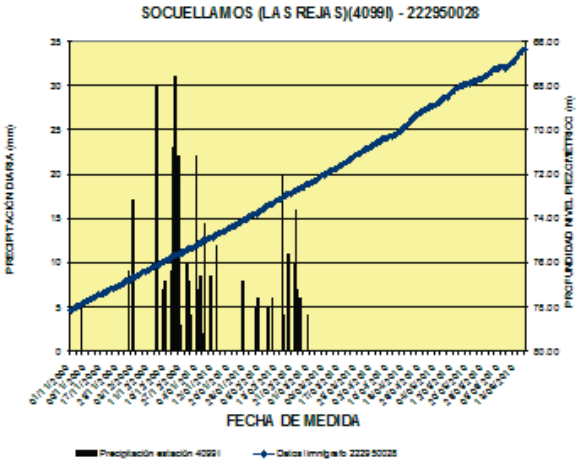


Figura 18. Evolución piezométrica diaria del punto 222950028

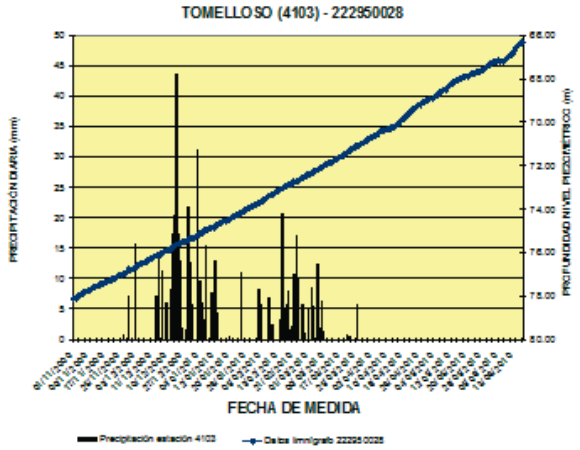


Figura 19. Evolución piezométrica diaria del punto 222950028

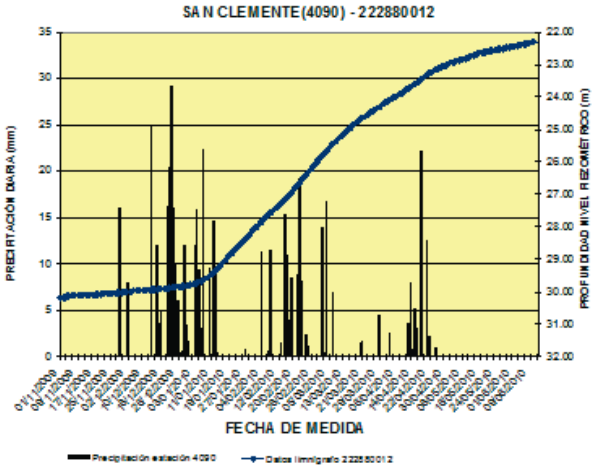


Figura 20. Evolución piezométrica diaria del punto 222880012

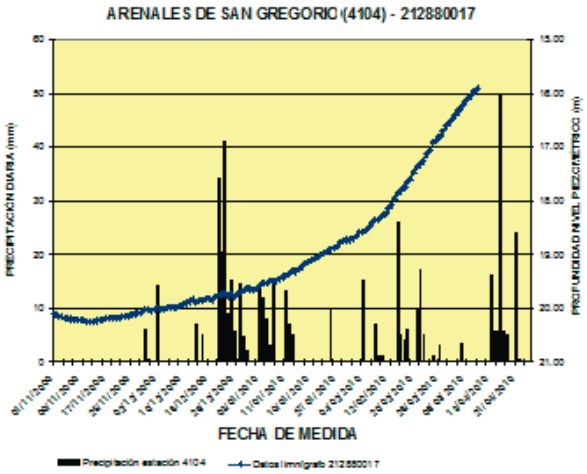


Figura 21. Evolución piezométrica diaria del punto 212880017

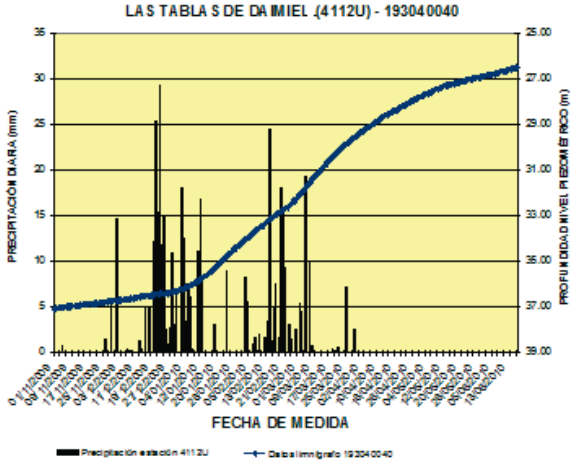


Figura 22. Evolución piezométrica diaria del punto 193020048

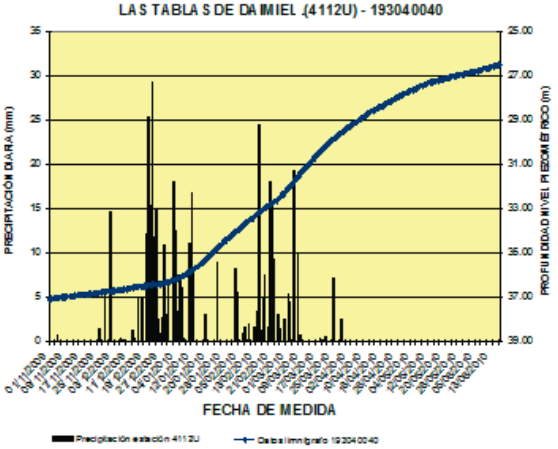


Figura 23. Evolución piezométrica diaria del punto 193040040

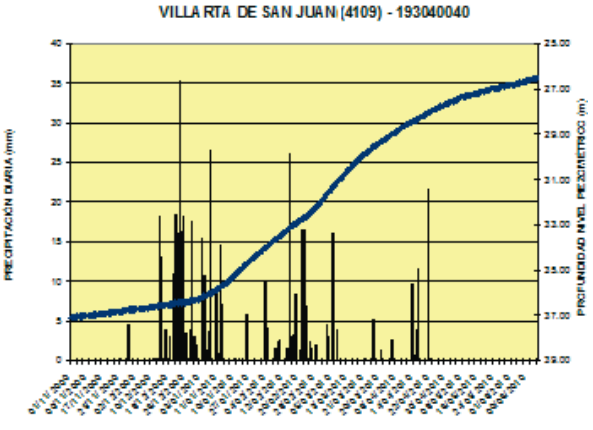


Figura 24. Evolución piezométrica diaria del punto 193040040

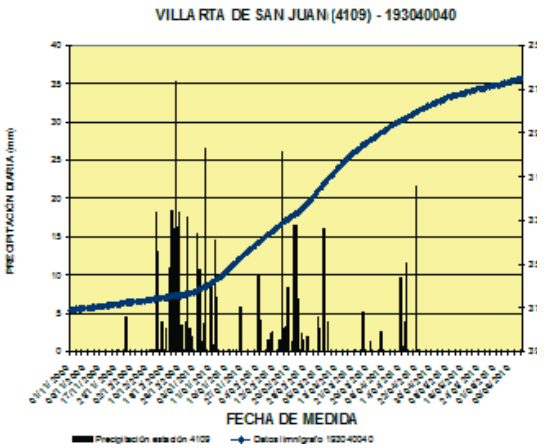


Figura 25. Evolución piezométrica diaria del punto 232870015

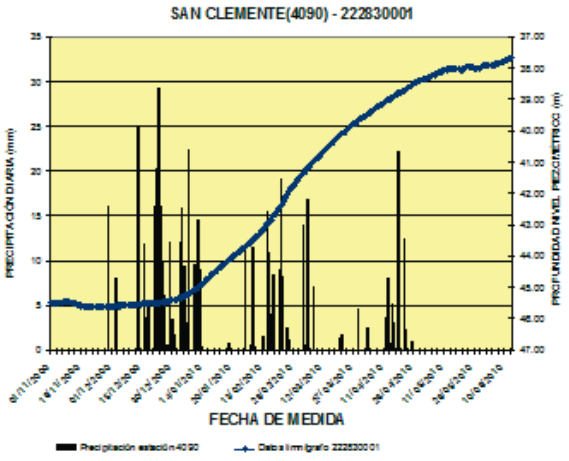


Figura 26. Evolución piezométrica diaria del punto 222830001

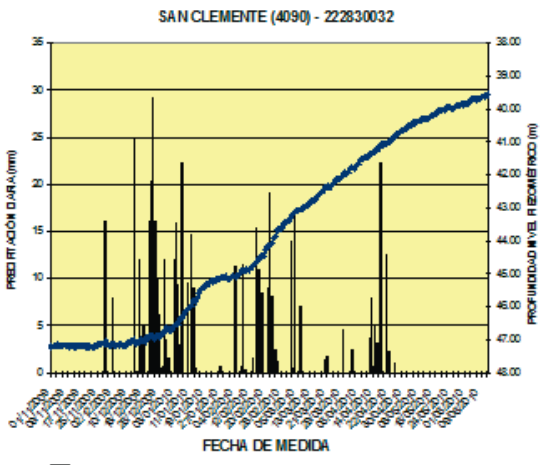


Figura 27. Evolución piezométrica diaria del punto 222830032

La recuperación viene representada por una recta continua ascendente, el nivel pasa de una profundidad de 78,15 m, antes de iniciarse las precipitaciones, a 66,34 m el 17 de junio de 2010; es decir, un ascenso de 11,81 m, figuras 18 y 19.

El punto 222880012 se sitúa en la zona nororiental de la MASb Mancha Occidental II, muy cerca del límite con la MASb Rus-Valdelobos. Controla el acuífero inferior, en este caso incluye niveles de edad cretácico y jurásico. La evolución se analiza con respecto a la estación meteorológica 4090 San Clemente. Las precipitaciones importantes se inician también el 29 de noviembre de 2009 con un máximo también el 23 de diciembre de 2009. La profundidad del nivel piezométrico se sitúa antes del inicio de las lluvias a 30,19 m. La recuperación tiene una ligera tendencia ascendente hasta principios de enero de 2010 (Martínez-Concha et al., 2011). Al finalizar el periodo de precipitaciones más intensas, del 23 de diciembre de 2009 al 12 de enero de 2010, la recta de recuperación sufre un brusco cambio de pendiente, para posteriormente ir suavizándose una vez finalizadas las lluvias intensas. La recuperación durante el periodo analizado es de 7,78 m, figura 20.

El último punto analizado en la MASb Mancha Occidental II es el 212880017, se sitúa en la zona central, tercio superior de dicha masa. No se dispone de datos precisos en relación con el nivel acuífero controlado, el sondeo atraviesa ambos acuíferos y, probablemente, se encuentre ranurado en ambos. La evolución se analiza con respecto a la estación 4104 Arenales de San Gregorio. El primer valor de precipitación superior a 10 mm/día se produce el 2 de diciembre de 2009 y los máximos entre el 21 y el 23 de diciembre. La recuperación viene representada por una curva ligeramente cóncava, iniciándose el ascenso más pronunciado a principios de febrero de 2010. El nivel se situaba a 20,27 m de profundidad el 12 de noviembre y a 15,86 m el 14 de marzo de 2010, es decir una recuperación de 4,41 m, figura 21.

En la MASb Mancha Occidental I se ha analizado la evolución de dos puntos de control. El piezómetro 193020048 se sitúa en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel, muy próximo a la superficie encharcada. Controla el acuífero carbonatado neógeno. Su evolución se analiza con respecto a la estación 4112U Las Tablas de Daimiel. Los valores altos de precipitación se inician el 2 de diciembre de 2009, los máximos del 21 al 23 de diciembre y durante la segunda quincena de febrero de 2010. El ascenso de nivel se inicia pocos días después de las máximas precipitaciones y se produce de manera muy rápida. Se pasa de una profundidad de nivel de 8,17 m el 1 de noviembre de 2009 a 1,14 m a primeros de marzo de 2010. En esta fecha el nivel alcanza su posición más alta, determinada por la lámina de agua superficial impuesta por Las Tablas, manteniéndose desde entonces en ese valor, figura 22.

El punto 193040040, situado en la misma MASb, muy próximo a los Ojos del Guadiana, se compara con los valores de precipitación diaria de las estaciones: 4112U Las Tablas de Daimiel y 4109 Villarta de San Juan. Controla también el acuífero carbonatado neógeno. Los valores altos de lluvia se producen en la primera estación a partir del 2 de diciembre y en la segunda a partir del 13 de diciembre de 2009. La curva de recuperación tiene una pendiente más pronunciada a partir del 11 de enero de 2010, transcurrido un mes desde el inicio de las precipitaciones importantes, hasta finales de marzo de 2010 en que se atenúa y se inicia un ascenso de nivel más

lento. El nivel pasa de una profundidad de 37,12 m el 1 de noviembre de 2009 a 26,54 m de profundidad a mediados de junio de 2010, es decir una recuperación de 10,58 m, figuras 23 y 24.

En la MASb Rus-Valdelobos sólo se cuenta con un piezómetro con datos diarios, el 232870015. Se sitúa en la franja central de la masa, próximo a su límite oriental con la cuenca del río Júcar. Su nivel corresponde al acuífero inferior, en su tramo del Lías (Jurásico Inferior). Se compara con los datos de precipitación de la estación 4090 San Clemente. Las precipitaciones importantes se inician el 29 de noviembre de 2009, con un máximo el 23 de diciembre de 2009, y continúa con precipitaciones notables hasta primeros de enero de 2010. Posteriormente, se producen unos días de escasas o nulas lluvias y otro grupo de fuertes precipitaciones desde primeros de febrero a primeros de marzo de 2010. A continuación, hay otro periodo de escasas lluvias hasta el 12 de abril, y vuelve a llover con cierta intensidad hasta el 21 de abril de 2010. La evolución piezométrica diaria refleja estos tres periodos de mayor precipitación y sus lapsos intermedios de escasa lluvia. La curva de ascenso tiene un aspecto sinusoidal con mayores ascensos en la parte final de los periodos de lluvia intensa. El nivel se situaba el 1 de noviembre de 2009 a 133,97 m de profundidad y asciende hasta 131,26 el 8 de mayo de 2010, tras finalizar el último periodo de precipitaciones importantes. A partir de esa fecha continúa un ascenso muy moderado, figura 25.

Por último, en la MASb Sierra de Altomira se analiza la evolución de los puntos de control 222830001 y 222830032 en relación con la estación 4090 San Clemente. Ambos puntos están muy próximos uno de otro y se sitúan en el límite sureste de la MASb, junto a la divisoria con la MASB Mancha Occidental II. Controlan el acuífero mesozoico. El primer tramo ascendente se inicia al finalizar el primer periodo de lluvias intensas, del 29 de noviembre de 2009 al 13 de enero de 2010. A partir de los primeros días de enero de 2010 se inicia un rápido ascenso de nivel que continúa hasta los datos tomados en junio de 2010. En el caso del punto 222830001 la profundidad del nivel correspondiente al 15 de noviembre de 2009 era de 45,57 m y el 12 de junio de 2010 se situaba a 37,70 m, siendo el ascenso total de 7,87 m. El punto 222830032 tenía para las mismas fechas la profundidad de 47,17 m y 39,59 m respectivamente, un ascenso por tanto de 7,58 m. En ambos puntos el ascenso parece continuar después de la última fecha mencionada, figuras 26 y 27.

CONSIDERACIONES FINALES

1.- A partir de los datos de precipitación y temperatura de 88 estaciones meteorológicas, distribuidas en las MASb que componen el subsistema Alto Guadiana, e incluyendo además la MASb 040-008 Bullaque, se ha realizado el completado de las mencionadas variables mediante correlación lineal.

Con estos datos se ha calculado la lluvia útil y la precipitación media por año tipo climatológico: seco, medio o húmedo para cada MASb de las incluidas en el estudio. Con los valores obtenidos se han dibujado los mapas de isoyetas y lluvia útil para cada año tipo.

Existen importantes diferencias en la precipitación media por MASb para cada tipo de año. Entre año tipo seco y húmedo, la diferencia de precipitación media viene a ser aproximadamente un factor de 2, y entre año medio y húmedo el factor es para todas las MASb entre 1,3 y 1,4.

Las MASb donde se producen más precipitación, para cualquier tipo de año, son por este orden: La Obispalía, Bullaque y Rus-Valdelobos; las que menos: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Consuegra-Villacañas. El recorrido, o diferencia de precipitación en mm, entre la MASb con mayor precipitación y la de menor precipitación es, respectivamente, para año seco, medio y húmedo: 126 mm, 184 mm y 231 mm.

2.- A partir de los datos diarios de precipitación de las estaciones que se han considerado más representativas de cada MASb, en función de su porcentaje de datos y su situación, se ha calculado la infiltración procedente del agua de lluvia para cada MASb aplicando el programa THORDOS, que permite calcular los valores diarios de evaporación y lluvia útil, y la descomposición de ésta entre infiltración y escorrentía superficial.

Los valores medios de infiltración obtenidos, en hm^3/año, para cada MASb se han comparado con los valores obtenidos en otros estudios desarrollados por el IGME y la CHG, y en especial con el informe IGME, 2010.

Según este análisis comparativo los valores de infiltración obtenidos para las MASb: La Obispalía (27,5 hm^3/año), Consuegra-Villacañas (35,4 hm^3/año), Mancha Occidental II (110,5 hm^3/año) y Campo de Montiel (133 hm^3/año) son coherentes con los estimados en otros estudios y se ajustan bien a su balance hídrico. En el caso de las MASb: Sierra de Altomira (143,7 hm^3/año),

Lillo-Quintanar (49,3 hm^3/año) y Mancha Occidental I (117,4 hm^3/año) presentan estimaciones elevadas en relación con otros estudios y más difíciles de ajustar en el balance. Por último, el valor de infiltración obtenido en la MASb Rus-Valdelobos (110 hm^3/año) resulta mucho más alto de lo calculado hasta ahora, y no parece coherente con el balance hídrico de dicha masa.

Estas imprecisiones referidas en algunas masas pueden tener su explicación en los valores asignados a algunos de los parámetros necesarios para el cálculo establecido en el programa y que, por las limitaciones de tiempo, se han fijado de forma general a todas las masas. Quizás también alguna incertidumbre pueda provenir del cálculo de la superficie permeable para cada MASb, pese a haberse realizado con información a escala 1:50.000.

Los resultados de infiltración, obtenidos mediante la aplicación de este método, para cada MASb y para año climatológicamente de tipo medio resultan coherentes con otros valores estimados por el IGME en los casos de las MASb: La Obispalía, Consuegra-Villacañas, Mancha Occidental II y Campo de Montiel; resultan algo más elevados en los casos de las MASb: Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar y Mancha Occidental I y no resulta coherente con estimaciones anteriores, triplicando prácticamente la infiltración calculada por otros métodos, el valor obtenido en el caso de la MASb Rus-Valdelobos.

Estas variaciones pueden tener su explicación en el cálculo de los parámetros R_{max} y R_{min}, que se han tomado como 110 y 90 mm. Estos parámetros dependen de las características de cada tipo de suelo, y se necesitaría un estudio pormenorizado para determinarlos con precisión, ajustar mejor los parámetros y particularizarlos para el tipo de suelo en cada estación y MASb.

3.- Por último, se ha llevado a cabo un estudio comparativo de la evolución piezométrica, en aquellos puntos que disponen de registro continuo de nivel, con la precipitación diaria de la estación o estaciones meteorológicas más próximas. Este análisis se ha realizado para puntos de control situados en las MASb: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II, Rus-Valdelobos y Sierra de Altomira.

La comparación se ha hecho en el intervalo temporal correspondiente a los 6 primeros meses del año hidrológico 2009/10, de octubre 2009 a marzo 2010, sin poder extenderla a un lapso temporal mayor debido a la fecha de finalización del presente informe.

En términos generales, se puede concluir que los puntos de control piezométrico situados en la MASb Mancha Occidental II inician su recuperación coincidiendo con los valores altos de precipitación diaria, dibujando un hidrograma ascendente, que se mantiene hasta los últimos datos de nivel registrados en junio de 2010. El punto situado en la zona nororiental, 222880012, en las proximidades de las MASb Rus-Valdelobos y Sierra de Altomira, experimenta una recuperación más lenta al principio del periodo de lluvias intensas que se va posteriormente incrementando.

Se dispone de escasos datos y un lapso de tiempo muy corto para extraer conclusiones definitivas, pero parece existir una clara influencia en la mitad sur de la MASb Mancha Occidental II de la recarga procedente de la MASb situada al sur, Campo de Montiel, que favorece una recuperación más rápida que la que se produce en la mitad norte.

En la MASb Mancha Occidental I, el punto situado en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, 193020048, muy próximo al límite de la superficie encharcada, experimenta una recuperación muy rápida y coincidente con las precipitaciones y la evolución de la lámina de agua superficial, hasta adquirir un nivel determinado por ésta.

El punto situado en las proximidades de los Ojos del Guadiana, 193040040, inicia su recuperación algunos días después del inicio del periodo de lluvias intensas y al finalizar éste el ascenso se va moderando, aunque continúa la tendencia ascendente con posterioridad al periodo de precipitaciones importantes.

En la MASb Rus-Valdelobos se analiza la evolución de un punto situado en las proximidades del límite con la cuenca del Júcar. Su evolución refleja los periodos de lluvia intensa y los lapsos con menor o nula precipitación, respondiendo con relativa rapidez a estas variaciones.

Por último, con respecto a la MASb de Sierra de Altomira, los puntos de control estudiados se sitúan muy próximos al límite norte de la MASb Mancha Occidental II y, por tanto, claramente influenciados por la situación hidrogeológica de ésta. Su hidrograma tiene un cierto aspecto sinusoidal y tiende a disminuir su recuperación una vez finalizado el periodo de lluvias. Podría inducirse que la recarga que se produce desde el Norte hacia la MASb Mancha Occidental II resulta de mucha menor entidad que la que recibe desde el Sur, como se ha comentado anteriormente.

Este análisis resulta muy preliminar y, por la experiencia obtenida durante la evolución de anteriores periodos húmedos cortos, resulta necesario continuar el registro de datos y seguimiento de la evolución con posterioridad a la finalización del periodo húmedo, encuadrándolo en un espacio temporal más largo en el que se pueda analizar la influencia de la inercia hídrica de las diferentes MASb y los factores relacionados con la transferencia lateral entre las mismas.

No obstante, los datos obtenidos, la comparación con escenarios anteriores y el conocimiento hidrogeológico de la CAG permiten concluir que, en climas semiáridos, como el existente en la zona, la recarga se produce principalmente durante los cortos y esporádicos periodos húmedos, dando lugar entre éstos a una tendencia al descenso de los niveles que vuelven a recuperar, relativamente en función de las extracciones, en el siguiente periodo de precipitaciones intensas. Este proceso se ha podido constatar en los períodos húmedos 1995/98, 2003/04 (en menor medida) y en el actual, 2009/10, aunque en el momento de elaborar este informe todavía no puede darse por finalizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IGME, (2010). Estimación de los recursos disponibles para cada MASb de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME.

Martínez-Cortina, L.; Mejías, M.; Díaz-Muñoz, J. A.; Morales, R. y Ruiz-Hernández, J. M. (2011). "Cuantificación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana. Consideraciones respecto a las definiciones de recursos renovables y disponibles". *Boletín Geológico y Minero*, 122 (1):17-36

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN FUTURA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA A PARTIR DE DIFERENTES ESCENARIOS METEOROLÓGICOS Y DE EXPLOTACIÓN

Luis Martínez Cortina

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio de la evolución futura del sistema hidrológico de la Cuenca Alta del Guadiana a partir de diferentes escenarios meteorológicos y de explotación,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Luis Martínez Cortina
Miguel Mejías Moreno
María Elena Galindo Rodríguez

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN FUTURA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA A PARTIR DE DIFERENTES ESCENARIOS METEOROLÓGICOS Y DE EXPLOTACIÓN

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la posible evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana (en adelante CAG) (Figura 1), y en concreto la viabilidad de la recuperación hidrológica y medioambiental de sus masas de agua y ecosistemas acuáticos asociados.

El trabajo prestará una especial atención a la posibilidad de cumplimiento de los plazos establecidos por la legislación (Directiva Marco del Agua de la Unión Europea, DMA) para la recuperación de las masas de agua y ecosistemas, y por tanto tendrá como principales horizontes temporales los años 2015, 2021 y 2027. Sin embargo, no se centrará exclusivamente en ese cumplimiento, sino que analizará también las posibilidades y condicionantes existentes en cuanto a la recuperación y mantenimiento del sistema a largo plazo. En este sentido, se hará también una estimación, muy preliminar dado el estado del conocimiento existente al respecto, sobre la posible repercusión hidrológica y medioambiental que el efecto del cambio climático podría tener a largo plazo.

METODOLOGÍA DESARROLLADA

En trabajos elaborados con anterioridad por el IGME, se describían algunos aspectos generales relativos a la CAG, como su marco geográfico y administrativo, climatología, rasgos más característicos de su funcionamiento hidrológico y evolución en el tiempo, balances hídricos, etc IGME (2010). No se va aquí a insistir en dichas descripciones generales, salvo en algún tema concreto especialmente relevante a efectos del presente trabajo.

Un estudio sobre la previsible evolución futura de un sistema hidrológico ante determinados escenarios y actuaciones que se planteen, requiere, como punto de partida, un conocimiento adecuado del funcionamiento y comportamiento de dicho sistema, tanto a nivel conceptual como cuantitativo.

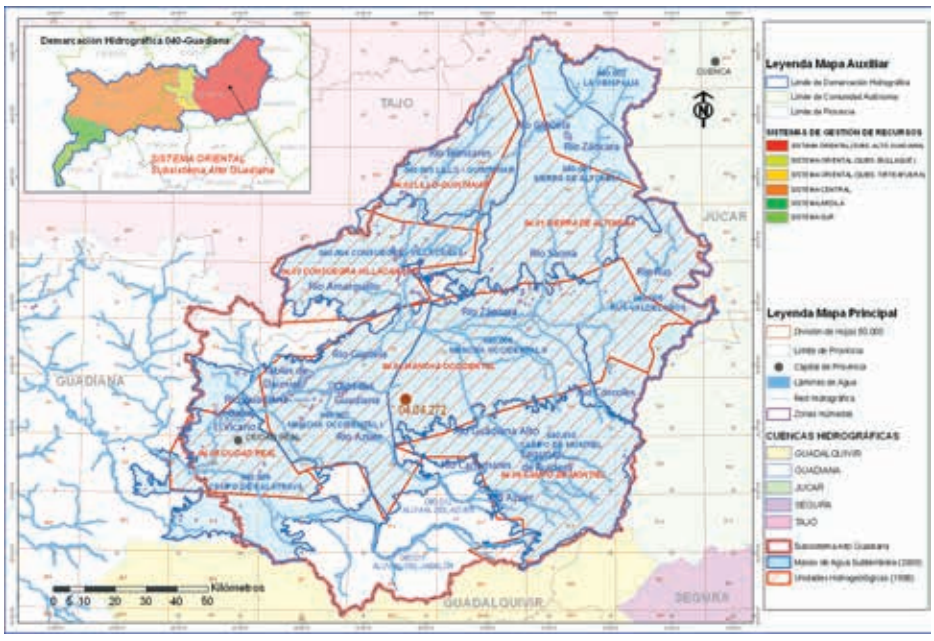


Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Guadiana, con la división en unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea.

Los acuíferos centrales de la CAG, de naturaleza detrítica y carbonatada, y que ocupan básicamente toda la Llanura Manchega, reúnen las características necesarias para llevar a cabo este análisis de evolución futura, tanto por sus características específicas como por el conocimiento que de los mismos se tiene. Estas características hacen que su respuesta a las acciones externas, tanto antrópicas (extracciones de agua subterránea principalmente), como no antrópicas (secuencias meteorológicas), sean relativamente moderadas desde el punto de vista de su influencia en los niveles piezométricos, al contrario de lo que sucede, por ejemplo, en el acuífero contiguo del Campo de Montiel, de marcado carácter kárstico. Esto ha permitido que esa zona, clave por otra parte en el comportamiento del conjunto de la CAG, haya sido modelada en diversas ocasiones con resultados muy aceptables en cuanto a su calibración, lo que ha supuesto una mejora en el conocimiento del sistema, tanto desde un punto de vista cualitativo, como especialmente cuantitativo. Estos valores históricos calibrados resultan esenciales para el planteamiento del presente trabajo, que pretende simular el comportamiento de futuro del sistema sin necesidad de desarrollar un nuevo modelo, y con una metodología empírica más fácilmente utilizable y revisable.

El análisis de la evolución futura del sistema hidrológico se ha hecho principalmente planteando diversos escenarios futuros en cuanto a las características climatológicas y a la extracción de aguas subterráneas de los acuíferos. Para la simulación de los diversos escenarios considerados se han utilizado modelos empíricos elaborados a partir de los datos, resultados y análisis procedentes de modelos numéricos desarrollados anteriormente (Martínez y Cortina 2001), y con los que se trata de simplificar los procesos físicos simulados. En concreto, a partir de los escenarios que se planteen definidos por precipitaciones y extracciones anuales, se calculará la correspondiente evolución de niveles piezométricos en un punto de referencia, que a su vez servirá de indicador de la situación hidrológica general del sistema.

Para la elaboración de los modelos empíricos que se van a utilizar, se ha evaluado el comportamiento de cada término del balance hídrico de forma cualitativa y cuantitativa, siempre en función de la situación en que se encuentre en cada momento el sistema hidrológico.

Términos del balance hídrico

De una forma muy resumida, puede comentarse lo siguiente respecto a cada una de las componentes del balance hídrico:

— *Recarga directa de la lluvia*. Es función de la precipitación y puede considerarse independiente de la situación en la que se encuentra el sistema. Por tanto, su valor medio a largo plazo se supone constante, excepto por la posible incidencia del cambio climático. El grueso de las simulaciones y análisis de escenarios se ha hecho sin la consideración del efecto del cambio climático, y para valorar la posible repercusión de dicho efecto se ha hecho una simulación en los escenarios denominados *de equilibrio*.
— *Recarga indirecta procedente de los ríos*. Este término del balance depende de la situación en la que se encuentra el sistema. Mientras está en una situación próxima al régimen natural, en la que existe conexión entre las corrientes superficiales y los acuíferos, y se mantienen las zonas de descarga *naturales*, los volúmenes infiltrados al acuífero oscilan moderadamente con respecto a unos valores medios. A medida que se produce la desconexión entre corrientes superficiales y acuíferos, y que el sistema puede considerarse en situación alterada, los valores totales de la recarga indirecta procedente de los ríos son más extremos (hay más zonas de recarga, pero un menor caudal circulante), especialmente en lo que se refiere a los valores altos.
— *Evapotranspiración*. La evapotranspiración producida desde el propio acuífero es uno de los elementos del balance hídrico que se ve más afectado por la alteración respecto a las condiciones naturales del sistema. La pérdida de numerosas zonas de descarga y de zonas húmedas dependientes de la aportación subterránea ha producido una reducción muy notable de la evapotranspiración.

  Es un factor esencial en el análisis del comportamiento actual de los acuíferos y de su posible recuperación. Es importante tener presente que en los escenarios de futuro a analizar en los que se produzcan recuperaciones importantes del sistema, el valor de la evapotranspiración se irá incrementando a medida que se produzca dicha recuperación.
— *Drenaje a los ríos*. Este término se ve también profundamente afectado por las alteraciones respecto a una situación cercana al régimen natural.

Las pequeñas oscilaciones del nivel piezométrico en un acuífero que alimenta a la red de aguas superficiales suponen variaciones del caudal drenado. Incluso en régimen natural, los moderados descensos de los niveles piezométricos en periodos secos, producen una disminución significativa de los caudales de descarga.

En un régimen profundamente alterado, como en el ca-

so de la CAG, el volumen drenado a los ríos disminuye en mucha mayor medida. No se trata de moderados descensos piezométricos que reducen los caudales de descarga, sino de cambios absolutos de comportamiento en la relación acuífero-río, con desaparición de numerosas zonas de descarga.

— *Transferencias laterales entre acuíferos*. Estos términos del balance quedan anulados entre si cuando se considera el conjunto cerrado de toda la CAG en lo que respecta a su divisoria hidrogeológica. Si se consideran aisladamente las distintas masas de agua subterránea hay que considerar las transferencias laterales que se producen entre ellas.

Estas transferencias también han experimentado ligeras modificaciones dependiendo de la situación del sistema, aunque esta variación es poco relevante en comparación con algunos de los términos anteriores. La transferencia subterránea más importante se produce de la masa de agua subterránea del Campo de Montiel a las centrales del sistema (Rus-Valdelobos, y especialmente Mancha Occidental II). Esta transferencia se ha incrementado como consecuencia de los importantes descensos piezométricos registrados en la Llanura Manchega, que han provocado un aumento del gradiente hidráulico.

— *Bombeos.* Son, evidentemente, un término fundamental en el balance hídrico de la CAG. Constituyen la principal acción antrópica que ha dado lugar a la profunda modificación del régimen natural del sistema. Asimismo, junto a la pluviometría, es el otro factor del que se van a plantear distintas hipótesis sobre su comportamiento futuro (en cuanto a los volúmenes extraídos), para analizar la viabilidad de la recuperación hídrica y medioambiental del sistema.

Si en términos científico-técnicos la cuantificación de algunos de los términos del balance hídrico es realmente compleja (por ejemplo: la recarga, la evapotranspiración o el drenaje de los acuíferos), cabría esperar que el volumen de agua subterránea bombeada de los acuíferos fuera un dato con el que se cuenta. Sin embargo, el grado de incertidumbre existente con respecto a dichos volúmenes es mucho mayor que el que parece esperable y recomendable. Esto dificulta de forma importante el proceso de calibración de los modelos desarrollados y utilizados, y en consecuencia también las previsiones que se hagan.

De ahí que una de las recomendaciones más necesarias que habría que hacer es la de poner los medios y mecanismos necesarios que permitan tener un control cuantitativo de las extracciones, espacial y temporalmente. En una cuenca con las características y connotaciones de la CAG, un conocimiento suficientemente aproximado de las extracciones reales debería marcarse como un objetivo inmediato, similar al conocimiento de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas, el de los niveles piezométricos en los puntos de la red de control, o el de los caudales de los ríos en las estaciones de aforos.

Análisis de evolución futura de la cuenca alta del Guadiana. Hipótesis y simplificaciones

El objetivo final es estimar de forma sencilla la evolución de los niveles piezométricos de la zona central de la CAG. De esta evolución dependerá la posible recuperación del sistema hidrológico en cuanto a las conexiones acuíferos-corrientes superficiales, con la consiguiente repercusión medioambiental.

Las simulaciones se realizarán en función simplemente de dos términos de los que se impondrán sus valores anuales a lo largo de toda la serie a simular: la precipitación, y el volumen de agua subterránea extraída en el conjunto de las tres masas centrales de la cuenca alta: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos. En las series simuladas será necesario aportar estos dos valores para cada año. Cualquiera de ellos puede ser constante a lo largo de toda la serie simulada o variar anualmente.

La estimación así realizada asume una serie de hipótesis, y también de limitaciones, que permiten simplificar lo que en realidad es un proceso mucho más complejo. Sin embargo, las características de los acuíferos de la zona central, y el adecuado conocimiento de su modelo de funcionamiento hidrogeológico, permiten afirmar que los resultados obtenidos están dentro de unos márgenes de incertidumbre que pueden considerarse tolerables con el nivel de conocimiento existente, con la propia incertidumbre inherente a todo proceso hidrológico, y dentro del contexto de los objetivos perseguidos.

Así, cabe decir en primer lugar que la representación de la evolución de niveles piezométricos en la zona central de la cuenca se va a hacer en un punto en concreto. Este punto representativo seleccionado se sitúa en el término municipal de Manzanares, unos 20 km al sudeste de las Tablas de Daimiel, en la masa de agua subterránea de Mancha Occidental II, cerca de su límite con Mancha Occidental I. En ese lugar está ubicado el punto de control histórico de la Base de Datos Aguas

del IGME con número de inventario 203030001, y actual punto de la Red Oficial de Control de Aguas Subterráneas de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, con código 04.04.272 (ver su situación geográfica en la Figura 1), del que se dispone de la serie histórica de evolución piezométrica. Corresponde a la zona donde mayores descensos históricos se han registrado, lo que favorece el proceso previo de calibración. Además, existe una correlación clara con las variaciones de los niveles piezométricos en las restantes zonas del acuífero, como por ejemplo la cercana de los Ojos del Guadiana (con descensos y ascensos ligeramente inferiores), lo que permite deducir a partir de este punto la situación en dicha zona, que a su vez constituye un indicador ideal de la posible recuperación hídrica de todo el sistema.

Otras simplificaciones importantes se producen con las extracciones de agua subterránea. La extracción que se utilizará como dato de entrada corresponde a la efectuada conjuntamente en las tres masas centrales de la cuenca: Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos. Aun con las importantes limitaciones e incertidumbre existentes en los datos históricos referentes a extracciones, hay que tener en cuenta que la evolución que se ha producido hasta la situación actual (y por tanto la analizada, cuantificada y calibrada) es producto de una determinada distribución de las extracciones, en cuanto a su situación geográfica y también al nivel acuífero de procedencia. Las estimaciones de futuro serán más válidas en la medida que dicha distribución no varíe mucho. En todo caso, también a este respecto la incertidumbre existente en cuanto al volumen de extracciones reales tiene mayor importancia que la incidencia que puedan tener cambios moderados en la distribución del total de las extracciones.

Puede estimarse en unos 350 Mm^3/año el volumen de extracciones efectuado en el conjunto de las tres masas consideradas en los últimos años (en años de pluviometría media). Esta es la cifra que puede considerarse que a largo plazo mantendría los niveles piezométricos en la situación actual. De esa cifra, aproximadamente 145 Mm^3/año se atribuyen a la masa de Mancha Occidental I, 170 Mm^3/año a Mancha Occidental II, y 35 Mm^3/año corresponderían a Rus-Valdelobos. De acuerdo con la hipótesis mencionada de mantenimiento de las distribuciones, cuando se haga referencia en este trabajo a los volúmenes de extracción, la distribución entre las masas debería ser proporcional a la referida, es decir, 41,4% correspondería a Mancha Occidental I, 48,6% a Mancha Occidental II, y 10% a Rus-Valdelobos.

Las restantes masas de agua subterránea de la CAG desempeñan un papel secundario a efectos del presente trabajo. La estimación de extracciones en el conjunto de todas ellas es de unos 50 Mm^3/año. Se asume la hipótesis de que en las restantes masas se mantienen estos volúmenes. El aumento de las extracciones de forma importante podría condicionar aún más la recuperación medioambiental de la zona central de la CAG, que recibe, ya sea por escorrentía superficial o subterránea, las aportaciones de las masas laterales. Ese aumento haría que las aportaciones disminuyeran en mayor o menor medida. No obstante, la incidencia en cada caso debe ser objeto de un estudio particular.

En lo que respecta al valor introducido de precipitación anual, supone evidentemente una simplificación, tanto en cuanto a la distribución geográfica como especialmente a la temporal. En concreto, la forma en la que se produce la precipitación (en cuanto a la época del año, intensidad, duración, concentración geográfica y temporal, estado del suelo, etc.) tiene una incidencia directa en el comportamiento piezométrico, especialmente a nivel local. A este respecto hay que tener en cuenta que la evolución piezométrica histórica analizada y calibrada responde a todo este conjunto de episodios de precipitación de muy diferente tipo que se han producido históricamente. El análisis de los escenarios futuros será por tanto más fiable cuanto mayor sea su horizonte temporal, y por tanto más tiendan a compensarse unos tipos de episodios de lluvias con otros. Si se consideran aisladamente los valores de un solo año pueden producirse desviaciones importantes de lo simulado con respecto a la respuesta real.

Escenarios considerados

Se definen a continuación los criterios y escenarios elegidos para ser simulados y analizados posteriormente. Se ha pretendido que el conjunto de escenarios simulados permita tener una idea clara de la posible evolución futura del sistema hidrológico de la CAG en función de la explotación de agua subterránea que se realice, y en concreto de las posibilidades existentes en cuanto a su recuperación hidrológica y medioambiental.

Horizontes temporales analizados

Como se comentó anteriormente, el presente trabajo pretende dar respuesta a las posibilidades reales de cumplir las exigencias establecidas a partir de la entrada en vigor de la DMA, en cuanto a la recuperación medioambiental de las masas de agua y de los ecosiste-

mas acuáticos asociados. En consecuencia, los horizontes temporales que van a definirse para su análisis se corresponden con hitos establecidos en el propio proceso de planificación (años 2015, 2021 y 2027).

La fecha tomada como inicio de las simulaciones de escenarios fue la del 1 de octubre de 2010 (inicio del año hidrológico 2010/11). Por tanto, y a efectos de trabajar con años hidrológicos, se consideró el 2010/11 como primer año de la simulación, y se establecerán horizontes temporales hasta los años 2014/15 (5 años), 2020/21 (11 años), y 2026/27 (17 años) (tabla 1).

Periodo considerado	Duración del periodo
Octubre 2010-Septiembre 2015	5 años
Octubre 2010-Septiembre 2021	11 años
Octubre 2010-Septiembre 2027	17 años

Tabla 1. Horizontes temporales considerados para la simulación de escenarios.

Escenarios meteorológicos

En general, la simulación en el tiempo de procesos de flujo subterráneo utilizando un valor constante medio de la recarga puede conducir a una distorsión importante de los resultados finales. En climas como el de la CAG esto se hace más evidente, puesto que las puntas importantes de recarga se producen sólo en años de pluviometría muy alta, mientras que en años secos los valores de la recarga se reducen a valores mínimos. Este hecho se ha puesto de manifiesto en modelos numéricos previos desarrollados sobre el conjunto de acuíferos de la CAG.

Por ello se optó por simular los escenarios futuros utilizando series reales de precipitación. Así, y teniendo en cuenta los horizontes temporales a analizar (los 5, 11 y 17 años correspondientes hasta 2015, 2021 y 2027) (tabla 1), se seleccionaron en cada caso las series temporales históricas de dicha duración más húmeda, más seca, y dos de valores medios (con menor y mayor desviación típica). Como valores de la serie histórica de precipitación se consideraron los medios anuales calculados para toda la superficie de la CAG.

De esta forma se obtuvieron los escenarios meteorológicos a utilizar en las simulaciones correspondientes a los tres horizontes temporales considerados. La tabla 2 resume dichos escenarios, mostrando en cada caso la serie histórica que se considera representativa, con el valor medio de la precipitación en esa serie y la desviación respecto al valor medio de 419 mm/año. Para la elección de secuencias históricas medias, se ha impuesto como condición que el valor medio de precipitación de la serie esté como máximo un 2% por encima o por debajo del valor medio de 419 mm/año. Esto determina un rango comprendido entre 410 y 428 mm/año.

Escenarios de explotación

Se han elegido una serie de escenarios de explotación que están referidos a las extracciones de agua subterránea (para todos los usos) en el conjunto de las tres masas de agua subterránea de la zona central de la CAG (Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos). Evidentemente se podrían haber simulado otros, pero se ha considerado que los seleccionados cumplen globalmente el objetivo requerido. Por otra parte hay escenarios extremos que no han sido simulados, pero que conducirían a resultados fácilmente deducibles a la vista de las consideraciones del presente estudio o de los resultados obtenidos en él.

Así, cualquier escenario de futuro en el que las extracciones de agua subterránea en el conjunto de las tres masas centrales de la cuenca alta no se sitúen por debajo de los 350 Mm^3/año, no producen a medio o largo plazo

Horizonte temporal	2010/11-2014/15 (5 años)	2010/11-2020/21 (11 años)	2010/11-2026/27 (17 años)
Serie húmeda	1958/59-1962/63 526 mm/año (+26%)	1958/59-1968/69 480 mm/año (+15%)	1955/56-1971/72 459 mm/año (+10%)
Serie seca	1990/91-1994/95 330 mm/año (-21%)	1943/44-1953/54 375 mm/año (-11%)	1941/42-1957/58 376 mm/año (-10%)
Serie media (con menor desviación típica)	1932/33-1936/37 418 mm/año	1969/70-1979/80 427 mm/año	1973/74-1989/90 414 mm/año
Serie media (con mayor desviación típica)	1994/95-1998/99 425 mm/año	1994/95-2004/05 421 mm/año	1936/37-1952/53 410 mm/año

Tabla 2. Series representativas utilizadas en la simulación para cada uno de los horizontes temporales considerados, y en cada escenario meteorológico planteado.

recuperaciones del nivel piezométrico de los acuíferos. Lógicamente, cuanto mayor sea el volumen extraído por encima de esa cifra, mayores serán los descensos adicionales a los ya existentes, pero en cualquier caso, desde el punto de vista que aquí se pretende analizar de posibilidad de cumplimiento de la recuperación medioambiental en la línea de lo establecido por la DMA, esta no será posible en ningún caso por encima de esa cifra.

En el extremo contrario, y desde un punto de vista más teórico que realista, hay que señalar que un hipotético cese absoluto de las extracciones (para todos los usos) produciría a medio plazo una recuperación total de los niveles piezométricos en los acuíferos, y por tanto de sus descargas y de la superficie de zonas húmedas. Tanto los niveles de equilibrio alcanzados, como las descargas y la extensión de las zonas húmedas llegarían a ser incluso superiores a las *históricamente conocidas*, dado que puede estimarse en unos 50-60 Mm^3/año el volumen de extracciones que ya existía a mediados del pasado siglo. Esa explotación se realizaba desde mucho tiempo antes mediante la utilización de norias.

En los escenarios de explotación planteados se ha partido, o bien del valor de 350 Mm^3/año, o bien directamente desde valores más bajos (275 o 230 Mm^3/año), que proporcionarían ya desde el principio una tendencia a la recuperación piezométrica.

A efectos de nomenclatura y resumen posterior se utilizarán como abreviaturas de los escenarios de extracciones las siguientes: CTE–X (extracción mantenida constante en una cifra de X Mm^3/año), ESC–X/Y/Z (escalones de extracción de volúmenes X, Y, Z en cada uno de los periodos de 5 ó 6 años comprendidos hasta 2015, 2021 y 2027), GRA–X_Y/Z (extracción disminuyendo anualmente desde un volumen X, a razón de Y Mm^3/año hasta alcanzar —si la duración del periodo considerado lo permite— un volumen Z, que luego permanece constante).

En concreto, los escenarios de extracción de aguas subterráneas que se han simulado y analizado, en combinación con los escenarios meteorológicos anteriormente descritos, y con los diferentes horizontes temporales planteados, son los siguientes:

—CTE–350: Extracción mantenida en el tiempo de 350 Mm^3/año.
—CTE–275: Extracción mantenida en el tiempo de 275 Mm^3/año.
—GRA–350_25/100: Extracción comenzando en 350 Mm3/año y descenso gradual de 25 Mm^3/año hasta llegar a una extracción de 100 Mm^3/año, que luego se mantiene constante.
—GRA–275_5: Extracción comenzando en 275 Mm^3/año y descenso gradual muy moderado de 5 Mm^3/año (se llega a una extracción de 195 Mm^3/año al final de la simulación de 17 años).
—ESC–275/200/150: Escalones de extracción: 5 primeros años de 275 Mm^3/año; los 6 siguientes con extracción de 200 Mm3/año; los 6 últimos con extracción de 150 Mm^3/año.
—ESC–230/190/150: Escalones de extracción: 5 primeros años de 230 Mm^3/año; los 6 siguientes con extracción de 190 Mm^3/año; los 6 últimos con extracción de 150 Mm^3/año.

Hay que tener en cuenta las diferencias existentes entre los escenarios según el horizonte temporal que se simule, puesto que a cada caso le corresponden series meteorológicas distintas. Por ejemplo, los escenarios CTE–275 con horizonte 2015, y CTE–275 con horizonte 2027 no son coincidentes en el periodo común hasta 2015, al simular series de precipitación diferentes.

Escenarios de cambio climático

Tanto desde un punto de vista científico como de gestión de los recursos, la posible incidencia del cambio climático ha de ser considerada en cualquier análisis que hoy día se efectúe relacionado con el comportamiento futuro de un sistema hidrológico. Si bien las bases científicas de la evidencia de un cambio climático parecen cada día más claras, existen grandes incertidumbres en los modelos actuales sobre las repercusiones futuras de dicho cambio climático a escala regional.

Por otra parte hay que considerar las características particulares que confluyen en las aguas subterráneas y en la CAG. Estas características hacen que desde un punto de vista hidrogeológico las recargas importantes se produzcan de manera esencial sólo en años notablemente húmedos. Así, una previsible distribución más extrema de la pluviometría, como apuntan la mayor parte de modelos climáticos, puede beneficiar dichas puntas de recarga, compensando en cierta medida la posible disminución de las precipitaciones.

La Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) establece que para incorporar el efecto del cambio climático en la Demarcación del Guadiana, debe considerarse una disminución con respecto a la aportación natural de re-

ferencia del 11%. No existe ninguna otra consideración o recomendación específicamente relacionada con el recurso subterráneo.

En principio, en las simulaciones que alcanzan como horizonte temporal el año 2027, que tratan de reproducir la posible recuperación de los niveles piezométricos, no parece necesario tener en cuenta una reducción de las aportaciones, que por otra parte están estimadas con los datos obtenidos durante las últimas décadas. Además, su aplicación no sería clara de repercutir cuando estamos simulando básicamente el funcionamiento hidrogeológico.

Sin embargo, con vista a un análisis de la situación del sistema hidrológico a largo plazo, y especialmente para conocer la incidencia del cambio climático en una situación más o menos *recuperada* del sistema, va a ser necesario en el futuro analizar todos los datos y la evolución que al respecto se vaya produciendo, lo que contribuirá a su vez a mejorar la fiabilidad de los modelos regionales de cambio climático.

Debido a esta posible importancia de los efectos del cambio climático a largo plazo, se va a considerar en el presente trabajo una simulación con el horizonte temporal de 2027, en la que ya desde el principio se tenga en cuenta la repercusión del cambio climático, asignando el 11% que señala la IPH a una reducción en dicho porcentaje de la recarga media anual. Estas simulaciones se van a realizar con valores medios anuales de la precipitación (y por tanto de la recarga), y para distintos valores de la extracción anual mantenida constante en el tiempo, lo que permitirá analizar la repercusión que el cambio climático va a tener para cada escenario de explotación, con esta hipótesis, en los niveles piezométricos de equilibrio (los que se alcanzarían a largo plazo en una situación estabilizada del balance, sin considerar la variabilidad meteorológica).

RESULTADOS OBTENIDOS. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Escenarios meteorológicos y de explotación para cada horizonte temporal

Se analizaron los resultados obtenidos al simular diferentes combinaciones entre los escenarios descritos anteriormente y referidos a meteorología (pluviometría) y explotación de los acuíferos (extracción de aguas subterráneas), para cada escenario temporal considerado (2015, 2021 y 2027), y teniendo siempre presentes las hipótesis y limitaciones que anteriormente fueron descritas.

En las gráficas de evolución piezométric de los escenarios simulados (Figuras 2 a 4) se han representado puntualmente valores piezométricos históricos anuales correspondientes al punto de control considerado (puntos verdes) para poder apreciar las desviaciones producidas con respecto a la simulación efectuada en el periodo histórico. Se han representado también en la gráfica los valores correspondientes a otros dos puntos: 212910019 del IGME (04.04.019 de la Red Oficial) (puntos rojos), situado en el término municipal de Alcázar de San Juan, más hacia el nordeste de la Llanura Manchega; y 193040040 del IGME (04.04.031 de la Red Oficial) (puntos azules), situado en Villarrubia de los Ojos, en la zona donde se localizaban los Ojos del Guadiana. Aun con las diferencias existentes puede apreciarse como el comportamiento en estos puntos es bastante similar.

En dichas gráficas de los escenarios analizados se han trazado asimismo dos líneas horizontales de trazo discontinuo ligeramente por encima de las cotas de 620 y 630 m s.n.m. La línea superior (en color verde) indicaría, de forma aproximada, el nivel de referencia que correspondería en ese punto a una situación teórica media en la que no se extrajera agua del acuífero (para ningún uso). Por su parte, la línea naranja pretende representar una cota por debajo de la cual los acuíferos quedan descolgados totalmente de las corrientes superficiales (en un significado extrapolado de forma aproximada para las zonas de descarga). Aproximadamente por encima de esa cota podría empezar a hablarse de recuperaciones desde el punto de vista de la conexión del acuífero con ríos y zonas húmedas. Son simplemente líneas aproximadas de referencia que deben interpretarse de forma meramente orientativa.

La línea vertical de trazos situada en 2009/10 separa en cada gráfica la zona correspondiente a la simulación histórica de la simulación de futuro. En cada gráfica se representan las simulaciones de futuro para cada uno de los tres escenarios meteorológicos: húmedo, medio o seco (en colores azul, marrón y rojo respectivamente), correspondientes al horizonte temporal analizado. Esto nos permitirá tener una idea de la evolución previsible de los niveles acotándola entre dos situaciones extremas, correspondientes al óptimo y pésimo histórico registrado durante un periodo de tiempo equivalente al analizado, desde el punto de vista de las aportaciones

procedentes de la lluvia. Para analizar las expectativas de lo que se puede esperar del sistema en cuanto a su posible recuperación conviene fijarse más en el escenario meteorológico medio. Hay que tener en cuanto que los otros dos responden a los comportamientos extremos que ha tenido la precipitación en toda la serie histórica en periodos de 5, 11 o 17 años. A largo plazo, los valores van lógicamente acercándose más a la media. En todos los casos se ha dibujado sólo la evolución en uno de los dos escenarios meteorológicos medios (el de menor desviación típica), al comprobarse que aunque la evolución difiera con respecto al otro escenario (el de desviación típica máxima), los resultados obtenidos al final de cada periodo simulado son prácticamente coincidentes.

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran, a modo de ejemplo entre las numerosas realizadas, tres simulaciones correspondientes respectivamente a cada uno de los horizontes temporales considerados (2015, 2021 y 2027), y con unos determinados escenarios de explotación en cada caso, indicados en los pies de las figuras.

En la figura 2 se representa la simulación correspondiente a unas extracciones constantes de 275 Mm^3 para el horizonte temporal 2015. Como ejemplo para el horizonte temporal 2021 se representa un escenario con dos escalones de extracciones: 275 Mm^3/año hasta el 2015 (como en el caso anterior) y 200 Mm^3/año en los seis años siguientes hasta el 2021. Por último, se muestra para el caso del horizonte temporal 2027 un escenario muy ambicioso desde el punto de vista de la reducción de las extracciones, que parte de una extracción de 350 Mm^3/año en 2010/11 y va disminuyendo gradualmente a razón de 25 Mm^3/año, hasta los 100 Mm^3/año, que se alcanzarían en 2020/21, manteniéndose constante posteriormente.

Al final de este apartado de resultados se incluye un subapartado con una tabla-resumen de todos los esce-

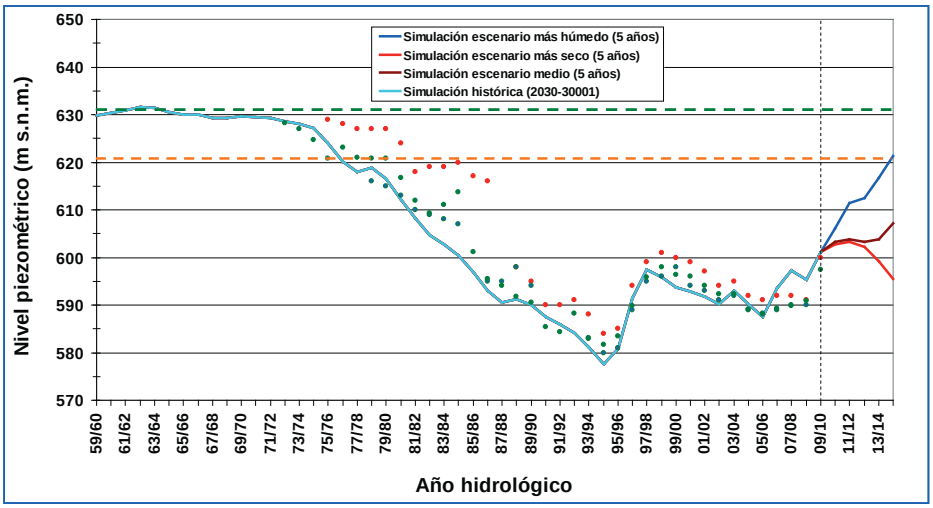


Figura 2. Simulación periodo 2010/11-2014/15. Escenario de explotación: extracción constante de 275 Mm^3/año (CTE–275).

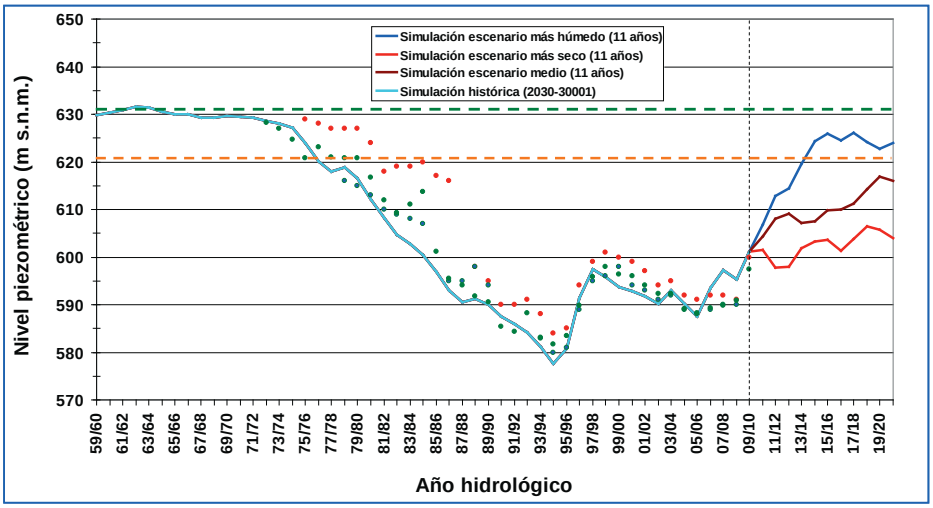


Figura 3. Simulación periodo 2010/11-2020/21. Escenario de explotación: volúmenes de extracción en dos escalones: 5 años de 275 Mm^3/año (2010/11-2014/15), y 6 años de 200 Mm^3/año (2015/16-2020/21) (ESC-275/200).

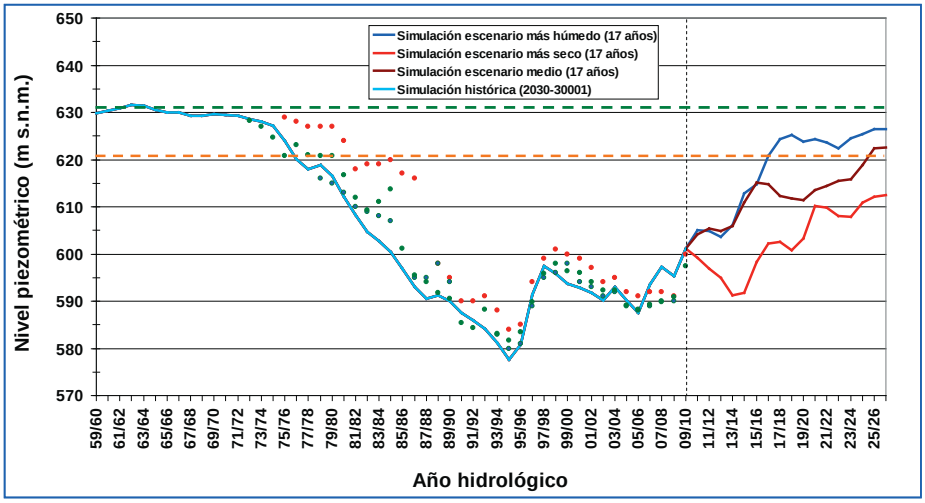


Figura 4. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenario de explotación: extracción disminuyendo a razón de 25 Mm^3 cada año, desde 350 Mm^3/año hasta 100 Mm^3/año (GRA–350_25/100).

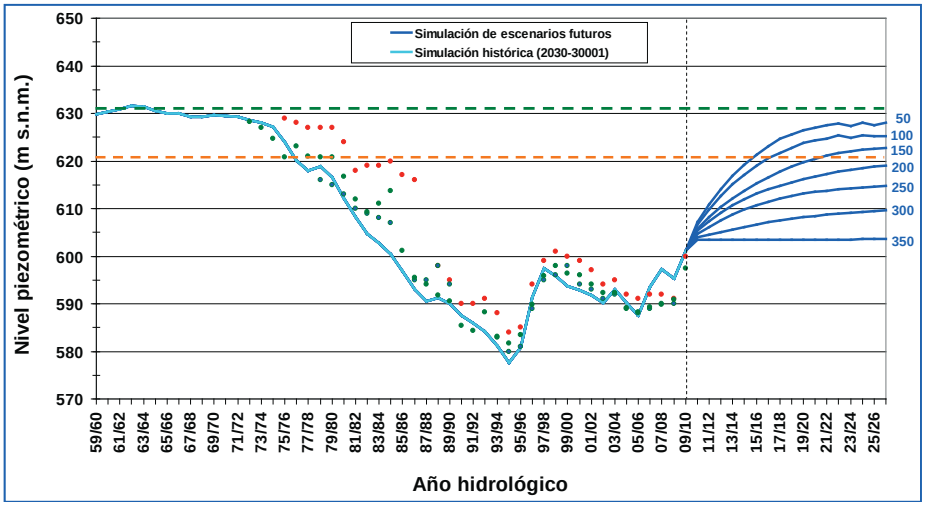


Figura 5. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenarios de equilibrio a largo plazo: pluviometría anual constante de 419 mm; diferentes valores de extracción mantenida en el tiempo (350, 300, 250, 200, 150, 100 y 50 Mm^3/año) (CTE-350, CTE-300, CTE-250, CTE-200, CTE-150, CTE-100 y CTE-50).

narios simulados. Por otra parte en las consideraciones finales se valorarán las perspectivas de recuperación existentes para cada horizonte temporal considerado y para el largo plazo, a partir de un análisis de todos los escenarios simulados. Para este análisis será muy útil la consideración de los escenarios de equilibrio, cuyos resultados se exponen a continuación.

Escenarios de equilibrio

Los escenarios de equilibrio definirán de forma aproximada la situación piezométrica a largo plazo para cada nivel de explotación, suponiendo que este se mantiene constante en el tiempo.

La evolución del nivel piezométrico se ha simulado en los casos anteriores a partir de series reales de precipitación, tal y como se justificó anteriormente. En este apartado se va a realizar un ejercicio más teórico que real, que pretende servir de complemento a los análisis anteriores, con el objetivo de acotar más las previsiones futuras de evolución del sistema en función de la explotación que se haga de las aguas subterráneas.

El análisis está basado en el hecho de que si mantenemos constante en el tiempo un determinado volumen de agua subterránea extraída, el sistema llegará a alcanzar una situación de equilibrio (por así decirlo, una nueva situación estacionaria con un bombeo constante), caracterizada por un cierto balance hídrico (que tendrá incorporado dicho bombeo constante) y unos determinados niveles piezométricos, que podremos considerar de referencia para cada volumen de extracción.

En la figura 5 se han incluido las simulaciones considerando la pluviometría media anual constante (419 mm/año), y en cada caso un valor constante mantenido en el tiempo de la extracción de aguas subterráneas en las tres masas centrales de la CAG. El valor asintótico al que tiende cada una de las simulaciones nos da una idea de

la situación de equilibrio a la que tiende el nivel piezométrico para cada régimen de extracciones mantenido a largo plazo que consideremos.

Evidentemente, al igual que sucede en una situación teórica de régimen estacionario, la situación de equilibrio no es estricta, y se ve alterada por la propia variabilidad meteorológica. Esta variabilidad hará que los niveles piezométricos oscilen alrededor de los niveles considerados de referencia. Cuando los niveles de referencia son cercanos a la situación límite de recuperación de la conexión entre acuíferos y corrientes superficiales, la meteorología resulta decisiva en el comportamiento del sistema y en el grado de recuperación medioambiental que puede apreciarse en un momento dado y en una zona determinada.

En cualquier caso y a la vista de la figura 5, puede estimarse que a largo plazo es necesario reducir las extracciones por debajo de los 150 Mm^3/año para conseguir recuperaciones con cierto grado importante de permanencia en el espacio y en el tiempo, en la línea de los objetivos de la DMA. Puede estimarse que manteniendo el volumen de extracción por debajo de los 200 Mm^3/año se producirán episodios más o menos cercanos al funcionamiento hídrico natural asociados a secuencias húmedas.

Por debajo de los 150 Mm^3 de extracción anual mantenida en el tiempo, la recuperación ya es muy importante. A medida que dicha cifra se redujera más, aumentarían gradualmente las descargas naturales de los acuíferos y la extensión de las zonas húmedas, y el sistema sería menos sensible a la estacionalidad de dichas descargas. Pueden estimarse como referencias las cifras de 100 Mm^3/año en el conjunto de las tres masas consideradas para una recuperación hídrica y medioambiental muy notable, y 50 Mm^3/año para alcanzar la situación poco influenciada existente a mediados del siglo XX.

Escenarios de cambio climático

En la metodología se establecían las bases e hipótesis en las que va a ser planteado el análisis de la posible influencia del cambio climático. Se trata de simular los escenarios de equilibrio analizados en el apartado anterior, pero considerando una reducción anual del 11% en el valor de la recarga procedente de la lluvia. Los resultados obtenidos pueden verse en la figura 6.

Como puede verse comparando las figuras 5 y 6, la consideración del cambio climático en la medida descrita puede tener una repercusión importante en el nivel piezométrico de equilibrio que se alcanzaría en cada escenario de explotación considerado. Esto conduciría a la necesidad de reducir aún más las extracciones a las que habría que llegar a largo plazo para conseguir el mismo grado de recuperación que existía sin la influencia del cambio climático.

Hay que tener en cuenta que el 11% de reducción de la recarga considerado en estas simulaciones supone un volumen muy cercano a los 50 Mm^3/año (estos escenarios de equilibrio se simulan con el valor medio anual de precipitaciones constante, y por tanto también el de recarga procedente de la lluvia) en el conjunto de la CAG. Como se comentó anteriormente, las características particulares que confluyen en las aguas subterráneas y en la CAG parecen indicar que la hipótesis planteada en este escenario de cambio climático es excesivamente pesimista, pero resulta interesante su consideración, aunque sea como límite superior en cuanto a esta posible repercusión.

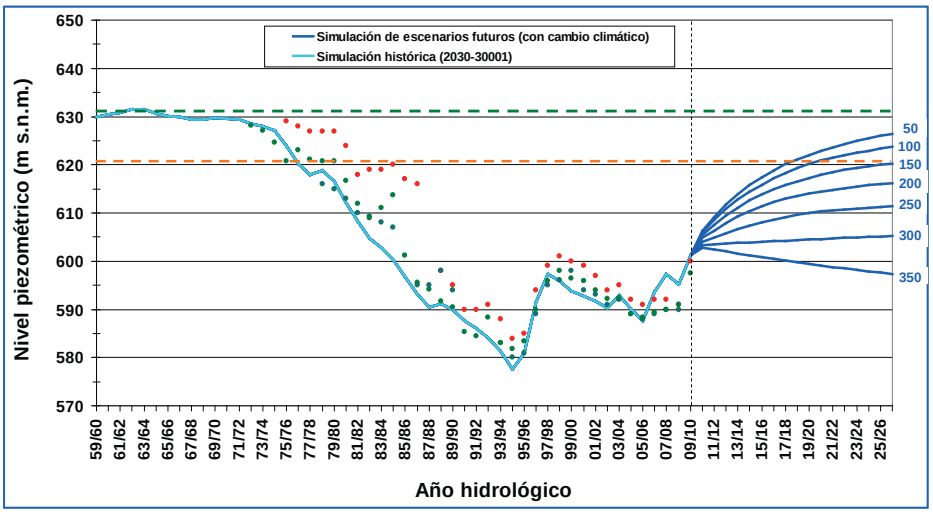


Figura 6. Simulación periodo 2010/11-2026/27. Escenarios de equilibrio a largo plazo: pluviometría anual constante de 419 mm; diferentes valores de extracción mantenida en el tiempo (350, 300, 250, 200, 150, 100 y 50 Mm^3/año). Consideración de cambio climático: reducción anual del 11% en el valor de la recarga procedente de la lluvia (CTE-350, CTE-300, CTE-250, CTE-200, CTE-150, CTE-100 y CTE-50).

Como sucede en otros órdenes del conocimiento hidrogeológico en la CAG, la necesaria transición que en su caso ha de producirse hacia la recuperación hidrológica del sistema permitirá la obtención de datos, contraste de previsiones, y consiguiente mejora del conocimiento, que ayudarán a reducir las incertidumbres existentes y en el caso del cambio climático permitirán tener modelos más aproximados y adecuados a la escala regional, de cara a la mejor cuantificación de su repercusión futura.

Tabla-resumen de escenarios

Del conjunto de escenarios simulados se obtiene un panorama general de las posibilidades de recuperación ambiental de las masas de agua subterránea y ecosistemas acuáticos de la CAG, en función de las extracciones de agua subterránea realizadas, y tanto a corto-medio plazo (5, 11, 17 años) como a largo plazo.

La recuperación a corto plazo exige una reducción muy rápida y drástica de las extracciones, mientras que a largo plazo depende fundamentalmente de la cifra de extracciones a la que se llegue y que se mantenga más o menos constante en el tiempo.

Por otra parte en el corto plazo hay una gran influencia y una incertidumbre muy alta en cuanto a la secuencia meteorológica que se produzca, mientras que a largo plazo la incertidumbre climatológica principal es la relacionada con el posible efecto del cambio climático.
Es difícil sintetizar los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores, tratando de relacionar directamente cada escenario de extracciones con un *veredicto* sobre si se produce o no la recuperación ambiental en un periodo de tiempo determinado. A las incertidumbres mencionadas se une el hecho de la gran sensibilidad que el sistema tiene a pequeñas variaciones piezométricas en situaciones que pueden considerarse de recuperación o muy cercanas. Las pequeñas oscilaciones de los niveles piezométricos producidas en esa situación hacen variar mucho los volúmenes de descarga de los acuíferos, o hacer que estas descargas cesen, lo que por ejemplo cambia totalmente el panorama si la recuperación se está relacionando principalmente con los caudales ambientales. En estas situaciones límite pueden producirse también diferencias importantes espacialmente, en cuanto a la existencia de estos caudales ambientales, entre unas zonas y otras.

Por tanto, la tabla-resumen adjunta (tabla 3) debe ser interpretada con suficiente cautela y sin olvidar las consideraciones anteriores. En dicha tabla se han intentado resumir los escenarios de explotación planteados, mostrando las previsiones de recuperación hidrológica

Tabla 3. Situación hidrológica alcanzada en los horizontes temporales considerados, para distintos escenarios de explotación. CTE: extracción constante; ESC: escalones de volumen de extracción; GRA: reducción gradual de las extracciones; Cifras de volúmenes de extracción en Mm^3/año; (l.p.): la cuarta cifra corresponde a la extracción a largo plazo; (sin c.c.): sin considerar efectos de cambio climático; (con c.c.): considerando efectos del cambio climático; A, B, C, D, E, F, G y escala de colores: indicadores de la situación alcanzada por el sistema para cada escenario (explicación en Tabla 4); Letras separadas con barra (por ejemplo, D/E): situación alcanzada intermedia a las dos indicadas; Letra entre paréntesis: situación que podría alcanzarse si la secuencia correspondiente es extremadamente húmeda.

Escenarios de extracciones	Situación 2015	Situación 2021	Situación 2027	Largo plazo (sin c.c.)	Largo plazo (con c.c.)
CTE–350	G (F)	G (F)	G (F)	G	G
CTE–275	F (E)	F (E)	F	F	F
CTE–200	F (E)	F (D)	E (D)	E	E / F
CTE–150	F (E)	E (D)	D (C)	D	D / E
CTE–100	E (D)	D (C)	C (B)	C	C / D
CTE–50	D / E (C)	C	B	B	B / C
CTE–0	C (A)	B (A)	A	A	A / B
ESC–275/200/150	F (E)	F (E)	E (D)	D	D / E
ESC–230/190/150/100 (l.p.)	F (E)	F (D)	E (D)	D	D / E
ESC–275/175/100	F (E)	F (E)	D / E (C)	C	C / D
ESC–250/200/150/100 (l.p.)	F (E)	F (E)	E (D)	C	C / D
ESC–275/225/175/125 (l.p.)	F (E)	F (E)	E / F (D)	C / D	D
GRA–350_25/100	F (E)	F (E)	D / E (C)	C	C / D
GRA–350_25/50	F (E)	F (E)	D (C)	B	B / C
GRA–275_5/100	F (E)	F (E)	F (E)	C	C / D
GRA–250_25/100	F (E)	E (D)	D (C)	C	C / D
GRA–250_25/50	F (E)	D / E (C)	C (B)	B	B / C

y medioambiental en cada caso, y para cada uno de los horizontes temporales analizados, incluyendo la previsión a largo plazo.

En la tabla 3, la columna de "Escenarios de extracciones" utiliza la nomenclatura ya definida previamente, distinguiendo entre escenarios de extracciones constantes (CTE); escenarios con escalones de 5, 6 y 6 años de extracciones constantes (añadiendo en algunos casos un cuarto escalón que determina un valor de la extracción constante a largo plazo) (ESC); y escenarios con reducción gradual de las extracciones anuales (GRA).

Las columnas restantes muestran, para cada escenario de extracciones, la situación prevista en cada uno de los horizontes temporales considerados: 2015 (5 años), 2021 (11 años) y 2027 (17 años), así como la previsión de la situación alcanzada con ese escenario a largo plazo, sin considerar los posibles efectos del cambio climático (sin c.c.), o teniéndolos en cuenta (con c.c.).

Para definir la situación hidrológica-medioambiental a la que se llega en cada caso, se han diferenciado 7 categorías, indicadas con las letras A, B, C, D, E, F y G. Los significados aproximados de cada una se muestran en la tabla 4.

Hay que recordar que los valores de extracciones tomados como referencia corresponden al conjunto de las tres masas de agua centrales de la CAG, con un reparto aproximado de 41 % para Mancha Occidental I, 49 % para Mancha Occidental II, y 10 % para Rus-Valdelobos.

Las letras indicadas entre paréntesis (Tabla 3) indican la situación que podría alcanzarse en ese escenario para el caso de que la secuencia meteorológica que se produjera hasta ese horizonte fuera extremadamente húmeda.

En algunas ocasiones se incluyen dos letras (por ejemplo, D / E), por ser especialmente difícil discernir entre las dos posibles situaciones alcanzadas. En esos casos, el color atribuido es el de la primera letra indicada.

Por otra parte, en el caso del largo plazo con consideración de cambio climático, se ha tenido en cuenta que la hipótesis utilizada es excesivamente pesimista, y en casi todos los casos se ha preferido asignar dos letras: la que existía sin la consideración del cambio climático, y la que resulta de la hipótesis realizada de reducir la recarga de la lluvia en el 11 %. A modo únicamente de convenio, se ha asignado el color de la hipótesis más favorable. Como se indicó anteriormente la incertidumbre de estos escenarios de cambio climático sólo puede irse reduciendo con los datos y análisis que se vayan realizando sobre la evolución del sistema, y con la mejora de los modelos de cambio climático a escala regional.

Situación	Color tabla	Valoración de la recuperación hidrológica	Extracción a largo plazo que representa (En Mm3/año)
A	Verde	Absoluta. Régimen natural. Niveles, descargas y zonas húmedas mayores que las conocidas en el siglo xx.	0
B	Amarillo	Prácticamente total. Recuperación al nivel de la situación existente a mediados del siglo xx.	50
C	Azul	Muy importante. Restablecimiento de la conexión de acuíferos con ríos y zonas húmedas, con una cierta vulnerabilidad, según las zonas, a las secuencias secas.	100
D	Rosa	Media. Comportamiento de la relación acuífero-río muy condicionado por la pluviometría y las zonas. Descargas en secuencias suficientemente húmedas.	150
E	Rojo	Ligera. Importante recuperación de niveles, pero en general las descargas sólo se producirían en secuencias muy húmedas.	200
F	Marrón	Mínima. Sólo recuperación de niveles, pero no lo suficiente para producirse descargas.	250-350
G	Gris	Nula. Mantenimiento de la situación actual.	350

Tabla 4. Valoración de la recuperación hidrológica del sistema para cada situación definida, y volumen de extracción de referencia correspondiente a cada situación.

En general, y con todos los matices que han sido expuestos, podría identificarse de alguna manera la recuperación ambiental de la CAG en los términos establecidos por la DMA, con los indicadores A, B y C (verde, azul y amarillo). El indicador D (rosa) quedaría bastante cercano, por lo que dependería de la secuencia climatológica, dada la importancia de la misma en periodos de tiempo tan reducidos como 5, 11 o incluso 17 años.

Una última consideración a realizar es que la recuperación hidrológica de la que aquí se habla está referida a la recuperación de los niveles piezométricos que vuelve a producir la conexión de los acuíferos con cauces superficiales y zonas húmedas, y por tanto las consiguientes descargas naturales de los acuíferos, y la evidente recuperación ambiental que ello supone. No es objeto del presente trabajo analizar las funciones ecológicas y medioambientales que puedan no ser recuperables a causa de otras acciones antrópicas o de fenómenos producidos como la combustión de las turbas.

CONSIDERACIONES FINALES

El presente trabajo ha tratado de analizar la posible evolución futura del sistema hidrológico de la CAG, y en concreto la viabilidad de su recuperación medioambiental, ligada a su vez a la recuperación de las descargas de los acuíferos y de la conexión de estos con las corrientes superficiales.

Para ello se han simulado una serie de escenarios futuros, determinados por la secuencia meteorológica que se produzca (en cuanto a pluviometría anual) y por la extracción anual de agua que se realice en las tres masas de agua subterránea centrales de la cuenca alta (Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos). Las secuencias meteorológicas, de diferentes características (húmedas, medias, secas), se han elegido a partir de las series históricas de precipitación media anual. Para las extracciones futuras se ha intentado simular diversas hipótesis que en conjunto permitieran tener una idea general de la evolución que puede esperarse del sistema.

Las simulaciones se han realizado mediante modelos empíricos elaborados a partir de los datos y resultados obtenidos en varios modelos numéricos de flujo subterráneo desarrollados en la CAG, y del conocimiento del funcionamiento del sistema en las diferentes situaciones en las que éste puede encontrarse. Para ello se ha analizado y cuantificado el comportamiento de los diferentes términos del balance hídrico en dichas situaciones.

La recuperación de los niveles piezométricos que permitiría recobrar la conexión entre los acuíferos y las corrientes superficiales depende del volumen de extracción que a largo plazo se establezca de una forma más o menos constante. El sistema evolucionará en cada momento desde la situación que tenga a una nueva situación de equilibrio caracterizada por un nuevo balance hídrico, al que corresponderá una determinada distribución de los niveles piezométricos.

A partir de las simulaciones realizadas (especialmente de los denominados *escenarios de equilibrio*) puede resumirse la situación a la que llegaría el sistema en función de los volúmenes extraídos de agua subterránea en el conjunto de las masas de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, de la siguiente manera.

— Extracción mantenida de 50 Mm^3/año. Recuperación prácticamente total. Las descargas de los acuíferos y superficies de zonas húmedas volverían a los niveles de mediados del siglo xx. Sus valores dependerían lógicamente de las secuencias climatológicas, que harían oscilar moderadamente los niveles piezométricos, recuperándose el funcionamiento autorregulador de los acuíferos de la cuenca alta.
— Extracción mantenida de 100 Mm^3/año. Recuperación muy importante. A largo plazo volvería también en este caso a recuperarse la conexión de acuíferos y corrientes superficiales y las zonas de descarga volverían a funcionar como tales. Las descargas, y por tanto la componente subterránea de la escorrentía y las superficies de zonas húmedas serían menores que en el caso anterior. El sistema sería más vulnerable a las secuencias secas, produciéndose estacionalmente el cese estas descargas. Esta vulnerabilidad a periodos de escasas precipitaciones dependerá de la zona y de la intensidad del periodo seco.
— Extracción mantenida de 150 Mm^3/año. Importante recuperación de los niveles piezométricos, pero comportamiento de la relación acuífero-río muy condicionado por la pluviometría. Los periodos de tiempo en los que existirán descargas del acuífero (por ejemplo en los Ojos del Guadiana), así como los volúmenes descargados y superficies de zonas húmedas serán bastante inferiores a los que his-

tóricamente se registraban hasta los años 70 del pasado siglo, con bastantes épocas en las que las descargas desaparecerán en muchas zonas.

— Extracción mantenida de 200 Mm^3/año. Notable recuperación de los niveles piezométricos respecto a la situación actual, pero sin poder considerar recuperado el sistema desde un punto de vista hidrológico y medioambiental, puesto que el nivel piezométrico *de equilibrio* que se alcanzaría no llega a ser suficiente para garantizar la conexión acuífero-ríos durante periodos de tiempo importantes. En secuencias climatológicas suficientemente húmedas sí llegarían a producirse estas descargas en muchas zonas.

— Extracciones mantenidas superiores a 225 Mm^3/año. Los niveles piezométricos estarían a largo plazo por encima de los actuales (si la cifra de extracciones se mantiene por debajo de 325-350 Mm^3/año), pero el funcionamiento del sistema seguiría siendo básicamente el mismo que el actual, totalmente alterado respecto al régimen natural y sin producirse conexión del acuífero con las corrientes superficiales en toda la zona central de la CAG.

Evidentemente, los resultados anteriores tienen un margen de incertidumbre y las cifras deben ser consideradas como meramente orientativas. No obstante, proporcionan un panorama bastante claro y fiable sobre la situación a largo plazo que se puede esperar en función de las decisiones adoptadas con respecto a la utilización de las aguas subterráneas. Además, la posible recuperación de los acuíferos requiere de una etapa más o menos larga de transición, durante la cual el contraste y actualización de las hipótesis formuladas, y el adecuado seguimiento y análisis de la evolución del sistema permitirá reducir los márgenes de incertidumbre y adaptar los modelos y previsiones existentes. A su vez, esto permitirá tomar decisiones más ajustadas a la realidad en la fase final de recuperación de los acuíferos. En este sentido, en el trabajo se hace hincapié en la necesidad de tener un conocimiento suficientemente aproximado de las extracciones reales de agua subterránea, espacial y temporalmente.

Los resultados anteriores hacen referencia a la posible recuperación del sistema hidrológico a largo plazo. Uno de los aspectos analizados es la posibilidad de que esa recuperación se produzca dentro de los horizontes temporales establecidos por la legislación, en concreto por la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea. Así, han sido analizadas las posibilidades de recuperación en los años 2015, 2021 y 2027. Las incertidumbres en este caso son notablemente mayores, puesto que los periodos de tiempo son suficientemente reducidos para estar muy condicionados por las secuencias climatológicas registradas. A este respecto, las secuencias simuladas reproducen secuencias históricas extremas (además de las medias) húmedas y secas. Por ello, los casos en que la recuperación sólo se produce en secuencias extremadamente húmedas, son excesivamente ficticios desde el punto de vista de considerar la recuperación hídrica y medioambiental del sistema. Parece más coherente vincular esta recuperación a secuencias medias en cuanto a precipitaciones. Como resumen de los escenarios analizados podría comentarse lo siguiente:

— Horizonte temporal 2015. En términos prácticos, y considerando el contexto actual, parece prácticamente imposible la recuperación en dicho plazo. Sólo un hipotético cese absoluto de las extracciones (incluidas las destinadas a abastecimiento) podría dar lugar a la recuperación del sistema. Un escenario climatológico que reprodujera los 5 años históricamente más húmedos, que además prolongaría el del año hidrológico 2009/10 que ha sido igualmente muy húmedo, podría conducir a ascensos espectaculares de los niveles piezométricos que quedarían muy cercanos a situaciones que podrían considerarse cercanas a la recuperación, pero en todo caso bastante ficticias. Desde el punto de vista de la posible recuperación en un plazo más largo, este periodo es importante de cara a reducir las extracciones hasta los valores más cercanos posibles a los que se estimen como objetivo final a mantener en el largo plazo, de acuerdo con los valores de referencia que se establecieron anteriormente.

— Horizonte temporal 2021. Con escenarios climatológicos medios la recuperación para ese año es difícil, a no ser que desde el principio se redujeran drásticamente las extracciones. Si desde el principio se consigue adoptar volúmenes de extracción como los indicados anteriormente en el análisis a largo plazo, los 11 años de este periodo, sin llegar a ser suficientes para alcanzar la denominada situación de equilibrio, sí que serían suficientes para conseguir un porcentaje muy alto del ascenso total esperable a largo plazo con esas extracciones. Por ejemplo, ante escenarios climatológicos medios, y con extracciones que desde el principio se acercaran a los 200 Mm^3/año, y en la media del periodo estuvieran por debajo de esa cifra, se produciría una recuperación muy notable de los niveles piezométricos. No podría hablarse de recuperación en 2021 en los términos establecidos por la DMA, pero dejaría la

situación favorable para conseguirlo en el siguiente periodo de 6 años en el caso de que se consiguiera reducir a otro escalón inferior dicho nivel de extracciones. Para poder hablar de recuperación con una climatología media, sería necesario que en los 11 años que abarca este periodo las extracciones estuvieran claramente por debajo de los 100 Mm^3/año. En todo caso, un periodo de 11 años sigue siendo muy sensible a la climatología, y así una secuencia extremadamente húmeda (al nivel del máximo histórico en 11 años consecutivos) produciría una recuperación de niveles hasta recobrar en muchas zonas los niveles de descarga de los acuíferos, con cifras de extracción de unos 200 Mm^3/año.

— Horizonte temporal 2027. Aun con la necesidad de reducción de las extracciones a niveles muy bajos en comparación con los estimados en las últimas décadas, el año 2027 parece un horizonte más realista para contemplar una recuperación real de los niveles piezométricos que produzca la correspondiente recuperación medioambiental, al menos en lo que respecta a la conexión de acuíferos y corrientes superficiales. Si desde el principio se establece un volumen de extracciones mantenido en el tiempo, en los 17 años del periodo se alcanzaría prácticamente la situación de equilibrio mencionada en los casos anteriores, por lo que la situación obtenida en cada caso (con cada volumen de extracción mantenido constante) sería la que se describió anteriormente. No obstante, el resultado al final del periodo de 17 años está todavía bastante influenciado por la secuencia climatológica, de forma que un periodo demasiado seco haría que el objetivo no se cumpliera.

  Si en lugar de considerar una extracción mantenida constante desde el principio se va reduciendo ésta gradualmente, podemos encontrar (siempre hablando de secuencias climatológicas medias) algún escenario en el que se consiga el objetivo de recuperación, pero pasaría porque hubiera una etapa final suficientemente larga (por ejemplo los últimos 12 años) en los que las extracciones no superen los 100 Mm^3/año, dedicándose los 5 primeros años a alcanzar gradualmente dicho nivel de extracciones. En todo caso hay que recordar que en estos plazos no suficientemente largos, y siempre considerando estos volúmenes de extracción suficientemente reducidos, las características climatológicas del periodo tienen una importancia decisiva para conseguir el objetivo más o menos rápidamente.

La tabla-resumen incluida en el apartado anterior, y las consideraciones allí realizadas, dan una idea más detallada de la posibilidad de recuperación del sistema ante los diferentes escenarios planteados.

La recuperación estricta del sistema lleva asociado el cumplimiento de indicadores bastante específicos, como son los de caudales ambientales mínimos en zonas como las Tablas de Daimiel. No hay que perder de vista que la gran sensibilidad del sistema (y en concreto de las descargas de los acuíferos) a pequeñas variaciones piezométricas en las situaciones en que el sistema puede considerarse en el límite de la recuperación, hacen que no tenga mucho sentido relacionar de forma más o menos precisa volúmenes de extracción y secuencias climatológicas futuras con aspectos de detalle cuantitativos relacionados con los volúmenes de descarga en puntos concretos, superficie de determinadas zonas húmedas, etc., que en todo caso habría que desarrollar de forma muy específica para dichas zonas y con una escala y nivel de detalle muy exigentes. No obstante, los escenarios analizados y las cifras aportadas sí suponen una referencia a seguir para conseguir llegar a dicha situación límite en cuanto a recuperación ambiental.

En lo contemplado hasta aquí en estas consideraciones finales no ha sido tenido en cuenta el posible efecto futuro del cambio climático. Su repercusión ha de ser considerada en los estudios que en adelante se realicen sobre la evolución futura del sistema hidrológico. Las incertidumbres sobre los modelos de cambio climático existentes, especialmente cuando descendemos a niveles regionales, son muy altas, y aun lo son más en cuanto a su afección en una cuenca con tanta importancia de la componente subterránea del recurso. En el presente trabajo se ha hecho una simulación considerando un escenario de cambio climático aparentemente muy desfavorable, que supone trasladar a la recarga de la lluvia el 11% de disminución sobre la aportación natural de referencia indicado por la Instrucción de Planificación Hidrológica. Esta hipótesis supone reducir en cerca de 50 Mm^3 el valor medio anual de la recarga procedente de la lluvia en el conjunto de la cuenca alta del Guadiana (algo más de 30 Mm^3/año en las tres masas centrales). No es una cifra despreciable, y supondría la necesidad de reducir aún más las extracciones para conseguir los mismos objetivos. En todo caso, la incertidumbre relativa al cambio climático requiere un adecuado seguimiento de la evolución del sistema en los próximos años y una mejora en los modelos existentes de cambio climático a escala regional.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

IGME (2010) *Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME*. Encomienda de gestión para la realización de trabajos cinetífico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Estudio complemetario. Instituto Geológico y Minero de españa y Dirección General del Agua. 69 pp.

Martínez Cortina, L. (2001). *Estimación de la recarga en grandes cuencas sedimentarias mediante modelos numéricos de flujo subterráneo. aplicación a la cuenca alta del Guadiana*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 418 pp

PROPUESTA DE DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN DE UN CONJUNTO DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

Juan Antonio López Geta

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Informe sobre la propuesta de declaración de sobreexplotación de un conjunto de masas de agua subterránea situadas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Responsable:

Juan Antonio López Geta. Instituto Geológico y Minero de España

Realización: Instituto Geológico y Minero de España

Antonio González Ramón
Claus Kohfahl
Crisanto Martínez Montañés
Juan Carlos Rubio Campos
Sergio Martos Rosillo
Loreto Fernández Ruiz

PROPUESTA DE DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN DE UN CONJUNTO DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR

INTRODUCCIÓN

El estudio que aquí se presenta, se formula para ofrecer apoyo técnico a la actualización de los planes hidrológicos de cuenca en materia de aguas subterráneas, y mas concretamente como asesoramiento experto a la Oficina de Planificación de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, con el fin de evaluar el estado, en cuanto a su posible declaración de sobreexplotación o en riesgo de estarlo, de las masas de agua subterránea de:

05.04. Huéscar-Puebla de D. Fadrique
05.23.Úbeda
05.24. Bailen-Guarromán-Linares
05.25.Rumblar
05.38. El Pedroso-Arcas
05.41.Guadahortuna-Larva
05.43. Sierra y Mioceno de Estepa
05.49. Niebla-Posadas

El procedimiento para la declaración de acuíferos sobreexplotados está recogido en el artículo 56 y en el 87.2 del Texto Refundido de la Ley de Aguas y en el artículo 171.2 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 606/2003, de 23 de mayo), que establece: "A los efectos previstos en el apartado anterior, se considerará que los recursos subterráneos de una zona están sobreexplotados o en riesgo de estarlo cuando se dé algunas de las siguientes condiciones:

— Que se esté poniendo en peligro la subsistencia de los aprovechamientos de aguas subterráneas existentes o de los actuales ecosistemas directamente asociados a esta agua que hayan sido objeto de delimitación y posterior declaración conforme a la legislación ambiental, como consecuencia de que se vinieran realizando en los acuíferos de la zona, extracciones medias anuales superiores o muy próximas al volumen medio interanual de recarga.
— Que se vengan realizando extracciones que generen un deterioro significativo de la calidad del agua.
— Que el régimen y concentración de las extracciones sea tal que, aún no existiendo un balance global desequilibrado, se esté poniendo en peligro la sostenibilidad de los aprovechamientos a largo plazo.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de prescribir el estado en que se encuentran las diferentes masas de aguas subterráneas (en adelante MASb) incluidas en este estudio, en los términos que señala en el artículo 56 y en el 87.2 del texto Refundido de la Ley de aguas y en el artículo 171 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 606/2003, de 23 de mayo de Aguas), se ha desarrollado una metodología basada en determinar el balance hídrico en cada masa de agua subterránea o sectores y/o estudiar la evolución de los niveles piezométricos a lo largo de los años en esas masas o sectores de éstas, lo que permitió conocer el grado de influencia de los aprovechamientos en la evolución de los niveles piezométricos en el acuífero. En el caso de cumplirse alguno de los supuestos recogidos en la legislación, la MASb o los acuíferos o sectores identificados en ella podrán ser propuestos para ser declarados sobreexplotados o en riesgo de estarlo.

Para ello, se han desarrollado las siguientes actividades:

— Recopilación de la información geológica e hidrogeológica existente en la zona donde se ubica la masa.
— Recopilación de los datos aportados por las redes piezométricas, ubicación, características hidrogeológicas de cada uno de esos puntos, series históricas de niveles de agua y temporalidad.
— Recopilación de los datos fisico-químicos de las aguas subterráneas, red de control disponible y temporalidad de las series históricas de datos.
— Recopilación de las entradas de agua a cada un de las MASb, procedentes de la infiltración del agua de lluvia, de los retornos de riego o de entradas laterales procedentes de otras MASb.

— Recopilación de las extracciones mediante bombeos, salidas por manantiales, a ríos, por evapotranspiración o laterales a otros acuíferos.
— Recopilación del balance hídrico y grado de contaminación de las aguas aguas subterráneas.

Se ha realizado un diagnostico de la situación de cada MASb, en cuanto su grado de conocimiento, especialmente en lo que se refiere a las características de la geometría de la masa o de los acuíferos identificados en cada una de ellas, parámetros hidráulicos, funcionamiento hidrodinámico, elementos del balance hídrico, e información piezométrica físico-química de sus aguas.

DECLARACIÓN DE SOBREEXPLOTACIÓN

Con la información disponible se ha tratado de responder a los diferentes supuestos contemplados en la normativa vigente, para definir que una masa de agua subterránea está sobreexplotada o en riesgo de estarlo.

En general, el conocimiento hidrogeológico existente de cada una de las MASb contempladas en este estudio, es muy diferente para cada una de ellas. Resaltan el gran desconocimiento de aspectos tan importantes e imprescindibles como la escasez de información actualizada sobre la infiltración del agua de lluvia o de los retornos de riego, no disponiéndose de series pluviométricas de años representativos, ni la valoraciones de esa infiltración para periodos de lluvia secos o húmedos, ni el grado de aprovechamiento de los recursos hídricos y su distribución espacial o la inexistencia en la gran mayoría de las MASb de redes de control piezométrico o de composición de las aguas, con registros históricos muy limitados, o en el caso de disponerse de estos datos, ponen en evidencia la caótica distribución de los puntos de control dejando grandes zonas sin ningún punto de control.

Estas carencias de información condicionan establecer con suficiente fiabilidad la situación actual de cada una de estas MASb, lo que dificulta la toma de decisión en cuanto a su declaración como sobreexplotada en su totalidad, aumentando esta dificultad aún más, la posible diferenciación de acuíferos o sectores independientes en esas masas de aguas subterráneas. Aunque con esa debilidades se ha considerado como más adecuado declarar como sobreexplotado todo el territorio abarcado por la MASb estudiada, con la convicción de que esta medida ayudará a una mejor gestión de ésta y a su recuperación, dejando pendiente su sectorización a la elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, estableciendo en cada uno de los sectores identificados, unas condiciones especificas de aprovechamiento o en su caso la aplicación de la Norma de explotación o de aprovechamiento, en el caso de existir o elaborarla si no se dispone de ella.

En los puntos siguientes se incluye la propuesta de declaración para cada una de las MASb, y los fundamentos técnicos en los que se basa y que corresponden a las principales consideraciones hidrogeológicas de la MASb.

PROPUESTAS

MASb 05.04. Huéscar-Puebla de Don Fadrique

La evolución piezométrica, e hidrométrica de los manantiales en la MASb de Huéscar-Puebla en los últimos años, así como el balance hídrico, particularmente en los períodos de sequía, ponen de manifiesto problemas en el drenaje natural de los manantiales mas destacados, el de Fuencaliente, con reducciones muy importantes en el caudal disponible para satisfacer las demandas y los ecosistemas asociados al drenaje del manantial y el de Parpacén con problemas puntuales. Esta situación conlleva a tomar como medida para corregir esta situación indeseable y garantizar los aprovechamientos existentes de aguas subterráneas, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos o sectores definidos en ésta, especialmente en lo referente al grado de explotación.

Fundamentos

Para valorar la situación de la MASb se han aplicado los criterios seleccionados, de análisis de la evolución piezométrica e hidrométrica y su comparación en los sectores diferenciados con el balance hídrico y con los datos disponibles sobre bombeos en diferentes períodos (a destacar el período entre 1994/95 y 2002/03, en el que las explotaciones alcanzaron máximos de 8,67 hm^3/año). Estos sectores están constituidos por los dos tipos de acuíferos, a priori, en conexión hidraúlica, el primero de ellos constituido por los materiales carbonáticos jurásicos subbéticos, permeables por fisuración-karstificación y el segundo por los materiales detríticos plio-cuaternarios que se encuentran rodeando a los anteriores y en principio en conexión hidráulica

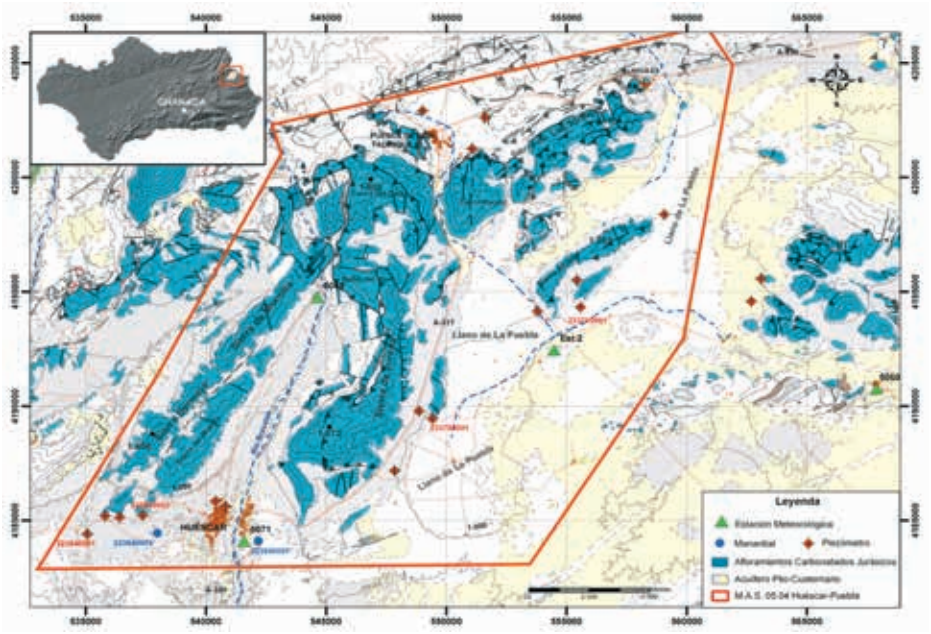


Figura 1. Contexto hidrogeológico de la MASb 05.04 Huéscar-Puebla y ubicación de los puntos de medida piezométricos y de hidrometría y estaciones meteorológicas.

(figura 1). En estos materiales se han identifican tres sectores sin conexión hidráulica, denominados como: Sector de Huéscar (manantial de Parpacén); el Sector del Llano de la Puebla (manantial de Fuencaliente) y el Sector Norte detrítico.

Para analizar la piezometría e hidrometría, se partió de los datos correspondientes al periodo 1969-2009; si bien este periodo de registro presenta medidas no continuas en el tiempo, ni disponibles por igual en el espacio temporal analizado, para todos los piezómetros y manantiales (tablas 1,2 y3). Esta información pone de manifiesto un comportamiento distinto en las evoluciones de los piezómetros ubicados en el Llano de la Puebla y los situados en las proximidades del pueblo de Huéscar. En el Llano de la Puebla, los piezómetros revelan un periodo de ascenso en el nivel desde 1969-1974, causado por la sucesión de precipitaciones netamente superiores a la media. A partir de 1974 hasta 2009 se observa una tendencia descendente, con ciclos de ligero ascenso motivados por las importantes lluvias de 1989 y 1996 (figura 2). El descenso total resulta del orden de 25 m, con un ritmo incrementado en los últimos años de la serie, principalmente por las extracciones de regadío en el Llano de la Puebla.

Nº	Código del punto	Denominación	X UTM (Huso 30)	Y UTM (Huso 30)	Cota (m s.n.m.)	Prof (m)	Periodo de medida
1	05.04.001	233710008	548954	4202694	1165	80	Dic 80- 2009
2	05.04.002		550237	4197289	1066	153	Dic 07-2009
3	05.04.003	233760001	554756	4194232	995	120	Oct 69-2009
4	05.04.004	Cortijo Don Andrés	550619	4189470	997	150	Ene 07-2009
5	05.04.007	223840003	536510	4185160	945	144	Ene 69-2009
6	05.04.009	223840001	535091	4184411	955	301	Oct 69-2009
7	05.04.010	223840005	536469	4185139	945	152	May 69-2009
8	05.04.012	2338/1/0005	547946	4187164	995		Mar 02-2009
9	05.04.013	2337/5/0013	548838	4189851	1010		Ene 02-2009

Tabla 1. Red Piezométrica de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

Nº	Código IGME	Denominación	X UTM (Huso 30)	Y UTM (Huso 30)	Cota (m s.n.m.)	Periodo de medida
1	05.04.01H	Fuencaliente (2238.4.0007)	542190	4181490	918	Sept 66-Sept 08
2	05.04.02H	Parpacén (2238.4.0009)	537875	4184450	931	Sept 66-Sept 01

Tabla 2. Red Hidrométrica de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

.Nº	Código punto	Denominación	X UTM	Y UTM	Tipo de punto	Tipo de Red
1	5.04.01	Fuencaliente de Huéscar	542194	4184143	Manantial	General
2	5.04.11	Sondeo San Gregorio	550870	4202210	Sondeo	Prepotables
3	5.04.21	Finca La Parra	549143	4188891	Sondeo	Nitratos

Tabla 3. Red de Calidad de la MASb 05.04.Huéscar-Puebla de D. Fadrique

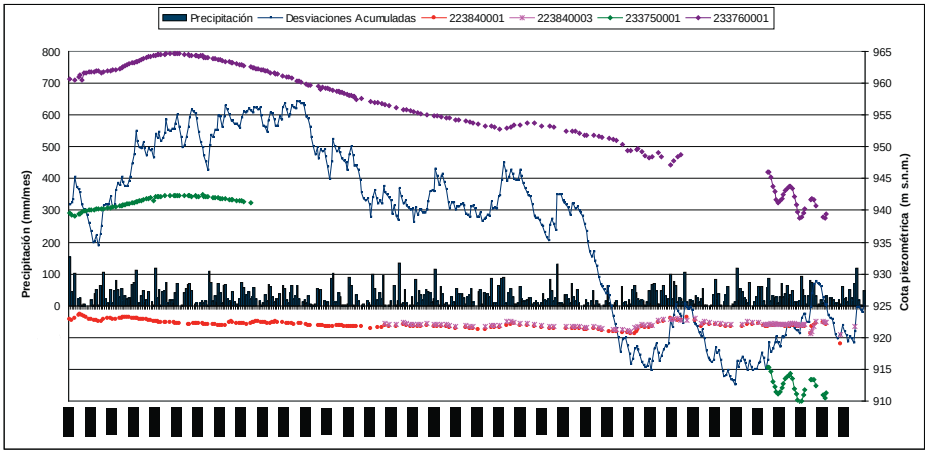


Figura 2. Evoluciones de los piezómetros más representativos y relación con las precipitaciones y sus desviaciones acumuladas respecto de la media (datos mensuales).

Respecto a la evolución hidrométrica, el régimen de descarga de los dos manantiales es también muy diferente. Así, el manantial de Parpacén tiene una evolución similar a los piezómetros del Sector de Huéscar, mientras el manantial de Fuencaliente es afín a los piezómetros ubicados en el Sector del Llano de la Puebla. De la evolución de las desviaciones acumuladas respecto a la media de la precipitación mensual (figura 3) desde el año 1982/83 y la evolución de niveles y de la evolución del manantial de Fuencaliente hasta 1992/93, se observa una alternancia de 4 años entre ciclos secos y húmedos. A partir de 1992/93, la alternancia de períodos secos y húmedos aumenta de amplitud entre 7 y 8 años. En esta etapa destacar el período entre 2000/01 y 2003/04 que aun siendo húmedo, los niveles y el caudal de Fuencaliente tienden al descenso. En los últimos cinco años la tendencia disminuye desde el 2003-2004, casi se llega a estabilización, a pesar del período seco 2003/2004 y 2007/2008.

Toda la MASb de Huéscar-Puebla, se ha visto sometida a una fuerte explotación en los últimos años, principalmente la zona del Llano de la Puebla (acuífero principal), provocando descensos importantes tanto en el nivel piezométrico como en el caudal del principal manantial: Fuencaliente. La evolución de este manantial es claramente descendente desde 1974 como se ha indicado anteriormente, teniendo una evidente relación con dicho comportamiento, el incremento en la explotación que se venía produciendo en este sector para regadío, a partir de los años 1982/83.

La evolución de la explotación ha sido muy evidente, en 1970 no existía y se ceñía exclusivamente a la utilización del agua de los principales manantiales, los cuales arrojaban un volumen de 18 hm^3/año.

El último balance hídrico realizado en la MASb fue en el 2001. Las entradas fueron estimadas en 30 hm^3/año, mientras que las salidas se producían a través de manantiales y sondeos surgentes (16 hm^3/año), por bombeos (7,2 hm^3/año) y a través de descargas ocultas (6,8 hm^3/año).

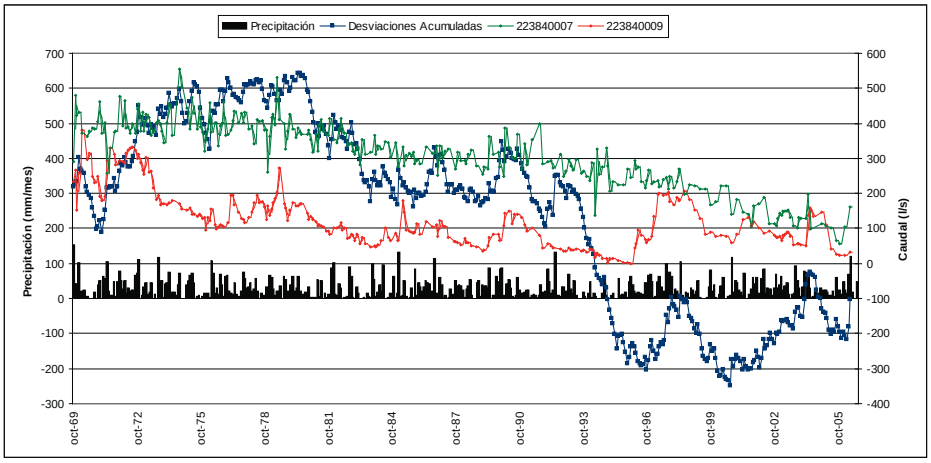


Figura 3. Evoluciones hidrométricas y su relación con las precipitaciones y sus desviaciones acumuladas respecto de la media (datos mensuales).

En resumen el sector de los Llanos de la Puebla en relación con el manantial de Fuencaliente, es el que presenta, con claridad, riesgo de sobreexplotación.

En relación con el sector relacionado con el manantial de Parpacén (englobaría la margen derecha del río de Huéscar, Sierra del Muerto, Sierra Bermeja y Sierra de Montilla), se señala una correspondencia entre el caudal del manantial y las desviaciones acumuladas de la precipitación, señalando que las tendencias al descenso y ascenso de caudales coinciden en el tiempo con los periodos secos y húmedos, así como que la influencia de las explotaciones por bombeo debe ser pequeña. Se señala un balance en el periodo 1970-71 a 2006-07 (37 años) para el sector situado al oeste del río Bravatas en relación con Parpacén, de 3,44 hm^3/año y unas aportaciones estimadas por infiltración para el conjunto de 3,78 hm^3/año. Para el periodo 1951/52 a 2006/2007 (56 años), las aportaciones por lluvia al acuífero se estiman en 4 hm^3/año. Se considera que como cifra prudente para conservar el manantial no superar para el sector el 10 % del volumen correspondiente al caudal medio real histórico del manantial de Parpacén (108,5 L/s). Además se debe seguir la recomendación incluida en la norma de explotación de la CHG-IGME (2001) de no realizar ninguna captación dentro de un radio circular al manantial de 2000 metros.

Sobre el acuífero del sector detrítico y afloramientos asociados donde se encuentra el núcleo urbano de Puebla de Don Fadrique es preciso diferenciar el sector detrítico donde se encuentra el núcleo urbano de la Puebla de D. Fadrique y formaciones geológicas interrelacionadas, independizado del sector principal del Llano de La Puebla por el cabalgamiento del Subbético sobre el Prebético. Éste presentaría unos recursos renovables muy reducidos (pendiente de evaluar, pero posiblemente en torno a 1 hm^3/año), si bien la explotación es muy incipiente.

Recomendaciones

Sería de interés un seguimiento de la evolución de niveles, al menos en 8 puntos estratégicos a seleccionar y de todas las explotaciones concedidas mediante la instalación de contadores, así como el control del drenaje de los manantiales de Parpacén y Fuencaliente. La frecuencia de medidas deberá ser al menos con carácter mensual salvo los manantiales de Parpacén y Fuencaliente, cuyo control se propone en continuo mediante la instalación de data logger.

Para el acuífero detrítico y los afloramientos asociados donde se encuentra el núcleo urbano de Puebla de Don Fadrique, se recomienda una actualización del inventario de puntos de agua y de las explotaciones que debe ser exhaustiva, así como la realización de un balance de entradas al sector, lo que permitirá evaluar la presión a la que está sometido este sector en la actualidad.

Para el acuífero principal o de Los Llanos se propone la comparación de la evolución de niveles, explotación y del drenaje de Fuencaliente, con los resultados previstos en el modelo matemático temporalmente.

Para el acuífero situado al oeste del río Bravatas, en relación con el manantial de Parpacén, se propone también la comparación de resultados entre drenaje de este manantial y bombeos en el sector, cada dos años.

MASb 05.23. Úbeda

Teniendo en cuenta la evolución piezométrica en el conjunto de acuíferos de la Loma de Úbeda y el gra-

do actual de explotación, que podría superar los 40 hm^3 anuales, se observa un déficit anual explotación vs. recarga del orden de unos 14 hm^3 anuales. Esto conlleva, como medida para reducir ese exceso de explotación en un volumen similar que permita alcanzar un equilibrio en el balance, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del Plan de Ordenación de las Extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos definidos en ésta, especialmente en lo referente al grado de explotación y la composición de sus aguas. Una alternativa a la declaración de sobreexplotación podría ser la aplicación de la norma de explotación de esta masa de agua subterránea.

Fundamentos

La valoración de los criterios utilizados para determinar el estado de la MASb, evolución piezométrica y balance hídrico, descensos de niveles de agua en los acuíferos en la Loma de Úbeda, indica diferencias, entre las formaciones de areniscas y conglomerados triásicos (Buntsandstein), y las constituidas por carbonatos jurásicos y areniscas y calcarenitas del Mioceno (figura 4).

El síntoma más significativo del elevado grado de explotación existente, es el descenso continuado de niveles piezométricos que se ha venido registrando en el acuífero jurásico desde que, en 1996, se obtuvieron los primeros datos. Del acuífero triásico se desconocen en detalle las características litológicas y geométricas bajo los carbonatos jurásicos, si bien, se sabe que es captado por diversos sondeos situados en la margen izquierda del río Guadalimar, y por la mayoría de los sondeos situados en su margen derecha bajo los carbonatos jurásicos, donde es el principal acuífero explotado.

La información más antigua sobre la morfología de la superficie piezométrica del acuífero jurásico (fisurado y kárstico) corresponde a un periodo situado entre marzo y junio de 1996. Con estos datos se pudo trazar, por primera vez, un mapa de isopiezas (figura 5) que muestra la situación en los inicios del proceso de explotación intensiva de recursos que el acuífero sufrió en los años posteriores. No se dispone de ninguna información sobre la piezometría del acuífero en condiciones no influenciadas por los bombeos. Las isopiezas muestran la existencia de un conoide de bombeo al sur del acuífero en la zona confinada, al este de Torreperogil. En esta zona, se construyeron algunos de los primeros sondeos de gran profundidad, capaces de apor-

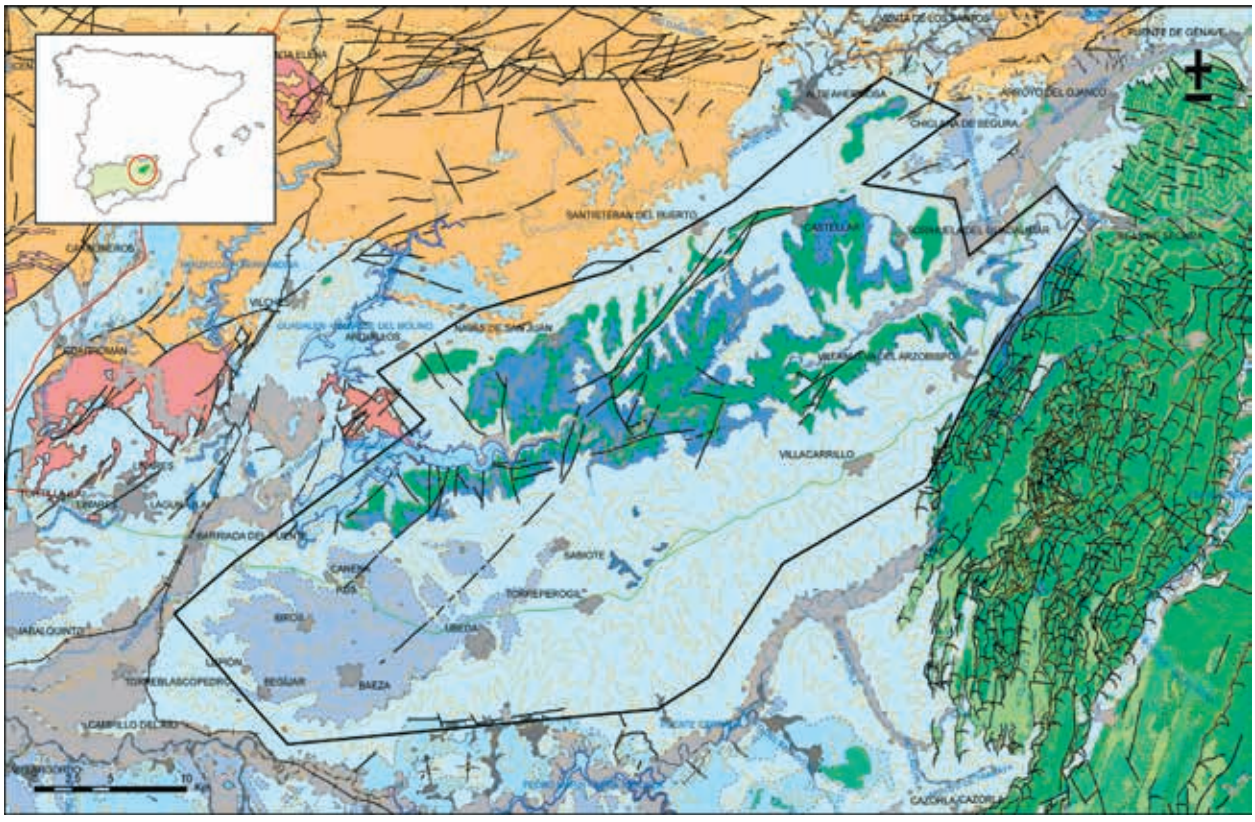


Figura 4. Mapa de formaciones permeables de la MASb 05.23 Úbeda

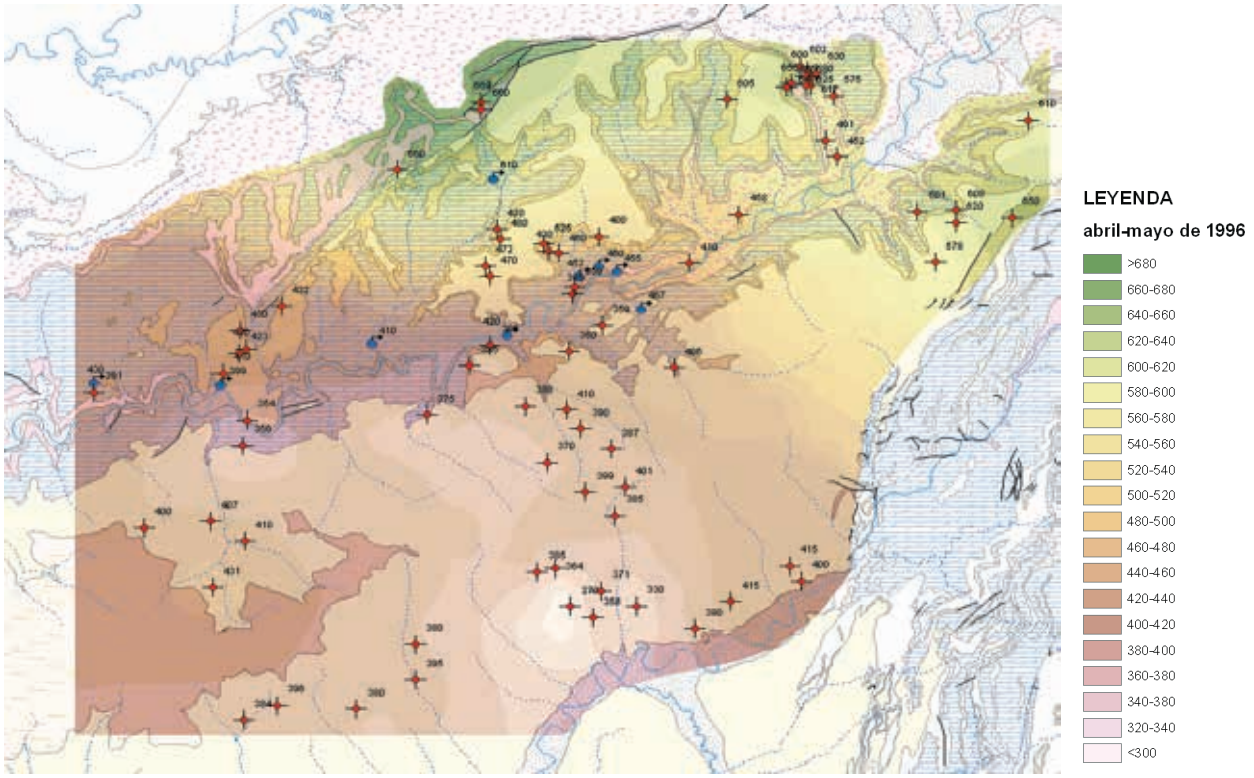


Figura 5. Plano de isopiezas del acuífero jurásico y triásico de la Loma de Úbeda. Periodo abril-mayo de 1996

tar elevados caudales. En la margen izquierda del río Guadalimar, cerca de su cauce, se observan dos zonas deprimidas en las que el nivel se sitúa a menos de 370 m s.n.m. Se trata de los únicos sectores donde el nivel piezométrico está bajo el cauce del río Guadalimar y podría indicar vías de alimentación preferente hacia el acuífero confinado jurásico. La ausencia de datos en un amplio sector al sur de estas zonas impide precisar mejor esta cuestión. Finalmente, se intuye la presencia de un domo piezométrico bajo el acuífero mioceno, que parece indicar la presencia de recarga diferida proveniente de este acuífero.

En marzo de 2004, a partir de los datos disponibles, se observa un descenso generalizado de niveles en todo el acuífero jurásico con respecto a los datos de 1996. Con reservas, este descenso puede cifrarse en cerca de 20 m en la zona central del acuífero jurásico libre, aunque afecta al acuífero triásico, en unos 15 m junto al río Guadalimar en su margen izquierda, y en más de 50 m al sur de Torreperogil y en el entorno de Villacarrillo y Villanueva del Arzobispo.

En cuanto al segundo de los criterios utilizados, las extracciones en el *acuífero jurásico*, fueron estimadas por primera vez en el año 1998-99, alcanzando una cifra de 18,2 hm^3. En una nueva estimación realizada en el año 2001 la extracción global por bombeo superó los 28 hm^3/año, que incluye extracciones realizadas en los tres acuíferos. En 2003 se realizó una nueva estimación de 35,5 hm^3/año para el acuífero jurásico. Finalmente, en 2006 se calculó que el volumen posible de extracciones para el conjunto de acuíferos de la MASb podría situarse en torno a 60 hm^3/año.

En 2007 se realizó un modelo matemático del que, como conclusión más relevante, se deduce la existencia de un déficit en el acuífero jurásico cercano a 14 hm^3/año.

Para el *acuífero mioceno*, el resultado es unas entradas por infiltración de agua de lluvia de 6,7 hm^3/año y unas salidas por manantiales de 1,0 hm^3/año y por bombeos entre 2,1-4,4 hm^3/año, lo que supone un total de entre 3,1-5,4 hm^3/año. Esta diferencia entre entradas y salidas (1,3 a 3,6 hm^3/año) podría corresponder a drenajes o zonas de rezume dispersas no conocidas y a infiltración sobre niveles acuíferos más profundos (en parte a través de los sondeos que los comunican, como ya se ha comprobado en algunos casos), aunque tampoco se puede descartar que la infiltración por lluvia esté algo sobrevalorada, siendo difícil más precisión con los datos disponibles para este tipo de materiales.

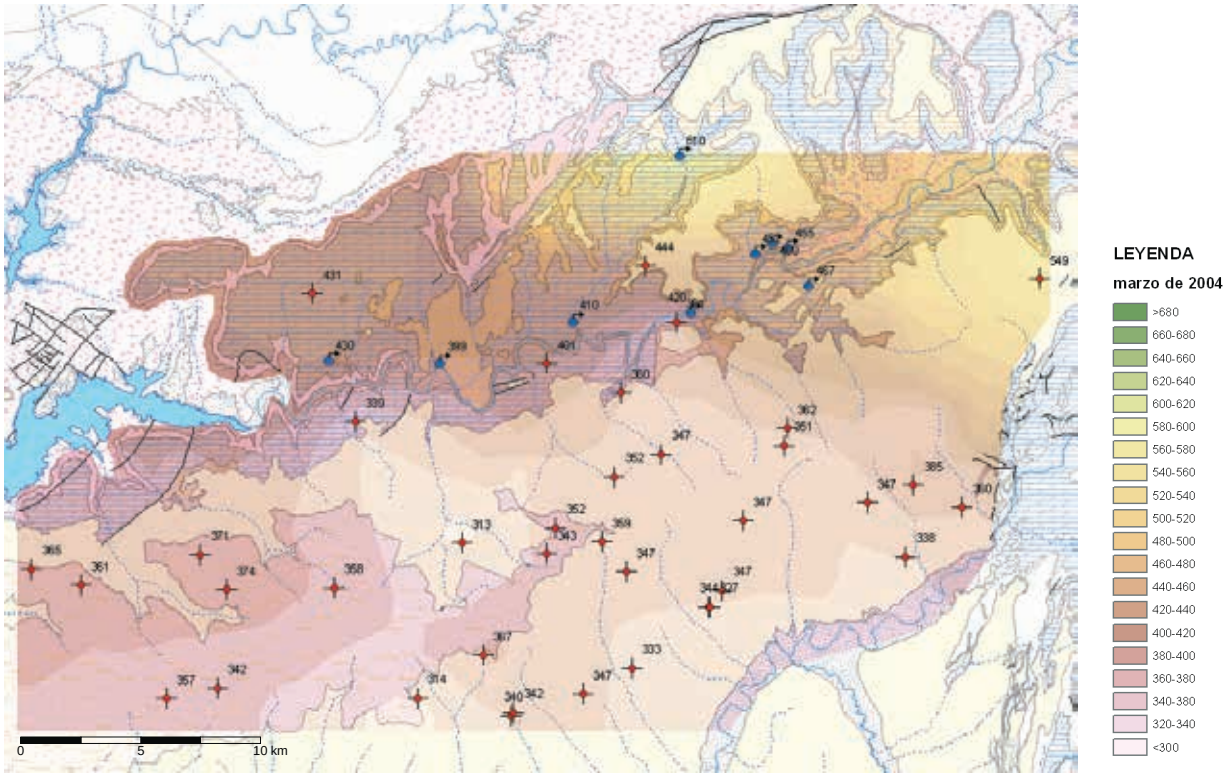


Figura 6. Plano de isopiezas del acuífero jurásico y triásico de la Loma de Úbeda. Periodo marzo de 2004

Recomendaciones

Las actuaciones futuras deben ir enfocadas a cubrir las lagunas de información existentes, especialmente importantes en lo que respecta al conocimiento de la geometría de los acuíferos confinados (acuíferos bajo el recubrimiento de margas miocenas, donde precisamente se produce la mayor explotación) y al seguimiento de la evolución de los niveles piezométricos en estos mismos acuíferos, cuestión que puede resolverse mediante la construcción de sondeos de investigación que posteriormente sean utilizados como piezómetros, pues con la excepción de los sondeos realizados por el IGME en el entorno del río Guadalimar, no existen piezómetros de control construidos para tal fin. Las medidas en la zona confinada son muy complejas, pues la mayoría de los sondeos están instalados, no disponen de tuberías piezométricas y los niveles piezométricos están muy profundos. Existe información piezométrica que cubre gran parte del acuífero jurásico en 1996, 2001 y 2004, y de la red de control en una serie de piezómetros puntuales que el IGME ha mantenido, pero es necesaria una actualización de información que permita conocer la situación presente.

Apenas se conoce la morfología de la superficie piezométrica ni su evolución temporal en el acuífero triásico en la margen derecha de río Guadalimar, y se trata del acuífero más explotado en este sector. Además, las últimas investigaciones sugieren que este acuífero podría ser una fuente importante de recarga del acuífero jurásico, gracias a los juegos de fracturas existentes.

La investigación de las pautas de recarga presenta gran complejidad debido a la interacción entre los tres acuíferos y el río Guadalimar y, pese a los trabajos realizados, aún no está suficientemente bien conocida. Los acuíferos de la Loma de Úbeda están delimitados y atravesados por importantes ríos que presentan gran variabilidad anual e interanual en sus caudales. El aprovechamiento de los caudales en crecida puede mejorarse enormemente mediante la utilización de la recarga artificial, ya que la situación de estos acuíferos respecto a los ríos es idónea. Su viabilidad fue ya puesta de manifiesto en estudios anteriores. Debe plantearse como objetivo futuro, la instalación de un operativo experimental de recarga para evaluar la capacidad real de almacenamiento en diversos sectores del acuífero.

El acuífero mioceno también es poco conocido desde el punto de vista piezométrico, por lo que deben acometerse trabajos enfocados a definir su piezo-

metría tanto desde el punto de vista espacial como temporal.

Es necesario acotar los volúmenes de explotación actuales y los principales puntos de bombeo, labor muy compleja por el gran número de sondeos existentes.

05.24. Bailén-Guarromán-Linares

Si se tiene en cuenta exclusivamente el grado de explotación de la MASb en su conjunto, el agua extraída por bombeo (24,19 hm^3/año para el año 2008 y 29,80 hm^3/año para el 2009), excede en gran medida los recursos renovables calculados (entre 14,0 y 16,8 hm^3/año), alejándose del concepto de uso sostenible. En consecuencia, la medida preventiva más adecuada es la declaración de sobreexplotación del conjunto de la MASb, proponiéndose como medida alternativa la aplicación de la norma de explotación que tenga en cuenta en cada acuífero de los que forman la MASb, entre otras, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección u otros usos y las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

Fundamentos

La información disponible es la referida únicamente a una situación puntual en el tiempo (enero de 2000) y aunque refleja un importante descenso de la superficie piezométrica en la zona sur del acuífero, se desconoce si se trata de una situación excepcional o si ha tenido una continuidad en los 10 años transcurridos hasta la actualidad. El no disponer de la ubicación de las captaciones de agua subterránea, hace que no sea posible discriminar entre los dos acuíferos que integran la MASb (Bailén-Guarromán y Linares) por lo que podría darse el caso de que uno de ellos se encuentre en riesgo de sobreexplotación y el otro no, a lo que habría que añadir un cierto grado de incertidumbre en cuanto a la relación hidrogeológica entre ambos acuíferos.

No existe ningún punto de la red actual de piezometría en la MASb. Tampoco existe red hidrométrica oficial de manantiales dentro de su poligonal envolvente. Con los datos de profundidad del nivel piezométrico de la base de datos AGUAS del IGME para enero de 2000, se trazó un mapa de isopiezas, (figura 7) que refleja que las líneas isopiezas dibujan un importante conoide de descenso en la zona sur del acuífero, quedando la zona norte con cierta falta de información. La falta de puntos de control piezométrico en este acuífero hace que se desconozca la evolución temporal de la piezometría.

Dentro de la MASb existen dos puntos pertenecientes a la red de seguimiento del Estado Químico del Agencia Andaluza del Agua (AAA). El agua del acuífero de Bailén-Guarromán es de facies bicarbonatada cálcica o cálcico-magnésica con algún caso de agua sulfatada cálcica posiblemente debido a la comunicación del acuífero mioceno con el superficial, más rico en sulfatos, mientras que el acuífero de Linares presenta una facies bicarbonatada cálcica con un total de sólidos disueltos inferior a 500 mg/L.

Las entradas de agua a ambos acuíferos se deben principalmente al drenaje diferido de los materiales suprayacentes al acuífero, y en menor medida a la infiltración directa del agua de lluvia. Así, considerando el balance incluido en la norma de explotación de la unidad hidrogeológica 05.24 (Bailén-Guarromán-Linares), actualizada y modificada. (2001), las entradas en el conjunto de la MASb suponen entre 14,0 y 16,8 hm^3/año.

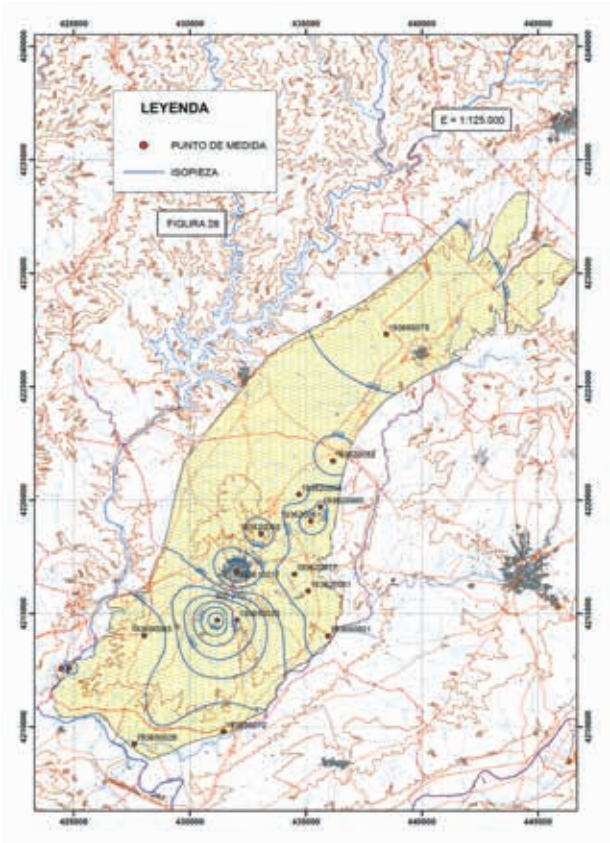


Figura 7. Mapa piezométrico del acuífero de Bailén-Guarromán enero del 2000 (Martín Montañés, 2007)

La explotación por bombeo en el año 2009, según la información facilitada por la CHG es de 29,80 hm³/año, lo que arrojaría un déficit cifrado entre 13,28 y 15,08 hm³/año. También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) que es de 24,19 hm³/año, distribuidos en 21,99 hm³/año para riego, 0,19 hm³/año para abastecimiento urbano y 2,01 hm³/año para la industria.

Recomendaciones

La falta de información en cuanto a la distribución espacial y en el tiempo de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto con la inexistencia de puntos de control de evolución piezométrica, calidad e hidrometría hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Implantación de una red de control piezométrico en ambos acuíferos.
- IDeterminación de la ubicación de las captaciones.
- IRealización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la MASb sobre todo del acuífero de Linares, de su relación con el de Bailén-Guarromán y de ambos con el acuífero aluvial del Guadalquivir de la MASb 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto).

05.25. Rumblar

Considerando que el volumen de agua extraída por bombeo de esta MASb (11 hm³/año) junto con las salidas ocultas a la MASb vecina 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto)" (3-6 hm³/año), exceden en gran medida de los recursos renovables calculados (de entre 3 y 10 hm³/año) se propone como medida para subsanar esta situación, la declaración de sobreexplotación, acompañada de la implementación de un plan de ordenación de aprovechamientos de la MASb.

Fundamentos

La información piezométrica disponible no indica un importante descenso de la superficie piezométrica, si bien hay que considerar que el periodo de medida es de apenas un año y medio y se trata de un punto situado en el límite sur de la MASb, hacia donde se dirige el flujo natural.La información hidroquímica tampoco es indicativa de sobreexplotación, aunque los valores observados son elevados con oscilaciones importantes y comportamientos muy diferentes. Este comportamiento junto al escaso número de observaciones conlleva una escasa representatividad.

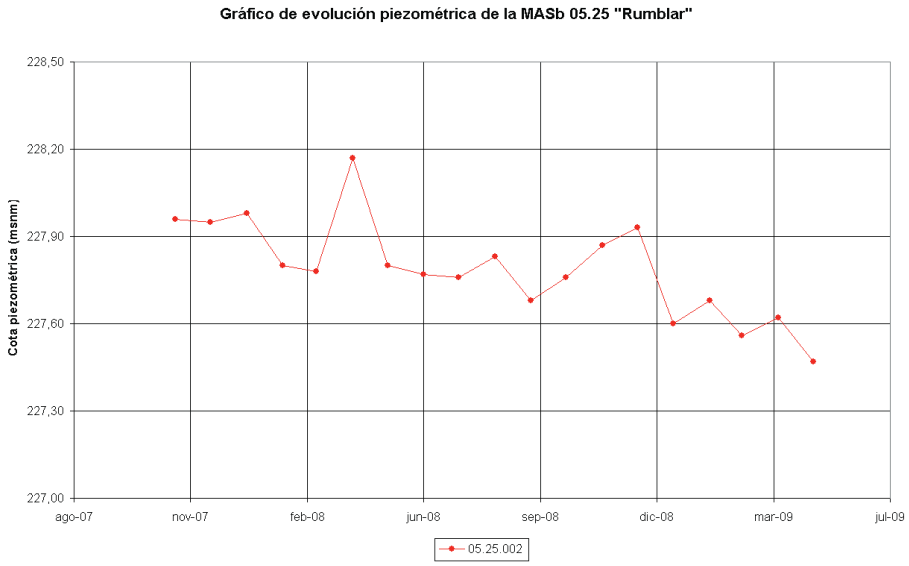
La densidad de las estaciones se puede considerar insuficiente y desde un punto de vista ambiental los valores observados de nitrato son excesivos, por lo que sería conveniente determinar su origen, si bien este aspecto no es indicativo de sobreexplotación. Asimismo, del estudio de las relaciones río-acuífero no se desprende ninguna consideración sobre la posible sobreexplotación de la MASb ya que la información es solamente de carácter bibliográfico.

En cuanto a las redes de control, existe un único punto de la red nacional de piezometría (figura 8), al igual que de la red de seguimiento del estado químico (Agencia Andaluza del Agua), no disponiéndose de ningún punto de la red hidrométrica oficial de manantiales dentro de su poligonal envolvente.

Figura 8. Distribución espacial de las estaciones de seguimiento en la MASb 05.25

Con la información disponible, el nivel piezométrico se sitúa entre 0 y 50 m de profundidad, existiendo algunos sondeos surgentes (figura 9). En los sectores septentrionales, está próximo a la cota 360, descendiendo hacia el Sur, hasta cotas próximas a 260 ms.n.m. La dirección principal de los flujos es N-S, siendo E-O en las inmediaciones de los arroyos de Escobar, Las Piedras y La Fresneda, por constituir áreas de drenaje.

Figura 9. Evolución piezométrica de la MASB "Rumblar" 05.25



Las entradas de agua al acuífero se deben principalmente a la infiltración directa del agua de lluvia, ya que el retorno de riego se considera mínimo debido a que está implantado el riego por goteo en la totalidad de la zona regada. Así, considerando el balance incluido en la norma de explotación de la unidad hidrogeológica 05.25 (Rumblar), actualizada y modificada (2001), las entradas en el conjunto de la MASb suponen entre 6 y 10 hm³/año. Las salidas consideradas en ese mismo balance incluidas salidas por manantiales y galerías (0,5-1 hm³/año) y ocultas a la MASb 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto)" (3-6 hm³/año) a las que deben sumarse los casi 11 hm³/año de extracciones por bombeo. Por tanto, las salidas, aún descontando 1 hm³/año que probablemente no surge en la actualidad por los manantiales que drenan la MASb, suman un total de entre 14 y 17 hm³/año lo que arroja un déficit cifrado en un valor entre 4 y 11 hm³/año. La explotación por bombeo para el año 2009, según información facilitada por la CHG es de 11,25 hm³/año. También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) que es de 6,88 hm³/año, distribuidos en 6,65 hm³/año para riego y 0,228 hm³/año para la industria.

Recomendaciones

La falta de información en cuanto a la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero junto con la inexistencia de puntos de control y datos históricos de la evolución piezométrica, hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

— Ampliación de las redes de control piezométrico, hidrométrico y de calidad.
— Determinación de la ubicación de las captaciones de aguas subterráneas.
— Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la MASb sobre todo de su relación con el acuífero aluvial del Guadalquivir de la MAS 05.26 "Aluvial del Guadalquivir (Curso Alto).

05.38. EL Pedroso-Árcas

El balance hídrico para el conjunto de acuíferos incluidos en esta MASb: Pedroso, Arcas-Cerro Gordo, Cuevas Altas y Campo-Agro,(figura 10) con un funcionamiento hidrogeológico independiente, es del orden de los 4.9 hm³/año, de los que se extraen por bombeos del orden de los 3 hm³/año, el resto corresponden a salidas por manantiales, difusas y ocultas.

Aunque se observa un equilibrio hídrico, existen síntomas que apuntan a que se está haciendo un uso intensivo del agua subterránea en todos los acuíferos de esta MASb, por ello parece conveniente controlar las nuevas autorizaciones de extracción de agua subterránea, siguiendo las normas de explotación y proceder a la declaración de sobreexplotación o en riesgo y elaborar un plan de ordenación de las extracciones, que tenga en cuenta independientemente, el conjunto de acuíferos identificados en esta MASb a diferenciación, estableciendo para cada uno de ellos las condiciones de explotación.

Hay que tener en cuenta que el acuífero de Campo–Agro fue incluido en el catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización realizada por

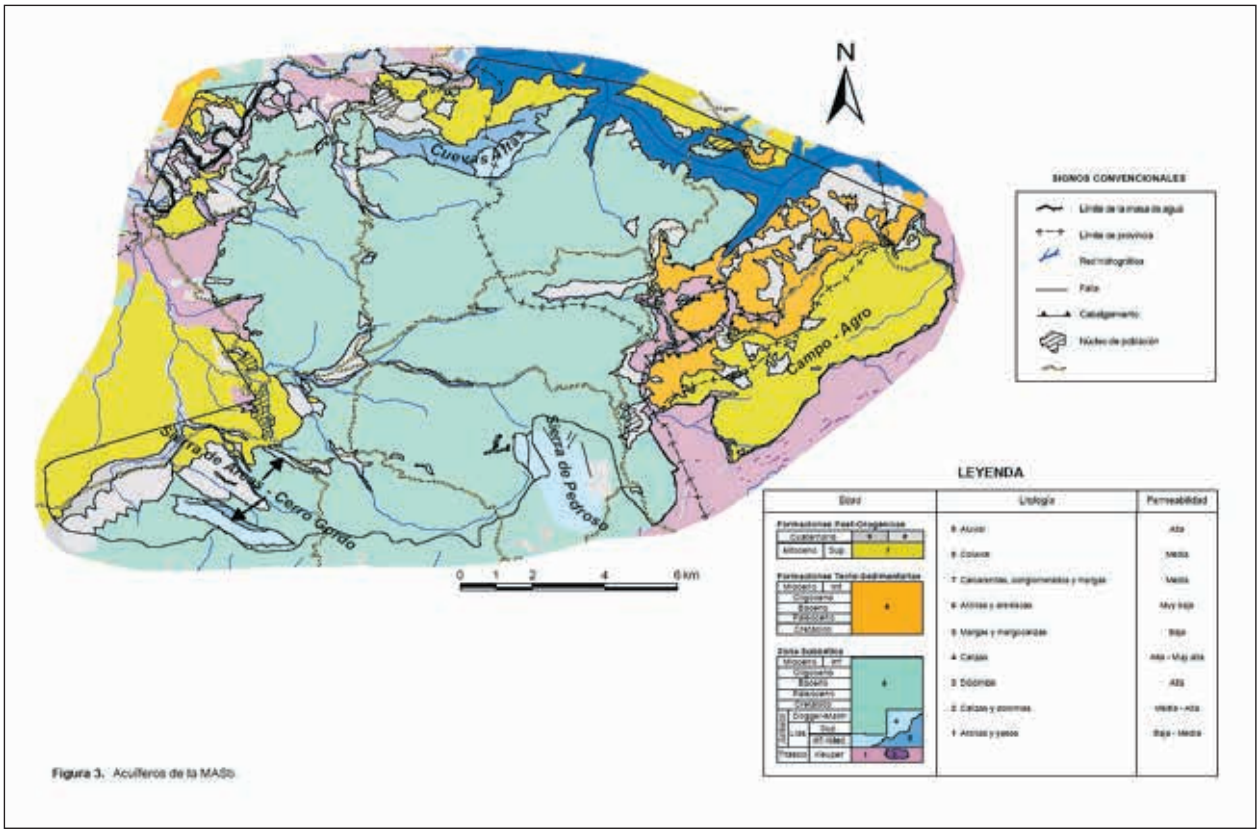


Figura 10. Acuíferos de las MASb " El Pedrod-Arcas"

el Ministerio de Medio Ambiente en 1997, en el que se indicaba que el volumen de agua explotado ya ponía en peligro el abastecimiento de algunas poblaciones y las salidas naturales del acuífero.

Fundamentos

Teniendo en cuenta el balance de forma individualizada, el acuífero del Pedroso funciona como un área de infiltración de agua que se trasfiere subterráneamente en dirección desconocida, siendo la recarga estimada del orden de 1 hm³/año, con unas salidas de 0.1 por bombeos y el resto 0.5 por otras formas (manantiales, difusas o ocultas). En el acuífero de Arcas-Cerro Gordo, la recarga está evaluada en 0,5 hm³/año. No se dispone de datos precisos de las extracciones, pero la cifra estimada podría ser equivalente a los recursos propios (0,5 hm³/año). Algún sondeo de abastecimiento a Villanueva de Algaidas ha sido abandonado por el incremento de la salinidad del agua captada, cuestión que parece estar relacionada con el uso intensivo del agua subterránea de este acuífero. El acuífero de Campo- Agro, debe su principal salida a las extracciones por bombeo (2,0 hm³/año) (IGME 2002), siendo la recarga de 2,7 hm³/año (IGME 2002). Para el acuífero de Cuevas Altas, su recarga se ha calculado en 0,7 hm³/año estando evaluadas las extracciones por bombeo en 0,4 hm³/año y 0,4 hm³/año por manantiales y formas difusas.

No existe información piezométrica de esta MASb, tan solo existe un punto de control de la red oficial de calidad, siendo la gran mayoría de las aguas de la MASb de naturaleza bicarbonatada-cálcica. Algunos puntos, en el sector suroccidental de la Sierra de Campo Agro, son de facies sulfatada cálcica, debido posiblemente a la influencia de materiales triásicos. La dureza es media, con mineralización que oscila entre ligera a notable.

Recomendaciones

Las incógnitas que aún existen en relación con el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos incluidos en esta MASb y su posible interrelación hacen necesaria la realización de un estudio hidrogeológico que permita apoyar cualquier tipo de decisión para la gestión de sus aguas subterráneas.

El déficit de información en cuanto a, la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto a la inexistencia de puntos de control, de datos

históricos de evolución piezométrica, calidad y del caudal drenado por los manantiales, hace necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

- Puesta en marcha de una red de control piezométrico, hidrométrico y de calidad de las aguas subterráneas
- Determinación de la ubicación y explotación de las captaciones de agua subterránea
- Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la masa sobre todo de las situaciones individuales de cada acuífero y de su relación con los demás integrantes de la MASb.

05.41. Guadahortuna-Larva

En esta MASb, formada por materiales de distintas características litológicas y de permeabilidad, se ubican un conjunto de acuíferos, de los que se carece de información precisa para estimar la evolución de los niveles piezométricos y el balance hídrico de cada uno de esos acuíferos y por tanto del total de la MASb.

El volumen de agua extraída por, es de 16,4 hm³/año en 2009. Este volumen supera a las entradas de 12,5 hm³/año consideradas en el balance redactado en 2001 (pero de origen anterior) y el grado de explotación se aleja del concepto de uso sostenible. Es por ello que, en tanto no se disponga de mayor información en la que se ponga de manifiesto, al menos, el valor de extracción de aguas subterráneas que corresponde a cada acuífero, se propone como medida previa a la declaración de sobreexplotación, la elaboración de una norma de explotación de esta masa de agua subterránea que tenga en cuenta en cada acuífero, además de las extracciones por bombeo correspondientes a cada uno, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección u otros usos y las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

Asimismo, hay que hacer constar que el sector Chotos-Cortijo Hidalgo (anteriormente denominado Acuífero Chotos-Cortijo Hidalgo) perteneciente al Acuífero Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos de la Subunidad Larva-Solera fue *"declarado sobreexplotado o en riesgo de estarlo según acuerdo de la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (BOP. Jaén de 24 de Octubre de 1992")* proponiéndose también la continuidad de esa declaración.

Fundamentos

El conjunto de niveles productivos se han agrupado de acuerdo a su composición litológica: *Acuíferos carbonatados jurásicos y miocenos*: Subunidad de Larva-Solera: Acuífero de Cabra de Santo Cristo, Acuífero de Chotos-Sazadilla-Los Nacimientos y Acuífero de Larva; Subunidad de Gante-Santerga: Acuífero de los Gallardos, Acuífero de Santerga y Acuífero de La Serreta-Gante-Cabeza Montosa; *Acuíferos calcareníticos oligocenos–aquitanienses*: Subunidad de Altos de Torrecardela y *Acuíferos detríticos*: Subunidad Plio-cuaternaria de la Depresión de Guadahortuna y Subunidad del Aluvial del Río Guadahortuna

La explotación por bombeo de la MASb para el año 2009, según información facilitada por la CHG, es de 16,42 hm³/año También se dispone de la explotación por bombeo para el año 2008 (fuente CHG) cifrado en 11,42 hm³/año distribuidos en 10,78 hm³/año para riego, 0,52 hm³/año y 0,12 hm³/año para la industria.

En cuanto a los datos disponibles de las redes de control, existen dos puntos de la red nacional de piezometría y los datos aportados por la Diputación Provincial de Jaén, que realiza conjuntamente con el IGME medidas periódicas de la profundidad en los sondeos Majablanquilla II, en el acuífero de Larva, y del sondeo Comunidad de Regantes (203870011), del acuífero de Cabra del Santo Cristo (tablas 4 y 5).

No existe ningún punto de la red hidrométrica oficial de manantiales dentro de la poligonal envolvente de la

Nº	Nombre	Provincia	Municipio	X	Y	Z (ms.n.m.)	Prof (m)	Inicio	Acuifero
05.41.001		Jaén	Cabra del Sto. Cristo	472638	4171588	1292	293	nov-07	Cabra del Sto. Cristo
05.41.003	Los Navajuelos	Jaén	Larva	481014	4177327	810	200	sep-07	Larva

Tabla 4. Características de los puntos de la red oficial de control piezométrico

N.º IGME	Nombre	Prov.	Municipio	X	Y	Z (ms.n.m.)	Prof (m)	Inicio	Acuifero
203840035	Majablanquilla II	Jaén	Larva	480775	4179011	835	210	mar-06	Larva
203870011	Comunidad de Regantes	Jaén	Cabra del Sto. Cristo	474375	4174350	1010	60	abr-04	Cabra del Sto. Cristo

Tabla 5. Características de los puntos de la red oficial de control de calidad

MASb. Se dispone, de dos puntos pertenecientes a la red de seguimiento del estado químico (AAA) codificados en el acuífero de Subunidad del Aluvial del río Guadahortuna y otro en el acuífero de Cabra del Santo Cristo. La escasez de datos de la red nacional no permite hacer ninguna consideración. Sin embargo, la serie de medidas del sondeo Comunidad de Regantes (203870011) del acuífero de Cabra del Santo Cristo sí tiene un número de datos significativos (4 años) y presenta un descenso progresivo prácticamente constante con leves recuperaciones relativas del nivel piezométrico. La tasa de descenso es de 6,6 m/año. En el caso del acuífero de Larva, el punto Majablanquilla II (203840035) con una serie de 2 años presenta una curva también con pendiente negativa y con una tasa de descenso de 4,4 m/año.

Recomendaciones

El déficit de información en cuanto a la distribución de los puntos de extracción y su discriminación por acuífero, junto con la inexistencia de puntos de control y datos históricos de evolución piezométrica, calidad y del caudal drenado por los manantiales, hacen necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones:

— Ampliación de la red de control piezométrico, hidrométrico y de calidad de las aguas subterráneas.
— Determinación de la ubicación de las captaciones de agua subterránea.
— Realización de estudios complementarios dirigidos a aumentar el conocimiento hidrogeológico de la masa sobre todo de las situaciones individuales de cada acuífero y de su relación con los demás integrantes de la MASb.

05.43. Sierra Y Mioceno de Estepa

La MASb Sierra y Mioceno de Estepa, la componen diez acuíferos: acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa (acuíferos de Becerrero, Águilas-Guinchón, Pleites, Hacho de Lora y Mingo), de los Caballos y de los Almadenes, y los acuíferos detríticos del Mioceno de Estepa, del Saucejo y de Martín de la Jara; todos con un funcionamiento hidrogeológico independiente (figura 11).

A partir de la información disponible, se puede indicar que, a tenor de los balances hídricos realizados y de la respuesta hidrométrica y piezométrica de los acuíferos de la unidad del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón, su utilización constituye un evidente ejemplo de explotación intensiva de las aguas subterráneas que, en el caso del acuífero de Águilas-Guinchón, es manifiestamente preocupante.

Fundamento

Respecto a los datos utilizados para el balance del resto de acuíferos de la MASb se han tomado de diferentes fuentes, todas ellas muy desactualizadas. Esta situación anómala se debe a la falta de estudios hidrogeológicos específicos y actualizados para cada uno de los acuíferos diferenciados en la MASb. En tanto no se disponga de mayor información, se propone como medida la declaración de sobreexplotación, la elaboración de una norma de explotación de esta masa de agua subterránea que tenga en cuenta en cada acuífero, entre otras, las condiciones de aprovechamiento en cuanto a volúmenes de agua reservados para uso urbano y su perímetro de protección, otros usos, las características geológicas y técnicas de cada una de las captaciones y su dimensionamiento.

El grado de conocimiento de los acuíferos que componen la MASb muy dispar. Así, los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa son bien conocidos, pero no ocurre lo mismo con el resto de los acuíferos. Este hecho condiciona el dictamen que se puede hacer de cada uno de estos acuíferos respecto a la conveniencia o no de su declaración como acuífero sobreexplotado individualmente. Tan sólo se podría emitir una opinión fundamentada en el caso de los acuíferos de la Sierra de Estepa.

Las redes de control del estado cuantitativo y cualitativo que son gestionadas actualmente, no son suficientes en esta MASb dado que la mayoría de los acuíferos carecen de puntos de control. Llama la atención la ausencia de redes de control de las aguas subterráneas de acuíferos como el de Águilas-Guinchón, que abastece a cuatro poblaciones sevillanas en exclusiva, y en el que existe un

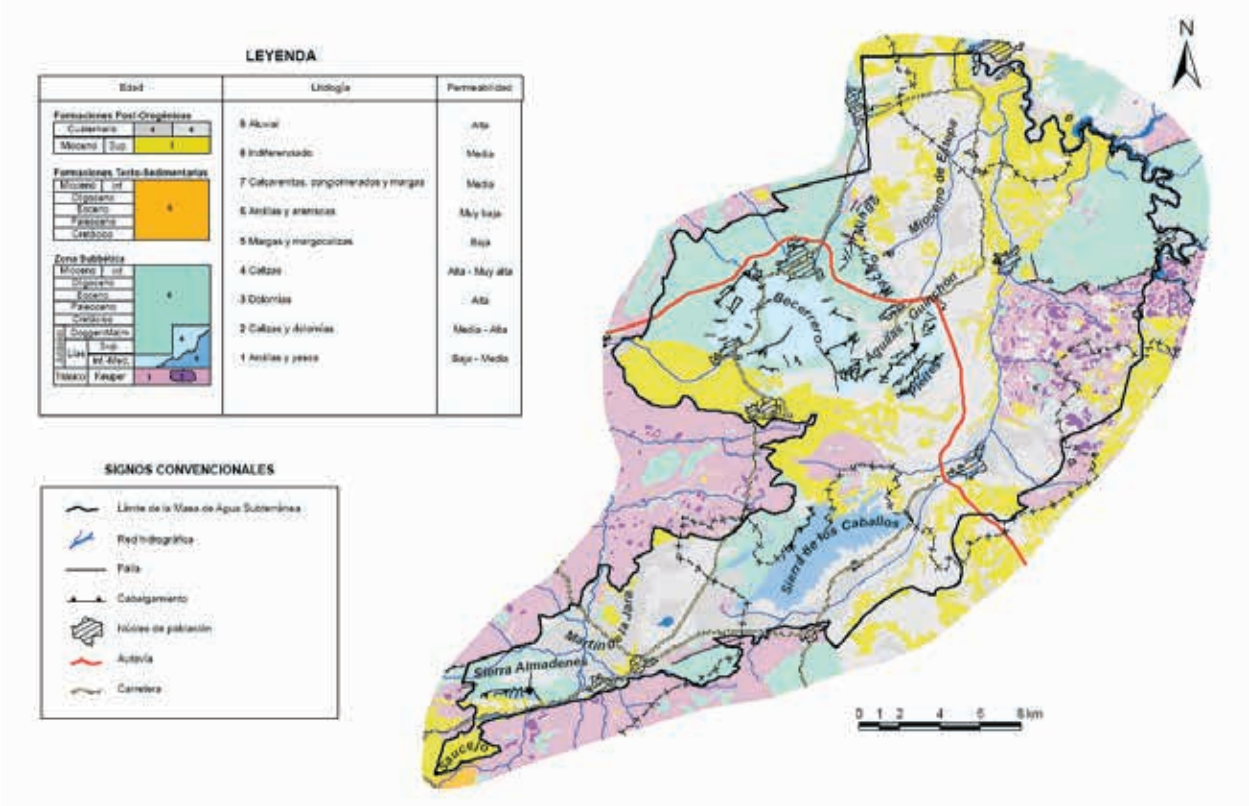


Figura11. Acuíferos de la MASb "Sierra y Mioceno de Estepa"

piezómetro instalado por el IGME habilitado para tal fin, que no es controlado por la AAA. (tablas 6, 7 y 8)

En el balance de los acuíferos de la Sierra de Estepa se han considerado los valores medios de las salidas corres-

Identificación	N.º IGME	Provincia	Municipio	X	Y	Z	Prof	Fecha inicio medidas
05.43.002		Sevilla	Gilena	330954,0	4124837,0	471	271	01/01/2007
05.43.003	154180004	Sevilla	Pedrera	332242,0	4122246,0	464	80	01/05/1976
05.43.006	164110036	Sevilla	Estepa	336380,0	4124740,0	480	100	01/01/1985
05.43.007		Sevilla	Estepa	337547,0	4131486,0	355	125	01/01/2007

Tabla 6. Puntos de control piezométrico de la AAA en la MASb 050.43.

Identificación	N.ºIGME	Manantial	Provincia	Municipio	X	Y	Z	Fecha inicio medidas
05.43	164110018	Lora de Estepa	Sevilla	Lora de Estepa	338053,0	4126400,0	435,0	01/10/1979
	154140021	Ojo de Gilena	Sevilla	Gilena	330675,0	4124980,0	469,0	01/11/1966

Tabla 7. Puntos de control hidrométrico de la AAA en la MASb 050.043

Identificación	Código	UTMX	UTMY	Punto de control
84	5.38.01	387005	4119285	Cortijo de la Torre
92	5.43.01	341614	4134595	La Mina
93	5.43.11	335345	4113220	Abastecimiento de Sierra Yeguas
94	5.43.12	336296	4126130	Fuente de Santiago (Abto. Estepa)
95	5.43.13	332150	4123125	Pozo Matagallar
96	5.43.21	327533	4111714	Laguna de Gosque

Tabla 8. Puntos de control de calidad de la AAA en la MASb 050.43.

pondientes al periodo 2003-2006; en el caso de las entradas, se ha analizado toda la información disponible, con el objetivo de estimar un valor lo más representativo posible de los recursos medios renovables del acuífero Sierra de Estepa: Sector Sierra de Becerrero (tabla 9), entradas 6,0 hm³/año, salidas: 5,3 hm³/año.

En el sector acuífero de Hacho de Lora-Mingo-Guinchón, están diferenciados cuatro acuíferos carbonáticos, desconectados hidráulicamente entre sí: acuíferos de Hacho de Lora, Mingo, Águilas-Guinchón y Pleites. El mayor de ellos es el de Águilas–Guinchón, en el que la escasa precipitación anual media y la marcada irregularidad interanual de ésta, combinada con la explotación intensa de sus aguas subterráneas, lo hace altamente proclive a sufrir situaciones de desequilibrio hídrico. En este sector de Águilas-Guinchón, existe un descenso acumulado de más de 63 m en el periodo 1997 a 2009. Los recursos medios renovables de los cuatro sistemas son de 2,2 hm³/año y se explotan 2,8 hm³/año, aspecto que se manifiesta en una disminución continuada de reservas en alguno de ellos y que ha provocado serios problemas, durante los últimos años, en el abastecimiento mancomunado que se hace desde el acuífero de Águilas-Guinchón (tabla 10).

Entradas (hm³/año)	Acuífero de la Sierra de Becerrero (hm³/año)
Entradas	
Infiltración del agua de lluvia	6,0
Salidas	
Salidas por bombeos	4,6
Salidas por manantiales	0,7
E-S	0,7

Tabla 9. Ensayo de balance hídrico del acuífero de la Sierra de Becerrero (Martos-Rosillo 2008)

	Entradas (hm³/año)	Salidas (hm³/año)	E-S (hm³/año)
Mingo	0,16	0,282	-0,122
Hacho de Lora	0,305	0,334	-0,029
Águilas-Guinchón	0,995	1,806	-0,811
Pleites	0,48	0,35	0,13
Total	1,94	2,772	-0,832

Tabla 10. Ensayo de balance hídrico del acuífero de Águilas-Guinchón (Martos-Rosillo 2008)

Se presenta toda la información piezométrica del acuífero de la Sierra de Becerrero (figura 12), y se compara

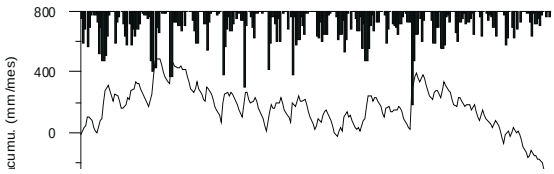


Figura 12. Precipitación mensual, desviación de la precipitación mensual, evolución piezométrica y puntos de control de la Sierra de Becerrero y extracciones anuales. Periodo 1976-2006 (Martos-Rosillo 2008).

con la precipitación mensual (medida en el observatorio de Estepa), con la desviación de la precipitación mensual respecto a la media y con las extracciones anuales. Asimismo, se señala, con una línea discontinua, la cota de los principales manantiales (466 m s.n.m.). Los dos rasgos más destacados que se ponen de manifiesto en esta figura son: los importantes periodos de tiempo en los que los niveles piezométricos del acuífero están por debajo de la cota de surgencia de los manantiales y la evolución del nivel piezométrico del sondeo de explotación Matagallá

En la figura 13 se representa toda información piezométrica correspondiente a los acuíferos de la unidad geológica del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón. En la gráfica destacan la distinta evolución piezométrica que presentan los acuíferos diferenciados y la evolución manifiestamente descendente de los niveles piezométricos correspondientes al acuífero de Águilas-Guinchón. En el acuífero de Águilas-Guinchón los descensos acumulados desde 1997 a 2009 son de 63 m. La variación temporal en el acuífero de Pleites también presenta una tendencia descendente al haberse iniciado una intensa explotación para sustituir parte de los bombeos que se realizan para abastecimiento en Águilas-Guinchón (figura 13).

El régimen de bombeo que se realiza en el acuífero de Águilas-Guinchón, con una explotación muy regular durante todo el año, para cubrir el abastecimiento de la población, genera una respuesta piezométrica con unas variaciones de nivel intra-anuales no muy marcadas; no obstante, la tendencia de los niveles es claramente descendente desde 1996.

En el acuífero de Pleites la información piezométrica es muy reducida si bien se ha constatado un descenso acumulado del mismo desde 2005 a 2010 de unos 10 m por lo que no es posible llevar a cabo un estudio detallado que pueda considerarse suficientemente significativo; con todo, la distinta evolución de los niveles piezométricos con respecto al acuífero vecino de Águilas-Guinchón, pone de manifiesto la falta de conexión hidráulica entre ambos.

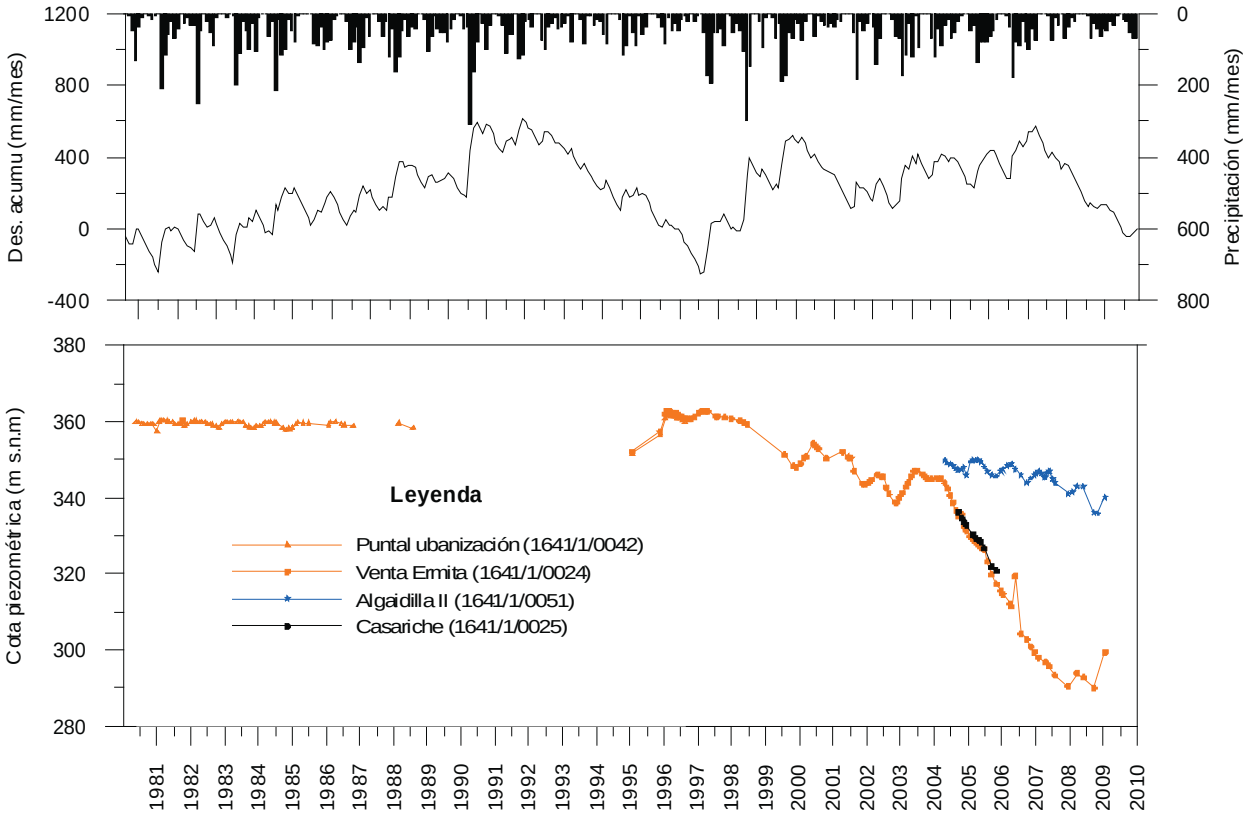


Figura 13. Precipitación mensual, desviación de la precipitación mensual, evolución piezométrica y puntos de control del Hacho de Lora-Mingo-Guinchón. Período 1981-(Martos-Rosillo 2008).

Respecto a la variación temporal de las características hidroquímicas de las aguas subterráneas de los acuíferos de la Sierra de Estepa, se puede indicar que la fuerte explotación, el reducido tamaño de los acuíferos de la Sierra de Estepa y la gran difusividad hidráulica de los materiales favorecen que el efecto hidrodinámico de las extracciones, se propague de forma rápida en cada uno de los sistemas acuíferos, produciéndose un descenso del potencial hidráulico que crea las condiciones hidrodinámicas necesarias para que se produzca la mezcla con las aguas subterráneas de los materiales acuitardos y acuíferos que se sitúan en el sustrato y en los bordes de los acuíferos.

En este sentido, en 2009 se propusieron una serie de recomendaciones para la mejor gestión y protección de los acuíferos de Becerrero y de Águilas-Guinchón.

En el acuífero de la Sierra de los Caballos, los datos disponibles ponen de manifiesto una fluctuación piezométrica intra-anual comprendida entre 3 y 5 m. La importante explotación a la que está sometido este acuífero ha ocasionado abatimientos de la piezometría, en estos sectores, de hasta 11 m, si bien, en la actualidad los niveles están próximos a los que presentaba el sistema en régimen no influenciado. De los balances hídricos realizados (IGME, 2002) se deduce un valor de recursos medios renovables de 2,7 hm³/año, mientras que la explotación mediante sondeos representa 2,9 hm³/año.

La información piezométrica disponible por el IGME del acuífero de la Sierra de los Caballos, prueba la existencia de una bajada generalizada de los niveles piezométricos en la última década que puede estar relacionada con el incremento de la explotación del acuífero.

Los escasos datos piezométricos disponibles del acuífero de la Sierra de Almadenes indican cierta tendencia descendente aunque la cadencia de medida y la representatividad de los datos es reducida. El acuífero de la Sierra de los Almadenes se alimenta, exclusivamente, por infiltración del agua de lluvia, y se descarga por las fuentes de El Esparto y El Tejar, en el extremo SE y hacia el arroyo de La Parra, al S. El nivel piezométrico de la única captación de la que se dispone de información, junto a la Fuente del Esparto, se sitúa entre 370 y 378 m s.n.m. La recarga media es inferior a 0,2 hm³/año, incluida la que se produce en los afloramientos miocenos contiguos y las salidas por bombeo son del orden de 10.000 m³/año. El agua presenta una conductividad eléctrica (CE) media de 1200 µS/cm.

El acuífero detrítico del Saucejo, es libre, y se recarga por infiltración directa del agua de lluvia. La superficie piezométrica se encuentra entre 5 y 10 m de profundidad y las fluctuaciones intra-anuales son del orden de 2 m. La recarga media ha sido evaluada en 1 hm^3/año. Las salidas por bombeo son del orden de 0,35 hm^3/año, si bien esta última cifra no tiene prácticamente ninguna validez al no estar actualizada desde los años ochenta del pasado siglo.

El acuífero detrítico de Martín de la Jara, se recarga por infiltración directa del agua de lluvia y por retornos de riego. Las salidas se producen, fundamentalmente, hacia los arroyos de la Fuente y Salado y hacia la laguna del Gosque. El nivel piezométrico se encuentra a profundidades máximas de 5 m y fluctúa a lo largo del año entre 1 y 3 m. La recarga media es de 1,3 hm^3/año y las salidas por bombeo se estimaron en 1 hm^3/año. Los datos de bombeo disponibles datan de finales de los ochenta del siglo pasado.

El último balance del que se dispone del acuífero Mioceno de Estepa, se cita en el Atlas Hidrogeológico de la provincia de Sevilla (Durán 2003). Las entradas se cifraron en 4,2 hm^3/año, mientras que las salidas se reparten en 3 hm^3/año, para el riego, 1 hm^3/año, para industria y para abastecimiento a las poblaciones de Puente Genil y la pedanía de La Mina. El resto (0,2 hm^3/año) se supone que se drena hacia los ríos Genil y Yeguas.

En general la red de piezometría de la AAA sólo permite obtener información de 2 de los 10 acuíferos que forman la MASb, mientras que la red de hidrometría sólo considera dos sectores de uno de estos 10 acuíferos.

Recomendaciones

La falta de información de datos hidrogeológicos (explotación, piezometría, hidrometría e hidroquímica), tanto espaciales como temporales, en los acuíferos detríticos de la MASb (Saucejo, Martín de la Jara y Mioceno de Estepa) y en los acuíferos de la Sierra de los Caballos y Almadenes, hacen necesaria la actualización de su conocimiento hidrogeológico, para lo que será necesaria:

- La implantación de una red de control de las aguas subterráneas (se pueden aprovechar de los antiguos pozos y sondeos de abastecimiento).
- La actualización y georeferenciación de las explotaciones de cada acuífero.
- La evolución de la recarga y de las reservas de cada acuífero.

05.49. Niebla-Posadas

La evolución piezométrica en esta MASb, así como el balance hídrico y la evolución histórica en el conjunto de los diferentes acuíferos o sectores de situadas en ella, ponen de manifiesto un déficit anual explotación vs. recarga. Esto conlleva a tomar, como medida para reducir ese exceso de explotación, un volumen similar, que permita alcanzar un equilibrio en el balance hídrico, la posible *declaración de sobreexplotación* de la MASb y la elaboración del plan de ordenación de las extracciones, que tenga en cuenta la singularidad de cada uno de los acuíferos o sectores definidos en esta MASb, especialmente en lo referente al grado de explotación y la composición de sus aguas. Una alternativa a la declaración de sobre explotación podría ser la aplicación de la norma de explotación de esta masa de agua subterránea.

Fundamentos

Debido a sus cambios laterales de facies, en estudios precedentes, se diferenciaron 5 sectores en la U.H. (IGME 2003; Agencia Andaluza del Agua 2010): la zona Niebla-Gerena, Gerena-Cantillana, Cantillana–Lora del Río, Lora del Río-Hornachuelos, Puebla de los Infantes. Además de estos sectores, en la MASb 05.49 existe otro acuífero, que no forma parte del acuífero Mioceno de Base, como son los formados por las terrazas del río Guadalquivir ubicadas en la margen derecha del río, formando una franja de unos 3 km de ancho y de 5 a 15 m de espesor, constituido por gravas, arenas y limos cuyo comportamiento corresponde al de un acuífero libre.

Las redes de control de calidad y cantidad fueron gestionadas por el IGME hasta diciembre 2001, a partir de esa fecha el control lo ha realizado la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y posteriormente la Agencia Andaluza del Agua. La red de control de calidad actual está constituida por 5 puntos de control, uno en cada una de las subunidades de las que se compone la MASb.

El análisis de los datos disponibles de piezometría muestra, que durante los años ochenta, la mayoría de los puntos presentan niveles más o menos estables. La evolución general de la piezometría queda marcado por descensos importantes durante la sequía al principio de los años noventa, sin alcanzar a los mismos niveles piezométricos en los años posteriores. Se pueden observar importantes fluctuaciones de niveles, que por su dimensión, están asociados con explotaciones realizadas en la cercanía de los puntos.

— La Subunidad NIEBLA-GERENA: Dos de los cinco puntos de control presentan importantes descensos entre 20 y 30 m durante épocas de sequía, en un caso sin recuperación posterior (figura 14)
— La Subunidad GERENA-CANTILLANA: Este sector presenta tendencia al descenso en 5 de los 6 puntos observados. Los niveles han sufrido descensos sucesivos debidos tanto a la entrada en funcionamiento de nuevas explotaciones como al efecto conjunto de los periodos de sequía, de forma que en la actualidad se acumulan más de 15 m de descenso sin señales de recuperación (figura 15).
— La Subunidad CANTILLANA-LORA DEL RÍO: Ésta, en las proximidades de Villanueva del Río y Minas, presenta una evolución anómala ya que desde 1983 la tendencia anual de la evolución piezométrica es ascendente. Esto se debe al abandono de la mina de Villanueva a principio de los años ochenta (IGME 2003) (figura 16).
— La Subunidad LORA DEL RIO-HORNACHUELOS: La evolución piezométrica en este sector presenta cambios significativos y uno de los 4 puntos monitorizados en Peñaflor demuestra tendencias claras de descenso debido a un incremento de explotación entre Peñaflor y Posadas. Los demás puntos se ven estrechamente influido por extracciones, pero presentan

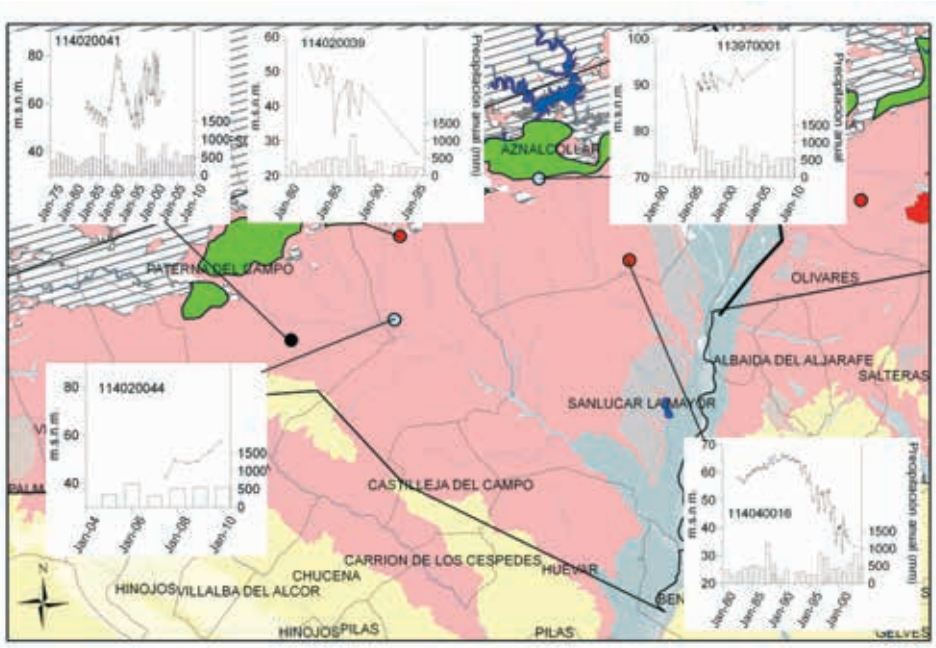


Figura 14. Evolución de niveles piezométricos del sector Niebla-Gerena

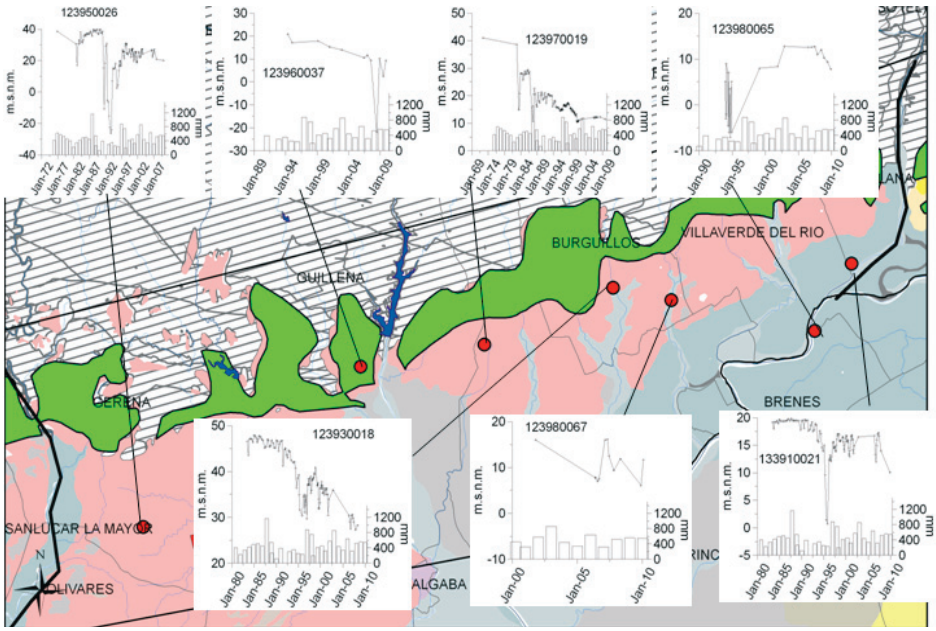


Figura 15. Evolución de niveles piezométricos del sector Gerena-Cantillana

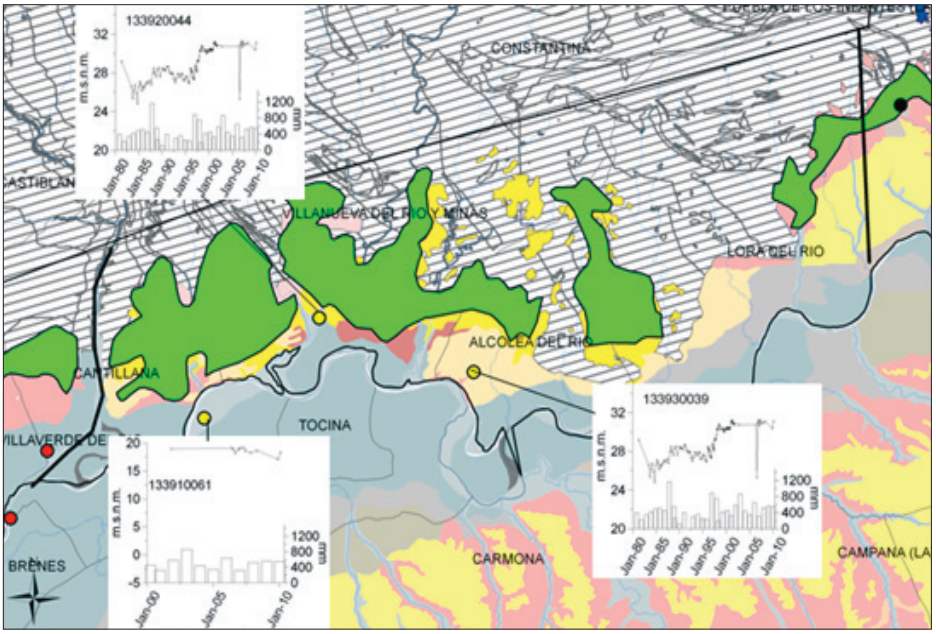


Figura 16. Evolución de niveles piezométricos del sector Cantillana-Lora del Río

capacidad de recuperación y no muestra tendencia al descenso. (figura 17)

En resumen, los cambios más significativos se observan en los sectores Niebla-Gerena y Gerena Cantillana que presentan descensos piezométricos durante las últimos décadas sin viso de recuperación, lo que pueden indicar que las extracciones reales superan la recarga del acuífero en estos sectores. En el sector Lora del Río-Hornachuelos se observa un descenso sin recuperación en Peñaflor, mientras que en los demás puntos no se observa una tendencia al descenso. Los descensos en general se deben a extracciones agrícolas y se observan sobre todo en los acuíferos confinados, debido a su menor transmisividad. Bajo este punto de vista, las zonas Niebla-Gerena y Gerena-Cantillana muestran características de sobreexplotación y el sector Lora Del Río-Hornachuelos está en riesgo, al estar cerca del límite de explotación.

En el sector Cantillana-Lora del Río se observan los mayores valores de conductividad eléctrica, aunque no existen extracciones intensivas de agua subterránea y los niveles piezométricos han subido considerablemente. En el sector Lora Del Río-Hornachuelos se observa un descenso de los niveles piezométricos sin recuperación en Peñaflor, mientras que en los demás puntos no se observa una tendencia al descenso.

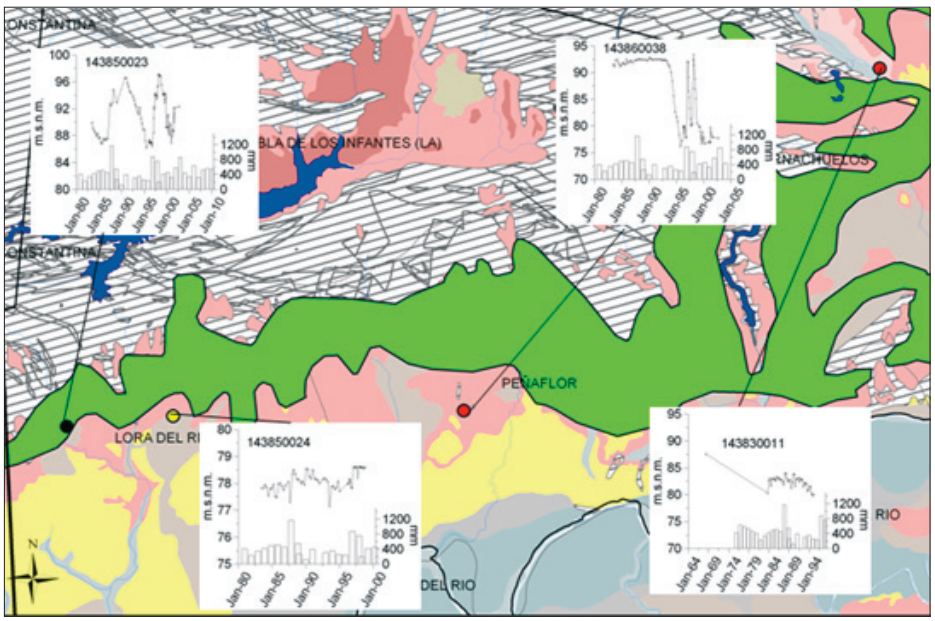


Figura 17. Evolución de niveles piezométricos del sector Lora del Río-Hornachuelo

No existe ninguna información recopilada sobre los volúmenes de extracciones reales por riego y/o abastecimiento durante las últimas décadas en el acuífero Gerena-Posadas. Las concesiones actuales de 8,75 hm^3/a, concedidos por la Agencia Andaluza del Agua (mayo 2010), están muy por debajo del volumen de recarga del acuífero y no justifican el descenso piezométrico en ninguno de los sectores por lo cual hay que suponer alguna otra causa. Las salidas por extracciones de agua subterránea y su evolución temporal no se han registrado de forma accesible. No obstante, estimaciones de extracciones de agua subterránea para regadío en los años ochenta ya indican explotaciones superiores a la recarga en el sector Niebla-Gerena. Estimaciones más recientes de extracciones de agua subterránea para regadío, entre los municipios Guillena y Villanueva del Río y Minas, suman volúmenes de 8 hm^3/año y 3 hm^3/año por abastecimiento (IGME 2003) para años medios y secos, lo que se acerca bastante a las entradas respectivas.

Recomendaciones

El carácter dinámico de la MASb 05.49 y sus características de sobreexplotación en algunos sectores obligan a continuar una serie de trabajos y estudios adicionales que permiten una gestión sostenible de los recursos hídricos en el futuro. Bajo este punto de vista, se recomienda realizar las siguientes medidas en algunas zonas con cierta problemática.

- Para garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos en los sectores Niebla-Gerena y Gerena-Cantillana es necesario abordar el estudio de recarga natural forzada ó recarga artificial en dichas zonas. De igual manera hay que prever su posible utilización en el resto del acuífero para subsanar los posibles desequilibrios que en el futuro, se podrían originar también en el sector Lora del Río-Hornachuelos. Las posibilidades de la aplicación de la recarga artificial por caudales excedentes en los cauces que atraviesan los sectores ya fueron evaluadas positivamente en estudios anteriores, tanto en cantidad como en calidad (IGME 1983; IGME 2003).
- Control de las extracciones reales, sobre todo en los sectores con desequilibrio de extracciones y recarga.
- Control anual de los nuevos sondeos que se realicen en el futuro para registrar los aumentos de las extracciones de agua.
- Realización periódica de aforos en los ríos y arroyos que atraviesan el sistema para poder cuantificar recargas y descargas del acuífero hacia los cauces lo que es imprescindible para estimar la recarga natural y los recursos hídricos disponibles en este sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Andaluza del Agua. (2010). Adaptación de los puntos de control de calidad de las aguas subterráneas a la D.M.A. para M.A.S. Niebla Posadas (05.49), Junta de Andalucía.

Agencia Andaluza del Agua. (2010). Apoyo a la explotación de la red de control de calidad de las aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica del Guadalquivir. Establecimiento de la Red de Control

CHG (2007). Resultados del modelo matemático de flujo subterráneo del sector del acuífero de Fuencaliente. Simulación considerando las posibles explotaciones establecidas por la CHG. Informe preliminar.

CHG-IGME (2009). Análisis sobre las masas de agua subterránea 05.04 (Huéscar-Puebla) y 05.05 (La Zarza) como base para el establecimiento de normativas de explotación que permitan la recuperación del manantial de Fuencaliente y la conservación de los manantiales de Parpacén y Bugéjar. Encomienda de Gestión entre la CHG y el IGME. Act. 5. Documento interno.

CHG-IGME (2001). Revisión y actualización de las normas de explotación de las UH de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate: UH 05.04 Huéscar-Puebla.

Durán, JJ. (2007). Atlas hidrogeológico de la provincia de Sevilla. IGME-Diputación Provincial de Sevilla Servicio de Publicaciones del IGME. Madrid.

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C. y Núñez, I. (2007). *Los acuíferos de la Loma de Úbeda (Jaén)*. González-Ramón, A., Rubio-Campos, J.C. y López-Geta, J.A. (Eds.). IGME-AUAS. Madrid. 56 p.

Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C.; Martín-Montañés, C.; González-Ramón, A. y Peinado, T. (2001). Los acuíferos de la Loma de Úbeda, reserva estratégica para el desarrollo del olivar. *Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. Linares (Jaén). T-1: 379-383. DPG-UJ-IGME.

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Benavente, J.; Hidalgo, M.C.; Marín-Lechado, C.; Molina-Molina, A.; López-Martos, J.J.; Peinado, T. y Rubio-Campos, J.C. (2002). Acuíferos del borde de la meseta en la provincia de Jaén. *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardenete. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*: 219-229. IGME-CHG-COPTJA-DPG.

IGME (2003). Estudio de la incorporación de las aguas subterráneas al sistema de emergencia del abastecimiento a la ciudad de Sevilla y su área de influencia. Sevilla, Instituto Geológico y Minero de España: 131.

IGME (2010). Análisis del modelo matemático elaborado en el sector acuífero relacionado con el manantial

de Fuencaliente como base para la recuperación del manantial y recomendaciones para la conservación de los manantiales de Parpacén y Bugéjar (masas de agua subterránea 05.04 Huéscar-Puebla y 05.05 La Zarza). Encomienda de Gestión entre la CHG y el IGME. Actividad 5 documento interno.

IGME-DGA (2009). Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2.015. (Demarcaciones Hidrográficas del Tajo, Guadiana y Guadalquivir). Encomienda de Gestión con la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (MICINN).

IGME-DGA (2009). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica. Encomienda de Gestión con la Dirección General del Agua (MARM) y el Instituto Geológico y Minero de España (MICINN).

IGME (2002). Norma de explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.38. El Pedroso-Arcas. Instituto Geológico de España, Sevilla.

IGME (2000). Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en el abastecimiento urbano. Estudios hidrogeológico de probabilidades de mejora de los abastecimientos urbanos del norte de la provinica de Málaga. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

ITGE (1995). Catálogo de acuíferos sobreexplotados. Madrid, Instituto Tecnológico Geominero de España.

ITGE-CHG (1993). *Propuesta de Normas de Explotación de la U.H. 05.23 (Úbeda).*

ITGE. (1993). Propuesta de Norma de Explotación de la Unidad Hidrogeológica 05.43. Sierra y Mioceno de Estepa. Instituto Geológico de España, Sevilla.

Lambán, L. J., and J. M. Pernía. (2004). Propuesta de indicadores sobre el estado cualitativo de las aguas subterráneas: aplicación al acuífero de la Sierra de Estepa. Pages 337-347 *in* VIII Simposio de Hidrogeología. Asociación de Hidrogeólogos, Zaragoza,

MMA (1998). Programa de ordenación de acuíferos sobreexplotados/salinizados. Serie monografías. Ministerio de Medio Ambiente.

MMA. (1997). Catálogo de Acuíferos con problemas de Sobreexplotación o Salinización. Predefinición del Programa de Actuación. Secretaria de Estado de Aguas y Costas. Dirección Generañ de Obras Hidraúlicas y Calidad de las Aguas., Madrid.

Martín Montañés, C. (2007). Aplicación de técnicas hidrogeológicas dirigidas a la ordenación del territorio en la investigación de acuíferos sometidos a una potencial contaminación y/o explotación no sostenible: desarrollo metodológico

Martos-Rosillo, S. (2008). Investigación hidrogeológica orientada a la gestión racional de acuíferos carbonáticos sometidos a un uso intensivo del agua subterránea. El caso de la Sierra de Estepa (Sevilla). Tesis Doctoral. Universidad de Granada, Granada.

Martos-Rosillo, S., M. Martín Machuca, J. Cruz-San-julián, J. C. Rubio, C. Hermo, and A. Díaz Pérez. (2006b). Evaluación de los recursos medios renovables del acuífero carbonático de la Sierra de Estepa (Sevilla). Pages 203-211 *in* Karst, cambio climático y aguas subterráneas. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero, Málaga.

Martos-Rosillo, S., F. Pérez-Fernández, A. Díaz, J. A. López Geta, M. Martín Machuca, and F. Ruiz -Bermudo. (2008a). Cálculo de la tasa de infiltración con el método APLIS en el acuífero carbonático de la Sierra de Becerrero (Sevilla). Análisis y contrastes de los resultados. 25-35 en A. Fernández Uría. IX Simposio de Hisrogeología. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Elche.

Martos-Rosillo, S., F. Pérez-Fernández, and J. J. Durán. (2008b). Estimación de la recarga mediante el método APLIS en los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa (Sevilla). Geo-Temas.

Martos-Rosillo, S., A. M. Rebollo, A. Díaz, and F. Pérez-Fernández. (2008c). Evaluación del tiempo medio de residencia del agua subterránea en los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Estepa y su repercusión en la gestión de los recursos explotables. Pages 985-904 en VII Congreso del Agua en Andalucía. IGME, Baeza.

ESTUDIO DE DEFINICIÓN DE LA TRANSFERENCIA SUBTERRÁNEA DE LA MASB BOQUERÓN CON OTRAS MASAS DEFINIDAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

Ramón Aragón Rueda,
Jorge Hornero Díaz,
Clemente Trujillo Toro

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Estudio de definición de la transferencia subterránea de la MASb Boquerón con otras masas definidas en la demarcación hidrográfica del Júcar,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

Ramón Aragón Rueda
Jorge Enrique Hornero Díaz
Clemente Trujillo Toro

Colaboración:

Empresa INTECSA-INARSA

ESTUDIO DE DEFINICIÓN DE LA TRANSFERENCIA SUBTERRÁNEA DE LA MASB BOQUERÓN CON OTRAS MASAS DEFINIDAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La zona comprendida en la denominada masa de agua subterránea Boquerón (070.004) disponía hasta la actualidad de un conocimiento hidrogeológico precario, pues su investigación se remonta a la década de los años 70 y principios de los 80 del siglo XX (IGME, 1979; 1980; 1981; 1985; 1988), (Senent *et al*., 1975) dentro de las actividades llevadas a cabo por el IGME en el marco del Programa Nacional de Investigación de las Aguas Subterráneas de España (PIAS) y comienzos del siguiente Programa de Gestión y Conservación de Acuíferos (PGCA). Estudios posteriores parten de dichas investigaciones y adoptan básicamente el modelo geológico e hidrogeoló-

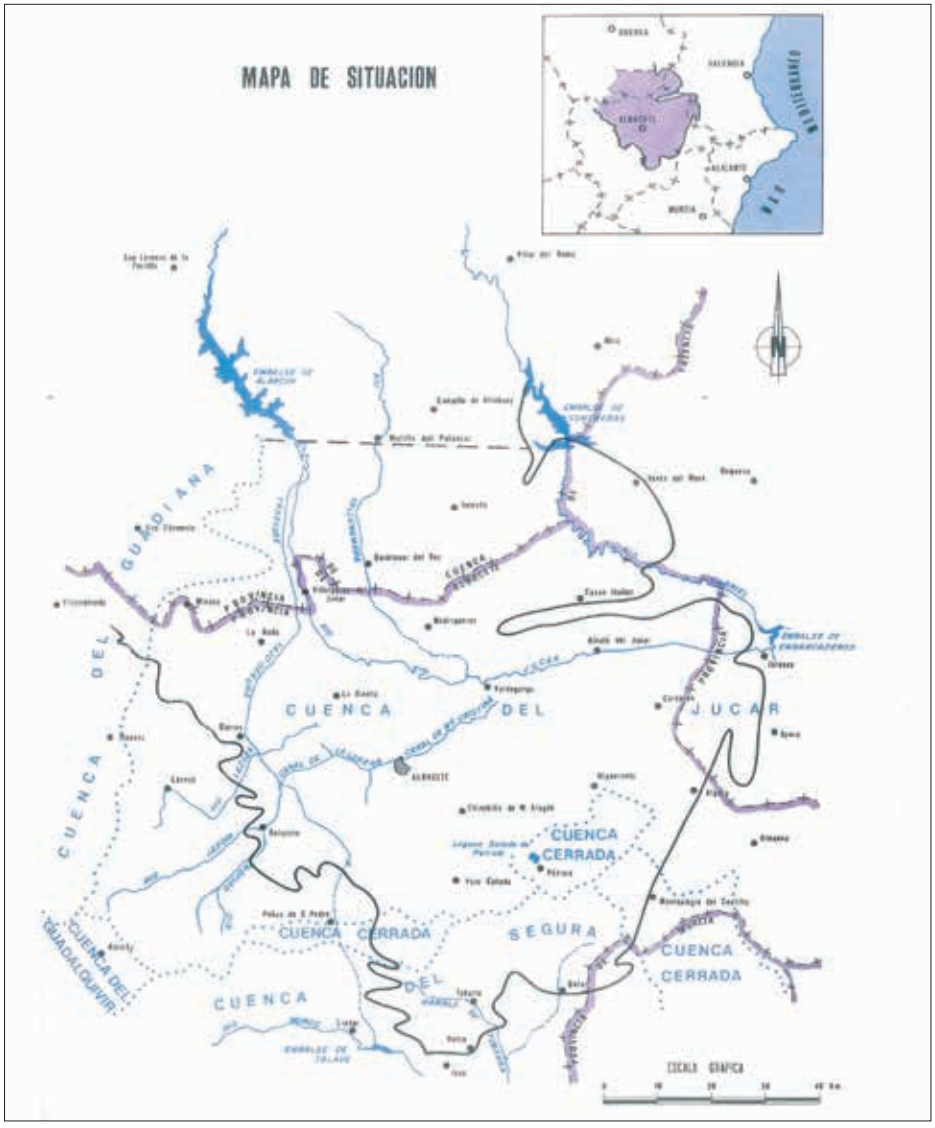


Figura 1. Localización de la unidad hidrogeológica de Albacete (IGME, 1979)

gico establecido anteriormente, y se limitan a actualizar diferentes aspectos relacionados con la gestión, como son las extracciones de agua subterránea, delimitación administrativa e incluso modelación numérica del flujo subterráneo, pero sin realizar investigaciones hidrogeológicas nuevas IGME (1999), (DGOH-IGME, 1988), (CHS,1988;1997;2007). Además, las consideraciones que se efectúan apenas afectan a la zona correspondiente al límite entre las cuencas del Júcar y Segura, sino a las situadas el norte o sur de la misma.

Es precisamente en esta zona donde se concentran las principales ausencias de conocimiento tanto en lo concerniente a definición geométrica y delimitación de acuíferos como a su funcionamiento hidrogeológico, incertidumbres que adquieren especial relevancia por su significación en una cuestión de tanta trascendencia técnica y administrativa como es el posible intercambio de flujos subterráneos entre las mencionadas cuencas hidrográficas.

Este ha sido por tanto el objetivo fundamental de la investigación llevada a cabo, que lleva implícitos otros objetivos parciales como son la delimitación de los acuíferos y masas de agua subterránea en este entorno, su caracterización geométrica y establecimiento de su funcionamiento hidrogeológico.

ANTECEDENTES

De acuerdo con el conocimiento previo existente, la actual masa de agua subterránea quedaba englobada dentro de lo que se denominaba "Unidad de Albacete" o "Unidad Norte: Sistema hidrogeológico de Albacete". Dicha unidad se extiende ampliamente por la provincia de Albacete y comprende incluso el extremo meridional de la Cuenca, abarcando una superficie de 8500 km^2 (figura 1). Se definieron tres acuíferos principales constituidos por dolomías del Dogger (formación Chorro), calizas y dolomías del Cretácico superior (formación Benejama) y materiales calizos y detríticos del Terciario-Cuaternario. El primero de ellos es el de mayor importancia, mientras que el último presenta un interés reducido y variable espacialmente.

En la Llanura de Albacete estos acuíferos se encuentran superpuestos e hidráulicamente conectados vertical o lateralmente según los sectores, constituyendo un único acuífero multicapa que es drenado por el río Júcar. En el extremo meridional del sistema sólo está presente el acuífero Chorro, en conexión hidrogeológica con la zona de la Llanura de Albacete y drenado en parte por el límite sur del sistema (manantiales de la zona de Hellín-Tobarra, evaluados entonces en unos 15 hm^3/año). Este esquema global es más complicado a escala local por la existencia de numerosas discontinuidades estratigráficas y tectónicas (cambios de facies, fallas, etc.).

A grandes rasgos, se distinguieron hidrogeológicamente dos zonas que, aunque conectadas hidráulicamente, presentan características diferentes: zona de la Llanura de Albacete y zona de "tectónica en teclas de piano". La primera incluye los sectores central y septentrional del sistema y en ella están representados los tres acuíferos importantes antes mencionados, conectados en el sector central, y con el flujo subterráneo condicionado por el río Júcar hacia el que se produce el drenaje. La segunda zona ocupa el extremo meridional del sistema, está constituida por una serie de alineaciones montañosas correspondientes a los afloramientos de las dolomías del Dogger (único acuífero de interés aquí representado) y se encuentra compartimentada en subsistemas relacionados entre sí y limitados en la mayoría de los casos por barreras de transmisividad (figura 2).

En esta zona, a través de las fallas o de los núcleos de los anticlinales existentes, puede darse localmente una interrupción hidráulica en el acuífero, pero este hecho no es general, siendo frecuente, sin embargo, que se produzca una importante disminución de potencia saturada del acuífero en esos lugares, lo que crea una especie de barreras por reducción muy considerable de la transmisividad, que generan diferencias bruscas de la piezometría entre ambos lados de las mismas. De esta manera se definieron bloques con diferentes piezometrías, pero hidráulicamente comunicados. La circulación subterránea muestra por una parte un gradiente hacia el norte comunicándose hidráulicamente con la Llanura de Albacete y, por otra, en el sector meridional, con gradiente general hacia el sur produciéndose la descarga a través del límite meridional (manantiales de Hellín-Tobarra).

Posteriormente (IGME, 1980;1981), y con objeto de simplificar la investigación y la gestión de un área tan extensa, esta unidad se dividió 11 zonas hidrogeológicas (figura 3), una de las cuales, la denominada Zona 4 (Petrola-Hellín) está incluida casi en su totalidad en la cuenca del Segura, y corresponde aproximadamente a las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.004 Boquerón, 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla, 070.008 Ontur, 070.007 Conejeros-Albatana (parcial), 070.001 Corral Rubio y 070.002 Sinclinal de la

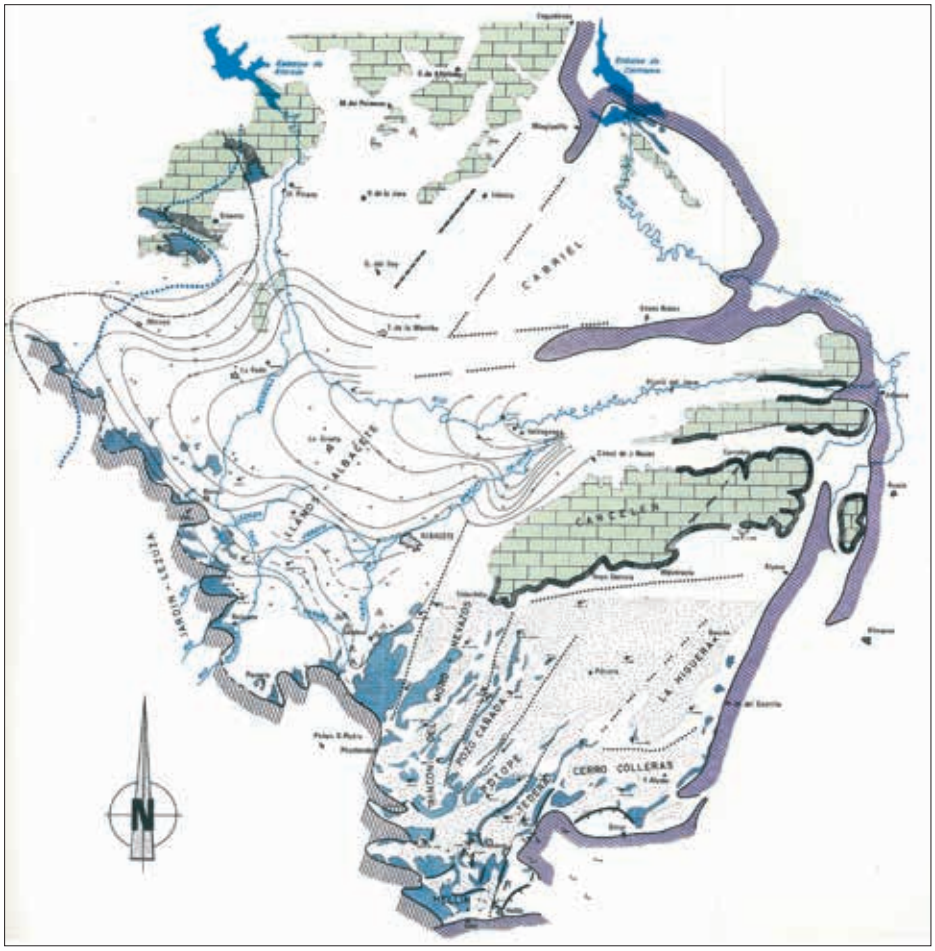


Figura 2. Sectorización de la U.H. de Albacete (IGME, 1979)

Higuera. Además incluye los reducidos sectores pertenecientes a la cuenca del Júcar de Nava de Abajo y este de Pozo Cañada. De los acuíferos que forman el Sistema de Albacete, el único presente en toda esta zona es el Chorro (materiales carbonáticos jurásicos), que alcanza potencias máximas próximas a 300 m, y se encuentra afectado por una tectónica de bloques que ha provocado su división en una serie de compartimentos, entre los que existe una deficiente conexión hidrogeológica puesta de manifiesto por diferencias piezométricas. El flujo del agua subterránea tiene sentido hacia el sur, aunque la presencia de barreras de transmisividad condiciona la circulación y da lugar a una serie de manantiales, todos en el sector sur, que constituyen el drenaje natural. Ya se advertía que, aunque la zona estaba en equilibrio hídrico, sin transferencias laterales subterráneas y con una coincidencia aproximada entre las divisorias de cuencas hidrográficas Júcar y Segura y de aguas subterráneas, el previsible incremento de las extracciones de agua subterránea implicaría un desplazamiento hacia el norte de la divisoria piezométrica, pudiendo establecerse flujo subterráneo desde la cuenca del Júcar hacia la del Segura. Igualmente, la estructura del acuífero en compartimentos haría que se produjeran sobreexplotaciones locales, con la aparición de umbrales hidrogeológicos que independizarían zonas dentro de un mismo compartimento, resultando inevitablemente afectados los manantiales.

En IGME (1985;1988) se desagregan del sistema hidrogeológico de Albacete las actualmente denominadas masas de agua subterránea 070.001 Corral Rubio, 070.002 Sinclinal de la Higuera y 070.005 Tobarra-Tedera-Pinilla. El sector de Corral Rubio no se estudió y se siguió considerando como parte del sistema hidrogeológico mencionado. El resto de los sectores se subdividió en diferentes bloques o compartimentos denominados, de norte a sur, Sinclinal de la Higuera, Pinilla, Tedera y Tobarra. La formación acuífera principal es la constituida por dolomías del Dogger, siendo el sentido del flujo subterráneo hacia el sur, con circulación en forma de "cascada" como consecuencia del escalonamiento hidrodinámico originado por la tectónica de bloques que afecta al acuífero, que da lugar a fuertes saltos o escalones en la superficie piezométrica y a la diferenciación en los compartimentos citados, intercomunicados entre sí por conexiones laterales a través de las zonas de fractura. Los límites laterales con el resto del sistema hidro-

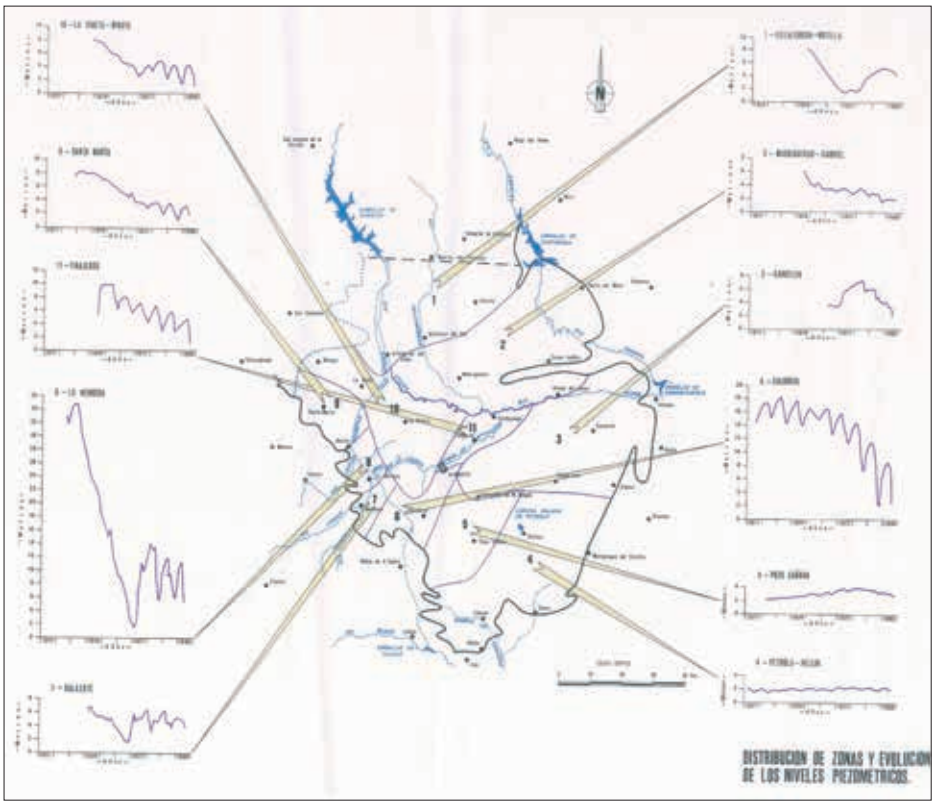


Figura 3. Distribución de zonas y evolución de los niveles piezométricos en la U.H. de Albacete (IGME, 1980)

geológico de Albacete se estiman como impermeables, con algunas posibles excepciones locales en el caso de Tedera.

La actualmente denominada masa de agua subterránea Boquerón comprende los anteriormente denominados por el IGME compartimentos de Boquerón, Preciados y parte de Polope (excepto el sector noreste de este último, que abarca la hoy denominada masa de agua subterránea Corral Rubio y zona colindante de la cuenca del Júcar). El sector de Nava de Abajo, actualmente excluido de la masa de agua subterránea Boquerón por hacerse coincidir su límite con la divisoria hidrográfica entre las cuencas del Júcar y Segura, formaba parte del compartimento de Polope. Es precisamente en esta zona donde se contempla el principal objetivo del presente informe, que es el de dilucidar la dirección y sentido de la circulación del agua subterránea y la ubicación del límite real de los acuíferos en estudio.

En DGOH-IGME (1988) se adopta oficialmente la denominación de U.H. 08.29 Mancha Oriental y se modifica el límite sur que se hace coincidir con la divisoria entre las cuencas hidrográficas del Júcar (CHJ) y Segura (CHS). Este es el límite que se ha considerado posteriormente por CHS, con la matización de que la cuenca endorreica de Pozohondo se asigna actualmente a la CHJ, por lo que quedaría incluido en la Mancha Oriental. De este modo, el sector de Nava de Abajo resultó posteriormente excluido de la masa 070.004 Boquerón a pesar de que, según documentos recientes de CHS, incluiría parcialmente los acuíferos de Buhos y Umbria.

En los estudios posteriores no se aportan más novedades para Boquerón y la zona intercuencas que la consideración de que el hacer coincidir los límites hidrogeológicos con los hidrográficos es una cuestión administrativa (por motivos exclusivos de mayor facilidad y eficacia en la gestión hídrica), pero que la realidad física es diferente, por lo que existe un flujo subterráneo con sentido norte-sur, es decir, desde la cuenca del Júcar a la del Segura (IGME, 1999). También existen algunas diferencias en cuanto a la subdivisión interna de Boquerón (CHS, 1997).

Por último, en CHS (2007) se expone que la unidad de Boquerón, cuyos límites adopta los del Plan Hidrológico del Segura (CHS, 1997), tiene un funcionamiento muy complejo, compartimentado, con límites difíciles de establecer, teniendo comunicación con la cuenca del Júcar por el norte y con la unidad de Tobarra por el este. Es interesante el análisis piezométrico que se efectúa y las consideraciones respecto al intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (figura 4), cuya cuantificación no se realiza, sino que se admiten

las establecidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura, es decir: entradas laterales a Boquerón, desde Mancha Oriental, 10,27 hm³/año; salidas laterales desde Boquerón, sin especificar claramente si es hacia la Mancha Oriental o hacia Tobarra-Tedera-Pinilla: 2,2 hm³/año.

Asimismo se indica que se está produciendo un descenso generalizado de niveles piezométricos, más acusado en el sector occidental y vertiente del Júcar (figura 4). Este descenso está provocando un "arrastre" hacia el Júcar (salidas laterales), mientras que todo el sector oriental mantiene sus flujos primigenios con una sobrealimentación, que en principio se origina al noreste de la Unidad de Boquerón, en la cuenca del Júcar. Para justificar las evoluciones piezométricas que se registran, donde en ocasiones se observan significativos ascensos de niveles, se ha considerado la existencia de aportes laterales, pues la infiltración de agua de lluvia no es capaz por sí misma de explicarlos. La situación de desequilibrio se inició en el año 1980, aunque los descensos de niveles no comenzaron a producirse hasta el año 1983. En los últimos años los niveles han llegado a descender por debajo de la cota de descarga, anulándose por tanto la Fuente de Isso (llegó a descargar 150L/s), aunque con recuperaciones coyunturales ligadas a episodios de alta pulviosidad. Todos los manantiales restantes están secos actualmente.

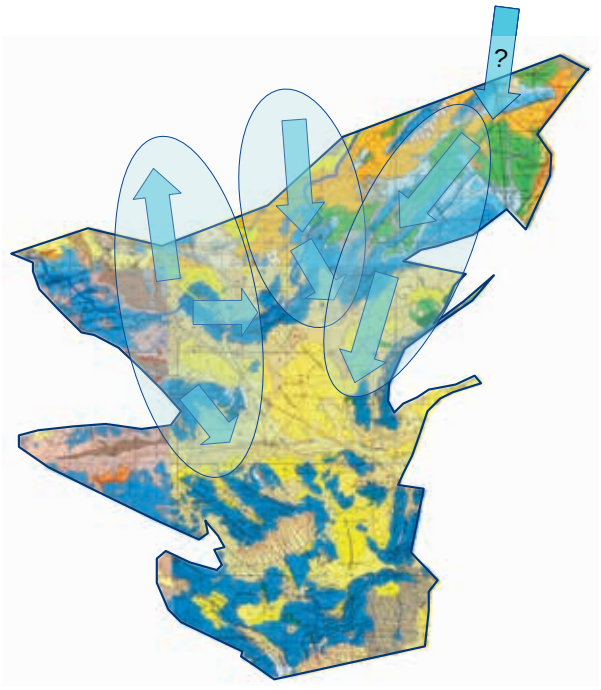


Figura 4. Intercambio de flujos subterráneos entre las cuencas del Segura y Júcar (CHS, 2007)

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Para alcanzar los objetivos propuestos se ha procedido en primer lugar a una completa recopilación y análisis de la documentación existente, que ya desde un principio se comprobó que apenas comprendía a la zona de límite entre las cuencas hidrográficas del Júcar y Segura. Se trataría además de numerosos estudios que actualizaban algunos de los aspectos de los acuíferos involucrados pero que no aportaban prácticamente nada en cuanto a los aspectos fundamentales de geometría, evaluación de recursos hídricos, funcionamiento hidrogeológico y balance, pues se remitían en estas cuestiones a los estudios primigenios del IGME.

En consecuencia, ha sido necesario proceder a un reconocimiento geológico e hidrogeológico de campo que, junto con la actualización del inventario de puntos de agua y de extracciones por bombeo, aportasen la base adecuada para revisar la delimitación externa e interna de los acuíferos y masas de agua subterránea involucrados en el área del estudio.

Con objeto de mejorar la caracterización geométrica, y en especial para definir la naturaleza de los límites en el entorno de la divisora hidrográfica entre las dos demarcaciones, se han utilizado varias técnicas hidrogeológicas: revisión de cartografía en el campo; cortes hidrogeológicos; campaña piezométrica *flash* y análisis del balance hídrico.

Para dar coherencia a la nueva delimitación, en especial en la zona del límite intercuencas, y, sobre todo, para tratar de esclarecer la cuestión fundamental de la existencia o no del intercambio de flujos subterráneos entre ambas demarcaciones hidrográficas, ha sido preciso evaluar la recarga a los acuíferos y determinar el flujo subterráneo. Para ello se ha establecido su balance hídrico y se han analizado las evoluciones piezométricas mediante la realización de campañas en puntos que se han nivelado para la ocasión. El fin último que se buscaba es la coherencia entre la nueva definición geométrica, su esquema de circulación y la cuantificación de sus recursos, habiéndose utilizado para un mayor rigor de la evaluación de la recarga varios métodos de cálculo: balance de agua en el suelo y balance de cloruros.

El estudio ha concluido con una propuesta de nueva delimitación para las masas de agua subterránea que ha incidido fundamentalmente en el límite entre ambas cuencas y en la consideración del flujo entre ambas, as-

pecto de especial interés por su importancia en la planificación hidrológica.

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA

El área de estudio se localiza en el extremo oriental de la zona Prebética, al borde Sureste de los Llanos de Albacete, y en la parte más meridional de la Cordillera Ibérica.

Los materiales más antiguos que aparecen en la región estudiada corresponden al Triásico, mientras que los más modernos se atribuyen al Cuaternario, siendo los más abundantes los pertenecientes al Jurásico. Durante este periodo de tiempo la sedimentación no ha sido ni continua ni homogénea, y se presentan diversas lagunas estratigráficas, discordancias y variaciones de facies a lo largo y ancho de la zona estudiada.

La formación permeable principal está constituida por los materiales dolomíticos del Dogger (denominados en documentos anteriores Formación Chorro), coronados por un tramo calizo poco potente del Oxfordiense, que dan al conjunto un espesor próximo a 300 m. A muro del Dogger se encuentra una formación margosa poco permeable del Lías, que se utiliza generalmente en la definición de los límites hidrogeológicos. Por debajo, hay una formación dolomítica del Lías que apenas aflora y de la que se conoce poco de su comportamiento hidrogeológico, así como de la salinidad de su agua, que puede ser localmente más elevada que la del Dogger. El impermeable de base general es la formación arcillosa del Trías, que localmente también actúa como límite lateral. Otras formaciones permeables a techo del Dogger son de muy reducido interés y tienen una piezometría descolgada del acuífero principal.

Figura 5. Delimitación de acuíferos propuesta

Los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográfica del Segura y del Júcar diferencian 4 acuíferos: tres en el Segura (Boquerón, Búhos y Umbría) y uno en el Júcar, denominado Mancha Oriental.

La zona se caracteriza por la escasez de afloramientos del impermeable de base general del Trías en la mayor parte de los límites y por una presencia limitada de la formación Madroño, de naturaleza margosa (Lías). En estas condiciones, juegan un papel fundamental los subafloramientos de estas formaciones en los ejes de los anticlinales y en las unidades cabalgantes, por lo que la comprensión de la estructura geológica de la zona tiene una importancia fundamental.

La delimitación de acuíferos se define con un carácter general a nivel del Jurásico, pues como antes se ha indicado es la formación dolomítica del Dogger la de mayor importancia hidrogeológica de la zona. Se desconoce el carácter de los materiales dolomíticos del Lías inferior, ya que no son captados por sondeos, aunque el conocimiento regional del flujo induce a pensar que guarda relación con el Dogger (figura 5).

Los límites, tanto los externos de la masa como los internos entre los acuíferos que la componen, son en parte de difícil definición. El sector meridional de Boquerón aparece claramente constituido por los afloramientos de Trías al SO de Hellín. Desde esta zona, tanto los límites laterales de la MASb (límite occidental de los acuíferos Boquerón, como el oriental del acuífero Búhos) deben estar definidos por levantamientos del impermeable de base, en anticlinales o cabalgamientos, en los que aflora de un modo parcial. Este tipo de estructura determina el límite entre los acuíferos Umbría y Boquerón. El resto de límites este-oeste resultan más difíciles de determinar.

El límite entre Umbría y Boquerón no resulta de definición clara, y puede proponerse su eliminación, dejando los actuales dos acuíferos, Boquerón y Umbría, como uno solo Boquerón-Umbría.

El límite entre Umbría y Búhos se traza por levanta-

miento de la formación margosa del Lías por la acción de cabalgamientos sucesivos que existen en esta zona.

El límite septentrional de la MASb (acuíferos Umbría y Búhos), de especial interés para la planificación hidrológica por la posible conexión hidráulica subterránea intercuencas, es el más difícil de establecer, dada la ausencia de barreras impermeables que afloren de un modo continuo. Se deduce que se compone de divisorias piezométricas condicionadas por zonas de baja transmisividad y por la distribución de los bombeos. En el caso del acuífero Umbría se ha trazado basándose en el levantamiento del impermeable de base al sur de Nava de Arriba hasta el Dogger del Cerro del Romeral. En el amplio sector del acuífero Búhos la situación es más compleja debido a la ausencia de límites geológicos claramente identificables, siendo esta la razón de que en el Plan Hidrológico del Segura (1997) se le asigne un carácter abierto y permita unas entradas subterráneas procedentes del mismo acuífero, en su parte situada en la cuenca del Júcar. La existencia de esta transferencia en régimen natural no es más que la constatación de que el límite actualmente definido en el Plan es convencional y que el real debe situarse más al norte, dentro de la Demarcación del Júcar. Aunque no es posible precisar su posición exacta, sí ha resultado factible determinar la extensión del acuífero en base al análisis de la coherencia de la superficie permeable con la tasa de recarga evaluada, lo que es una manera indirecta de aproximar su superficie en la cuenca del Júcar.

Los límites propuestos se indican en la figura 5 y en algunos casos presentan variaciones apreciables con respecto a la definición previa recogida en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.

Por otro lado, las extracciones actuales que se vienen realizando en el acuífero Búhos son superiores a los valores de recarga, lo que ocasiona que se encuentre en una situación de sobreexplotación (figura 6). Ésta ha ocasionado la compartimentación del acuífero por divisorias piezométricas de modo que en la situación actual aparece dividido en al menos tres sectores, denominados Meridional, Judarra o Intermedio y Septentrional (figura 5). Este último se localizaría al norte de Judarra, aunque se delimitación precisa se desconoce por las variaciones del flujo subterráneo inducidas a causa de la sobreexplotación.

Al tratarse de límites hidráulicos determinados por la distribución de las extracciones y condicionados por las barreras de transmisividad, son límites que espacialmente pueden variar. No obstante, esta movilidad queda restringida por la distribución de las características hidráulicas del acuífero, que en gran parte están condicionadas por la tectónica. Las zonas donde aflora el Dogger tienen una sección saturada muy pequeña debido a su altitud, e incluso en algunos casos pueden encontrarse desaturadas. En base a esta disposición, es posible precisar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero en sus sectores Meridional y Judarra. Se mantiene la incertidumbre en la geometría del límite sep-

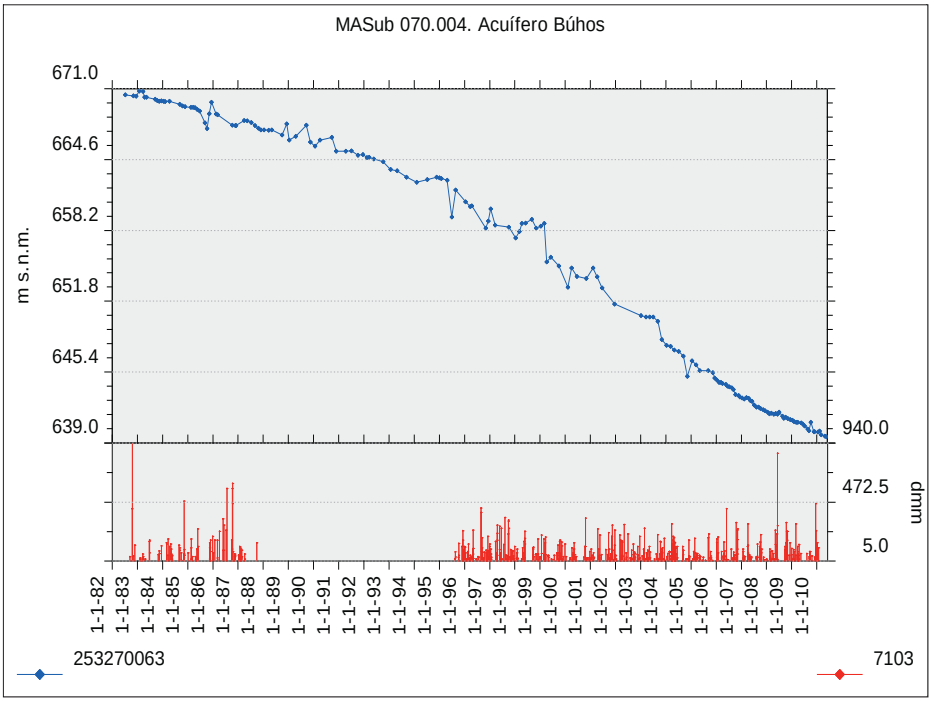


Figura 6. Evolución piezométrica en el acuífero Búhos

tentrional, como ya se ha comentado anteriormente al describir este límite.

DEFINICIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

La información piezométrica disponible para caracterizar con una cierta precisión la circulación del agua subterránea en régimen natural es bastante incompleta, pues desde la definición del acuífero Boquerón (Senent *et al.*, 1975) no se han realizado estudios complementarios hasta el realizado por CHS (2007). No obstante, en la presente investigación se ha definido mediante el análisis de la información de las redes de control piezométrico en los acuíferos Boquerón, Umbría, Búhos y sector meridional del acuífero Mancha Oriental y de los datos históricos del IGME.

En régimen natural, los recursos de los acuíferos Umbría y Boquerón descargaban por la fuente de Isso (253420029) y en menor medida por los manantiales de La Teja (253420030) y del Prado (253420030), estas últimas con unos caudales de unos 5 L/s cada una. La fuente de Isso registró caudales en torno a los 100 L/s, con un máximo observado de 150 L/s en marzo de 1990. A partir de 2002 la fuente permanece seca, si bien ha vuelto a surgir esporádicamente en relación con periodos en los que se han producido fuertes precipitaciones. Los recursos generados en el acuífero Umbría se transferencia por escorrentía subterránea al acuífero Boquerón a través de un límite de carácter abierto. El acuífero Búhos descargaba en régimen natural por las fuentes de Polope y Mercedes. Es importante también indicar la probable existencia de una transferencia subterránea desde el sector meridional del acuífero Búhos al acuífero Boquerón.

A partir de 1980, los bombeos en la zona sur de Albacete fueron incrementándose gradualmente hasta superar en algunos casos los recursos subterráneos renovables. Los significativos descensos piezométricos causados por

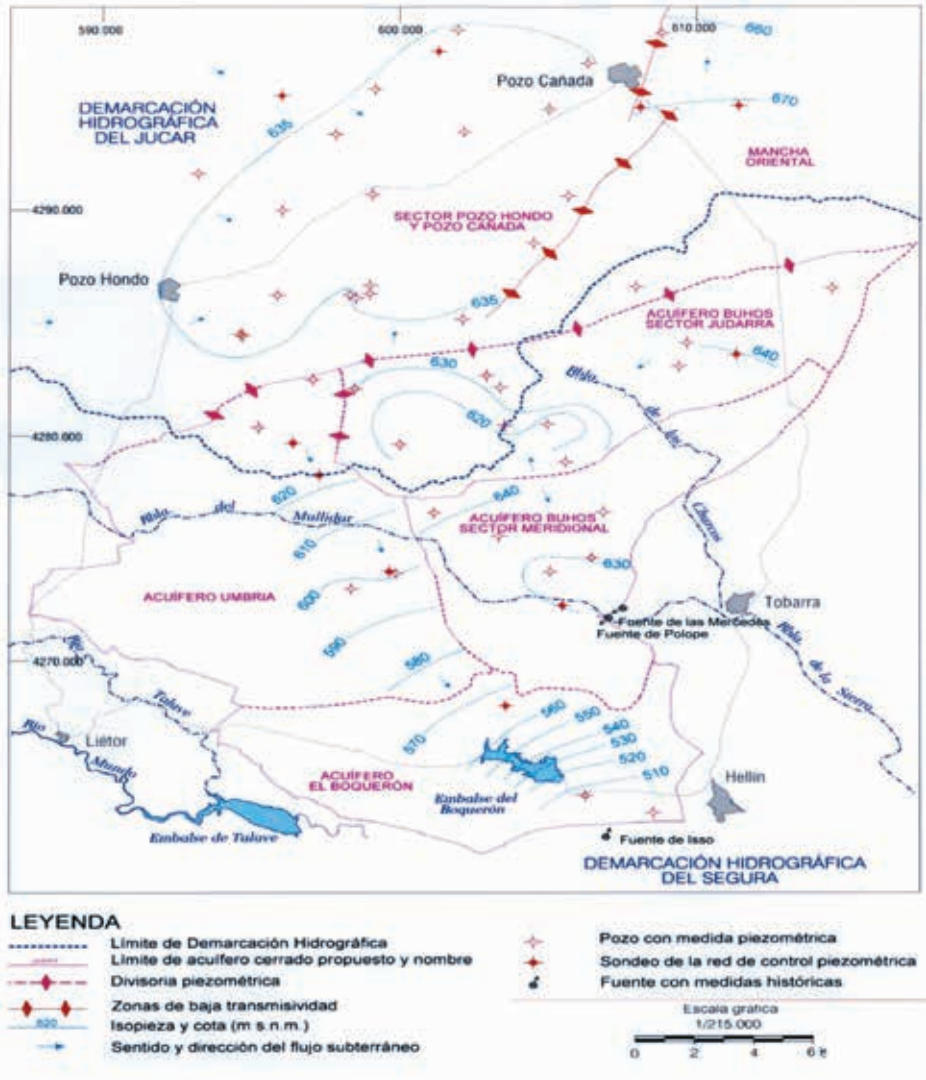


Figura 7. Definición del flujo subterráneo

estos bombeos han alterado muy significativamente el esquema de circulación del agua subterránea en todos los acuíferos de esta zona (figura 7).

Desde hace años la explotación por bombeo es muy intensa, 28,46 hm^3/año (CHS, 2007), lo que ocasiona descensos generalizados y que se observen grandes conos piezométricos que permiten deducir variaciones en las direcciones de flujo con respecto a una situación previa a los años 1970, en régimen natural. El régimen influenciado ha producido divisorias piezométricas que deben ser tenidas en cuenta.

En el acuífero Umbría-Boquerón se aprecia un flujo subterráneo continuo NO-SE. En la zona septentrional, la posición del límite con el sector Judarra del acuífero Búhos e incluso con el sector Pozo Cañada-Pozo Hondo de Mancha Oriental se establece por divisorias piezométricas condicionadas por los bombeos. La parte más occidental del acuífero ha sido cortada por el túnel del Talave, que podría drenar de un modo muy local esta zona. En la situación actual, las detracciones de recursos al acuífero a consecuencia de los bombeos en la cuenca del Júcar parecen poco significativas y la disminución del caudal de la Fuente de Isso es consecuencia de los bombeos en el sistema Umbría-Boquerón, que en función del análisis realizado podría considerarse como un único acuífero.

En el acuífero Búhos el flujo natural desde el sector septentrional hacia los manantiales de Polope y Mercedes (2533-20031 y 20032) se ve interrumpido en el denominado sector Judarra. No se descarta una pequeña transferencia subterránea a través de su límite nororiental, pero el área generadora de recursos subterráneos drenables hacia Judarra en la situación actual es pequeña, y aparece limitado por la barrera de transmisividad Ontalafia-Chertal. En cualquier caso, los bombeos han mermado muy significativamente o incluso hecho desaparecer la transferencia subterránea que en régimen natural existía entre las demarcaciones del Júcar y Segura. Por otro lado, no puede descartarse completamente una transferencia poco significativa a través del límite suroriental del sector Judarra hacia el sector meridional del acuífero Búhos. Dentro de este sector, las mayores depresiones se observan en los pozos situados al oeste de las antiguas surgencias naturales del acuífero. Precisamente por esta situación de explotación intensiva, el flujo subterráneo hacia el acuífero Boquerón debe ser muy poco importante, en caso de existir.

Entre Pozo Hondo y Pozo Cañada, ya en el acuífero Mancha Oriental, se ha formado una amplia zona deprimida piezométricamente a consecuencia de los bombeos que se producen en su interior. La alineación Ontalafia-Chertal (al SO de Pozo Cañada) define una barrera de transmisividad determinada por el afloramiento de la formación Madroño, que debe de continuar por el este de Pozo Cañada, según la interpretación piezométrica de los sondeos a ambos lados de la misma. Es muy posible que en régimen natural, con una disposición piezométrica más favorable, el sector definido al este de la Sierra de Ontalafia drenara hacia la cuenca del Segura, pero la ausencia de información piezométrica impide precisarlo.

ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO Y COHERENCIA CON LA DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA BOQUERÓN

Un estudio reciente realizado por el IGME-CHS (2009) ha ayudado a definir con mayor precisión la estructura hidrogeológica y el balance hídrico en áreas limítrofes a la zona de estudio, concretamente en la masa de agua subterránea de Alcadozo. Las masas de agua subterránea de Alcadozo y Boquerón presentan singularidades parecidas, fundamentalmente en lo que se refiere a sus características hidrogeológicas, tipo de estructura y materiales permeables. Además, por su cercanía, las variables climatológicas presentan características similares que permiten correlacionar y extrapolar ciertos parámetros que sirven de base en determinadas estimaciones relacionadas con el cálculo de sus recursos.

En este sentido se ha considerado factible extrapolar en la MASb Boquerón, el valor de la recarga media interanual estimada en la MASb de Alcadozo mediante la aplicación del código numérico Visual Balan (Samper y García-Vera, 1999). Este tipo de modelación numérica está basada en el carácter secuencial de determinados balances de agua que se producen en los acuíferos durante el proceso de recarga, concretamente los balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el propio acuífero. En la masa de agua subterránea de Boquerón ha sido necesario encontrar variables y series de datos regulares de tipo hidrométrico que permiten su calibración, como son, por ejemplo, la evolución piezométrica y el volumen temporal de descarga concentrada a través de sus principales manantiales. Es importante significar que la estimación de la recarga en los acuíferos está siempre sometida a ciertas incertidumbres, sobre todo relacionadas con la distribución espacial y temporal de la precipitación, con las condiciones atmosféricas am-

bientales (temperatura), las características del suelo y de la vegetación, y a veces con las modificaciones o perturbaciones derivadas de algunas acciones antrópicas (Custodio, 2009).

Las investigaciones hidrogeológicas relacionadas con el cálculo de los recursos hídricos mantienen que es necesario contrastar el valor mediante diferentes métodos. Entre éstos, uno de los métodos más recomendable para el cálculo de la recarga está basado en el valor de deposición total atmosférica del ión cloruro sobre el acuífero, ya que se puede estimar el promedio de recarga a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Eriksson y Khunakausem, 1969). Esta metodología ha sido tratada por Custodio (1997, 1998 y 2009) y Alcalá y Custodio (2004). Los resultados obtenidos con el uso de esta metodología la proyectan como una técnica solvente a la hora de establecer el valor de la recarga difusa media en determinados acuíferos; además también sirve de ayuda a la hora de precisar algunos términos de difícil cuantificación, como puede ser la posible transferencia de agua por entradas o salidas laterales con acuíferos adyacentes.

En definitiva, la causa principal que ha motivado la aplicación de estos métodos ha sido analizar la coherencia de la nueva definición geométrica propuesta, que modifica parcialmente los límites hidrogeológicos, con la estimación de los recursos generados dentro de la masa de agua subterránea de Boquerón. Este análisis ha estado apoyado en:

—Extrapolación de los resultados obtenidos mediante Visual Balan en la MASb Alcadozo (IGME-CHS, 2009), considerando el valor de la recarga media interanual obtenida para una serie de 20 años hidrológicos (1989-90 hasta 2008-09) (figura 8).
—Aplicación de métodos de balance químico utilizando el ión cloruro atmosférico (CMB).

Estimación de la recarga media aplicando Visual Balan

Los datos obtenidos en la masa de agua subterránea de Alcadozo (IGME-CHS, 2009) indican que la relación porcentual entre la precipitación (P) y la recarga (R) obtenida para el periodo hidrológico 1989/90-2008/09 es P/R≈10,66 %. Con la nueva definición geométrica de la MASb Boquerón se han modificado parcialmente sus límites hidrogeológicos y, por tanto, la distribución y superficie de los materiales permeables (Lías y Dogger). Se han considerado idénticas variables hidrogeológicas en ambas masas de agua subterránea. La precipitación media registrada en la estación termopluviométrica de Ontur ha sido de 300 mm, aproximadamente un 25% menos que la registrada en la estación de control de Liétor-CHS localizada en la MASb Alcadozo. Con los valores de precipitación total interanual, superficies permeables en cada sector acuífero de la MASb Boquerón y porcentajes de recarga extrapolados de la MASb Alcadozo se han estimado los valores anuales de recarga y la recarga media. Con estos datos el valor de la recarga media por infiltración de agua de lluvia sobre los

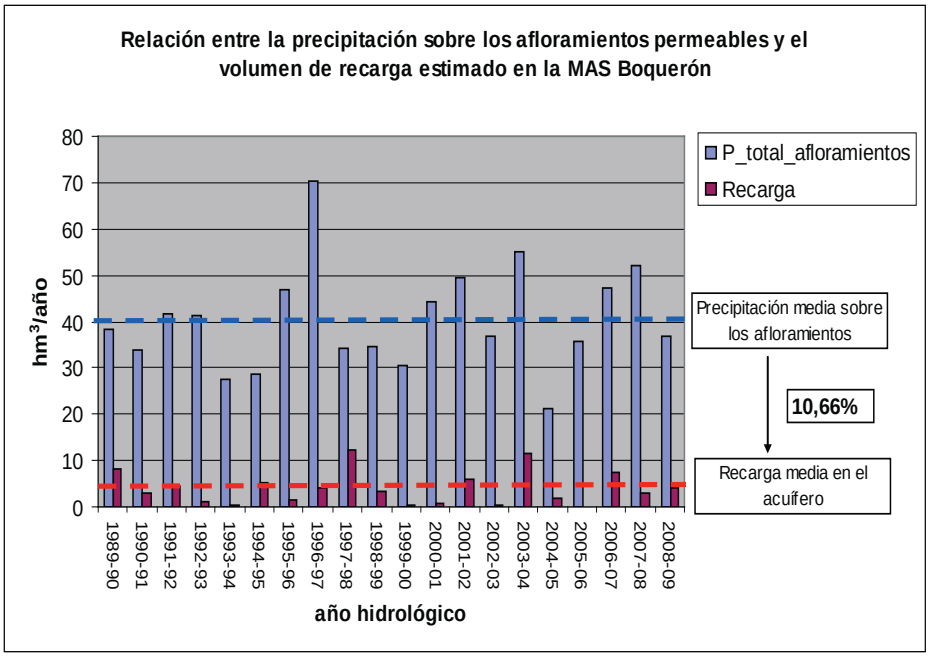


Figura 8. Distribución temporal de la precipitación y la recarga en la MASb Boquerón a partir de los datos extrapolados de la MASb Alcadozo.

122,7 km² de superficie total permeable en la MASb ha quedado fijada en 3,62 hm³/año.

Análisis de los resultados obtenidos en régimen variable

El Plan de Cuenca (CHS, 1997) establece que existe un equilibrio entre las entradas y salidas. En el estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación realizado por el Organismo de Cuenca (CHS, 2007) se ha obtenido que la variación de almacenamiento es -13,19 hm³.

El área permeable en la MASb Boquerón está cercana a los 122 km². Con el porcentaje de recarga/precipitación cercano al 10,66%, la recarga media está sobre los 3,62 hm³/año, aunque con una importante variabilidad temporal (figura 8). Si se asumen los valores aportados en el informe de CHS (2007) referidos a los demás términos del balance hídrico, sobre todo por su impacto, los volúmenes de explotación de agua subterránea, el resultado confirma que se está produciendo durante estos últimos años una variación de almacenamiento negativa cercana a los 14 hm³/año.

La evolución piezométrica refleja que la situación de desequilibrio comienza en la década de los años 80 (figura 9). Posteriormente el uso intensivo de las aguas subterráneas ha creado un escenario de sobreexplotación caracterizado por descensos piezométricos continuos que han debido ser determinantes en la modificación del esquema de funcionamiento del acuífero. Este nuevo escenario hidrogeológico implica que hay diferencias respecto del esquema de flujo subterráneo conocido y, por tanto, también respecto de las posibles relaciones internas entre los diferentes sectores acuíferos y de la propia masa de agua con otros acuíferos o masas de agua adyacentes.

La piezometría refleja un evidente vaciado del volumen almacenado en el acuífero, el gráfico representado en la figura 9 muestra unos descensos totales en los puntos de control que oscilan entre los 16 m y 58 m para un periodo aproximado de 30 años (1980-2010).). Los descensos mayores se localizan en la parte norte del acuífero Umbría y Búhos, y los descensos menores se observan en el borde suroriental del sector acuífero Boquerón. La evolución de las principales descargas naturales (figura 10) muestran oscilaciones puntuales e intensas con descensos de caudal no recuperado debido fundamentalmente a dos situaciones derivadas del uso intensivo de las agua subterráneas: por un lado, la gestión relativa-

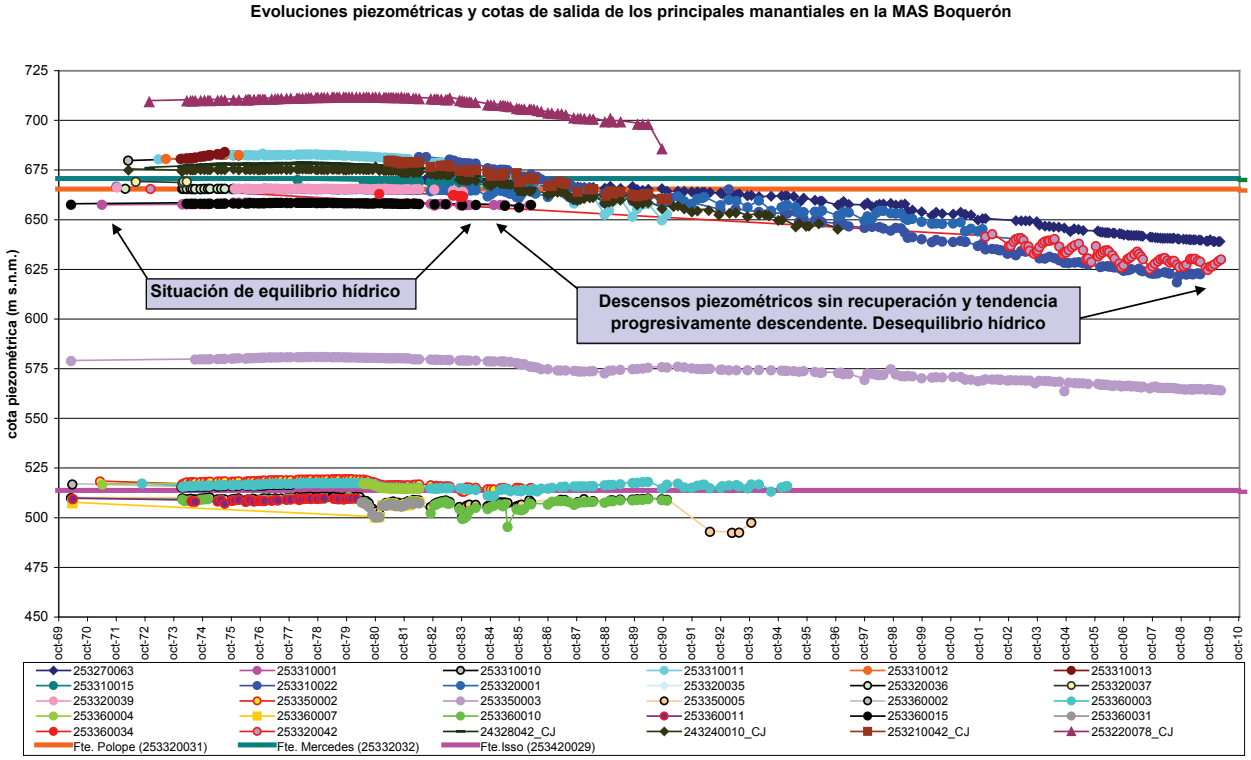


Figura 9. Evolución histórica de los niveles piezométricos y su relación con las cotas de salida de los principales manantiales en la MASb Boquerón.

mente planificada de algunos manantiales mediante la construcción en sus inmediaciones de sondeos de regulación, y por otro, al efecto de agotamiento en los caudales de descarga debido a la sobreexplotación del acuífero. El escenario temporal en el que se hacen evidentes estos efectos negativos en la situación hidrogeológica de la masa de agua subterránea, se puede determinar observando la intersección de las principales evoluciones piezométricas con las cotas de salida de los manantiales controlados.

Se ha estimado que existe una importante variabilidad interanual en los valores de recarga (figura 8) y, aunque los datos de explotación histórica son muy escasos, 9,82 hm^3 (IGME, 1988) y 28,46 hm^3 (CHS, 2007), se considera que en términos generales la aportación de recursos a la masa de agua ha estado notablemente descompensada respecto de los volúmenes de agua extraídos, es decir, su evolución histórica responde a un escenario temporal de agotamiento de sus reservas hídricas subterráneas. Se puede concluir de este análisis que a pesar del factor de incertidumbre que acompaña a este tipo de estimaciones, se considera válido que aproximadamente un 10,66% del agua de precipitación se pueda infiltrar en el acuífero.

Si se toman como elementos de referencia en el diagnóstico de la situación hidrogeológica de la masa de agua subterránea las variaciones temporales de la piezometría y la evolución de las descargas subterráneas (escorrentía no visible y manantiales), el estado más favorable que permite hacer una relativa calibración es cuando el acuífero no esté sometido a ninguna perturbación, es decir, el mejor escenario hidrogeológico posible ha de reflejar el estado natural del acuífero, situación que no se observa en la MASb Boquerón desde el inicio de la década de los años 80.

Cuantificación de los recursos generados y de la superficie permable en régimen natural

Se ha realizado en régimen natural un análisis comparativo entre los caudales descargados desde los principales manantiales y la superficie permeable existente, con el objetivo de comprobar la coherencia hidrogeológica en relación a los recursos generados dentro de los límites de la masa de agua. El escenario temporal escogido es anterior al comienzo de la explotación, concretamente el que transcurre entre los años hidrológicos 1975-1979.

El conocimiento geológico e hidrogeológico de la MASb propone que el análisis comparativo se debe hacer de manera independiente para los acuíferos

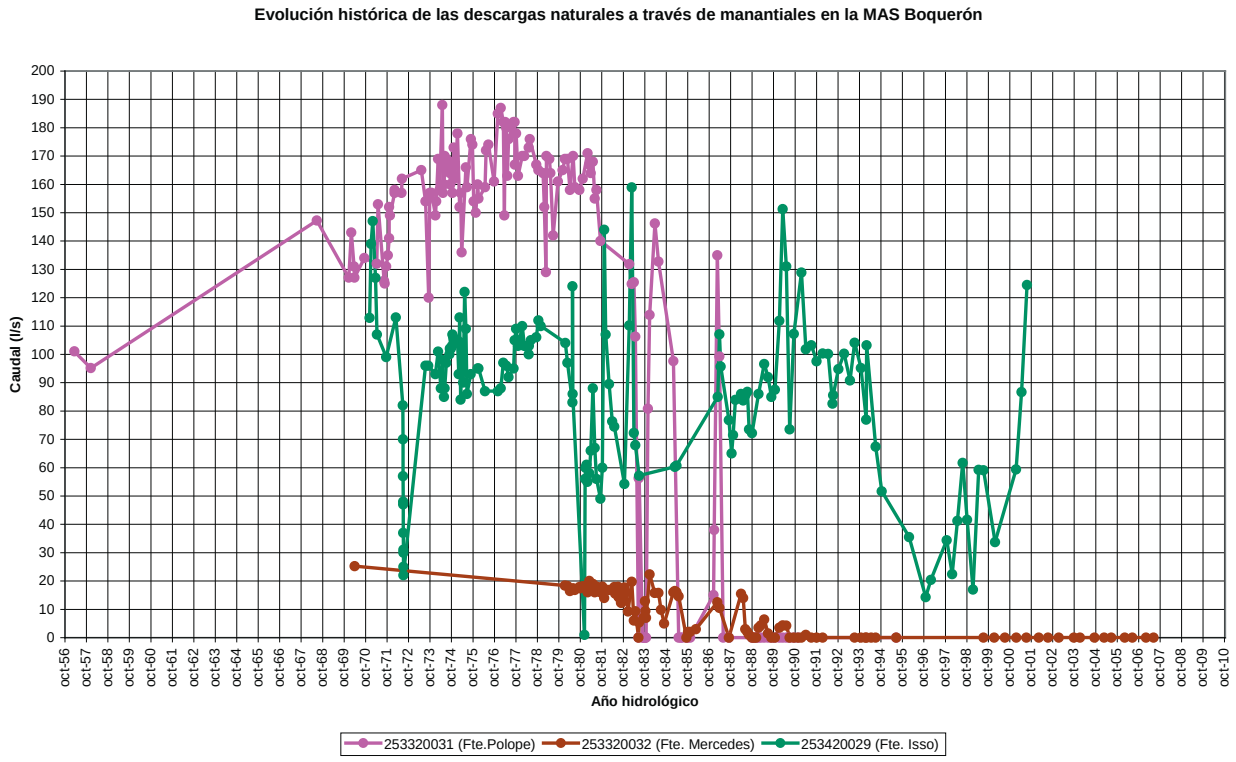


Figura 10. Evolución histórica de las descargas por manantial en la MASb Boquerón

Umbría-Búhos y Boquerón, es decir, considerar, por un lado, la coherencia de la superficie permeable total existente en los acuíferos de Umbría y Boquerón con respecto a su principal descarga natural (fuente de Isso-253420029) y, por otro, realizar la comparación entre las descargas registradas (fuente de Polope-253320031 y fuente de las Mercedes- 253320032) con respecto a la superficie permeable correspondiente al acuífero de Búhos.

En las tablas 1 y 2 se exponen los resultados más significativos obtenidos en los diferentes acuíferos:

Los resultados indican que la descarga media de 3,1 hm^3/año por la fuente de Isso (253420029) implica que el porcentaje de recarga (P/R) ha sido aproximadamente de un 10,87%. Este valor está en el mismo orden de magnitud que el considerado para la MASb Boquerón (10,66%) y, por tanto, es coherente con la superficie permeable y los recursos generados en los acuíferos Umbría y Boquerón.

En cambio, en el acuífero Búhos, el porcentaje P/R de 10,66 % tan solo podría justificar unos recursos medios cercanos a 1,76 hm^3/año frente los 5,85 hm^3/año que descargaban por las fuentes de Polope (253320031) y Mercedes (253320032). Esta cifra señala que sería necesaria una superficie permeable cercana a los 149 km^2 para justificar ese volumen de recursos. Este análisis comparativo demuestra que gran parte de los recursos que han estado disponibles en régimen natural en el acuífero Búhos, debían proceder de la infiltración de lluvia producida sobre determinados afloramientos permeables localizados sobre todo al norte de los límites del acuífero, es decir, se considera que en régimen natural ha existido una transferencia por escorrentía subterránea desde el acuífero de la Mancha Oriental (antes denominada UH 08.29 Mancha Oriental) hacia el acuífero Búhos (MASb Boquerón) que ha podido alcanzar el 70% de sus recursos totales. En términos cuantitativos, el volumen medio transferido de agua subterránea estaba cercano a los 4 hm^3/año.

Estimación de la recarga mediante balance de cloruros

Para realizar este análisis se han consultado valores de Cl en agua de lluvia obtenidos en estudios recientes

Tabla 1. Relación de valores medios de descarga por acuífero en la MASb Boquerón en régimen natural.

Acuífero	IPA	Nombre	Año hidrológico	Q medio	Descarga anual (hm^3)	Descarga media interanual en (hm^3/año)
Búhos	253320031	Polope	1975-76	162	5.04	5.17104
			1976-77	175	5.44	
			1977-78	171	5.32	
			1978-79	157	4.88	
	253320032		1975-76	22	0.68	0.684288
			1976-77	22	0.68	
			1977-78	22	0.68	
			1978-79	22	0.68	
Boquerón	253420029		1975-76	93	2.89	3.125952
			1976-77	94	2.92	
			1977-78	105	3.27	
			1978-79	110	3.42	

Tabla 2. Relación de precipitación anual, superficie permeable y lluvia media total sobre los afloramientos permeables de los acuíferos Umbría, Búhos y Boquerón en el periodo 1975-1979.

Año hidrológico	Precipitación estación Ontur (mm)	Sup. Permeable (m^2)			Precipitación media total sobre afloramientos (hm^2/año)		
		Umbría	Boquerón	Búhos	Umbría	Boquerón	Búhos
1975-76	467	47400000	30430000	44910000	17,51	11,24	16,59
1976-77	409						
1977-78	355						
1978-79	247						

(Alcalá y Custodio, 2008; Custodio, 2009) conjuntamente con datos propios del IGME de deposición de cloruros en agua de lluvia dentro de la MASb Alcadozo. Los valores de cloruro en agua de recarga (agua subterránea) se han obtenido de diferentes muestras que cumplen con los requisitos de aplicabilidad del método, recogidas entre los años 1974 y 1979 y localizadas en las MASb Mancha Oriental y MASb Boquerón (tabla 3).

Calcular el balance de masas entre el agua de lluvia y el agua subterránea utilizando el ión Cl^- como trazador natural, impone que no deben existir otros aportes de Cl^- procedentes del suelo o plantas, de tal manera que el valor de la recarga media interanual responda a la expresión (Allison *et al*. 1985):

$$R \cong P \cdot Cl_P / Cl_R$$

En esta ecuación R es la infiltración media (mm/año), P es la precipitación media anual (mm/año), Cl_P es el contenido medio en cloruros en el agua de lluvia (mg/L) y Cl_R es el contenido en cloruros en el agua de recarga (mg/L). El cociente entre Cl_P y Cl_R determina la tasa de infiltración y suele ser expresado como porcentaje.

Para el periodo en el que se han seleccionado las muestras de agua, la precipitación media registrada ha sido de 385 mm/año. La deposición atmosférica media oscila entre 0,3-0,5 g/m^2/año, según reflejan los últimos resultados obtenidos por el IGME y los que se exponen en los proyectos de investigación anteriormente citados. En la tabla 3 se indica que el valor medio de cloruros en el agua subterránea (agua de recarga) es de 30 mg/L (coeficiente de variación ±0,20). Con estos datos el valor de recarga media está cercano a 20,5 mm/año, es decir, el porcentaje de recarga respecto de la precipitación se aproxima a un 5,6%, valor bastante similar a los calculados por Alcalá y Custodio (2008) y Custodio (2009).

IPA	X UTM	Y UTM	Z	Año hidrológico	Cl (mg/L)
253210024	601950	4295350	800	1974-75	25
253220077	610721	4294818	811.07	1977-78	39
253310004	602922	4278720	765.48	1971-72	28
253320035	608759	4273470	696.86	1976-74	35
243340046	588104	4279985	810.00	1978-79	25

Tabla 3. Datos de contenido en Cl^- en puntos situados en el área de estudio

Como señalan los resultados, el porcentaje de recarga es menor que el obtenido mediante Visual Balan, diferencia que se debe principalmente a que el método CMB presenta una mayor incertidumbre asociada al tipo de variables que intervienen en los cálculos (contenido de Cl en lluvia y agua de recarga), lo que en determinados casos impone ciertas precauciones a la hora de valorar los resultados. En cualquier caso, de manera similar a la solución aportada por Visual Balan, el resultado obtenido indica que en régimen natural los recursos de agua subterránea de la MASb Boquerón procederían en gran parte de la infiltración de agua de lluvia originada sobre áreas permeables externas a los consideradas actualmente, es decir, se verifica la posibilidad de que se produjese una importante transferencia de agua subterránea desde el acuífero de la Mancha Oriental (cuenca del Júcar), coherentes además con las importantes descargas naturales que estaban activas en el borde sur-sureste de la MASb Boquerón antes del inicio de su sobreexplotación.

CONSIDERACIONES FINALES

Las masas de agua subterránea Boquerón y Mancha Oriental están sometidas a un proceso de sobreexplotación, que viene ocasionando un descenso piezométrico muy acusado desde principios de la década de los años 70 del pasado siglo, lo que ha ocasionado que se hayan secado los manantiales del acuífero Búhos. En la situación actual, el volumen anual de extracciones excede los recursos renovables de los acuíferos de estas masas, que provoca una distorsión del esquema del flujo subterráneo, ocasionando una variación de las trasferencias subterráneas que en régimen natural se producían entre las demarcaciones hidrográficas del Júcar y Segura. De acuerdo con las investigaciones realizadas, el cambio producido es poco importante en el acuífero Umbría, pero resulta muy significativo en el acuífero Búhos en el sentido de que el intercambio de flujos subterráneos entre ambas cuencas ha disminuido muy significativamente o incluso ha desaparecido.

Para precisar la posición actual del límite hidrogeológico entre dichas masas y la evolución de la divisoria piezométrica meridional del acuífero Mancha Oriental con los acuíferos septentrionales de la MASb Boquerón, es necesario disponer de datos complementarios de geofísica y sondeos, y realizar un estudio de mayor amplitud que contemple la realización de un modelo de flujo que reproduzca la situación en régimen natural y en régimen influenciado. En tanto no se disponga de los resultados

de este estudio, el límite septentrional del acuífero Búhos debería ser el que se propone en esta investigación y, en cualquier caso, considerar una transferencia subterránea muy poco significativa entre las demarcaciones hidrográficas del Segura y del Júcar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalá, F.J., Custodio, E. (2003). Recopilación de datos bibliográficos sobre deposición atmosférica de cloruro al terreno. Informe n.º 3. Proyecto de investigación HID 1999-0205. Ministerio de Ciencia y Tecnología (CICYT). Centro de Documentación del Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 1-43.

Alcalá, F.J., Custodio, E. (2004). Deposición total atmosférica de elementos mayoritarios en la ciudad de Barcelona (NE de España). Datos preliminares sobre la aportación mineral por la precipitación atmosférica. En: Simposio sobre el Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana. Barcelona. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Alcalá, F.J., Custodio, E. (2008). Atmospheric chloride deposition in continental Spain. Hydrological Processes, 22: 3636–3650.

Allison G.B., Stone, W.J. y Hughes, M.W. (1985). Recharge in karst and dune elements of a semi-arid landscape as indicated by natural isotopes and chloride. Journal of Hydrology, 76:1-26.

CHS (1988). Documentación básica para la realización del Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.

CHS (1997). Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura.

CHS (2007). Estudio de cuantificación del volumen anual de sobreexplotación de los acuíferos de las unidades hidrogeológicas 07.02 Sinclinal de la Higuera, 07.03 Boquerón, 07.16 Tobarra-Tedera-Pinilla, 07.18 Pino, 07.49 Conejeros-Albatana, 07.55 Corral-Rubio.

Custodio, E., (1997b). Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos. ITGE (ed.). En: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH-GE, p. 83-109. Las Palmas de Gran Canaria.

Custodio, E. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero, 109:329-346.

Custodio, E., (2009). Recarga a los acuíferos extensos a partir de la deposición atmosférica de cloruros y de la temperatura del terreno. Boletín Geológico y Minero, 120 (4): 631-640.

DGOH-IGME (1988). Delimitación de las UU HH del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características.

DGOH (1988). Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar .

Eriksson, E., Khunakasem, V. (1969). Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain. Journal of Hydrology, 7: 178-197.

IGME (1978). Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Alta del Segura. Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas. Ministerios de Industria y Agricultura.

IGME (1979). Investigación hidrogeológica de la cuenca alta de los ríos Júcar y Segura.

IGME (1980). El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental). Sus recursos en aguas subterráneas, utilización actual y posibilidades futuras.

IGME (1980). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. (843) Hellín. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria.

IGME (1981). Evolución y estado actual de los acuíferos en las cuencas altas del Júcar y Segura.

IGME (1985). El Sistema acuífero del Sinclinal de la Higuera (Albacete).

IGME (1988). Estudio hidrogeológico de los sistemas acuíferos situados al NE de Hellín (Albacete) dentro de la Cuenca del Segura.

IGME (1999). Convenio para actuaciones de apoyo a la gestión hídrica en la U.H. 08.29 Mancha Oriental.

IGME-CHS. (2009). Definición de un plan de extracciones de agua subterránea en la cuenca Alta del Segura en épocas de sequía.

Samper, J., García Vera, M.A. (1999). Manual de usuario del programa Visual Balan Version 1.0. ENRESA. Madrid.

Senent, M, L. Linares y J. Barba-Romero (1975). El sistema hidrogeológico del Boquerón (Albacete); contribución a su estudio con un bombeo de ensayo de larga duración. Boletín Geológico y Minero. T. LXXXVI-III, pp 277-296.

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

José M.ª López García,
Bruno J. Ballesteros Navarro,
Ana Sevillano Matilla

En este capítulo, se recoge una síntesis del trabajo *Caracterización básica de las masas de agua subterránea de la confederación hidrográfica del Júcar,* llevado a cabo en la Actividad n.º 3 de la Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al IGME relativa a la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas.

Realización: equipo Instituto Geológico y Minero de España

José María López García
Ana Sevillano Matilla

Supervisión:

Bruno Ballesteros Navarro (IGME)
Arancha Fidalgo Pelarda (CHJ)

Colaboración:

Empresas IDRENA E INFRAECO

CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

INTRODUCCIÓN

La Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) establece los criterios técnicos para la homogenización y sistematización de los trabajos de elaboración de los planes hidrológicos de cuenca. Esta IPH recoge una serie de criterios técnicos para la delimitación de las masas de agua subterráneas, adaptándose al nuevo reglamento de la planificación hidrológica que nace del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, con motivo de la transposición de la Directiva 2000/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario en el ámbito de la política de aguas.

Las masas de agua subterráneas definidas con anterioridad a la publicación de la referida IPH y recogidas en el informe *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias,* (MIMAM-DGA 2005) supuso la primera de las delimitaciones llevadas a cabo bajo la Dirección General del Agua para dar cumplimiento a las tareas establecidas en el artículo 5 de la Directiva Marco del Agua (DMA), recogiéndose en el *Informe para la Comisión Europea sobre los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua de la Demarcación Hidrográfica del Júcar* (CHJ 2005a). Esta labor se desarrolló a nivel nacional con la participación de las diferentes Confederaciones Hidrográficas que aportaron los conocimientos y estudios específicos de que disponían para llevar a cabo la adaptación de las antiguas Unidades Hidrogeológicas (UH) al concepto de "masa de agua subterránea" que establece la Directiva Marco del Agua. El número de masas de agua subterránea definidas en el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), excluyendo las consideradas impermeables, ascendía a un total de 79 (Tabla 1).

El *Estudio Inicial* (MIMAM-DGA 2005) incorpora en su Anexo 1 los C*riterios para la identificación y delimitación de masas de agua subterránea*. La DMA establece en su Anexo II.2 que la información recogida para cada masa debe ser analizada y organizada, y distingue entre la *caracterización inicial*, que es genérica, y la *caracterización adicional*, referida a las masas en riesgo de no satisfacción de los objetivos medioambientales, que requiere mayor cantidad de información. El Anexo 3 de este estudio incorpora las fichas de caracterización inicial de cada una de las masas de agua así definidas.

Tras la entrada en vigor de la IPH se hizo necesaria la revisión de la delimitación de las masas de agua subterránea para su incorporación al Plan Hidrológico de Cuenca, constituyendo la unidad de gestión básica de las aguas subterráneas. Se partió de las masas definidas en el año 2005, adaptándose los límites de todas ellas a los límites entre unidades litológicas establecidos en el Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España a escala 1:200.000 (IGME 2006). Los límites, perfilados inicialmente de forma arbitraria, fueron revisados y adaptados con criterio hidrogeológico, primando los de carácter impermeable, que son los que facilitan el análisis de los recursos en cada sistema y su gestión. El *Documento Técnico de Referencia: Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterránea. Ámbito territorial de la Confederación Hidrográfica del Júcar* (CHJ 2009a) describe los principales cambios y ajustes realizados en las masas de agua subterráneas descritas en el Informe del artículo 5 y 6 de la DMA, fijando un total de 90 masas a las que se añaden otras 26 correspondientes a unidades impermeables o exclusivamente con acuíferos de interés local.

Por su parte, la caracterización adicional se ha llevado a cabo desde el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a través del *Acuerdo para la encomienda de gestión por el Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General del Agua), al Instituto Geológico y Minero de España, del Ministerio de Educación y Cien-*

cia, para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Los trabajos se materializan en 14 actividades, de las cuales la Actividad 2 tiene por objeto el *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*. (IGME-DGA 2009a). Dentro de estos trabajos, se ha realizado la caracterización adicional de las masas de agua en riesgo correspondientes al ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (IGME-DGA 2009b).

Los estudios de caracterización adicional se realizaron sobre un total de 44 de las 90 masas de agua subterránea, y excluidas las 26 masas consideradas como DE BAJA PERMEABILIDAD o acuíferos de interés local. Su realización durante el año 2009, posterior en el tiempo a la revisión de las masas de agua de los art. 5 y 6, ha permitido su adaptación a los nuevos límites de los sistemas analizados.

El resto de masas que no cuentan con caracterización adicional no presentaban, hasta la fecha de realización de este trabajo, con una adaptación de la información procedente de la caracterización inicial a la nueva definición de esos límites.

El objetivo final de la *caracterización básica* de las masas de agua subterránea en la CHJ ha sido el de adaptar y complementar la información procedentes de las caracterizaciones inicial y adicional a la nueva división de masas de agua subterránea definidas tras la publicación de la IPH, que constituyen la unidad básica de gestión en el nuevo PHJ.

Se trata de obtener un documento de partida en forma de fichas generadas a partir de una base de datos sujeta a un proceso de actualización permanente. La información contenida en dichas bases de datos se centra fundamentalmente en los parámetros físicos poco o nada susceptibles a su variación temporal, como son los geologicos, litologicos, permeabilidad, límites y geometría de las formaciones geológicas e hidrogeológicas de la masa, etc. Incorpora, a su vez, los parámetros hidrogeológicos reflejados en los documentos básicos de partida: Caracterización Inicial de las Masas de Agua Subterránea (MIMAM-DGA 2005), Estudio de Delimitación de Acuíferos (CHJ 2005b), Delimitación de Unidades Hidrogeológicas (MOPU 1988), y de los estudios de caracterización adicional (IGME-DGA 2009b).

METODOLOGÍA APLICADA

La caracterización básica de las masas de agua subterránea del ámbito de la CHJ se ha realizado con el siguiente procedimiento:

1. Definición de contenidos y diseño de la ficha de caracterización básica.
2. Recopilación de la documentación básica de partida.
3. Generación de los mapas de caracterización básica de las masas de agua subterráneas a partir de la adaptación del Mapa Litológico y de Permeabilidades del IGME (2006).
4. Diseño y carga de una base de datos de la caracterización básica (IGME, Access 2007)
5. Migración de datos de Access 2007 a Access 2000 (CHJ en SQL Server).
6. Generación de las fichas de caracterización básica.
7. Informe de resultados.

Las bases de datos han permitido la generación de unas fichas de caracterización básica en las que se que sintetiza la extensa documentación previa disponible, especialmente la de los estudios de caracterización adicional, complementada y actualizada con la procedente de la caracterización inicial, de manera acorde a la nueva definición de masas de agua subterránea.

La estructuración de la información ha seguido las pautas principales marcadas por los estudios de caracterización adicional. En el caso de las masas de agua que cuentan con dichos estudios, la caracterización básica constituye una simplificación y homogeneización de la información contenida en ellos, centrándose en sus aspectos físicos y, en menor medida, en la adición de algunos elementos no contemplados en la misma. En el resto de masas, especialmente en aquellas que han sufrido modificaciones importantes en cuanto a su definición original para el cumplimiento del Art. 5, resaltadas en negrita en la Tabla 1, la información procede básicamente de la adaptación de la caracterización inicial (MIMAM-DGA 2005), del *Estudio de Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas* (MOPU 1988), y de la caracterización adicional (IGME-DGA 2009b) de las masas colindantes en cuanto a los límites se refiere.

Las formaciones geológicas y el comportamiento hidrogeológico se ha revisado en todas las masas de agua que cuentan únicamente con caracterización inicial, ya que ésta resulta en la mayoría de los casos insuficiente o con un escaso grado de homogeneidad. Esencialmente,

MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA			
MAS_ART5	Denominación	MAS_PHC	NOMBRE_MAS_PHC
080.001	Hoya de Alfambra	080.101	Hoya de Alfambra
080.002	Javalambre Occidental	080.102	Javalambre Occidental
080.003	Javalambre Oriental	080.103	Javalambre Oriental
080.004	Maestrazgo Occidental	080.104	Mosqueruela
080.005	Puertos de Beceite	080.105	Puertos de Beceite
080.006	Plana de Cenia	080.106	Plana de Cenia
080.007	Plana de Vinaroz	080.107	Plana de Vinaroz
080.008	Maestrazgo Oriental	080.108	Maestrazgo Occidental
		080.109	Maestrazgo Oriental
080.009	Plana de Oropesa-Torreblanca	080.110	Plana de Oropesa-Torreblanca
080.010	Lucena-Alcora	080.111	Lucena-Alcora
080.011	Hoya de Teruel	080.112	Hoya de Teruel
080.012	Arquillo	080.113	Arquillo
080.013	Gea de Albarracín	080.114	Gea de Albarracín
080.014	Montes Universales	080.115	Montes Universales
080.015	Serranía de Cuenca	080.116	Triásico de Boniches
		080.117	Jurásico de Uña
		080.118	Cretácico de Cuenca Norte
		080.119	Terciario de Alarcón
		080.120	Cretácico de Cuenca Sur
		080.121	Jurásico de Cardenete
080.016	Vallanca	080.122	Vallanca
080.017	Alpuente	080.123	Alpuente
080.018	Sierra del Toro	080.124	Sierra del Toro
080.019	Jérica	080.125	Jérica
080.020	Onda-Espadán	080.126	Onda-Espadán
080.021	Plana de Castellón	080.127	Plana de Castellón
080.022	Plana de Sagunto	080.128	Plana de Sagunto
080.029	Mancha Oriental	080.129	Mancha Oriental
080.023	Medio Palancia	080.130	Medio Palancia
080.024	Liria - Casinos	080.131	Liria - Casinos
080.025	Las Serranías	080.132	Las Serranías
080.026	Requena-Utiel	080.133	Requena-Utiel
080.027	Mira	080.134	Mira
080.028	Hoces del Cabriel	080.135	Hoces del Cabriel
080.030	Lezuza-El Jardín	080.136	Lezuza-El Jardín
080.031	Arco de Alcaraz	080.137	Arco de Alcaraz
080.032	Carcelén	080.138	Alpera (Carcelén)
080.033	Cabrillas-Malacara	080.139	Cabrillas-Malacara
080.034	Buñol-Cheste	080.140	Buñol-Cheste
080.035	Plana de Valencia Norte	080.141	Plana de Valencia Norte
080.036	Plana de Valencia Sur	080.142	Plana de Valencia Sur
080.037	Sierra del Ave	080.143	La Contienda
		080.144	Sierra del Ave

MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA			
MAS_ART5	Denominación	MAS_PHC	NOMBRE_MAS_PHC
080.038	Caroch Norte	080.145	Caroch Norte
080.039	Almansa	080.146	Almansa
080.040	Caroch Sur	080.147	Caroch Sur
080.041	Hoya de Játiva	080.148	Hoya de Játiva
080.042	Sierra de las Agujas	080.149	Sierra de las Agujas
080.043	Bárig	080.150	Bárig
080.044	Plana de Jaraco	080.151	Plana de Jaraco
080.045	Plana de Gandía	080.152	Plana de Gandía
080.046	Marchuquera-Falconera	080.153	Marchuquera-Falconera
080.047	Sierra de Ador	080.154	Sierra de Ador
080.048	Valle de Albaida	080.155	Valle de Albaida
080.049	Sierra Grossa	080.156	Sierra Grossa
080.050	Sierra de la Oliva	080.157	Sierra de la Oliva
080.051	Cuchillo-Moratilla	080.158	Cuchillo-Moratilla
080.052	Rocín	080.159	Rocín
080.053	Villena-Benejama	080.160	Villena-Benejama
		080.161	Volcadores-Albaida
080.054	Almirante Mustalla	080.162	Almirante Mustalla
080.055	Oliva-Pego	080.163	Oliva-Pego
080.056	Ondara - Denia	080.164	Ondara-Denia
080.057	Peñón-Montgó-Bernia	080.165	Montgó
		080.166	Peñón-Bernia
080.058	Alfaro-Mediodía-Segaria	080.167	Alfaro-Segaria
		080.168	Mediodía
080.059	Muro de Alcoy	080.169	Muro de Alcoy
080.060	Sierra Mariola	080.170	Salt San Cristobal
		080.171	Sierra Mariola
080.061	Sierra Lácera	080.172	Sierra Lácera
080.062	Sierra del Castellar	080.173	Sierra del Castellar
080.063	Peñarrubia	080.174	Peñarrubia
080.064	Hoya de Castalla	080.175	Hoya de Castalla
080.065	Barrancones-Carrasqueta	080.176	Barrancone-Carrasqueta
080.066	Sierra Aitana	080.177	Sierra Aitana
080.067	Serrella-Aixorta-Algar	080.178	Serrella-Aixorta-Algar
080.068	Depresión de Benisa	080.179	Depresión de Benisa
080.069	Jávea	080.180	Jávea
080.070	Sierra de Salinas	080.181	Sierra de Salinas
080.071	Argüeña-Maigmó	080.182	Argüeña-Maigmó
080.072	Orcheta	080.183	Orcheta
080.073	San Juan-Benidorm	080.184	San Juan-Benidorm
080.074	Agost-Monnegre	080.185	Agost-Monnegre
080.075	Sierra del Cid	080.186	Sierra del Cid
080.076	Sierra del Reclot	080.187	Sierra del Reclot
080.077	Sierra de Argallet	080.188	Sierra de Argallet
080.078	Sierra de Crevillente	080.189	Sierra de Crevillente
080.079	Bajo Vinalopó	080.190	Bajo Vinalopó

Tabla 1. Equivalencia entre las masas de agua subterránea del Art.5 de la DMA con caracterización inicial, y las establecidas en cumplimiento de la IPH para el nuevo PHJ (en verde masas con caracterización adicional y en negrita masas con cambios significativos en sus límites)

se ha optado por reflejar la información de la misma fuente que ha servido para la adaptación de los límites de las nuevas masas de agua, que ha sido el Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España (IGME 2006) elaborado por el IGME en el marco del Convenio para la realización de trabajos técnicos en relación con la aplicación de la directiva del agua 2006/118/CE en materia de aguas subterráneas. Esto ha permitido una mejora y homogeneización de la descripción de las distintas formaciones geológicas aflorantes en cada masa.

FICHA DE CARACTERIZACIÓN BÁSICA

El contenido de las fichas de caracterización básica (figura I), acordado entre el IGME y la CHJ, se centra fundamentalmente en aquellos aspectos físicos de las masas de agua subterránea que pueden ser considerados como permanentes o, al menos, escasamente variables, tales como litología, límites, acuíferos existentes y parámetros hidrodinámicos, que permitan una apreciación global de la geometría de la masa de agua y de las formaciones geológicas e hidrogeológicas presentes en la misma.

No obstante, se ha incorporado también información de carácter variable relacionada con el comportamiento hidráulico y con el volumen y la calidad del recurso hídrico. En este sentido, se ha incluido una información básica relativa a la morfología y comportamiento de la superficie piezométrica y, en la medida de lo posible, la principal o principales facies hidrogeoquímicas identificadas en la masa. Por su parte, la información correspondiente a la cuantificación de recursos hídricos no persigue otro objetivo que el de facilitar la identificación de los principales elementos que determinan el funcionamiento del sistema. Finalmente, se han identificado los humedales y ecosistemas asociados, dependientes en su funcionamiento de las aguas subterráneas, relacionados con cada una de las masas de agua subterránea.

La información recogida en las fichas se distribuye en los siguientes 12 apartados:

1. **Identificación**: Se identifica la masa de agua correspondiente mediante su código y denominación.
2. **Situación**: Se indica su extensión y superficie permeable, así como el sistema o sistemas de explotación, y la provincia o provincias en las que se encuentra. Asimismo, se adjunta el correspondiente mapa donde queda definida espacialmente la masa de agua e identificada su posición en la Cuenca del Júcar.
3. **Formaciones geológicas**: Se definen los materiales que componen la masa indicando su denominación, litología, espesor, edad y la permeabilidad de cada una de las formaciones geológicas que forman los acuíferos que la integran.
4. **Formaciones hidrogeológicas**: A partir de la definición de las características formaciones geológicas se establecen los diferentes conjuntos de materiales de comportamiento hidrogeológico diferenciado. Para cada una de ellos, y en función de la información disponible, se expone su naturaleza, espesor, condiciones hidrostáticas y su tipo y grado de permeabilidad.
5. **Límites y geometría**: En esta apartado se definen cada uno de los límites laterales y verticales de la masa. Para los primeros se hace referencia al criterio empleado, su tipología (abierta, cerrada, etc) y, en su caso, sentido del flujo e indicación de con qué otra masa se establece la conexión. Para los límites de muro y de techo, se identifica a la formación geológica que configura el impermeable de base, o elemento que hace esta función, así como el nivel impermeable superior de la masa, en caso de que ésta se encontrase confinada. Finalmente, se describe la geometría general de la estructura, con indicación de sus características morfológicas.
6. **Parámetros hidrogeológicos**: Aunque la información en este aspecto es muy escasa, y en muchas ocasiones hay una total carencia de datos, se ha estimado de gran interés recopilar y/o sintetizar, en la medida de lo posible, toda la existente. En este apartado se expone para cada una de las formaciones hidrogeológicas diferenciadas los rangos de sus principales características hidrodinámicas: permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, así como el caudal medio y el caudal específico de las captaciones que explotan la masa de agua.
7. **Características piezométricas**: En este apartado se reflejan la morfología y rango de fluctuación de la superficie piezométrica. La información se da tanto para régimen natural como para régimen influenciado, con indicación de sus cotas en las áreas de recarga y descarga, respectivamente. Por último, y deducido los datos anteriores, se indica el sentido del flujo subterráneo y el funcionamiento hidrodinámico general del sistema.
8. **Recursos**: Se cuantifican los diferentes conceptos que constituyen la alimentación de la masa de agua, así como las restricciones medioambientales y los recursos disponibles. Del mismo modo, se referencian los volúmenes utilizados y el índice de explotación.

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO · CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR · GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN · Instituto Geológico y Minero de España

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR
CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

1. IDENTIFICACIÓN

Código	080.101	**Denominación**	Hoya de Alfambra

2. SITUACIÓN

Superficie total (km2)	762,39	**Superficie permeable (km2)**	755,91

Provincia	Superficie total (km2)
Teruel	762,4

Sistemas de explotación	% en el sistema
Turia	100

Mapa de Situación

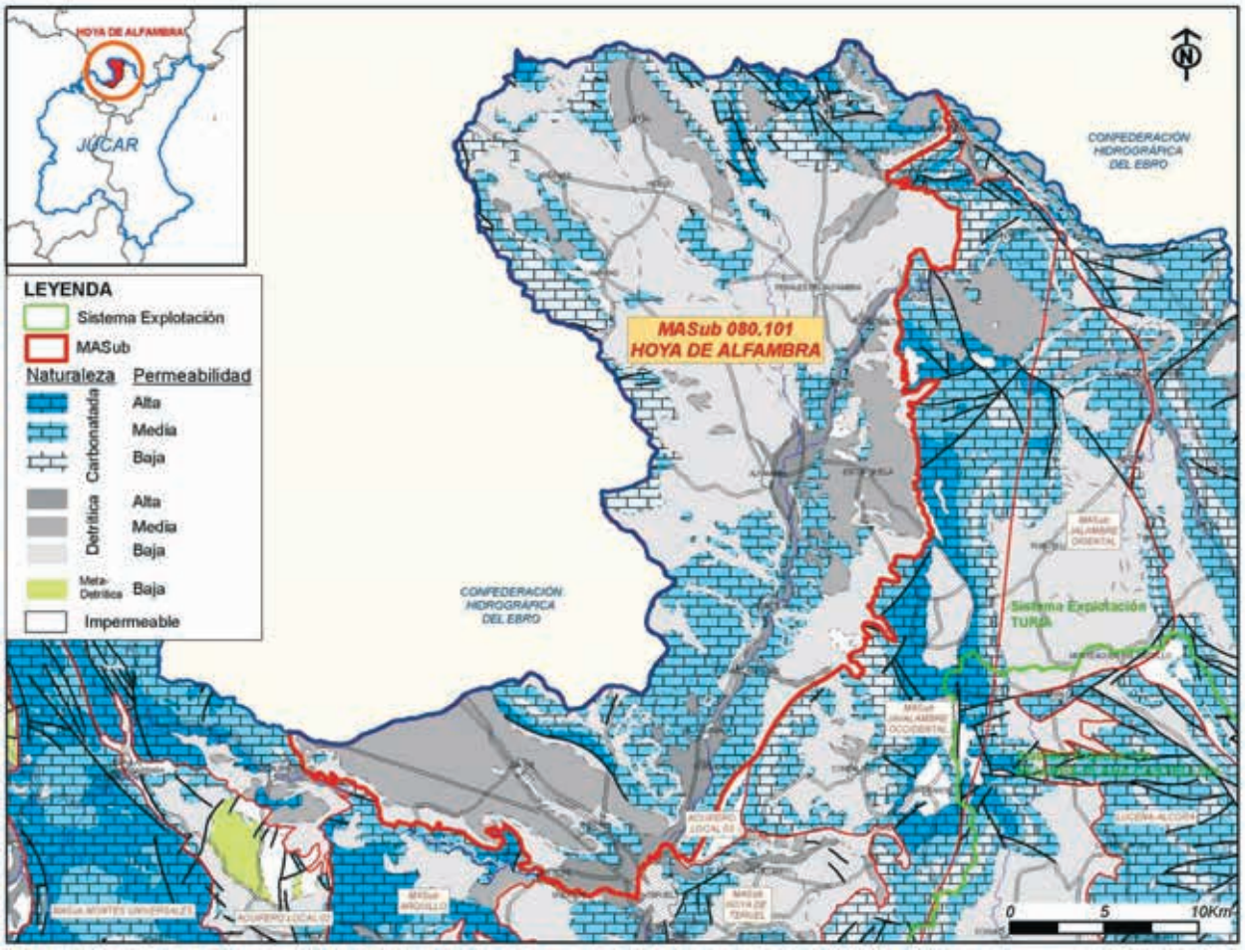


Figura 1. Salida de datos de la MASb de 080.101 Hoya de Alfambra

Código:	080.101	Denominación	Hoya de Alfambra

3. FORMACIONES GEOLÓGICAS

Denominación	Litologia	Espesor (m)		Edad	Comportamiento Hidrogeológico
		mín.	máx.		
Buntsandstein	Areniscas, conglomerados y lutitas			Pérmico - Triásico inferior	Permeabilidad baja
Keuper	Arcillas abigarradas y yesos			Triásico superior	Impermeable
Rethiense - Lías	Dolomías, brechas dolomíticas, carniolas y calizas			Rethiense - Lías	Permeabilidad alta
Jurásico medio (Dogger)	Calizas oolíticas con sílex y margocalizas			Dogger	Permeabilidad media
Jurásico medio - superior	Margas, calizas y margocalizas			Oxfordiense	Permeabilidad baja
Jurásico superior (Malm)	Calizas oncolíticas y pisolíticas			Kimmeridgiense - Portlandiense	Permeabilidad media
Jurásico - Cretácico (F. Purbeck)	Arenas, areniscas, arcillas y margas			Portlandiense - Valanginiense	Permeabilidad baja
Cretácico inferior (F. Utrillas)	Arenas, arcillas, margas y conglomerados			Gargasiense - Cenomaniense	Permeabilidad media
Cretácico inferior (Fm. Escucha)	Arenas y arcillas con lignitos			Aptiense - Albiense	Permeabilidad baja
Cretácico superior (Fms. Villa de Ves, Caballar, Tabladillo, Hontoria y Margas de Chera)	Calizas, dolomías y margas			Cenomaniense - Turoniense	Permeabilidad media
Cretácico superior	Calizas, dolomías, brechas dolomíticas y margas			Senoniense	Permeabilidad alta
Oligoceno	Conglomerados, areniscas, arcillas y limos			Oligoceno - Aquitaniense	Permeabilidad media
Oligoceno - Mioceno	Conglomerados, areniscas, lutitas, margas, calizas y lignitos			Oligoceno - Tortoniense	Permeabilidad baja
Mioceno - Plioceno	Calizas, dolomías y margas. Conglomerados, areniscas y lutitas			Tortoniense - Rusciniense	Permeabilidad media
Mioceno - Pleistoceno	Arcillas lutitas, areniscas y conglomerados			Messiniense - Pleistoceno	Permeabilidad baja
Plioceno	Calizas, margas y yesos			Plioceno	Permeabilidad media
Cuaternario	Gravas, arenas, limos y arcillas			Pleistoceno - Holoceno	Permeabilidad variable

4. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS

Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Espesor (m)		Condiciones Hidrostáticas	Permeabilidad	
		mín.	máx.		Tipo	Grado
Jurásico de Hoya de Alfambra	Carbonatado			Mixto	Fisuración	
Mioceno de Hoya de Alfambra	Detrítico - carbonatado			Libre	Fisuración y karstificación	

Figura 1. Salida de datos de la MASb de 080.101 Hoya de Alfambra (cont.)

Código:	080.101	Denominación	Hoya de Alfambra

Cuaternario de Hoya de Alfambra Detrítico Libre Intergranular

5. LÍMITES Y GEOMETRÍA

Límites laterales	Criterio	Tipo	Flujo	Conexión con:
Norte	Convencional			Divisoria Alfambra-Ebro
Oeste	Convencional			Divisoria Alfambra-Ebro
Este				Afloramientos de Trías y Jurásico del sistema de M.A.Sub. 080.102 Javalambre Occidental
Sur				Cauce del río Turia
Suroeste				Calizas y margas de M.A.Sub. 080.114 Gea de Albarracín y 080.113 Arquillo

Límites verticales	Formación geológica
Impermeable de base	
Impermeable de techo	

Geometría de la M.A.Sub.:

Está constituida por calizas, margas y arcillas arenosas jurásicas; materiales miocenos que afloran en la mayor parte de la masa, formados por calizas, arcillas, gravas, conglomerados, areniscas y lutitas; y materiales detríticos del Plioceno y Cuaternario, entre los que destacan los aluviales del río Alfambra y la rambla de la Hoz.

6. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Formación/es Hidrogeológica/s	Rango Permeabilidad (m/día)	Transmisividad (m /día)		Coeficiente de almacen.(S)		Q medio (L/s)		Q escpec. (L/s)	
		mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
Mioceno de Hoya de Alfambra									
Jurásico de Hoya de Alfambra									
Cuaternario de Hoya de Alfambra									

7. CARACTERÍSTICAS PIEZOMÉTRICAS

Piezometría en régimen natural		Piezometría en régimen influenciado	
Período		Período	
Área de recarga (m.s.n.m.)		Área de recarga (m.s.n.m.)	
Área de descarga (m.s.n.m.)		Área de descarga (m.s.n.m.)	

Observaciones:

No hay datos

8. RECURSOS

Periodo:	

Recurso renovable			Restricciones medioambientales				Rec. disponible		Bombeos		Índice explotación	
Concepto	Máx. (hm3/año)	Mín. (hm3/año)	Concepto	Máx. (hm3/año)	Mín. (hm3/año)	Max. (hm3/año)	Mín. (hm3/año)		Concepto	Máx. (hm3/año)	Máx. (hm3/año)	Mín. (hm3/año)
Infiltración lluvia	12,87	12,87	Caudal ecológico	0,9	0,72				Urbano	0,31		
Aportes de cauces	19,94	19,94	Salida al mar	0	0				Agrícola	0,37		

Figura 1. Salida de datos de la MASb de 080.101 Hoya de Alfambra (cont.)

Código:	080.101	Denominación	Hoya de Alfambra

Entradas laterales	0	0	Humedales	0	0			Industrial	0		
Retornos de riego	3,33	3,33	Manantiales	0	0			Otros	0		
Retornos urbanos	0	0									
TOTAL	36,14	36,14	TOTAL	0,9	0,72	35,24	35,42	**TOTAL**	0,69	0,02	0,02

9. CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS

FACIES NIVEL BÁSICO	

Observaciones:

10. ECOSISTEMAS ASOCIADOS

Denominacion	Tipo	Figura de Proteción	Relación río-acuífero	Volumen	Periodo
LOS YESARES Y LAGUNA DE TORTAJADA		LIC			

11. REDES

Tipo de red	Nº de puntos	Frecuencia	Periodo
Piezométrica operativa	4	mensual	2010-2010
Calidad	0		
Intrusión	0		
Hidrometría	0		

12. OBSERVACIONES Y COMENTARIOS

Observaciones

Se corresponde con la mitad septentrional de la antigua U.H. 8.99 Impermeable, y en las zonas de borde a parte de la U.H. 8-05 Javalambre Este, y U.H. 8.03 Arquillo-Tramacastiel-Villel al suroeste.

Figura 1. Salida de datos de la MASb de 080.101 Hoya de Alfambra (cont.)

9. **Características hidroquímicas**: En este apartado se indican brevemente las facies hidroquímicas predominantes en la masa de agua.
10. **Ecosistemas asociados**: se enumeran para cada masa aquellos ecosistemas acuáticos que dependen de las aguas subterráneas para su supervivencia.
11. **Redes**: Se relaciona el número de puntos, la frecuencia y del periodo de medida de las diferentes redes de control hidrogeológico (piezometría, calidad, intrusión e hidrométrica).
12. **Observaciones y comentarios**: Finalmente, en este punto se puede incluir toda la información que se crea de interés y que, por diversas causas, no haya podido exponerse con anterioridad en alguno de los apartados anteriores.

DOMINIOS GEOLÓGICOS Y MORFOESTRUCTURALES

De manera general, las características fisiográficas de la CHJ quedan definidas según seis dominios geológicos y morfoestructurales (figura 2) que condicionan las litologías presentes en cada uno de ellos (Figura 3) y, en consecuencia, la distribución de las diferentes masas de agua subterránea en función de la permeabilidad de las distintas formaciones geológicas.

Dentro de este contexto, las cadenas de origen alpino presentan predominante materiales mesozoicos y, en menor medida, materiales paleozoicos y terciarios sin y pretectónicos alineados con las directrices estructurales principales. Las formaciones neógenas post-tectónicas constituyen el relleno de las grandes cuencas cenozoicas, y en buena parte conforman el sustrato de las planas costeras. En ellas predominan los sedimentos de carácter detrítico, formados por conglomerados y areniscas, que hacia el centro de las cuencas evolucionan hacia materiales más finos y pueden culminar con el depósito de carbonatos y evaporitas de origen lacustre.

Finalmente, las denominadas planas litorales constituyen el enlace de las principales cordilleras con la línea de costa, y están formadas por sedimentos recientes detríticos cuaternario o pliocenos, de geometría tabular, que

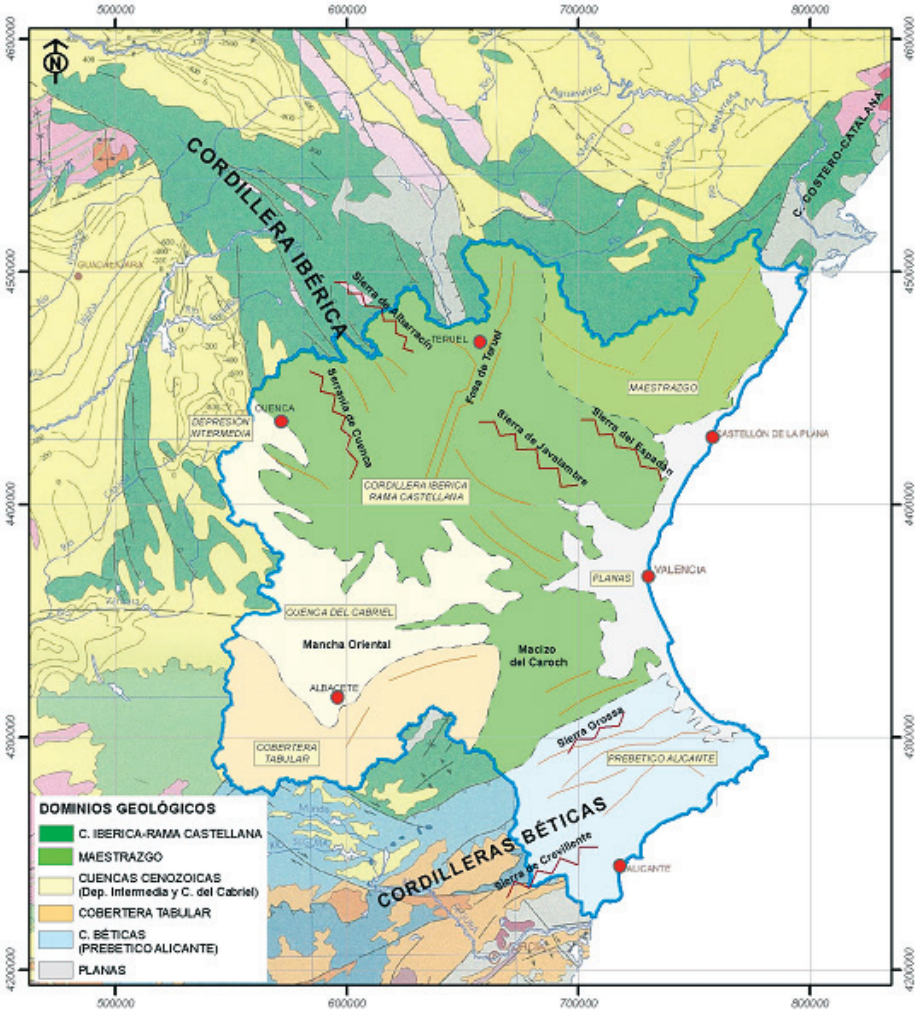


Figura 2 Dominios geológico–estructurales en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar

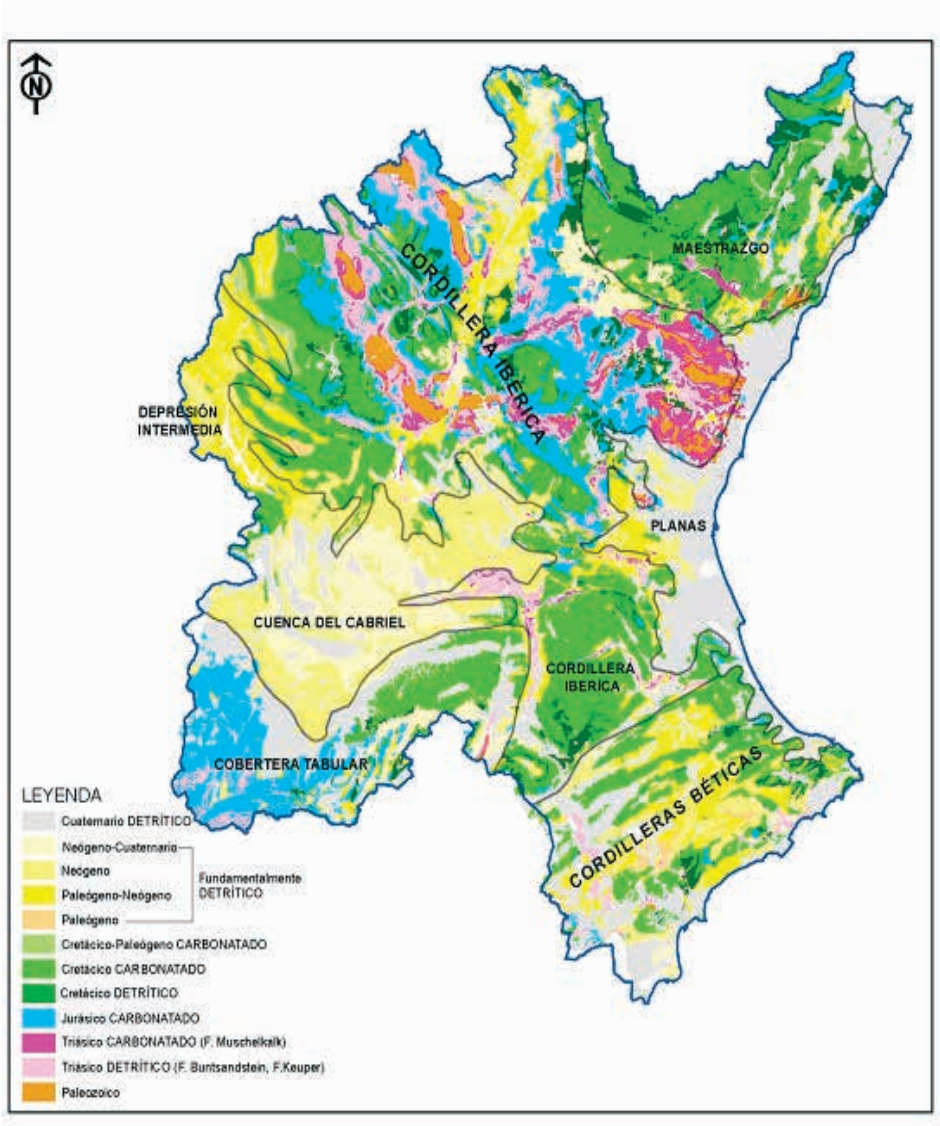


Figura 3. Litología de los dominios geológico–estructurales de la Demarcación del Júcar

recubren otros más antiguos miocenos postectónicos, o terciarios y mesozoicos estructurados.

Los rasgos más significativos de cada uno de estos dominios son descritos en los apartados siguientes.

Cordillera Ibérica. Es el dominio más extenso y en el que se enmarcan las principales alineaciones montañosas que alimentan la cabecera de todos los ríos de la Demarcación, con excepción de los que se encuentran en los dominios alicantinos del Vinalopó, Serpis, y los que alimentan a la Marina Alta y Marina Baja. La Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, de orientación NO-SE, origina los principales relieves al oeste de la fosa terciaria de Calatayud-Teruel (Serranía de Cuenca y sierra de Albarracín), donde afloran materiales mesozoicos (triásicos en facies germánica, jurásicos carbonatados y cretácicos), que configuran los relieves principales y, con menor extensión, materiales paleozoicos.

Al este de la mencionada depresión, rellena fundamentalmente por materiales terciarios y cuaternarios, aparece el denominado Sector Levantino con las sierras de Javalambre y del Espadán, entre las más representativas. En su enlace con el dominio de la Cordillera Bética se origina el Macizo del Caroch, formado principalmente por materiales cretácicos incididos por una red fluvial muy encajada en la que destacan los valles triásicos de Ayora y Navarrés.

Maestrazgo. Localizado al norte de la demarcación, constituye el sector de enlace entre la Cordillera Ibérica, de directriz NO-SE, y la Costero-Catalana, con directriz NE-SO, paralela a la costa, limitando la comunicación entre el valle del Ebro y el mar. Los materiales de este dominio son, sobre todo, mesozoicos, aunque es frecuente que el Terciario y Cuaternario rompan la continuidad de los afloramientos.

Prebético. Al sur de la Demarcación se extiende el dominio externo de la Cordillera Bética, que constituye el Prebético de Alicante y forma importantes relieves montañosos tales como la Sierra Grossa o la Sierra de Crevillente, de alineación tectónica OSO-ENE, que alimentan las cuencas de los ríos Vinalopó y Serpis. Está formada por sucesiones de rocas sedimentarias de edad Triásico a Mioceno, fuertemente deformadas pero poco o nada afectadas por metamorfismo alpino.

Cobertera Tabular. Bordea el límite suroriental de la Cordillera Ibérica y aparece debajo de las cuencas cenozoicas del Cabriel y del Júcar, y al norte del Prebético, en el extremo meridional de la Demarcación. Constituye un conjunto de sedimentos meso-cenozoicos no plegados, que forman el antepaís bético, siendo la zona estable y autóctona, no deformada durante la orogenia alpina y hacia las que fueron desplazadas las unidades tectónicas del orógeno.

Cuenca del Cabriel-Júcar. Conforma el extremo meridional de la Cordillera Ibérica y limita al sur con la Cobertera Tabular y el Prebético. Constituye una amplia depresión de límites irregulares y control tectónico impreciso rellena por sedimentos continentales (Mioceno superior-Plioceno) que yacen sobre un sustrato mesozoico o sobre miocenos más antiguos deformados. En la cuenca del Cabriel se presentan facies aluviales conglomeráticas que hacia el centro pasan a materiales detríticos finos y, finalmente, a carbonatos y evaporitas lacustres. En la cuenca del Júcar, también formada por materiales neógenos y cuaternarios continentales, se presentan materiales de carácter claramente detrítico en la Depresión Intermedia, mientras que en el valle del Júcar afloran esencialmente formaciones de origen lacustre que culminan en una sucesión de calizas travertínicas, Por su parte, en los llanos de Albacete, y al sur y suroeste del valle del Júcar, sólo aflora la parte superior detrítica de la serie neógena y materiales del sistema aluvial del río Júcar.

Planas costeras. Constituyen una serie de plataformas que se extienden a lo largo de la franja litoral, entre el cabo de la Nao y el limite septentrional de la Demarcación. En ellas es frecuente el desarrollo de cordones detríticos litorales emergidos durante el Holoceno, asociados a marjales y albuferas, entre las que destaca la Albufera de Valencia. Las costas escarpadas de las sierras de Irta, Les Rabosses y relieves de Las Marinas (Montgó, Llorensá, etc.) interrumpen puntualmente la continuidad de estas llanuras, así como también alteran su morfología plana algunos pequeños abanicos fluviales y conos de deyección del Pleistoceno (Benicarló-Vinaroz-Sierra de Irta, Marina Baixa).

MARCO HIDROGEOLÓGICO GENERAL DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

El análisis de las masas de agua subterránea (MASb) de la Cuenca Hidrográfica del Júcar mediante sistemas de información geográfica (SIG), arroja una superficie total de 43.025,64 km^2, distribuida en el marco de cuatro comunidades autónomas: Comunidad Valenciana (49,6 %), que incluye toda la provincia de Valencia y parte de las provincias de Castellón y Alicante; Castilla-La Mancha (36,6 %), con la presencia parcial de las provincias de Cuenca y Albacete; Aragón (13,2 %) con parte de la provincia de Teruel; y finalmente Cataluña (0,6 %) con tan sólo una pequeña parte del extremo meridional de la provincia de Tarragona. Todos los cursos fluviales de la Demarcación Hidrográficadel Júcar vierten al mar Mediterráneo, siendo sus principales ríos el Cenia, el Mijares, el Palancia, el Turia, el Júcar, el Serpis y el Vinalopó, cuyas cuencas hidrográficas definen, juntamente con la Marina Alta y la Marina Baja, los sistemas de explotación en que se divide el ámbito de la Demarcación.

Los diferentes dominios geológicos presentes en el ámbito de la demarcación dejan su impronta sobre el conjunto de los sistemas hidrogeológicos definidos. Las 90 masas de agua subterránea pueden agruparse según su pertenencia a uno u otro dominio geológico (figura 4), cuyas características distintivas: litológicas, cronoestratigráficas e hidrogeológicas son descritas brevemente y tabuladas en el Anexo 1.

Dentro de los dominios geológicos se han identificado 269 de estas formaciones hidrogeológicas, cuya distribución para cada una de las masas de agua subterránea se expone en el Anexo 1. La representación gráfica de dichas formaciones ha sido codificada mediante colores: rojos para el Triásico, azules para el Jurásico, verdes para el Cretácico, naranjas y amarillos para el Terciario-Cuaternario

En el dominio del Maestrazgo se han definido 5 masas de aguas subterránea que abarcan una superficie de 4.645 km^2 (tabla 2), cerca del 11 % de la superficie de la Demarcación, y en las que son mayoritarios los acuíferos mesozoicos carbonatados (figura 5). Los principales acuíferos corresponden a las formaciones carbonatadas del Jurásico, Cretácico inferior y Cretácico superior, siendo las más permeables las del Aptiense, en el Cretácico

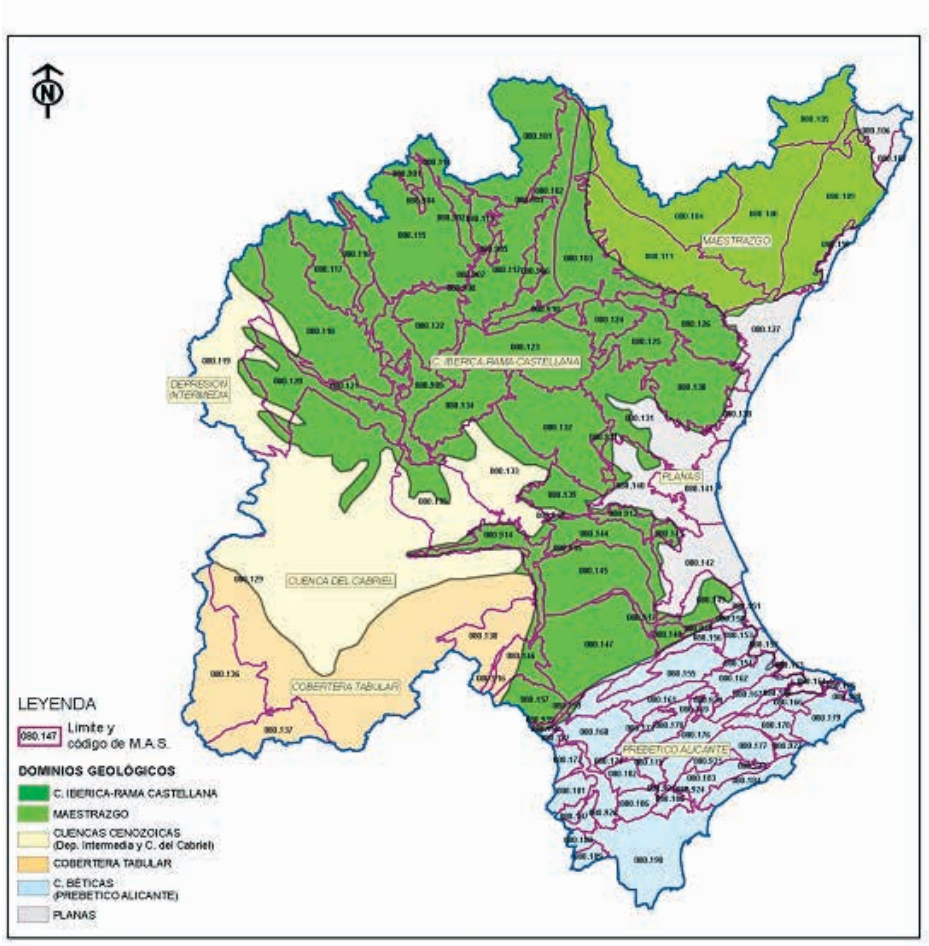


Figura 4. Masas de agua subterránea de la Demarcación del Júcar y su relación con los principales dominios geológico-estructurales

inferior, y las del Cenomaniense-Turoniense, en el Cretácico superior. El nivel impermeable de base está constituido fundamentalmente por la presencia de arcillas, margas y yesos del Keuper.

En el dominio de la Cordillera Ibérica se ha establecido un total de 29 unidades, que se pueden subdividir en dos sectores con diferencias significativas: La Rama Castellana y el Macizo del Caroch. En el correspondiente a la Rama Castellana, con 20 masas de agua subterránea que abarcan 15.068 km^2, lo que supone el 35% de la superficie de la Demarcación, predominan, con algunas excepciones relevantes, como los terciarios de la fosa de Calatayud-Teruel, los acuíferos jurásicos (sierras de Albarracín, Espadán, Javalambre) sobre los cretácicos (Serranía de Cuenca). Localmente, existen acuíferos desarrollados en los tramos dolomíticos triásicos de la facies Muschelkalk y, de forma ocasional, en los detríticos de las areniscas del Buntsandstein, que son los de litología más antigua de todo el ámbito de la Demarcación. Esta característica también queda reflejada en la litoestratigrafía del nivel impermeable de base de sus distintas masas, ya que, siendo mayoritaria la presencia del Keuper, este dominio geológico es el único en el que ocasionalmente el impermeable de base puede estar constituido por materiales pizarrosos del Paleozoico. También es típica de este sector la presencia acuíferos en los que predomina el régimen confinado o semiconfinado, frente al predominio de los acuíferos libres o mixtos del resto de dominios geológicos.

SUPERFICIES Dominio Estructural en el ámbito de la CHJ			
DOMINIO ESTRUCTURAL	**n.º de masas**	**Area (km^2)**	**Area (%)**
C. IBERICA-RAMA CASTELLANA	20	15068,00	35,03
CUENCA DEL CABRIEL-JÚCAR	4	6188,63	14,39
PREBETICO ALICANTE	35	5692,67	13,23
MAESTRAZGO	5	4645,01	10,80
COBERTERA TABULAR	3	4641,98	10,79
C. IBERICA-MACIZO DEL CAROCH	9	3520,88	8,18
PLANAS	14	3260,96	7,58
Confederación Hidrográfica J'ucar (TOTAL)	90	43018,13	100,00

Tabla 2. Superficie de las masas de agua subterránea pertenecientes a cada dominio geológico-estructural en el ámbito de la Demarcación Hidrográfica del Júcar

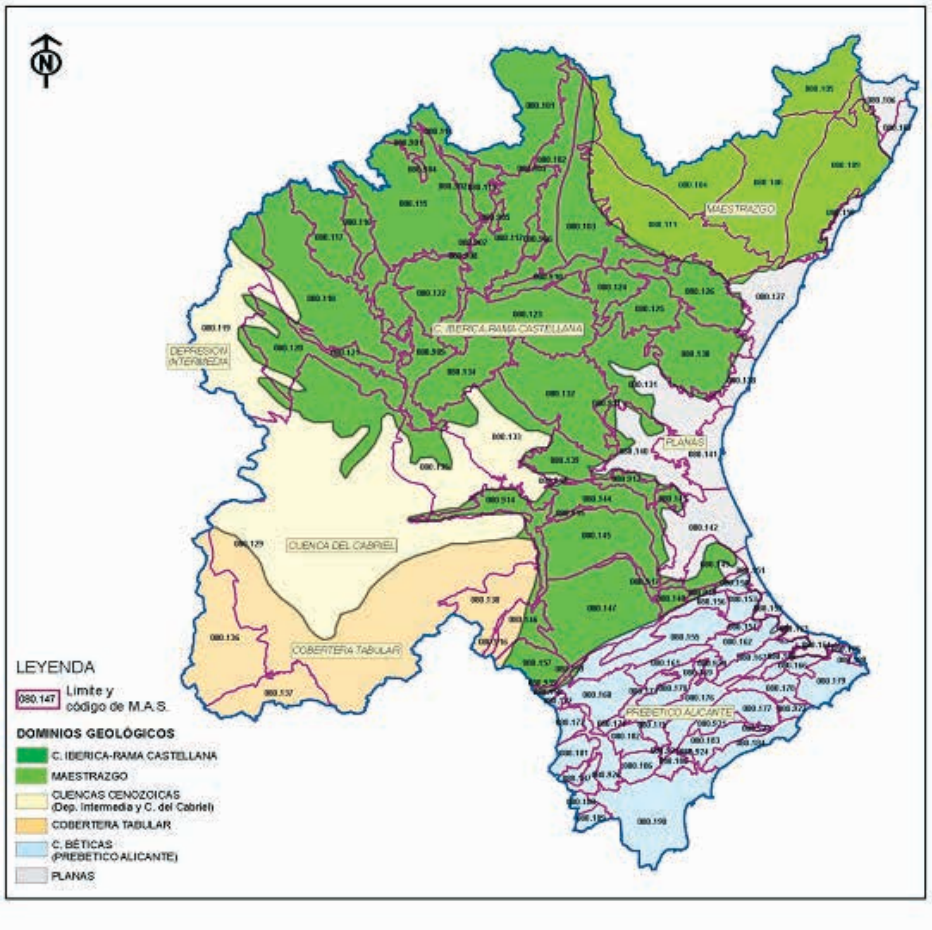


Figura 5. Distribución de las masas de agua y su relación con la litoestratigrafía de los diferentes dominios geológicos

El sector del Macizo del Caroch, constituido por un total de 9 masas, se extiende a lo largo de 3.521 km^2, lo que supone algo más del 8 % de la superficie total. Las masas involucradas presentan un predominio de acuíferos cretácicos, si bien los jurásicos están muy presentes. El impermeable de base en este entorno está constituido predominantemente por las facies margosas del Oxfordiense-Kimmeridgiense inferior (Jurásico superior). La litología continúa siendo carbonatada, si bien existen frecuentes formaciones geológicas del Cretácico inferior de carácter detrítico. También domina aquí el carácter libre de los acuíferos.

El dominio de la Cobertera Tabular manchega engloba tan solo a 3 masas, y parcialmente a una cuarta. Tiene una extensión aproximada de 4.642 km^2, que corresponden a cerca del 11 % de la superficie. Los acuíferos son de edad jurásica, mayoritariamente, y en menor medida cretácica, constituyendo en todos los casos el Keuper el impermeable de base.

El dominio de la depresión terciaria de la Cuenca del Cabriel-Júcar engloba a 3 masas de agua y, parcialmente, a una cuarta, compartida con la Ibérica y con la Cobertera Tabular. Se extiende a lo largo de 6.188 km^2 que representan aproximadamente el 15 % de la superficie. Existe una distribución similar de formaciones hidrogeológicas pertenecientes al Jurásico, Cretácico y Terciario, todas o casi todas presentes en cada una de las masas. Como nivel impermeable de base predomina el formado por las arcillas y margas con yesos del Keuper. Otra característica particular de los acuíferos de este dominio es la presencia de acuíferos mesozoicos confinados bajo sedimentos impermeables del Mioceno.

El dominio del Prebético, si bien no es el más extenso en superficie, ya que cuenta con 5.692 km^2 que suponen sólo un 13 % del total, engloba hasta 35 masas de agua subterránea. Éstas presentan una mayor compartimentación y una clara alineación morfológica de componente OSO-ENE, reflejo de las directrices estructurales dominantes en el sector. Los afloramientos dominantes corresponden a las unidades litoestratigráficas carbonatadas del Cretácico que, a su vez, son con diferencia el componente básico de las formaciones hidrogeológicas mesozoicas. En similar proporción se encuentran los acuíferos detríticos terciarios, de tipología libre a mixta. El Jurásico, también presente, es menos frecuente

que en el sector de la Rama Castellana de la Ibérica. Con estas mismas pautas, el impermeable de base de las masas de agua subterránea está constituido de forma mayoritaria por formaciones del Cretácico inferior, arcillosas de la facies Utrillas y/o margosos del Neocomiense-Aptiense.

Finalmente, las Planas litorales se extienden por el sector costero a lo largo de 3.271 km^2, un 7,5 % del total. Están formadas mayoritariamente por acuíferos detríticos libres de naturaleza aluvial y edad cuaternaria. En menor proporción, y dependiendo de la proximidad a cada uno de los distintos dominios mesozoicos (Maestrazgo, Ibérica y Prebético), aparecen en profundidad, confinados o semiconfinados, acuíferos con edades diversas que van desde el Muschelkalk y el Jurásico, hasta el Cretácico superior y Mioceno.

CONSIDERACIONES FINALES

La estructuración de las características esenciales de las masas de agua subterránea en bases de datos ligadas a fichas donde se reflejen sus principales rasgos hidrogeológicos, permite un acceso rápido a la información, de manera que puede ser utilizada con fluidez, especialmente en su aplicación e incorporación a la planificación hidrológica. Este planteamiento hace que los datos también puedan ser actualizados de forma permanente por el avance del conocimiento debido a la realización de nuevos estudios. De igual modo, permiten establecer el grado de conocimiento existente de las masas de agua subterránea y detectar las carencias que pueden darse en cada una ellas, lo que contribuye a optimizar los trabajos, facilitando la orientación de la investigación hacia aquéllas donde los recursos humanos y materiales pueden tener una aplicación más eficaz.

El análisis general de los datos reflejados en las fichas de caracterización básica de las masas de agua subterránea de la Cuenca del Júcar muestra un mayor grado de conocimiento en las localizadas en las zonas litorales, que es donde se concentra la población y donde son aprovechadas con mayor intensidad. En ellas existe información abundante sobre su geometría y límites, naturaleza de las formaciones permeables, piezometrías e hidrogeoquímica, mientras que en las masas de agua localizadas en las zonas interiores la información suele ser más escasa, especialmente en lo que atañe al funcionamiento hidráulico, morfología de la superficie piezométrica y referencias hidroquímicas. No obstante, a nivel general se observa una importante carencia sobre los parámetros hidrodinámicos de las formaciones hidrogeológicas que constituyen los acuíferos, así como en la determinación de las transferencias hídricas entre las diferentes masas de agua subterránea, aspectos que deberán ser abordados en futuros estudios. En este sentido, la progresiva ampliación de las redes de vigilancia y control es una de las actuaciones más determinantes para la mejora del conocimiento de los acuíferos y de los recursos hídricos subterráneos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Europea (2009) Estrategia Común de Implantación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). Documento Guía n.º 18. Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de tendencias. (Traducción Dirección General del Agua MARM).

Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Agua (2005) Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitaria.

IGME-DGA (2006) Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades.

IGME-DGA (2005) Guía metodológica de caracterización de masas de agua subterránea.

ANEXO 1

Dominios estructurales de las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Júcar

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PLANAS C. IBÉRICA - RAMA CASTELLANA	080.140	BUÑOL-CHESTE	080.140.007	Pliocuaternario de Chiva - Cheste	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.001	Plocuaternario de Yátova	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.140.002	Mioceno Sur	Carbonatado		Confinado	
			080.140.003	Pliocuaternario de la Rambla de Bugarra	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.004	Mioceno de Godelleta	Carbonatado		Libre	
			080.140.005	Plocuaternario de Cheste	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.140.006	Jurásico y Terciario de Buñol - Cheste	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.008	Jurásico de Cañada Fría	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.009	Mioceno de Urrea - Pedrizos	Detrítico - carbonatado		Libre	Intergranular y karstificación
			080.140.010	Cretácico superior de La Balsica	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.011	Jurásico de Lomayma	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.140.012	Cretácico superior de El Palmeral	Detrítico - carbonatado			
			080.140.013	Jurásico de Serretilla	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
	080.141	PLANA DE VALENCIA NORTE	080.141.002	Cuaternario de la Plana de Valencia Norte (acuífero superior)	Detrítico	Margas y arcillas atribuidas al Oligoceno y Mioceno basal. En ocasiones el Keuper	Multicapa	Intergranular
			080.141.001	Mioceno de la Plana de Valencia Norte (acuífero inferior)	Detrítico - carbonatado		Multicapa	Intergranular
PLANAS C. IBÉRICA - RAMA CASTELLANA	080.142	PLANA DE VALENCIA SUR	080.142.001	Mioceno de la Plana de Valencia Sur (acuífero inferior)	Detrítico	Margas y arcillas atribuidas al Oligoceno y Mioceno basal. En ocasiones el Keuper	Libre	Intergranular
			080.142.002	Cuaternario y Mioceno de la Plana Valencia Sur (acuífero superior)	Detrítico		Libre	Intergranular
PLANAS C. IBÉRICA - PREBÉTICO	080.151	PLANA DE JARACO	080.151.001	Cuaternario de la Plana de Jaraco y Buendía	Detrítico	Margas del Mioceno, (en la mitad occidental el muro es inexistente y la Unidad reposa en conexión hidráulica sobre la Unidad de Marxuquera-Falconera).	Libre	
PLANAS PREBÉTICO	080.152	PLANA DE GANDÍA	080.152.001	Cuaternario de la Plana de Gandía	Detrítico			
	080.163	OLIVA-PEGO	080.163.001	Cuaternario de Plana de Oliva-Pego	Detrítico	Margas (Mioceno)	Libre	Intergranular
	080.164	ONDARA-DENIA	080.164.001	Cuaternario de Plana Ondara-Denia	Detrítico	Margas (Mioceno)	Libre	Fisuración y karstificación
			080.164.002	Cretácico superior de Jesus Pobre	Carbonatado		Libre	
	080.180	JAVEA	080.180.001	Cuaternario de Jávea	Detrítico	Margas miocenas de facies Tap.		

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.190	BAJO VINALOPÓ	080.190.002	Jurásico de Fontcalent	Carbonatado		Libre	
			080.190.007	Pliocuaternario de San Juan	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.190.008	Pliocuaternario de San Vicente	Detrítico		Libre	
			080.190.003	Cretácico Superior de Águilas	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.190.001	Jurásico de Mediana	Carbonatado		Libre	
			080.190.005	Mioceno superior de Colmenar	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.190.004	Mioceno medio - superior de Sancho	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.190.006	Mioceno - Cuaternario de Vega Baja	Detrítico - carbonatado		Mixto	
PLANAS MAESTRAZGO	080.106	PLANA DE CENIA	080.106.001	Jurásico - Cretácico de la Plana de Cenia (acuífero inferior carbonatado)	Carbonatado	Keuper	Semiconfinado	Karstificación
			080.106.002	Mio - Cuaternario de la Plana de Cenia (acuífero superior detrítico)	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.107	PLANA DE VINAROZ	080.107.001	Jurásico - Cretácico de la Plana de Vinaroz (acuífero inferior carbonatado)	Carbonatado		Semiconfinado	Karstificación
			080.107.002	Mio - Cuaternario de la Plana de Vinaroz (acuífero superior detrítico)	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.110	PLANA DE OROPESA-TORREBLANCA	080.110.001	Cuaternario de la Plana de Oropesa - Torreblanca	Detrítico	Margas y arcillas del Mioceno	Libre	Intergranular
PLANAS C. IBÉRICA - RAMA CASTELLANA	080.127	PLANA DE CASTELLÓN	080.127.003	Muschelkalk - Lías - Cretácico de la Plana de Castellón (acuífero profundo)	Carbonatado		Semiconfinado	Fisuración y karstificación
			080.127.001	Pliocuaternario de la Plana de Castellón (acuífero somero)	Detrítico		Libre	
			080.127.002	Pliocuaternario de La Rambleta	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.128	PLANA DE SAGUNTO	080.128.001	Pliocuaternario de la Plana de Sagunto (acuífero detrítico)	Detrítico		Libre	Intergranular
			080.128.002	Muschelkalk y Jurásico de la Plana de Sagunto (acuífero carbonatado)	Carbonatado		Semiconfinado	Fisuración y karstificación
	080.131	LIRIA-CASINOS	080.131.003	Mioceno de Liria - Casinos (Mioceno Norte)	Carbonatado	Facies Keuper	Confinado	
			080.131.001	Jurásico superior de Liria - Casinos	Carbonatado		Libre	Fisuración
			080.131.002	Jurásico inferior de Alcublas	Carbonatado		Libre	Fisuración
			080.131.004	Cretácico superior de Liria - Casinos	Carbonatado		Libre	Fisuración

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.182	ARGüEÑA-MAIGMÓ	080.182.004	Eoceno medio de Los Molinos	Detrítico - carbonatado	Margas y margocalizas del Neocomiense	Mixto	
			080.182.005	Eoceno medio - Oligoceno de Conejera	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.182.003	Mioceno medio de Caprala	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.182.001	Oligoceno - Mioceno de Rullo	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.182.002	Eoceno - Oligoceno de Maigmó	Detrítico - carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.182.006	Eoceno medio - Oligoceno de Caballo - Fraile	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.182.007	Cretácico de Argüeña - Maigmó	Carbonatado		Mixto	
	080.183	ORCHETA	080.183.002	Cretácico superior - Mioceno inferior de los Anticlinales de Orcheta Norte	Carbonatado	Margas y margocalizas del Kimmeridgiense	Libre	Fisuración
			080.183.001	Malm - Berriasiense de Cabezón del Oro	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.184	SAN JUAN-BENIDORM	080.184.004	Pliocuaternario Benidorm - Altea	Detrítico	Flysch Mioceno	Libre	
			080.184.003	Pliocuaternario de Villajoyosa	Detrítico		Libre	
			080.184.002	Cretácico Superior - Mioceno inferior de Anticlinales de Orcheta Sur	Carbonatado		Libre	
			080.184.001	Pliocuaternario de San Juan	Detrítico - carbonatado		Mixto	
	080.185	AGOST-MONNEGRE	080.185.002	Cretácico Superior - Turoniense de Monnegre	Detrítico - carbonatado	Margas y margocalizas del Albiense-Cenomaniense	Libre	
			080.185.001	Cretácico Superior - Turoniense de Tosal del Reó	Detrítico - carbonatado		Mixto	
	080.186	SIERRA DEL CID	080.186.005	Cretácico superior de Vértice	Carbonatado	Margas y margocalizas del Albiense	Libre	
			080.186.006	Turoniense de Vendós - Castellar	Carbonatado		Libre-Semiconfinado	Fisuración y karstificación
			080.186.002	Cenomaniense-Turoniense de Petrel	Carbonatado		Mixto	
			080.186.004	Cenomaniense - Turoniense de Pusa	Carbonatado		Libre	
			080.186.001	Cenomaniense-Turoniense de Cid	Carbonatado		Mixto	
			080.186.003	Cenomaniense-Turoniense de Serreta Larga	Carbonatado		Mixto	
	080.187	SIERRA DEL RECLOR	080.187.001	Eoceno de Chinorlet	Carbonatado	Margas del Eoceno Inferior	Mixto	
			080.187.003	Eoceno-Oligoceno de Umbría	Carbonatado		Mixto	
			080.187.002	Eoceno de Collado del Rey	Carbonatado		Mixto	
	080.188	SIERRA DE ARGALLET	080.188.001	Lías de Argallet	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.189	SIERRA DE CREVILLENTE	080.189.001	Lías de Sierra de Crevillente	Carbonatado	Arcillas y yesos (Keuper) + materiales margosos (Albiense-Paleoceno)	Parcialmente confinado	Fisuración y karstificación

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.176	BARRANCONES-CARRASQUETA	080.176.004	Oligoceno - Mioceno inferior de Albabor	Carbonatado			
			080.176.001	Eoceno de Tibi	Carbonatado			
			080.176.006	Eoceno de Penáguila	Carbonatado			
			080.176.008	Cenomaniense de El Negre	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.176.002	Mioceno de Jijona	Carbonatado			
			080.176.005	Eoceno de Menechaor	Carbonatado			
			080.176.003	Mioceno de Carrasqueta	Carbonatado			
			080.176.007	Cenomaniense - Eoceno de Barrancones	Carbonatado		Predominantemente confinado	Fisuración y karstificación
	080.177	SIERRA AITANA	080.177.001	Aptiense - Cretácico superior de Canets	Carbonatado	Margas y margocalizas del Albiense-Cenomaniense	Mixto	
			080.177.002	Aptiense - Cretácico superior de Alquería	Carbonatado		Mixto	
			080.177.003	Aptiense - Cretácico superior de Los Manueles	Carbonatado		Mixto	
			080.177.005	Cretácico superior - Eoceno de Sella	Carbonatado		Mixto	
			080.177.006	Cretácico superior - Eoceno de Sierra Aitana	Carbonatado		Mixto	
			080.177.004	Malm - Berriasiense del Puig Campana	Carbonatado		Libre	
			080.177.007	Cretácico - Mioceno de Beniardá - Palop Sur	carbonatado		Mixto	
	080.178	SERRELLA-AIXORTA-ALGAR	080.178.002	Cretácico - Mioceno de Beniardá - Polop Norte	Carbonatado	Margas del Neocomiense	Mixto	
			080.178.003	Turoniense de Serrella - Aixortà	Carbonatado		Mixto	
			080.178.001	Turoniense de Llosa	Carbonatado		Libre	
			080.178.004	Cretácico - Eoceno de Carrascal - Bernia	Carbonatado		Mixto	
	080.179	DEPRESIÓN DE BENISA	080.179.001	Cretácico - Terciario de Depresión de Benisa	Carbonatado	Margas del Neocomiense-Barremiense		
	080.181	SIERRA DE LAS SALINAS	080.181.001	Paleógeno de Cabrera	Carbonatado	Margas, del Cretácico Inferior	Libre	
			080.181.002	Cretácico Inferior de Serral - Salinas	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.181.003	Cretácico Superior de Carbonera	Carbonatado		Mixto	

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.168	MEDIODÍA	080.168.001	Cretácico superior de Facheca	Carbonatado	Margas y margocalizas Barremienses	Mixto	
			080.168.002	Cretácico superior de Beniarbeig	Carbonatado		Mixto	
			080.168.003	Cretácico superior de Sanet	Carbonatado		Mixto	
			080.168.004	Cretácico superior de Mediodía	Carbonatado		Mixto	Fisuración
	080.169	MURO DE ALCOY	080.169.001	Cuaternario de Muro de Alcoy	Detrítico	Margas del Mioceno	Libre	Intergranular
	080.170	SALT SAN CRISTOBAL	080.170.004	Cretácico Superior de Agres	Carbonatado	Unidad Raspay (margas limosas del Cretácico superior - Paleoceno)	Libre	
			080.170.003	Cretácico Superior de Alto de Llacunas	Carbonatado		Libre/Mixto	
			080.170.005	Eoceno de Biscoy	Carbonatado		Libre/Mixto	
			080.170.001	Jurásico de Sierra Mariola	Carbonatado		Libre/Mixto	Fisuración y karstificación
			080.170.002	Cretácico superior de Pinar de Camús	Carbonatado		Libre/Mixto	Fisuración y karstificación
			080.170.007	Mioceno de Baradello	Detrítico - carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.170.008	Mioceno de Estrecho	Detrítico - carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.170.006	Eoceno de Salt San Cristobal	Carbonatado		Confinado / libre	Fisuración y karstificación
	080.171	SIERRA MARIOLA	080.171.002	Cretácico superior - Mioceno de San Jaime	Carbonatado	Margas de la Unidad Querola	Libre	
			080.171.004	Eoceno superior - Oligoceno - Mioceno medio de Onil	Carbonatado		Predominantemente libre	Fisuración y karstificación
			080.171.005	Oligoceno - Cretácico inferior de Fontanella	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.171.003	Cretácico superior de Pinar de Camús	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.171.001	Jurásico de Sierra Mariola o Cabranta	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.172	SIERRA LÁCERA	080.172.001	Cretácico Superior de Sierra de Lácera	Carbonatado	Materiales arcillosos de la Formación Utrillas		
	080.173	SIERRA DEL CASTELLAR	080.173.001	Cretácico Superior de Jumilla - Villena	Carbonatado	Materiales arcillosos de la Formación Utrillas	Libre	Fisuración y karstificación
	080.174	PEÑARRUBIA	080.174.001	Jurásico de Peñarrubia	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.174.002	Cretácico de Peñarrubia	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.175	HOYA DE CASTALLA	080.175.001	Pliocuaternario de Hoya de Castalla	Detrítico	Margas y arcillas del Mioceno y Keuper		

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.158	CUCHILLO-MORATILLA	080.158.001	Cretácico de Moratilla	Carbonatado	Materiales areno-arcillosos de la F. Utrillas		
			080.158.002	Cretácico de Cuchillo	Carbonatado			
	080.159	ROCIN	080.159.001	Cretácico superior de Rocín	Carbonatado	Arenas y arcillas (F. Utrillas)	Libre	
	080.160	VILLENA-BENEJAMA	080.160.001	Cuaternario de Caudete - Villena	Detrítico	Arenas y margas (F. Utrillas) y arcillas verdes (Keuper)	Libre	
			080.160.002	Cretácico superior Villena - Benejama	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
	080.161	VOLCADORES-ALBAIDA	080.161.001	Cretácico superior de Albaida	Carbonatado	Biomicritas, calcarenitas y margas (Cretácico Inferior)	Libre	
			080.161.002	Cretácico superior de Pou Clar	Carbonatado		Mixto	
			080.161.003	Cretácico superior de Els Viverets	Carbonatado		Libre	
	080.162	ALMIRANTE MUSTALLA	080.162.002	Cretácico superior de Salem - Albuerca - Gallinera - Mustalla	Carbonatado	Margas neocomienses (Fm. Oliva) y ocsionalmente del Keuper.	Libre	
			080.162.003	Cretácico superior de Cantalar	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.162.001	Jurásico superior de Oliva	Detrítico - carbonatado		Mixto	
	080.165	MONTGÓ	080.165.001	Cretácico superior de Montgó	Carbonatado	Margas (Barremiense) y Margas ("Tap", Mioceno)	Libre	
	080.166	PEÑÓN-BERNÍA	080.166.001	Cretácico de Siguili (Aptiense - Cretácico Superior)	Carbonatado	Margas y margocalizas del Neocomiense		
			080.166.002	Cretácico de Peñón (Aptiense - Turoniense)	Carbonatado			
			080.166.003	Cuaternario de Jalón	Carbonatado			
			080.166.004	Cretácico de Fontilles (Aptiense - Cretácico superior)	Carbonatado			
			080.166.005	Cretácico de Cocoll (Aptiense - Turoniense)	Carbonatado			
			080.166.006	Cretácico - Terciario de Solana de Llosa	Carbonatado			
			080.166.007	Cretácico de Orba (Aptiense - Turoniense)	Carbonatado			
	080.167	ALFARO-SEGARIA	080.167.001	Cretácico superior de Almudaina - Alfaro - Segaria	Carbonatado	Margas y margocalizas Barremienses	Mixto	Fisuración
			080.167.002	Cretácico superior de Villena - Benimasot	Detrítico		Confinado	
			080.167.003	Cretácico superior de Salem - Gallinera - Mustalla	Carbonatado		Mixto	
			080.167.004	Cretácico superior de Cava Norte	Detrítico - carbonatado			
			080.167.005	Cretácico superior de Caba Sur	Detrítico - carbonatado			
			080.167.006	Eoceno	Detrítico		Confinado	Intergranular

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
COBERTERA TABULAR	080.136	LEZUZA-EL JARDÍN	080.136.001	Lías de Campo de Montiel	Carbonatado	Keuper no aflorante	Mixto	Fisuración
	080.137	ARCO DE ALCARAZ	080.137.001	Jurásico inferior (Lías) - Lías y Dogger de Arco de Alcaraz - Elche de la Sierra	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Libre	Fisuración
			080.137.002	Jurásico medio (Dogger) - Lías y Dogger de Arco de Alcaraz - Elche de la Sierra	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.138	ALPERA-CARCELEN	080.138.001	Cretácico superior - Cuaternario de Carcelén	Detrítico - carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Mixto	Fisuración
CUENCA DEL CABRIEL-JÚCAR	080.119	TERCIARIO DE ALARCÓN	080.119.001	Terciario de Alarcón	Detrítico - carbonatado	Arcillas y margas (Fm. Villalba de la Sierra,Cretácico-Paleógeno)	Multicapa	Intergranular
	080.133	REQUENA-UTIEL	080.133.002	Mioceno y Cuaternario de la Plana de Utiel - Requena	Detrítico - carbonatado	Arcillas del Keuper	Mixto	Intergranular
			080.133.001	Jurásico y Cretácico de Fuenterrobles Sur	Detrítico - carbonatado		Mixto	Intergranular y fisurado
			080.133.003	Cretácico superior de la Sierra de Utiel Sur	Carbonatado		Mixto	Fisuración
	080.135	HOCES DEL CABRIEL	080.135.003	Mioceno (acuífero superior)	Detrítico - carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Libre - Semiconfinado	Intergranular
			080.135.001	Jurásico (acuífero inferior)	Carbonatado		Confinado	Fisuración y karstificación
			080.135.002	Cretácico superior (acuífero intermedio)	Carbonatado		Confinado	Fisuración y karstificación
	080.129	MANCHA ORIENTAL	080.129.001	Jurásico de Chorro - Colleras	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Confinado	Fisuración y karstificación
			080.129.003	Pontiense (Mioceno)	Carbonatado		Confinado	Fisuración y karstificación
			080.129.002	Cretácico de Franco - Benejama	Carbonatado		Confinado	Fisuración y karstificación
PREBÉTICO DE ALICANTE	080.150	BARIG	080.150.001	Jurásico superior de Jaraco	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.150.002	Cretácico superior de Barig	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.150.003	Cuaternario de la Plana de Jaraco	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.153	MARCHUQUERA-FALCONERA	080.153.001	Cretácico superior de Marchuquera - Falconera	Carbonatado	Margas del Neocomiense - Barremiense	Mixto	fisuración
	080.154	SIERRA DE ADOR	080.154.001	Jurásico superior de Ador	Carbonatado	Margas y margocalizas del Oxfordiense	Libre	Fisuración
			080.154.002	Jurásico superior de Terrateig	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.154.003	Aptiense - Albiense de Villalonga	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.154.004	Aptiense - Albiense de Palma de Gandía	Carbonatado		Mixto	
			080.154.005	Cuaternario de Plana de Gandía	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.155	VALLE DE ALBAIDA	080.155.001	Mioceno medio de Ollería-Benigánim	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.156	SIERRA GROSSA	080.156.001	Cretácico superior de Sierra Grossa	Carbonatado	Margas del Neocomiense - Barremiense	Mixto	Fisuración

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
CORDILLERA IBÉRICA-MACIZO DEL CAROCH	080.146	ALMANSA	080.146.001	Neógeno - Cuaternario de Almansa	Detrítico - carbonatado		Multicapa	Intergranular
			080.146.002	Cretácico superior de Almansa	Carbonatado		Mixto	Fisuración
CORDILLERA IBÉRICA-MACIZO DEL CAROCH	080.147	CAROCH SUR	080.147.001	Jurásico superior - Cretácico inferior de Caroch Sur	Detrítico - carbonatado	Margas y calizas con pasadas arenosas del Oxfordiense	Multicapa	Intergranular y fisurado
			080.147.002	Cretácico de Torquillo	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.003	Cretácico de Cuevas Negras	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.004	Cretácico de Requena	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.005	Cretácico de Losilla	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.006	Cretácico de Gallinero	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.007	Cretácico de Muela	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.147.008	Cretácico de Marín	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.147.009	Cretácico de Negritas - Cámara	Detrítico - carbonatado		Libre	
			080.147.010	Cretácico superior de Quesa	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.011	Cretácico superior de Comandante	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.147.012	Mioceno medio - Cuaternario detrítico de Navarrés - Estubeny	Detrítico - carbonatado		Libre	Intergranular
			080.147.013	Cretácico superior de Santos	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.147.014	Cretácico superior de Bernisa	Carbonatado		Mixto	
			080.147.015	Cretácico superior de la Atalaya	Carbonatado		Mixto	
	080.148	HOYA DE JATIVA	080.148.001	Cretácico de Mortera-Bernisa	Carbonatado	Margas del Neocomiense-Barremiense		
			080.148.002	Detrítico cuaternario de Canals	Detrítico			
	080.149	SIERRA DE LAS AGUJAS	080.149.001	Jurásico-Cretácico de la Sierra de las Agujas	Carbonatado		Libre-Semiconfinado	Fisuración y karstificación
	080.157	SIERRA DE LA OLIVA	080.157.001	Dogger de Sierra de la Oliva	Carbonatado	Ritmitas del Kimmeridgiense inferior-medio (tramo acuífero inferior). Calizas margosas del Barremiense (tramo acuífero superior)		
			080.157.002	Kimmeridgiense de Sierra de la Oliva	Carbonatado			
			080.157.003	Cretácico superior - Mioceno de Tres Puntas	Carbonatado			
			080.157.004	Cretácico inferior de Sierra de la Oliva	Carbonatado			

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
CORDILLERA IBÉRICA-RAMA CASTELLANA	080.130	MEDIO PALANCIA	080.130.001	Buntsandstein medio de Medio Palancia	Detrítico	Arcillas del Buntsandstein	Mixto	Fisuración
			080.130.002	Muschelkalk de Gansá	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.003	Muschelkalk de Estivella	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.004	Muschelkalk del Alto del Cornaco	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.005	Muschelkalk de Algar - Cuert	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.006	Muschelkalk del Caballo	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.007	Muschelkalk y Jurásico de Náquera - Puzol	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.008	Muschelkalk de la Vall de Uxó	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.009	Muschelkalk de Azuébar	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.130.010	Muschelkalk y Jurásico inferior de Segorbe - Soneja Sur	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
	080.132	LAS SERRANÍAS	080.132.003	Muschelkalk de la Transversal Higueruelas - Talayuelas	Carbonatado	Permo-trias y Keuper	Multicapa	Fisuración
			080.132.002	Jurásico de Medio Turia	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.132.001	Cretácico superior de la Sierra de Enmedio	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.134	MIRA	080.134.001	Cretácico superior de la Sierra de Utiel Norte	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Libre	Fisuración
			080.134.002	Cretácico superior de Fuenterrobles	Carbonatado		Libre	Intergranular
CORDILLERA IBÉRICA-MACIZO DEL CAROCH	080.139	CABRILLAS-MALACARA	080.139.001	Cretácico superior de la Sierra de Malacara	Carbonatado	Margas y arcillas del Keuper	Libre	Fisuración y karstificación
			080.139.002	Lías y Dogger de Siete Aguas	Carbonatado		Mixto	Fisuración
	080.143	LA CONTIENDA	080.143.001	Cretácico superior de La Contienda	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.144	SIERRA DEL AVE	080.144.001	Cretácico superior de Dos Aguas	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.144.002	Cretácico superior de Viñuelas	Detrítico - carbonatado		Mixto	
			080.144.003	Cretácico superior de El Ave	Detrítico - carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.145	CAROCH NORTE	080.145.001	Kimmeridgiense, Aptiense y Cretácico superior de la Unidad del Júcar	Detrítico - carbonatado	Calizas, arcillas y margas del Oxfordiense-Kimmeridgiense inf	Mixto	
			080.145.002	Cretácico superior de Áyora	Carbonatado		Mixto	
			080.145.003	Cretácico superior del Puntal de Juanevo	Carbonatado		Mixto	
			080.145.004	Cretácico superior de Sierra del Ave	Carbonatado		Libre	
			080.145.006	Cretácico superior de Cortes de Pallás	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
CORDILLERA IBÉRICA-RAMA CASTELLANA	080.115	MONTES UNIVERSALES	080.115.007	Cretácico	Carbonatado		Libre	Fisuración
			080.115.006	Muschelkalk	Carbonatado		Confinado	Fisuración
CORDILLERA IBÉRICA-RAMA CASTELLANA	080.116	TRIÁSICO DE BONICHES	080.116.001	Buntsandstein y Muschelkalk (Triásico de Boniches)	Detrítico - carbonatado	Pizarras, areniscas, cuarcitas y margas paleozóicas (Ordovícico -	Libre	Intergranular y fisurado
	080.117	JURÁSICO DE UÑA	080.117.001	Jurásico - Cretácico (Jurásico de Uña)	Carbonatado	Arcillas y margas versicolores del Keuper	Libre	Fisuración y karstificación
	080.118	CRETÁCICO DE CUENCA NORTE	080.118.001	Cretácico superior de Cuenca Norte (acuífero superior)	Carbonatado	Arcillas y margas del Keuper	Libre	Fisuración y karstificación
	080.120	CRETÁCICO DE CUENCA SUR	080.120.001	Cretácico superior de Cuenca Sur	Carbonatado	Facies detríticas y margosas del Cretácico inferior	Mixto	Fisuración y karstificación
	080.121	JURÁSICO DE CARDENETE	080.121.001	Jurásico de Cardenete	Carbonatado	Arcillas abigarradas y yesos del keuper	Mixto	Fisuración
	080.122	VALLANCA	080.122.001	Jurásico y Cretácico de Muelas	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Mixto	Fisuración y karstificación
			080.122.002	Lías y Cretácico superior de Talayón	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.123	ALPUENTE	080.123.005	Muschelkalk (acuífero inferior)	Carbonatado	Facies keuper	Mixto	Fisuración
			080.123.001	Lías y Dogger de Revolcador	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.123.002	Lías y Dogger de Landete - Garavalla	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.123.003	Kimmeridgiense superior y Portlandiense de Titagua - Alpuente	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.123.004	Lías y Dogger de Alpuente - La Yesa	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.123.006	Cretácico (acuífero superior)	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.123.007	Cuaternario	Detrítico		Libre	Intergranular
	080.124	SIERRA DEL TORO	080.124.001	Lías - Dogger de Sierra del Toro	Carbonatado	Triásicos impermeables	Libre	Fisuración
			080.124.002	Lías - Dogger de Alpuente - La Yesa	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.125	JERICA	080.125.001	Lías y Dogger de Jérica	Carbonatado	Facies Keuper	Mixto	Fisuración
			080.125.002	Muschelkalk de la Transversal de Bejís	Carbonatado		Mixto	Fisuración
CORDILLERA IBÉRICA-RAMA CASTELLANA	080.126	ONDA-ESPADAN	080.126.001	Buntsandstein de Onda - Espadán	Detrítico		Mixto	Intergranular y fisurado
			080.126.002	Muschelkalk de Alcudia de Veo	Carbonatado		Mixto	Fisuración y karstificación
			080.126.003	Muschelkalk de Ahín - Villavieja				
			080.126.004	Muschelkalk y Jurásico inferior de Segorbe - Soneja Norte				
			080.126.006	Muschelkalk de Onda				
			080.126.005	Jurásico inferior de Torrechivas - Suevas	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación

ANEXO 3:
DOMINIO ESTRUCTURAL-M.A.Sub.

DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN RELACIÓN CON LOS DOMINIOS GEOLÓGICOS (DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR)								
Dominio Estructural	CodM.A.S.	Nombre	CodFormHidrog	Formación Hidrogeológica	Naturaleza	Impermeable de base	CondHidrost	Tipo permeabilidad
MAESTRAZGO	080.104	MOSQUERUELA	080.104.001	Jurásico s.l. de Mosqueruela	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.104.002	Cretácico inferior (Gargasiense) de Mosqueruela Norte	Carbonatado		Libre	Fisuración
			080.104.003	Cretácico superior (Cenomaniense - Senoniense) de Mosqueruela Norte	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.105	PUERTOS DE BECEITE	080.105.001	Jurásico superior y Cretácico inferior de Puertos de Beceite	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.108	MAESTRAZGO OCCIDENTAL	080.108.002	Cretácico superior del Maestrazgo Occidental	Carbonatado	Margas y arcillas del Keuper	Libre	Fisuración
			080.108.001	Lías, Dogger, Kimmeridgiense y Gargasiense del Maestrazgo Occidental	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.109	MAESTRAZGO ORIENTAL	080.109.002	Cretácico superior del Maestrazgo Occidental	Carbonatado	Margas y arcillas del Keuper	Libre	Fisuración
			080.109.001	Lías, Dogger, Kimmeridgiense y Gargasiense del Maestrazgo Oriental	Carbonatado		Libre	Fisuración
	080.111	LUCENA-ALCORA	080.111.001	Jurásico - Cretácico inferior de Javalambre	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper		Fisuración
			080.111.002	Cretácico superior de Mosqueruela Sur	Carbonatado		Libre	Fisuración
CORDILLERA IBÉRICA-RAMA CASTELLANA	080.101	HOYA DE ALFAMBRA	080.101.001	Jurásico de Hoya de Alfambra	Carbonatado		Mixto	Fisuración
			080.101.002	Mioceno de Hoya de Alfambra	Detrítico - carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.101.003	Cuaternario de Hoya de Alfambra	detrítico		Libre	Intergranular
	080.102	JAVALAMBRE OCCIDENTAL	080.102.001	Jurásico de Javalambre Occidental	Carbonatado	Margas del Keuper	Mixto	Fisuración
	080.103	JAVALAMBRE ORIENTAL	080.103.001	Jurásico de Javalambre Oriental	Carbonatado	Arcillas yesíferas del Keuper	Mixto	Fisuración
	080.112	HOYA DE TERUEL	080.112.001	Cretácico superior de La Olmeda	Carbonatado	Arcillas y yesos del Keuper	Libre	Fisuración
	080.113	ARQUILLO	080.113.001	Lías - Dogger de Villel (acuífero inferior jurásico)	Carbonatado	Pizarras y cuarcitas paleozoicas y yesos del Keuper	Libre	Fisuración
			080.113.002	Lías - Dogger de Arquillo (acuífero inferior jurásico)	Carbonatado		Libre	Fisuración
			080.113.003	Mioceno (acuífero superior)	Detrítico - carbonatado		Libre	Intergranular
	080.114	GEA DE ALBARRACÍN	080.114.002	Muschelkalk (acuífero inferior)	Carbonatado	Pizarras, cuarcitas y grauvacas del Paleozoico	Confinado	Fisuración y karstificación
			080.114.001	Lías y Dogger de Tordesillos (acuífero superior)	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
	080.115	MONTES UNIVERSALES	080.115.001	Lías - Dogger de Tejadillos	Carbonatado	Pizarras y cuarcitas paleozoicas	Libre	Fisuración y karstificación
			080.115.002	Lías - Dogger de Ebrón	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.115.003	Lías - Dogger de La Hoz	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.115.004	Lías - Dogger de Berro	Carbonatado		Libre	Fisuración y karstificación
			080.115.005	Lías de Albarracín	Carbonatado		Libre	Fisuración

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN
GENERAL DEL
AGUA