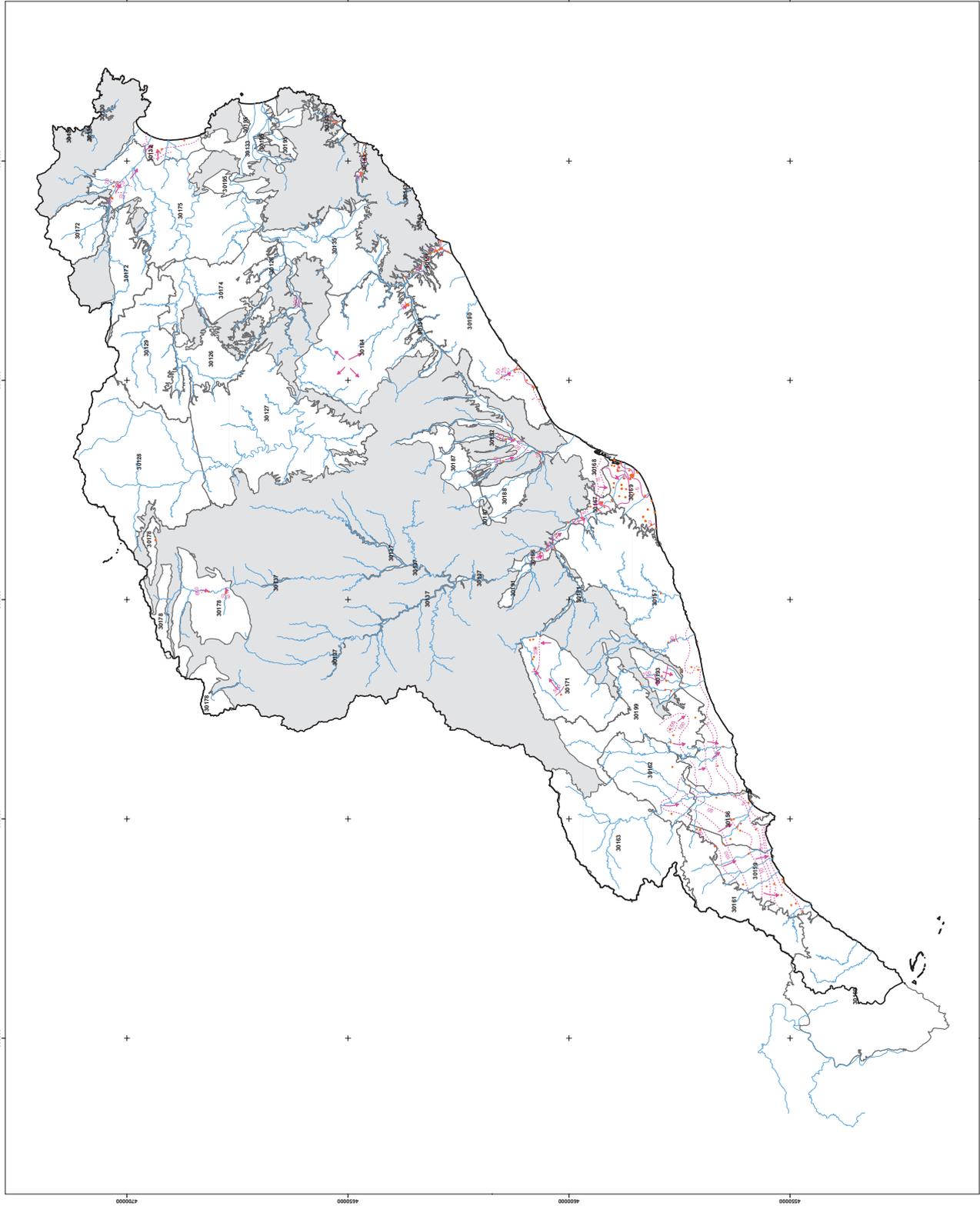


LEYENDA

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



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)

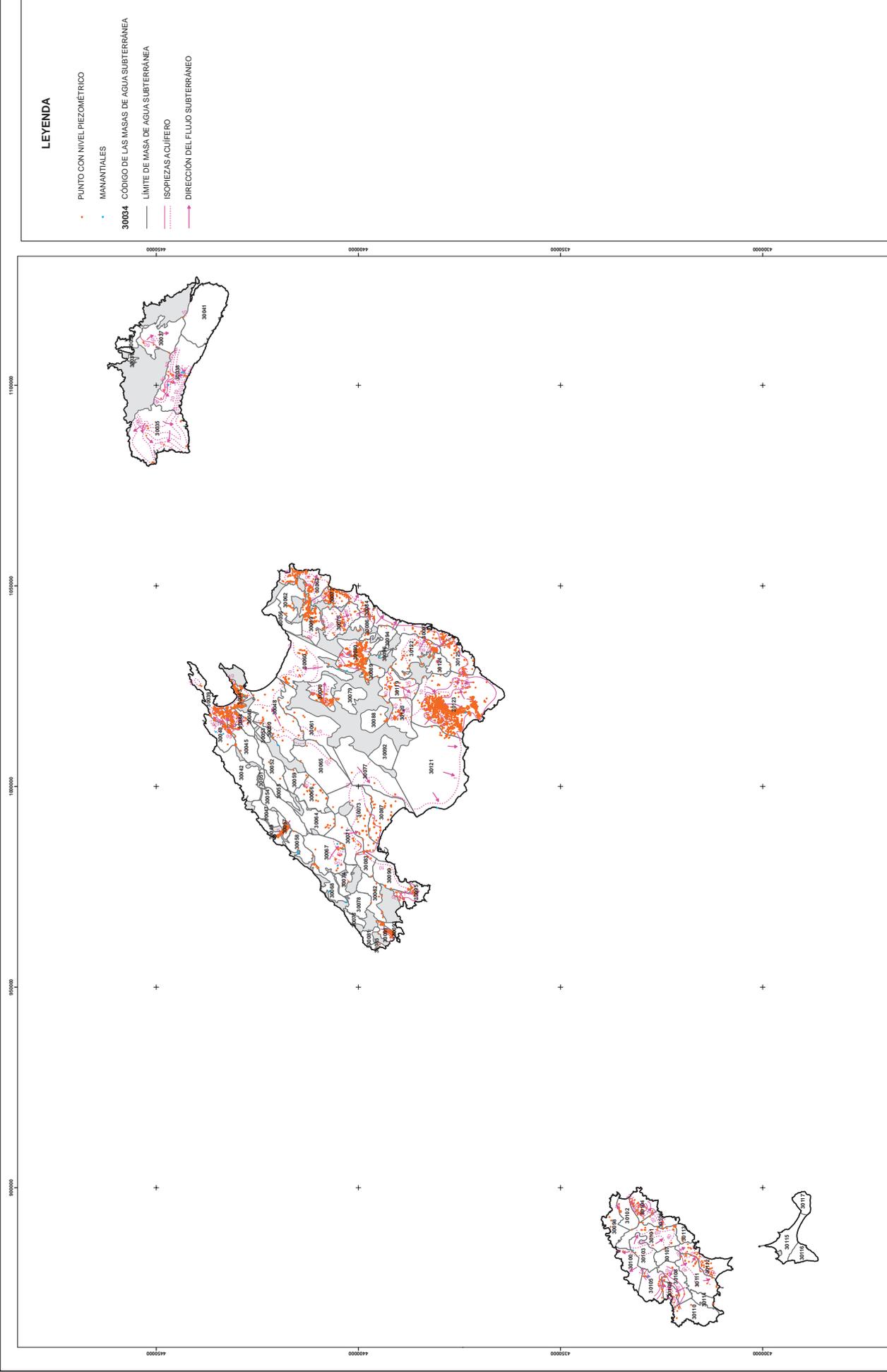
El periodo resultante para las isopiezas de referencia, 1972-1975, es muy reducido porque coincide con el desarrollo de los trabajos del Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de Baleares en el que se efectuó una caracterización hidrogeológica general de las islas, aunque la definición de acuíferos 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 las 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:

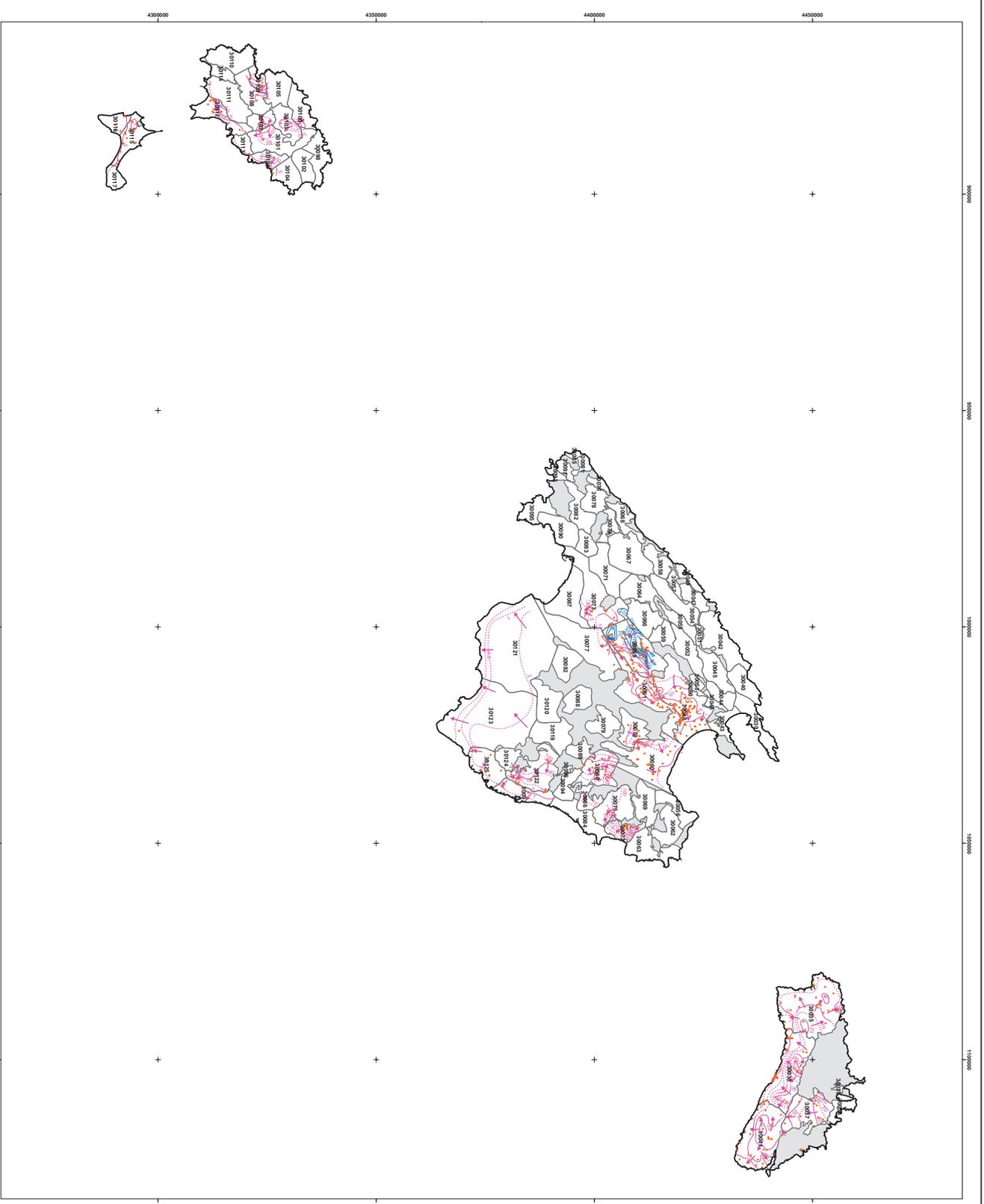
- En Mallorca, el caso más significativo es el de la Plá de Campos, en la que se aprecian cotas piezométricas negativas a considerable distancia de la costa). También aparecen áreas localizadas de depresión piezométrica en las Son Real, Portocristo, Son Maciá, Santanyí.



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- MANANTIALES
- 30034 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPÍEZAS ACUÍFERO
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA	 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA RÚRAL 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		CUENCA BALEARRES PERÍODO: 1969-1992 CÓDIGO MAPA: EG05_111_MAP_69_92	JULIO 2009
		ACTIVIDAD 5: ELABORACIÓN DEL MAPA PIEZOMÉTRICO DE ESPAÑA			



LEYENDA

- PUNTO CON NIVEL PIEZOMÉTRICO
- 30004 CÓDIGO DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
- LÍMITE DE MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA
- ISOPÍEZAS ACUÍFERO
- ISOPÍEZAS ACUÍFERO PROFUNDO (MAS 30085 Y MAS 3073)
- DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO



INSTITUTO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

INSTITUTO
DE RECURSOS
Y MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y FORESTAL

DIRECCIÓN GENERAL

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 BALEARÉS
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 Pla 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 ICiutadella 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

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 hidrológica 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 transcripción 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 aquella 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 aquella 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 superfi-

ciales, 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 isocloruros: 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 utili-

zar 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 (S_i) y a cada superficie se le asigna el valor medio de los cloruros de las isolíneas que la limitan (C_i). 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.

$$\text{El índice será: } I = \frac{\sum S_i \cdot C_i}{S_{\text{total}}}$$

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 avan-

ce 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:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |f(x) - \bar{f}|$$

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 cada 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.

Índice 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.

Párametro	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.

Parámetro I

Los valores del parámetro I en los tres acuíferos considerados se muestran en la tabla 10:

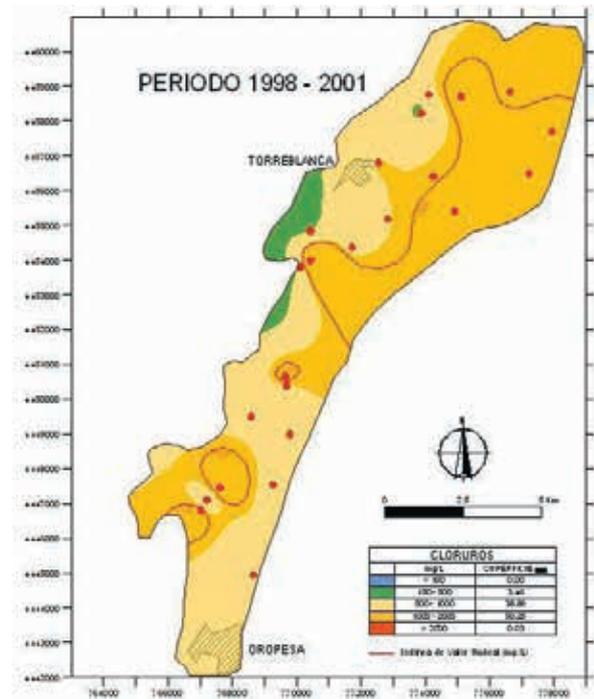


Figura 2. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en el acuífero de Oropesa - Torreblanca.

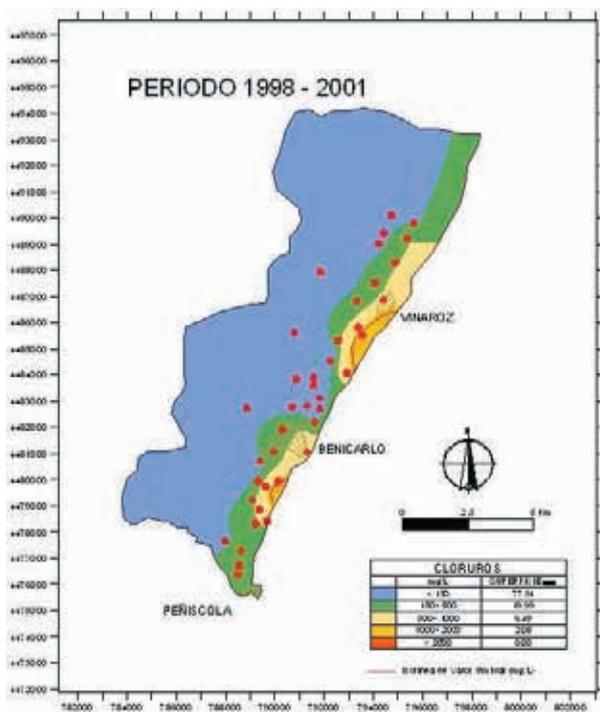


Figura 1. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en el acuífero de Vinaroz.

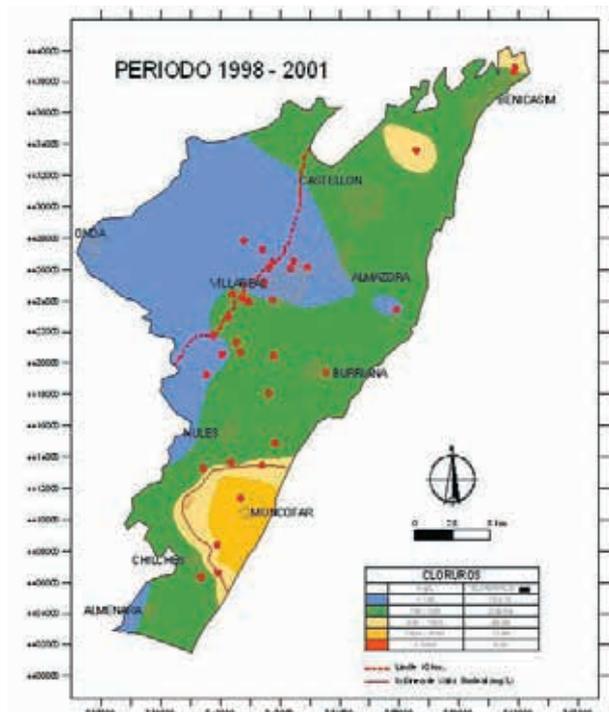


Figura 3. Mapa de isocloruros de valores medios del periodo 1998-2001 en la Plana de Castellón

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

Tabla 13. Resultados finales

Criterio	Plana de Vinaroz			Plana de Oropesa			Plana de Castellón		
	Índice	Valor	Código	Índice	Valor	Código	Índice	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)

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.

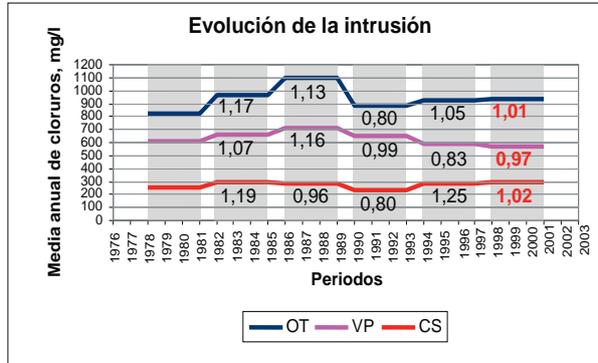


Figura 4. Valores del parámetro E en los tres acuíferos estudiados.

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

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, Cantábri-

co, 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, litostratigrafía 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 acepta-

ble. 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, con-

ductividad 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.

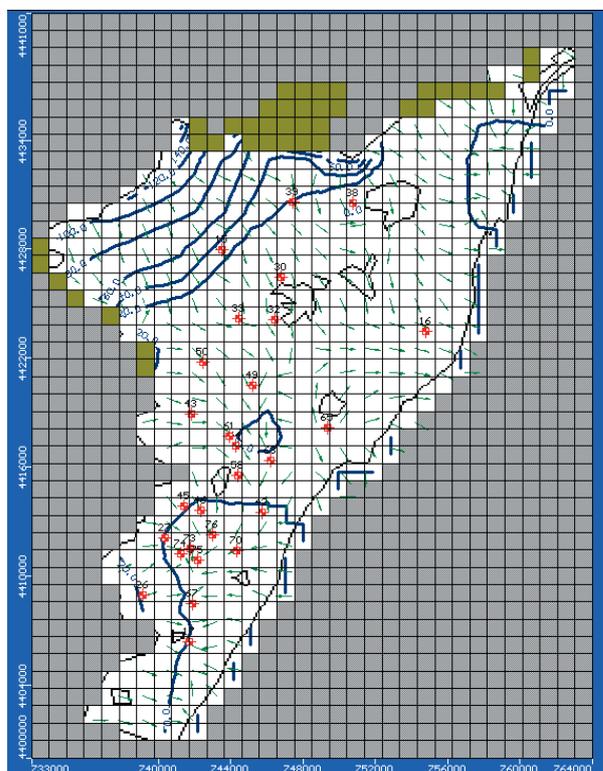


Figura 5. Plana de Castellón. Simulación del modelo en régimen estacionario

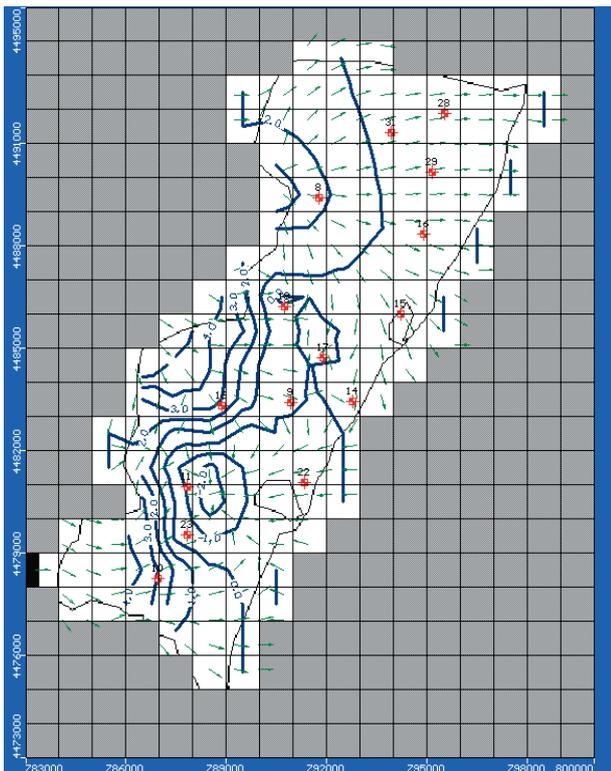


Figura 6. Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Vinaroz

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,

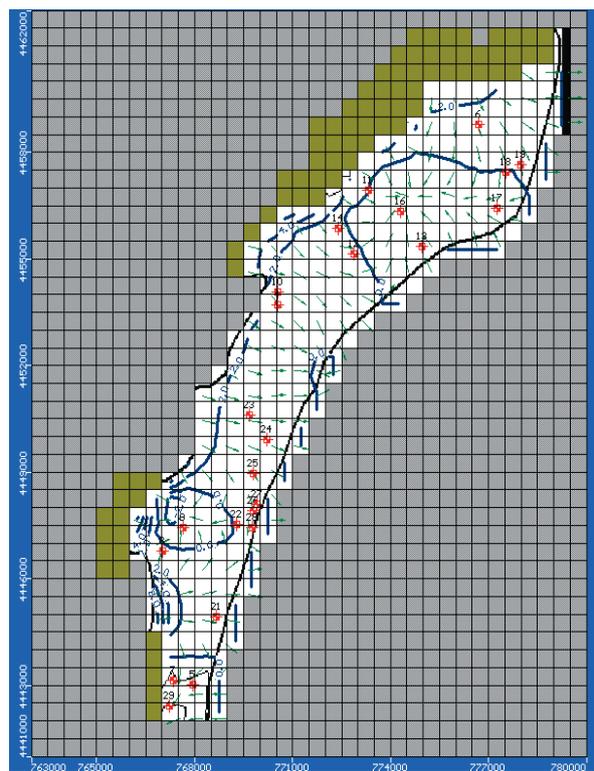


Figura 7. Simulación del modelo en régimen estacionario en la Plana de Oropesa

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 Jarraco 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).

Otras demarcaciones

Se han calculado también las descargas al mar de otras tres masas costeras correspondientes a las demarcaciones del Guadalquivir, Gadiana 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

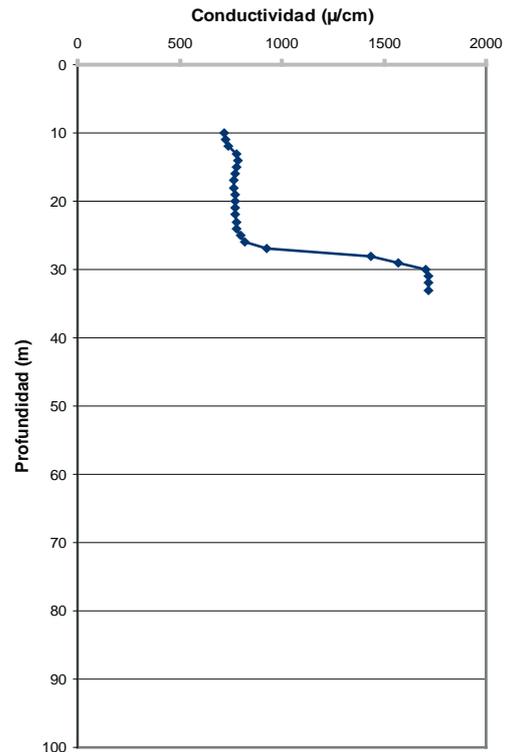


Figura 9. Perfil de conductividad en la masa de Villaviciosa (pto. 1403-6-0028)

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 afectación 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-NOREÑA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0005	VILLAVICIOSA		Sin intrusión	Antecedentes IGME, CHN	No	
ES016MSBT0007	LLANES-RIBADESELLA		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 VINAROSZ	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 intrusión 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-NOREDA	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 VINAROS	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 MASA ^b	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 (acuifero Plioceno)	1988-1989	0	Período de referencia para descargas ambientales
		CAMPO DE CARTAGENA (acuifero Cuaternario)	1988-1989	5	Período de referencia para descargas ambientales
	ES071MSBT0053	CABO ROIG	--	0.3	Balances previos y modelo matemático
	ES071MSBT0058	MAZARRÓN (acuifero Los Vaqueros)	1981/86 - 1993/97	0	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuifero Cabezo de Los Pájaros)	Anterior a 1995/96	0.1	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuifero Vértice Horno)	1988-actualidad	0.09	Período de referencia para descargas ambientales
		MAZARRÓN (acuifero La Azohía)	1988-2004	0.1	Período de referencia para descargas ambientales
	ES071MSBT0061	ÁGUILAS (acuifero Águilas-Cala Reona)	Finales años 90	1.73	Balance corregido para el período de referencia
ÁGUILAS (acuifero 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 Hidrológico 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. Cdrom.
- 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 M^a 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 m³ 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 deben 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 directamen-

te 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)

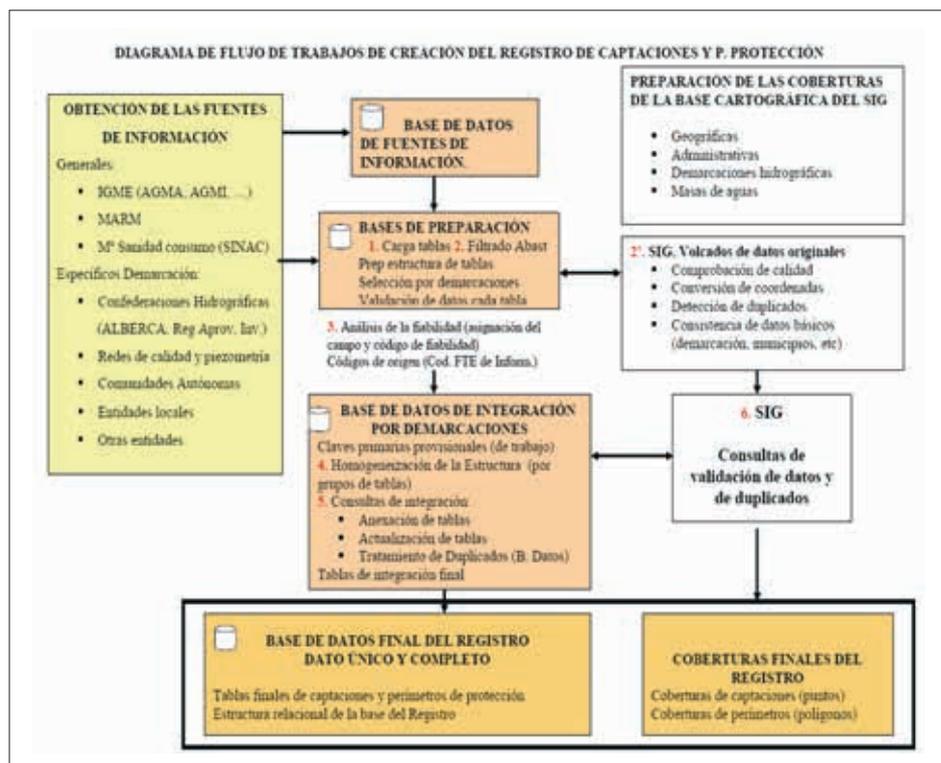


Figura 1. Diagrama de flujo de los trabajos de creación del registro de captaciones y perímetros de protección.

—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_perímetros". Así, hay cuatro tablas de captaciones integración_demarcación_principal, características, usos y titulares, que se relacionan con las tablas de perímetros datos_generales_perímetros y zonificación_perímetros, 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).

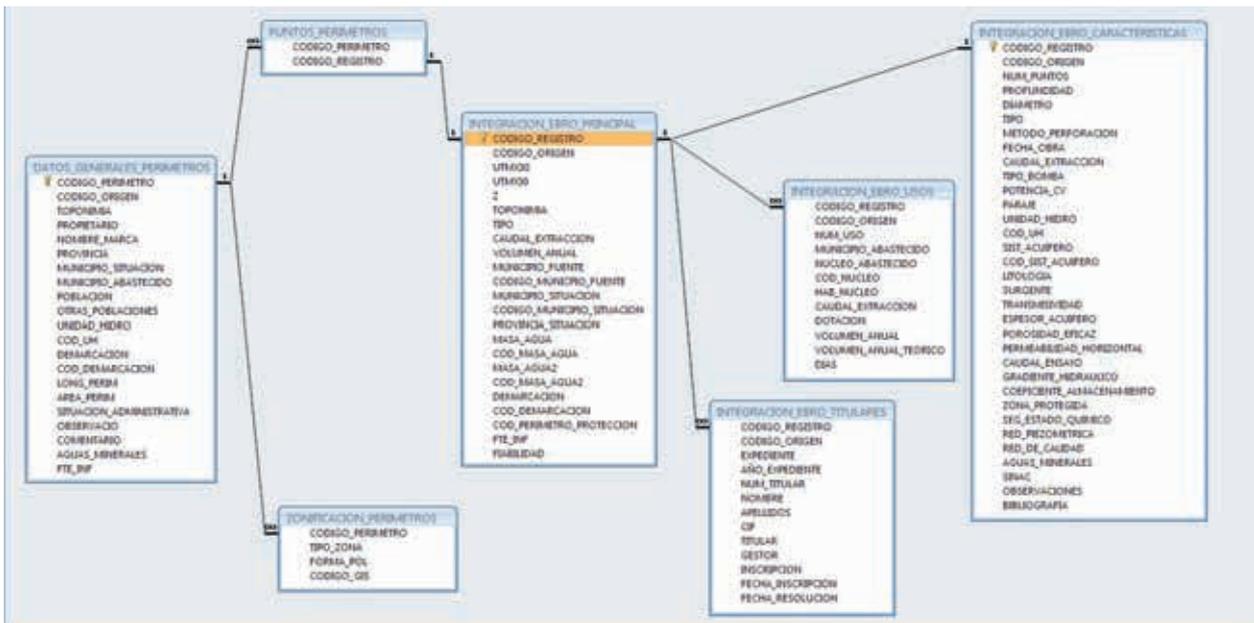


Figura 2: Estructura de tablas de las bases de datos finales

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 superficial 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; Dörfliker, 1996; Civita and De Maio, 1997; Goldscheider et al., 2000; Zwahlen, 2004; Vías et al., 2006a). Tras su análisis se ha considerado como los más 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 Concentration*), relativo a las condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan al acuífero,

—factor O (*Overlying layers*), que contempla las capas de protección del agua subterránea,
 —factor P (*Precipitation*), 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 países (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.

Piezometría: Información del MARM, Confederaciones hidrográficas e IGME, Mapa litoestratigráfico y de per-

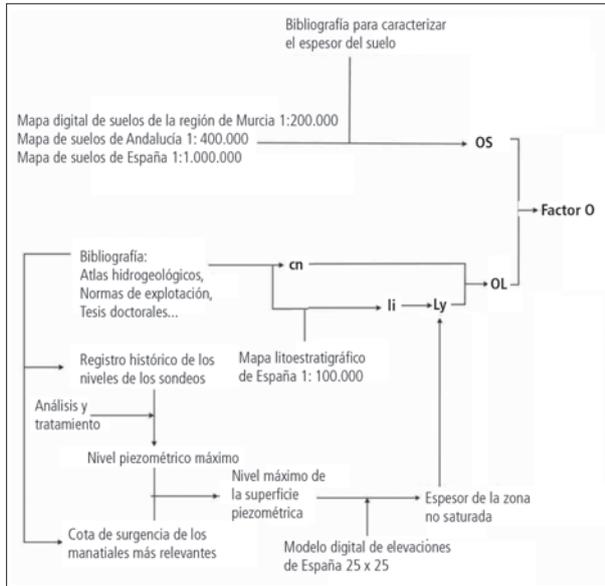


Figura 3. Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas para obtener el factor O del método COP.

meabilidad de España 1:200.000 (digitalizado) y Mapa geológico MAGNA (1:50000)

(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 ly	Valor de (ly)
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

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

Li= Σ (Ly.m) O_s= Li · cn
Variable O: Litología

Textura	Arcillosa	Limosa	Franca	Arenosa
Espeor > 1m	5	4	3	2
> 0,5 m y =1m	4	3	2	1
= 0,5 m	3	2	1	0

Factor O = O_s + O_t

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		Escenario 2: Áreas no vertientes a sumidero	
Rangos del parámetro d_i: distancia al arroyo vertiente	Valor de d_i	Rangos del parámetro d_i: distancia del sumidero	Valor de d_i
= 10	0	= 500 m	0
(10-100)	0,5	(500-1 000)	0,1
> 100	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
		> 5 000	1

Escenario 1: Áreas vertientes a sumidero		Escenario 2: Áreas no vertientes a sumidero			
Pendiente (s)	Vegetación (v)	= 8%	(8-31%)	(31-76%)	>76-31%
Presente	Presente	0,75	0,80	0,90	1
Ausente	Ausente	0,75	0,85	0,95	1

Escenario 2: Áreas no vertientes a sumidero		Capa superficial		
Geoformas	Capa superficial	Ausente	Permeable	Impermeable
Karst desarrollado presencia de dolinas, torcas, lapices, etc.	Ausente	0,25	0,5	0,75
Karst desarrollado o afloramiento superficial afectado por disolución	Ausente	0,5	0,75	1
Karst por fisuración	Ausente	0,75		
Ausencia formas karsticas	Ausente	1	1	1

Escenario 2: Áreas no vertientes a sumidero		Pendiente (s) / Vegetación (v)			
Pendiente (s)	Vegetación (v)	= 8%	(8-31%)	(31-76%)	>76-31%
Presente	Presente	1	0,95	0,85	0,75
Ausente	Ausente	1	0,90	0,80	0,75

Valor del factor C	Reducción 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

Factor C = $d_i \cdot d_j \cdot sv$

Factor C = $sl \cdot sv$

Factor C: Condiciones superficiales para la concentración de flujos de agua que recargan el acuífero.

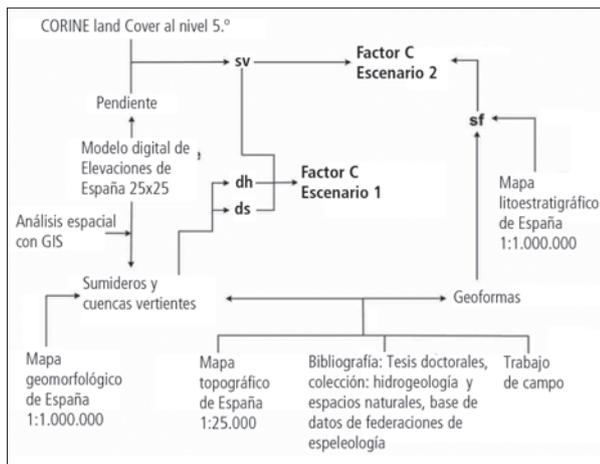


Figura 4. Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor C del método COP.

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

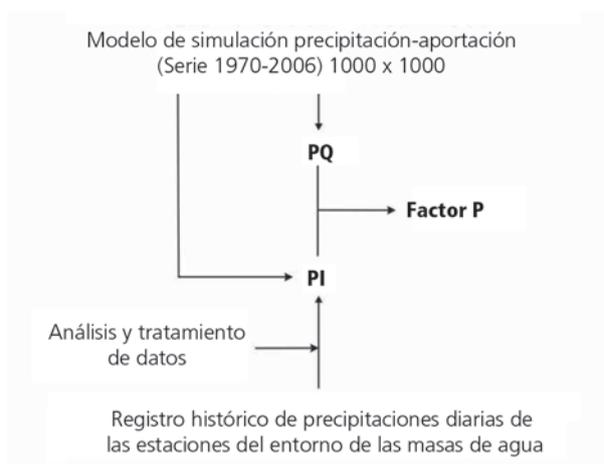


Figura 5 Procedimiento a seguir y fuentes de información empleadas en este estudio para obtener el factor P del método COP.

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

Intervalos de precipitación (mm)	Valo P _o
> 1600	0,4
(1 200-1600)	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

P₁ = Precipitación media anual, número de días con lluvia
 Factor = P_o + P₁ **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.

Intervalos 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 km²); 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 (*Depth groundwater*);
- recarga del acuífero (*net Recharge*)
- material de la zona saturada (*media Aquifer*)
- tipo de suelo (*Soil media*)
- pendiente (*Topography*)
- material de la zona no saturada (*Impact of the vadose zone media*)
- conductividad hidráulica del acuífero (*hydraulic Conductivity 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 su-

periores 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:	2
Franco-arcillosa	3
Franco-limosa	4
Franco	5
Franco-arenosa	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	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. Metamórficas/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	Descripción	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 alternancias 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	3
23-30	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).

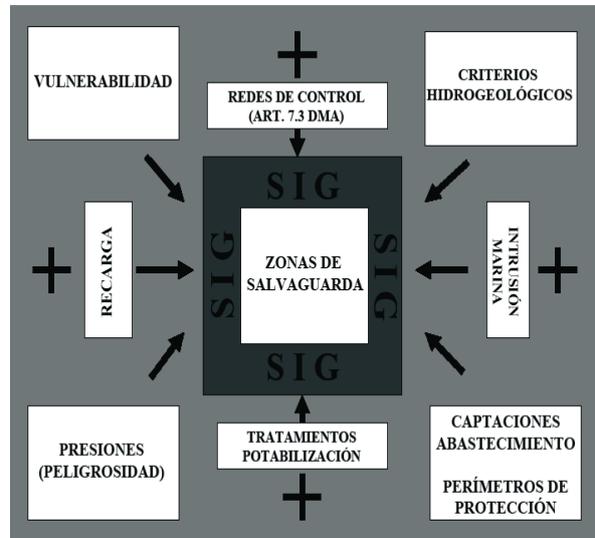


Figura 6. Marco conceptual para la delimitación de zonas de salvaguarda

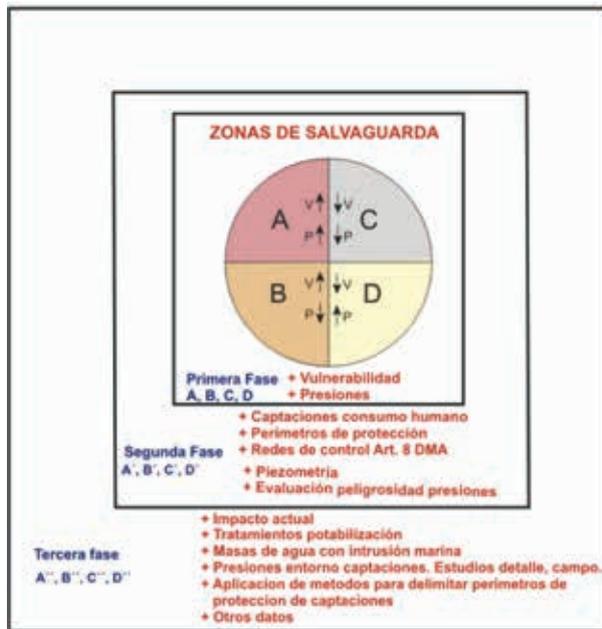
FASES DEL ESTUDIO

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



- A = Zona de salvaguarda con restricciones fuertes
- B = Zona de salvaguarda de prevención a futuro
- C = Sin zona de salvaguarda
- D = Zona de salvaguarda con restricciones moderadas
- V↑ Vulnerabilidad elevada
- P↑ Presiones significativas
- V↓ Vulnerabilidad reducida
- P↓ Presiones no 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).

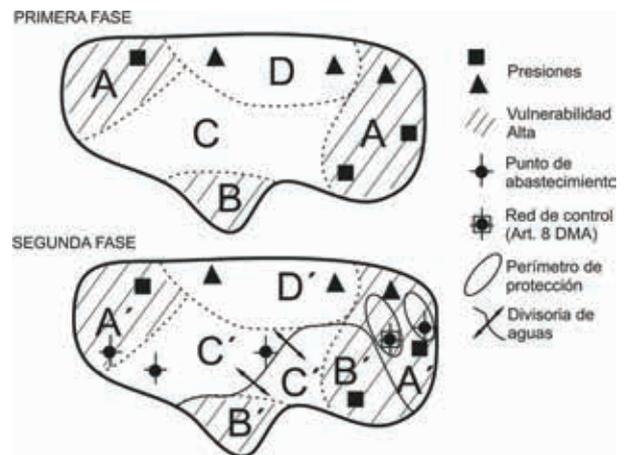


Figura 8. Ejemplos de delimitación de zonas de salvaguarda (Primera y segunda fase)

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.

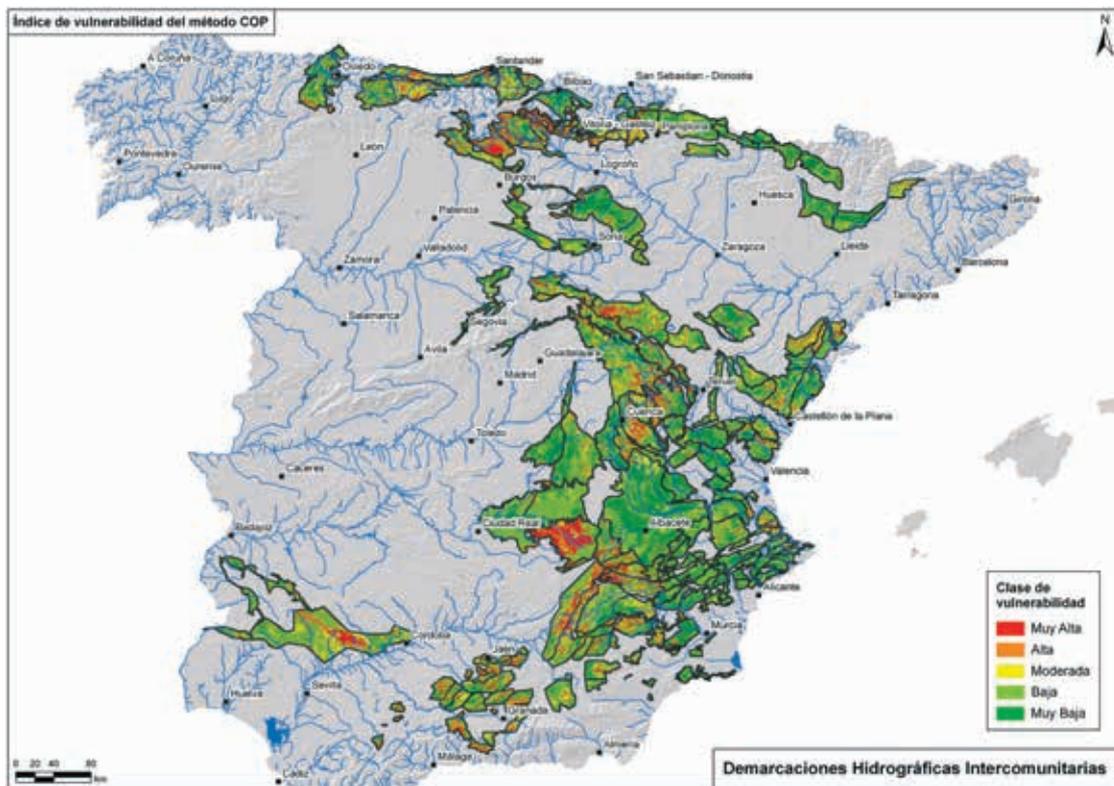


Figura 9: Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea carbonatadas empleando el método COP en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

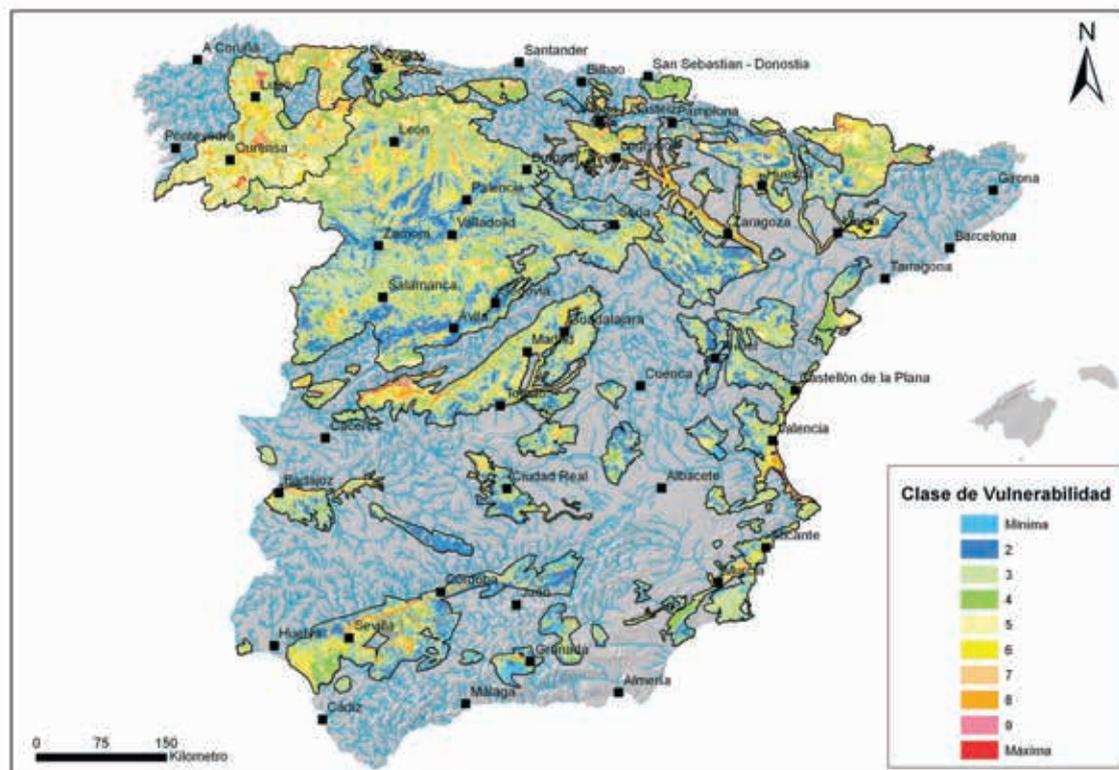


Figura 10: Vulnerabilidad de las masas de agua subterráneas detríticas y mixtas aplicando el método DRASTIC Reducido en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

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.

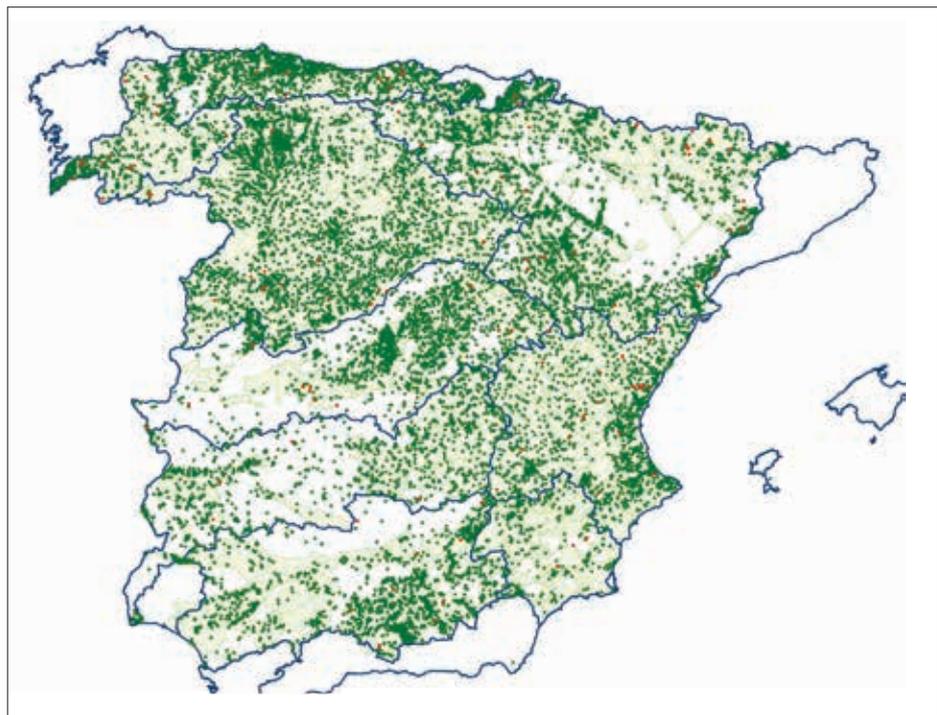


Figura 11. Distribución espacial de captaciones de abastecimiento en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

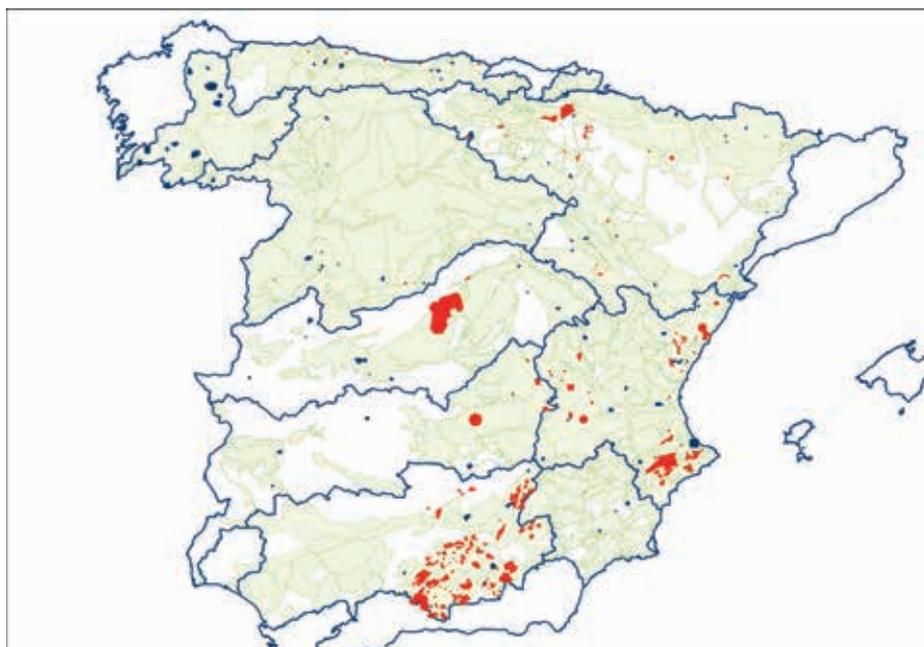


Figura 12. Distribución espacial de perímetros de protección de captaciones en las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias de España.

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')

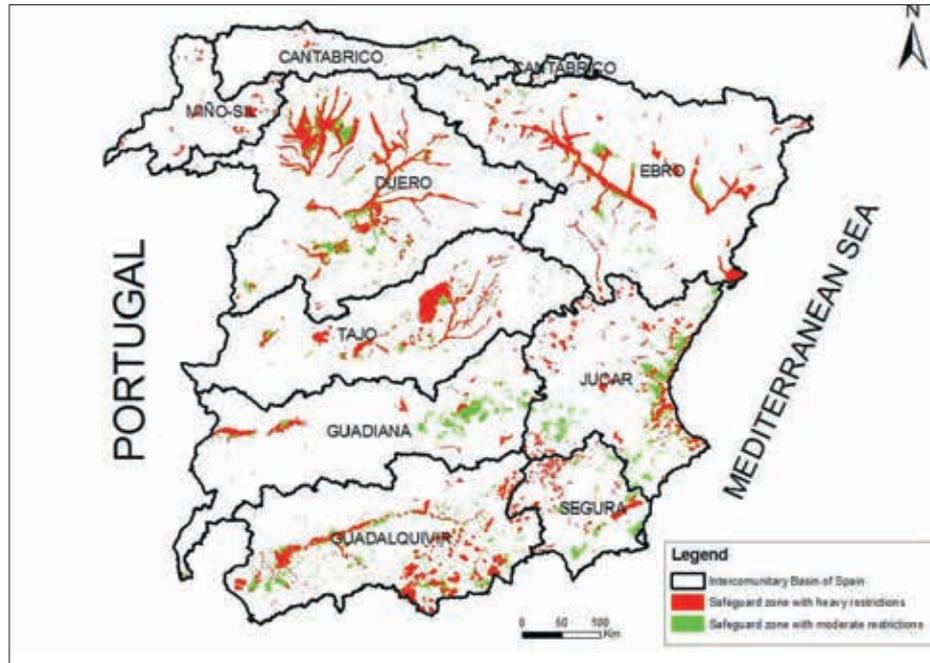
Los resultados obtenidos permiten focalizar las medidas de protección haciendo compatible la salvaguarda de la calidad del agua subterránea destinada al consumo humano con la actividad socioeconómica. Cabe indicar que las demarcaciones del Duero y Guadalquivir son las que tienen mayor extensión de su 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 muchos 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..
- Doerflinger, 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 Hötzl, 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 France.

- I : W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Editors), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, 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 Bauschlottter 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 período 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 período 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.

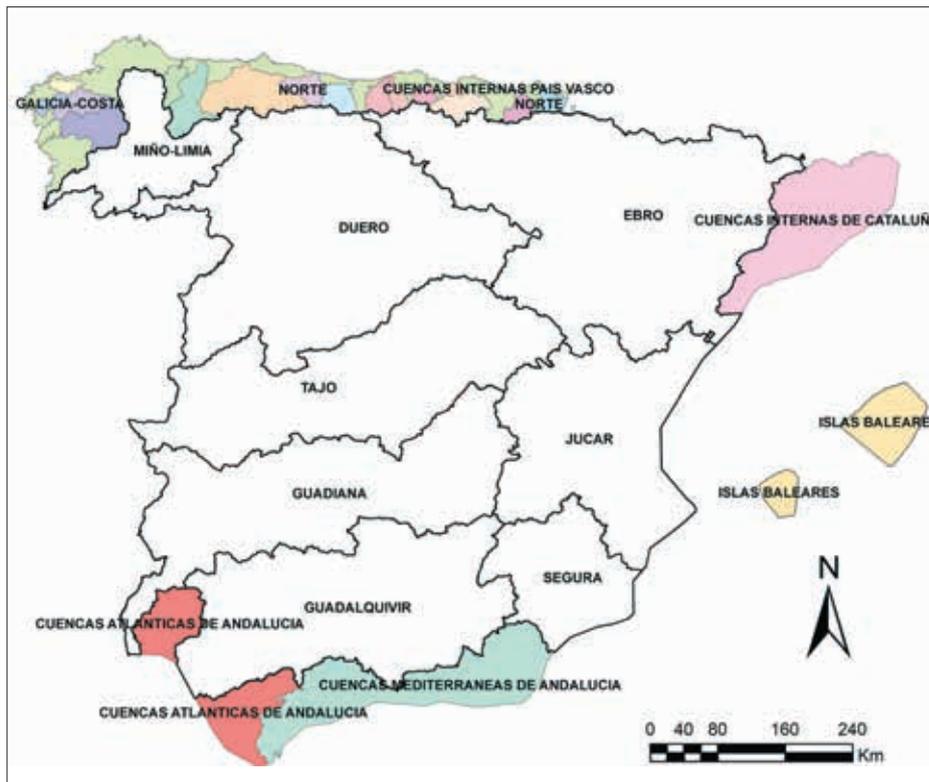


Figura 1. Cuencas analizadas en color blanco.

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 presenten 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 poner 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:

$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots$, 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.

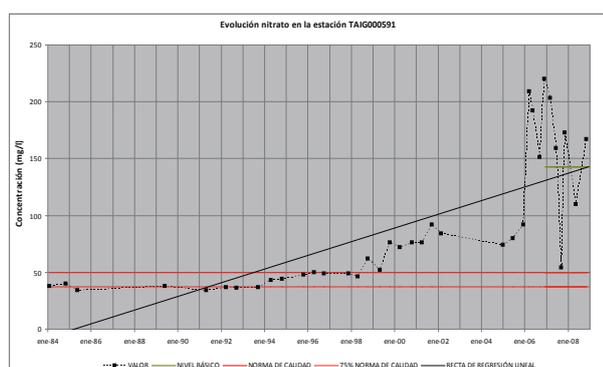


Figura 2. Gráfico de evolución del ión nitrato y su ajuste a una regresión lineal en la hoja de cálculo Excel.

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.

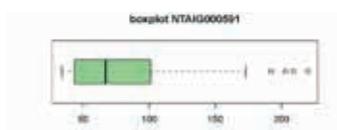


Figura 3. Gráfico de caja.

- 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

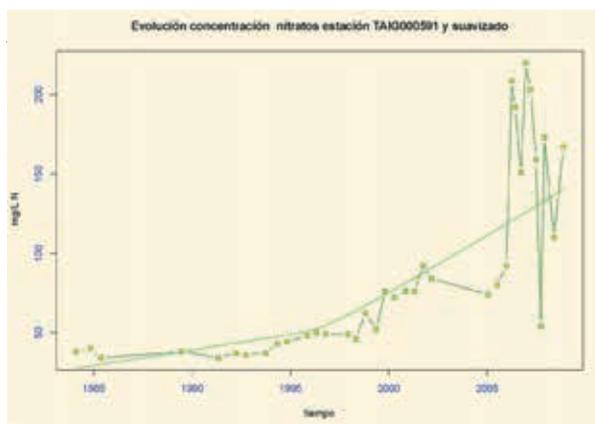


Figura 4. Gráfico resultante de aplicar una técnica de suavizado.

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 concentración					
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
23-09-1993	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 período de referencia muestra simetría e inexistencia de valores anómalos (outliers), lo que podría indicar normalidad aproximada.

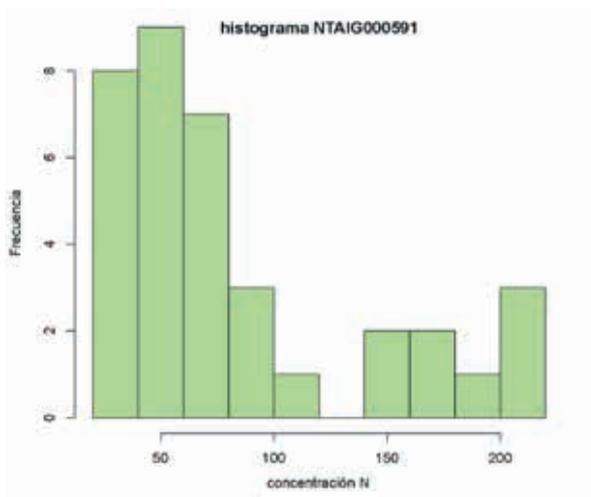


Figura 5. Histograma de los datos empleados.

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.

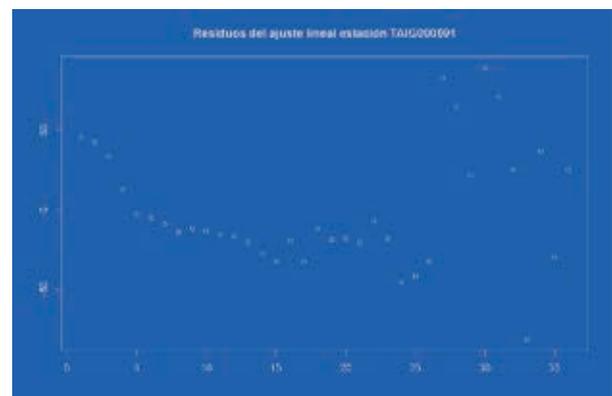


Figura 6. Residuos.

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.

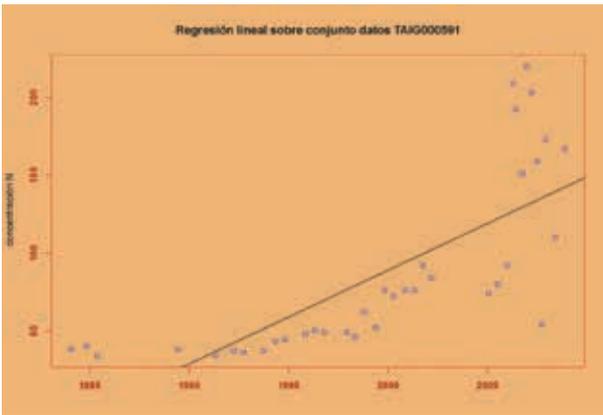


Figura 7. Ajuste del modelo lineal al periodo de referencia.

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.

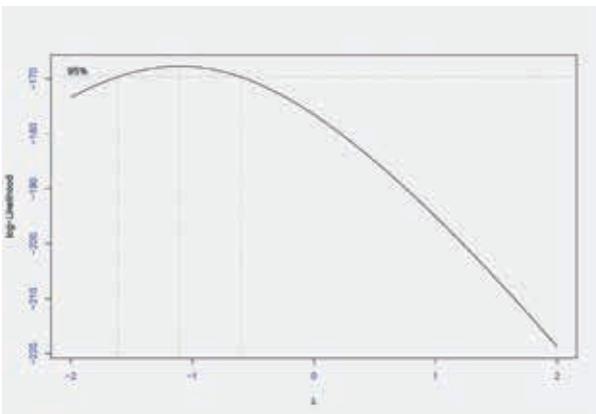


Figura 8. Transformación de Box-Cox.

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).

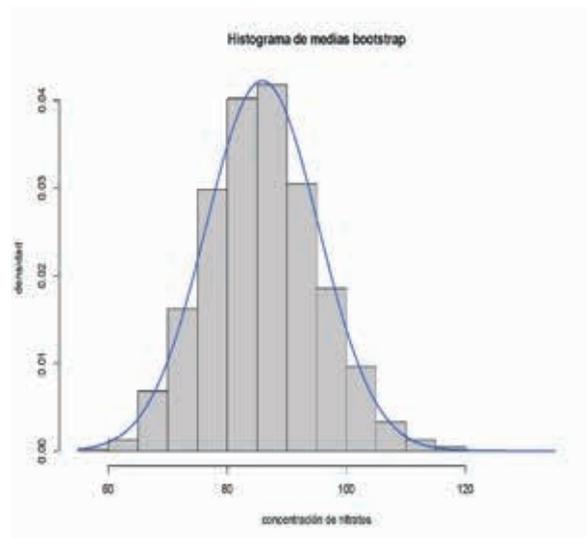


Figura 9. Histograma resultante de la transformación.

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).

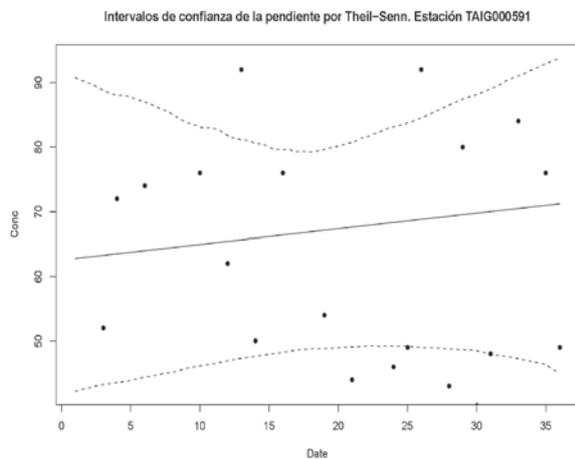


Figura 10. Resultados obtenidos con el método de Theil-Sen.

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

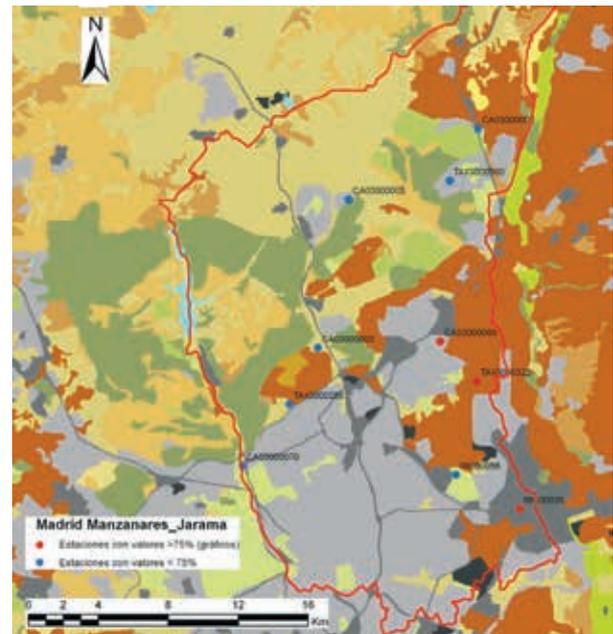


Figura 11. Se muestra un ejemplo con una masa de agua. La leyenda corresponde a la cobertura de Corine.

179	Zonas sumidero
621	Tierras de labor en secano
622	Médice en secano
643	Arrozales
647	Linderos y márgenes en tierras húmedas
654	Montaños esclerófilos mediterráneos
662	Pantanos con poco o ningún vegetación
665	Oliveros en secano
673	Sarcedales subalpinos; affagelietes rocosas
681	Oliveros en regadío
682	Médice en regadío
686	Prados en secano
692	Prados en regadío
693	Cebos herbáceos en regadío
698	Prados
699	Zonas verdes, campos de golf, instalaciones deportivas
802	Montaños de prados con espacios de vegetación natural
803	Bosques mixtos coníferos, caducifolios y mixtos
804	Bosques mixtos coníferos, caducifolios y mixtos
805	Zonas estacionales húmedas, exuberantes y melíferas
806	Zonas industriales, almacenes, aeropuertos
807	Tierras urbanas con usos urbanísticos

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

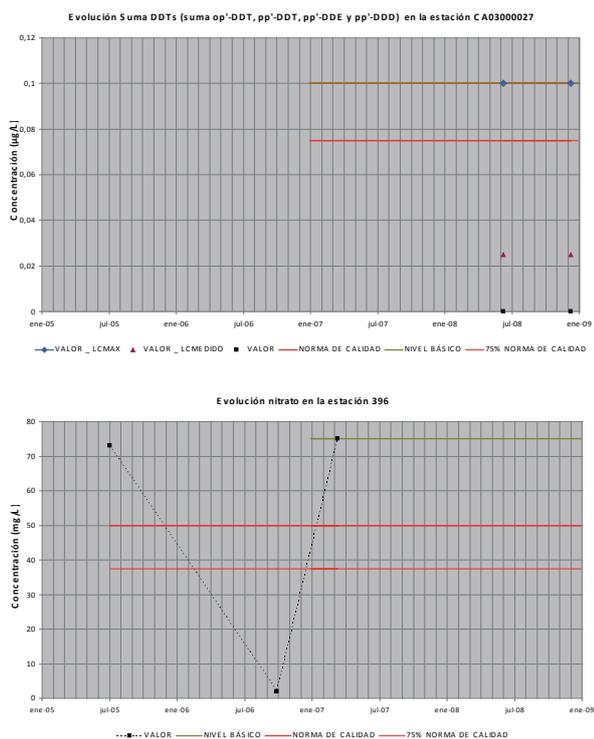


Figura 12. Ejemplo de gráfico tipo para el conjunto de la Demarcaciones donde en la mayoría de las estaciones se dispone de poca información.

dudas sobre la fiabilidad de un ajuste lineal sin ningún tipo de análisis previo y posterior de la información (figura 13).

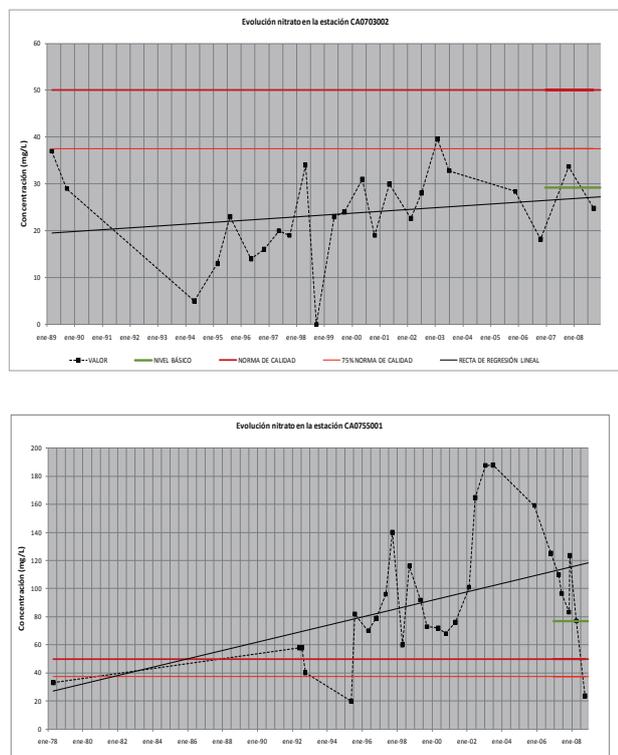


Figura 13. Ejemplo de ajuste lineal de tendencia en la hoja de cálculo Excel. El gráfico de la derecha muestra un falso positivo.

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

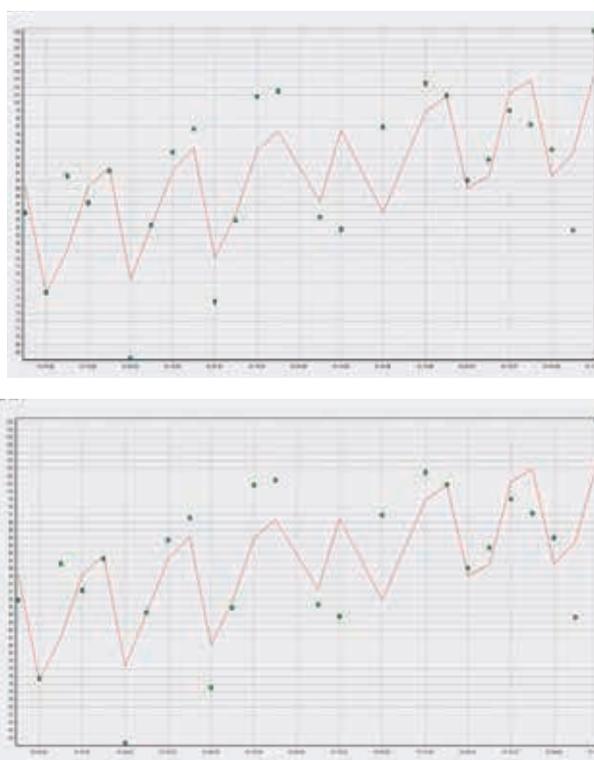


Figura 14. Izquierda: comportamiento estacional detectado y tendencia creciente según el método de Mann-Kendal. Derecha: inversión de tendencia en la misma estación.

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

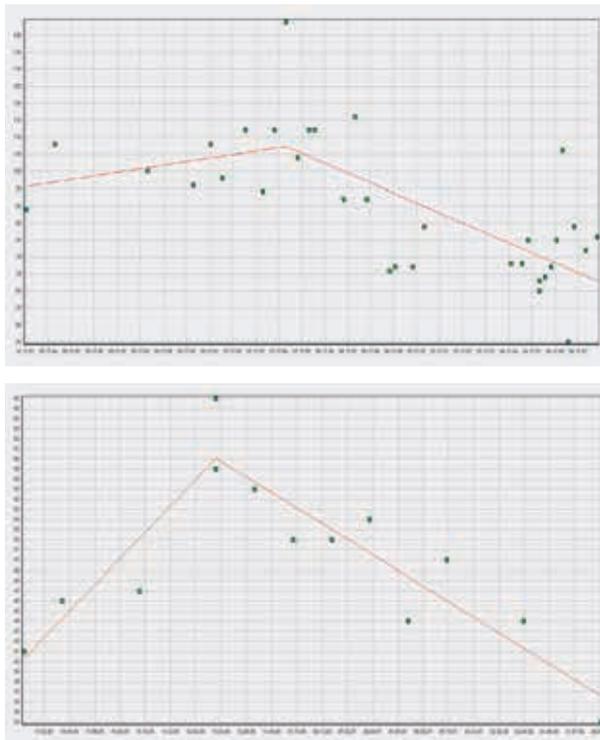


Figura 15. Ejemplo de determinación de inversión de tendencia mediante el programa GWStat.

sucedir 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

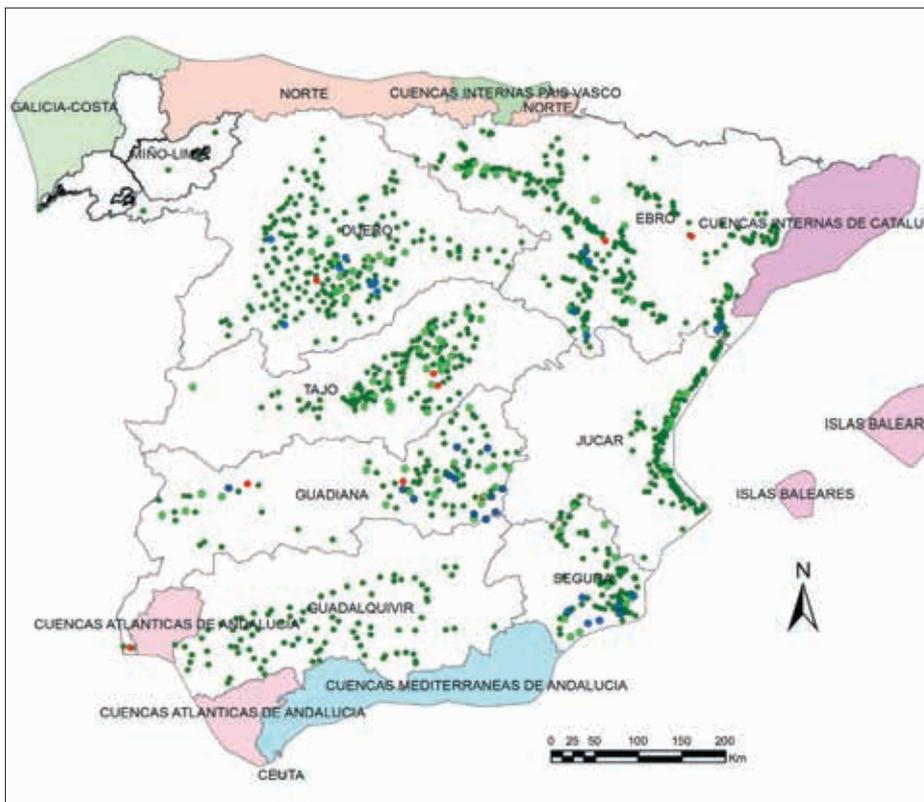


Figura 16. Los puntos de color naranja indican mala calidad en el periodo de referencia (2007-2008).

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.

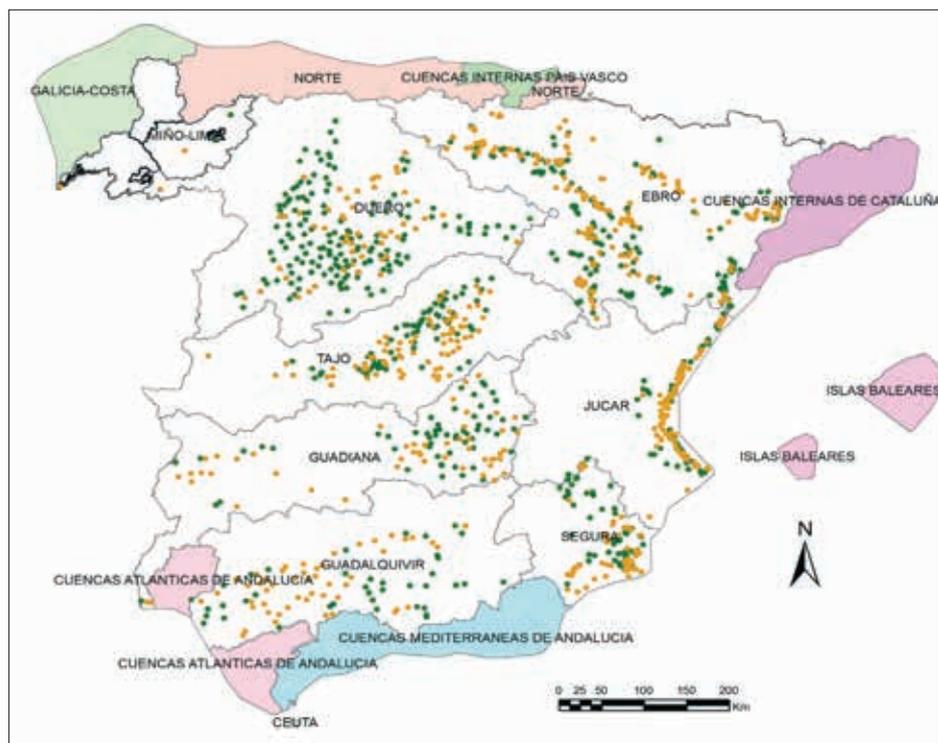
La densidad espacial de la información es en general insuficiente y en muchos casos se debería plantear un estudio que permitiera determinar si son necesarias nuevas estaciones de control y dónde para poder llevar a cabo un análisis del comportamiento espacial de las variables más fiable.

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 determinación 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 Implementation 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. {IS-BN} 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

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 indi-

cador 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).

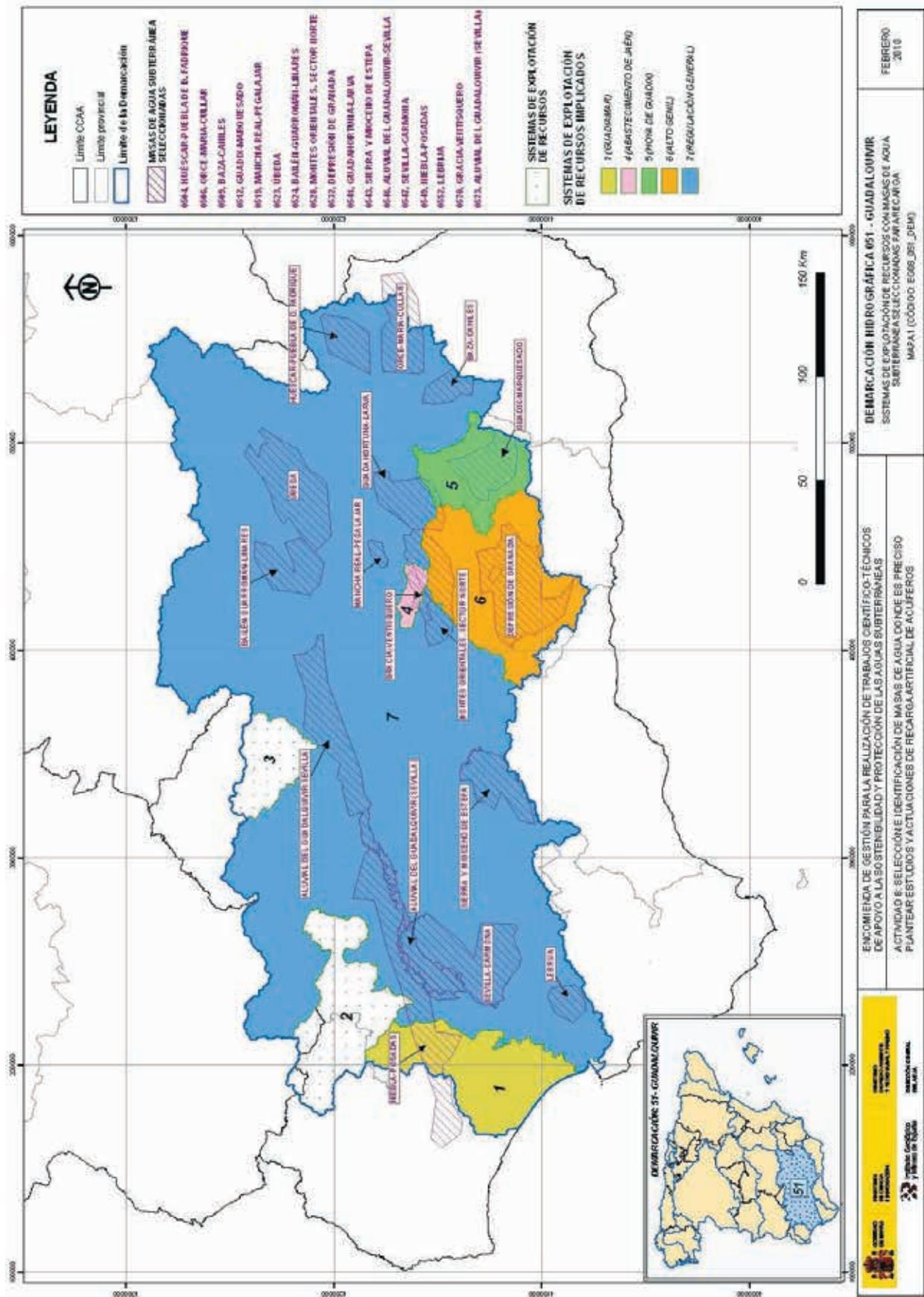


Figura 1. MAPA 1: mapa que precede al catálogo de actuaciones de recarga y que muestra la distribución de los SER y las MASb implicadas

Balace del SER: Déficit (D) Excedentes (E) En equilibrio Desconocido
 hm³/año: hm³/año:

¿Existen recursos naturales disponibles? Si 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**

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	3,4	4,4	4,4	7,3

Infraestructura de almacenamiento: Embalses del SER

Nombre del embalse	Capacidad (hm ³)	Ref. estación aforo	Periodo medida	Volumen regulado		Aportación hídrica natural (hm ³ /año)	
				medio	mínima	máxima	mínima
Quintar	14	5038	1976-2006	20,5	57,4	20,5	4,7
Ciniales	70	5048	1988-2006	59,3	127,4	59,3	19,6
Cubillas	19	5050	1954-2006	49	169	49	6,3
Colmenera	42	5050	1990-2006	21,6	94,3	21,6	0,6
Bermehales	103	5021	1954-2006	49,1	126,4	49,1	18

Depuración

EDAR total del SER: 20	Nº según tipo de tratamiento		Volumen depurado (V.) (m ³ /año)	¿Existe reutilización? (m ³ /año)	Volumen reutilizado (V.) (m ³ /año)
	1	5			
	1	Sin datos	-	S.I. 1 referencia	
	5	Sin especificar	5.280.400	S.I. 2 referencias	
	14	Secundario	60.096.777	S.I. 3 referencias	

ETAP total del SER: del orden de **65** hm³/año

Disponibilidad hídrica estimada: del orden de **65** hm³/año

¿Existen recursos depurados disponibles? Si 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 (m³/año):
 T.M.: del municipio:

Disponibilidad hídrica estimada (m³/año):

¿Existen recursos desalados disponibles? Si No A estudiar Sin datos Condicionado
 Comentario:

TOTAL RECURSOS HÍDRICOS POTENCIALMENTE DISPONIBLES EN EL SER: (Naturales + Depurados + Desalados)
 Comentario:

SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA DONDE ES PRECISO PLANTEAR ESTUDIOS Y ACTUACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFERO

INSTITUTO GEOGRÁFICO Y MINERO DE ESPAÑA DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS 05.S6 ALTO GENIL

POBLACIÓN DEPENDIENTE DEL SER: **71** (Inf. Ad. 1)
 Nº de Municipios: **597.592**

ANGALUCÍA Granada

PLANO DE SITUACIÓN DEL SER

MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA IMPLICADAS - 05.28 Montas Orientales, Sector Norte - 05.32 Depósito de Granada

DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN EL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DE RECURSOS

ORIGEN DEL AGUA	Recursos hídricos naturales	Depuración	Desalación
Recursos hídricos naturales (hm³/año)	206,5		
Aportación natural media anual del SER (1,2):	206,5 hm ³ /año	238 hm ³ /año	4,9 hm ³ /año
Recursos regulados superficiales:			
Recursos hídricos subterráneos regulados (bombas):			
Total recursos regulados:			
Fuente de los datos:			

Figura 2. Ficha-Modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Primera parte: datos del SER

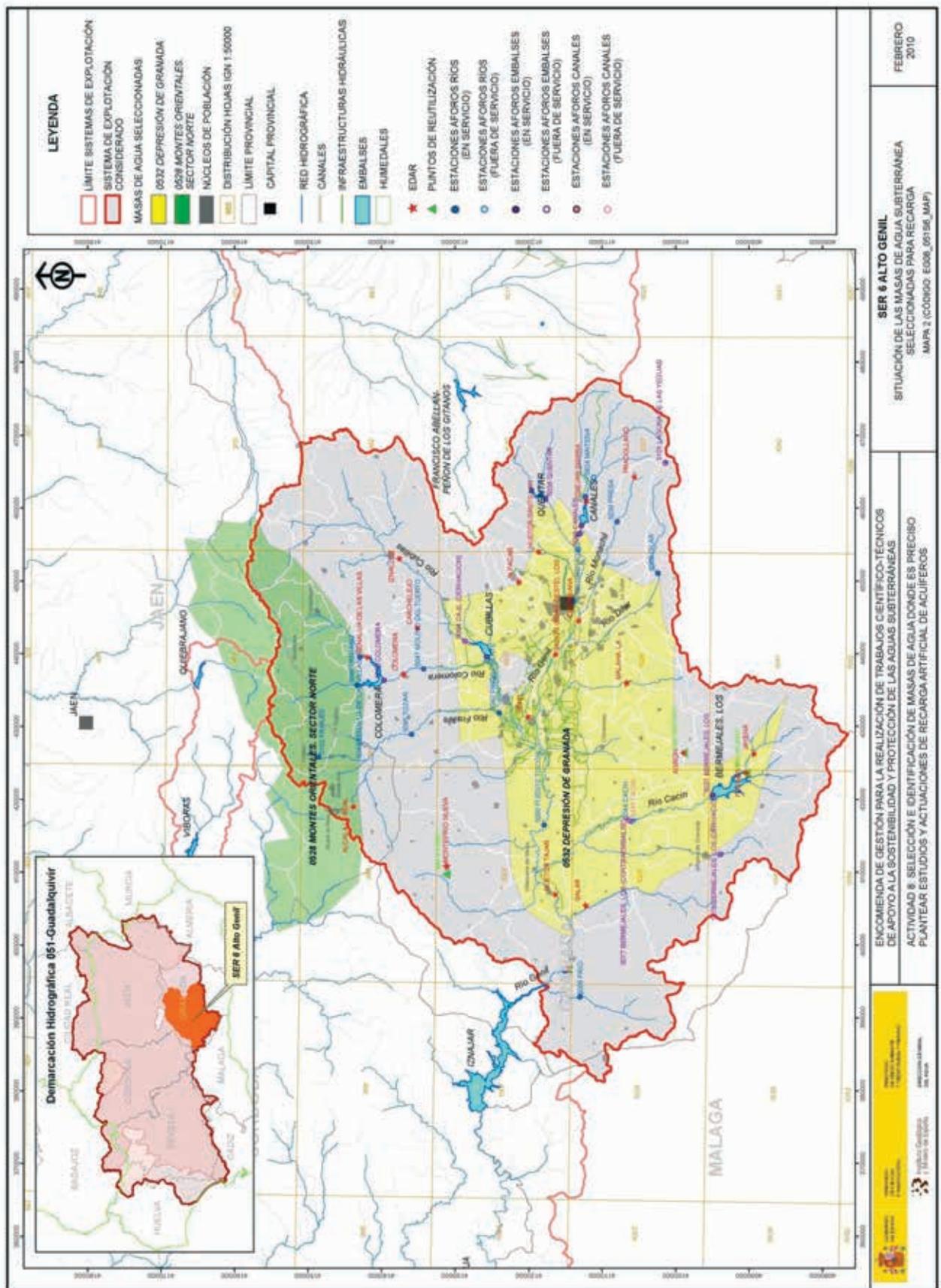


Figura 3. MAPA 2: Mapa del SER

ACUÍFERO RECEPTOR			
Tipo de acuífero		Litologías	
Detritico <input type="checkbox"/> Libre <input type="checkbox"/> Carga <input type="checkbox"/> Semiconfinado	<input type="checkbox"/> Carbonatado <input type="checkbox"/> Libre <input type="checkbox"/> Carga <input type="checkbox"/> Semiconfinado	<input checked="" type="checkbox"/> Mico <input checked="" type="checkbox"/> Libre <input type="checkbox"/> Carga <input type="checkbox"/> Semiconfinado	Litología: Calcareas Espesores: 36-97 m Columna litostratigráfica tipo: (Inf. Ad. 2)
Parámetros hidráulicos			
<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad • Permeabilidad o conductividad hidráulica (m/Día) • Transmisividad (m/Día) • Coeficiente almacenamiento • Superficie piezométrica (m s.a.m.): (Inf. Ad. 3) • Oculación estacional (m): • Espesor ZNIS (m) • Tiempo de residencia en el acuífero (días, mes o año) 	1.75	3.015	Alza: 10^1 a 10^2 2×10^0
Geometría			
2.200.02400.0			
Norte Sur Este Oeste	(1) c n c n	(2) bp n bp n bp	(3) (1) Límites: abierto (n), cerrado (c), semipermeable (sp) (2) Pugas: entradas (e), nulo (n), salidas (s) (3) Tipo de contacto: permeable (p), mecánico (m), boga permeabilidad (bp)
Observaciones: Dentro de la MASA se distinguen tres formaciones permeables con características de acuífero: las dolómitas y calizas del Lias inferior, las calizas tabulares, nodulosas y estriadas del Dogger-Malm y las calcarenitas miocenas, que constituyen el acuífero objeto de esta Ficha. Por tanto, las operaciones de recarga solo contemplan actuaciones en el acuífero de los Llanos de Alcalá la Real.			
Este acuífero se sitúa entre los núcleos de Alcalá la Real y Santa Ana, y está constituido por calcarenas, arenas y conglomerados miocenos. 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 sureste, sobre una formación margosa del Mioceno que constituye sus límites y sustrato impermeable. (Inf. Ad. 4)			
DISPONIBILIDAD HÍDRICA PARA RECARGA EN LA MASA			
ORIGEN DEL AGUA	Recursos hídricos naturales	Depuración	Desalación
	<input checked="" type="checkbox"/> Embalse 1: Río 3 <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Recursos hídricos naturales			
Nombre (código):	El Chaparral		
Surf. estación aforo:			
Capacidad embalse (hm)			
Aportación hídrica (A) (mm/año): - media (Z)			
± Caudal anual (Q) (m ³ /a)	- máxima - mínima		
Año o Periodo media:	Total Aportación natural media anual (A): Total Caudal medio anual (Q):		

SELECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA DONDE ES PRECISO PLANTEAR ESTUDIOS Y ACTUACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS		DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA	
Instituto Geológico y Minero de España	SISTEMA DE EVALUACIÓN DE RECURSOS 56 ALTO GERIL (57 REGULACIÓN GENERAL)	MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA 05.28 MONTES ORIENTALES SECTOR NORTE	
ÁMBITO GEOGRÁFICO DE LA MASA	Municipios: En Granada, Benalúa de las Villas, Campotejar, Colomera, Izaluz, Mondújar, Montejicar, En Jaén, Alcalá la Real, Cambil, Campillo de Arenas, Castillo de Lecubén, Frailes, Huétina, Cúchiles, Rosalga, Valdepeñas de Jaén.	Comarcas/Autoridades: ANDALUCÍA Jaén y Granada	
PLANO GEOLOGICO DE LA MASA			
La descripción litológica de la leyenda se adjunta en Información Adicional 0			
PROBLEMÁTICA/MOTIVOS DE SELECCIÓN: Existe una importante explotación intensiva del acuífero de los Llanos de Alcalá la Real, que 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 unas excedentes invernales, que podrían ser almacenados en el acuífero donde se propone la recarga.			
FINALIDAD DE LA RECARGA			
Mejora de la regulación y garantía de suministro	<input checked="" type="checkbox"/> Calidad	<input type="checkbox"/> Subexplotación	<input type="checkbox"/> Intrusión
Abastecimiento urbano	<input checked="" type="checkbox"/> Riego	<input type="checkbox"/>	
Mejora ecosistemas	<input type="checkbox"/> Nitratos	<input type="checkbox"/> Humedales	<input type="checkbox"/> Otras
Riberas	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Mejora sequía	<input type="checkbox"/>
ACUÍFEROS IMPLICADOS: Acuífero detritico mioceno de los Llanos de Alcalá la Real			

Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa.

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DEL AGUA

- Agua de recarga:** Sondeo El Chaparral (acuífero de Los Frailes - Bolesta)
 - Enfilmetrot: físico, químico y bacteriológico
 - Presión: una conductividad que supera los 1.000 µS/cm diferente a la del medio receptor y un contenido de sulfatos que supera en ocasiones los 250 mg/L.
- Agua del medio receptor:**
 - Enfilmetrot: físico, químico y bacteriológico (Inf. A6, S)
- Compatibilidad entre agua recarga en el medio receptor (prevista)**
 - Buena Regular Mala

SISTEMA DE RECARGA

TIPO DE RECARGA

Superficial

Barras Sondeos
 Inundación Pozos
 Zanjas Mixta:
 Canales Cauces ASR:
 Recreas Otros

Estudios previos de caudales

Proyecto para el establecimiento de las posibilidades de mejora del abastecimiento a Alcalá la Real mediante la realización de una experiencia de recarga artificial en el acuífero de Los Llanos y la realización de sondeos. ICGME, 2000

Estudios previos del acuífero

Otros estudios: Seguimiento de una experiencia de recarga artificial en el acuífero de Los Llanos de Alcalá la Real (Jaén) como mejora del abastecimiento urbano. ICGME, 1999

Planta de recarga

Infraestructuras de transporte

- Canal
- Azud
- Otros

Otros infraestructuras: Conducciones existentes

ESTUDIOS E INFRAESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS NECESARIAS

Análisis final de viabilidad del Proyecto de recarga (evaluación de superficies de infiltración necesarias (balas) y sondeos; compatibilidad calidad del agua e infraestructuras complementarias de transporte del caudal requerido.

VALORACIÓN GENERAL DE LA ACTUACIÓN DE RECARGA

En la operación de recarga que se propone en esta MAS ya existe infraestructura de transporte, tratamiento y de infiltración (mediante balsas). Las experiencias de recarga realizadas por el ICGME están hechas y contrastadas. Se adjunta un resumen de este trabajo (Inf. A, S). Documentado en el propio Boletín Geológico y Minero con la siguiente referencia bibliográfica "González-Ramón et al., 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de poblaciones. Experiencias en la provincia de Jaén, Boletín Geológico y Minero, 120 (2): 239-304. El abastecimiento de Alcalá la Real con unos 23.000 habitantes requiere, para dotarlo de una mejor garantía, de la realización de estas actuaciones.

Disponibilidad Nódica estimada (D_n):

Comentarios: El agua, que se podrá recargar en las calcaresitas, procederá de un sondeo del Ayuntamiento de Alcalá la Real del que se pueden derivar caudales de hasta 50 L/s

(2) Distribución media mensual: Q(m³/s)

	Dic	Nov	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Sondeo	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,05
Comentarios 1														
Tipo 1														
Comentarios														

Comentarios: Estas operaciones (indicadas en m³/h) permiten transferir recursos al acuífero de los Llanos de Alcalá la Real, que serán utilizados como un almacén temporal, aumentando la garantía de este sistema de abastecimiento.

Agua de depuradas (EDAR)

	EDAR 1	EDAR 2	EDAR 3	EDAR 4
Nombre (código):				EDAR 4
Municipio emisor(es):				
Población (hab):				
Tipo de tratamiento:				
Volumen depurado (V _d) (m ³ /año) (A):				
¿Existe reutilización?				
Referencia Certificación:				
Volumen reutilizado (V _r) (m ³ /año):				
Disponibilidad Nódica estimada (m ³ /año):				

¿Existen recursos desahogados disponibles? SI No estudiar sin datos condicionado

Comentarios: No se contemplan actuaciones de recarga artificial en la MASB con aguas depuradas por lo que los recursos potencialmente disponibles no se han evaluado.

(4) Distribución media mensual (m³)

	Dic	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Comentarios 1												
Disponibilidad estacional?	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	sin datos	<input type="checkbox"/>						
Comentarios:												

Agua de desahados

	Desahadora 1	Desahadora 2
Nombre (código):		
Origen del agua:		
Volumen desahado (V _d) (m ³ /año) (S):		
Disponibilidad Nódica estimada (m ³ /año):		
¿Existen recursos desahados disponibles? SI <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> estudiar <input type="checkbox"/> sin datos <input checked="" type="checkbox"/> condicionado <input type="checkbox"/>		
Comentarios:		

(5) Distribución media mensual (m³)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Comentarios 1												
Disponibilidad estacional?	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	sin datos	<input type="checkbox"/>						
Comentarios:												

Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa (continuación)

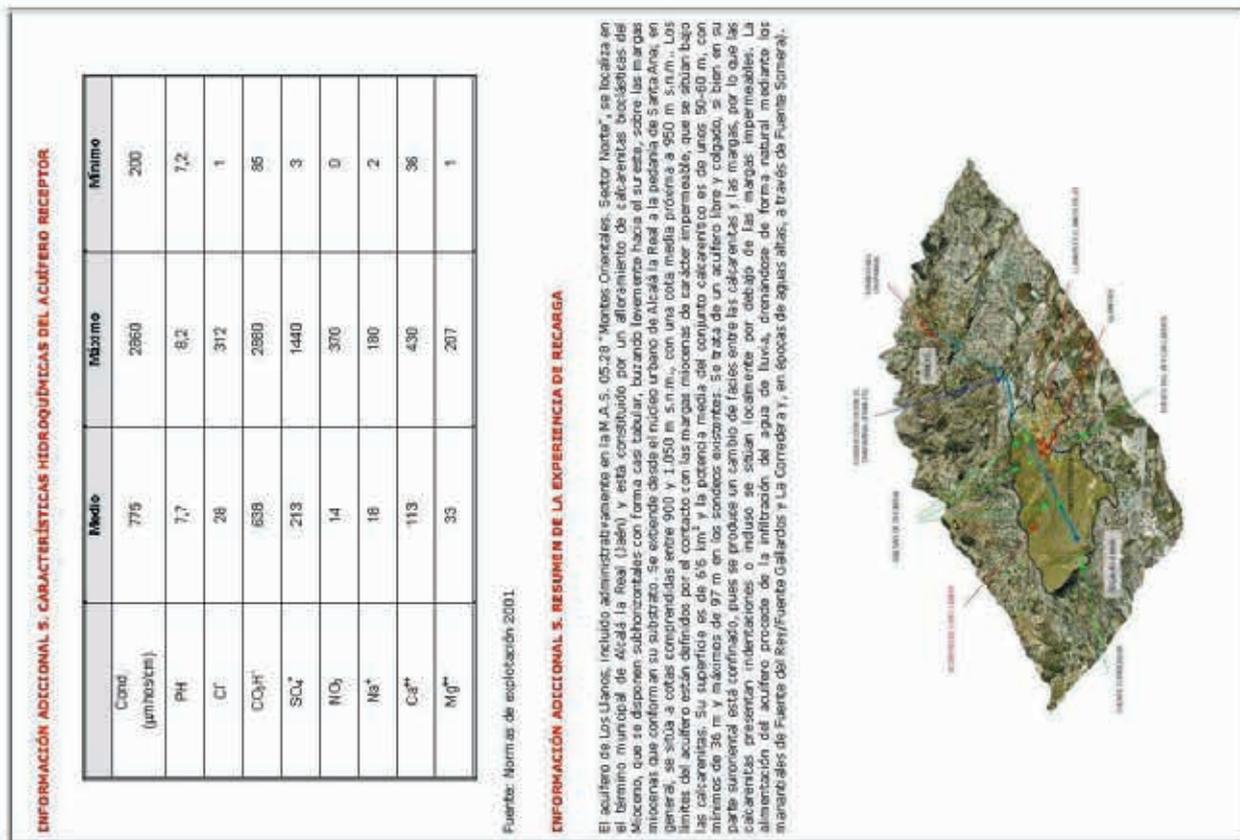
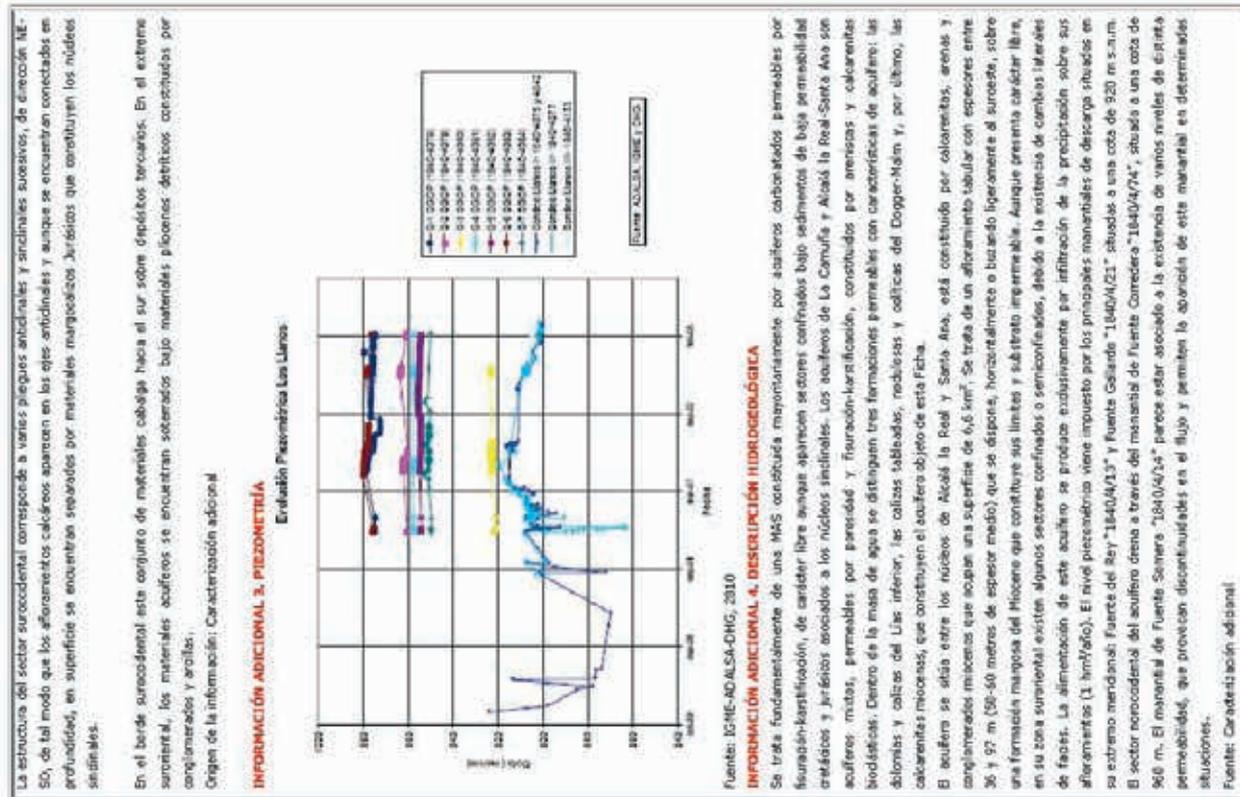


Figura 4. Ficha-modelo para la identificación y caracterización de actuaciones de recarga artificial. Segunda parte: Datos de la masa. Información adicional (continuación)

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_c 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

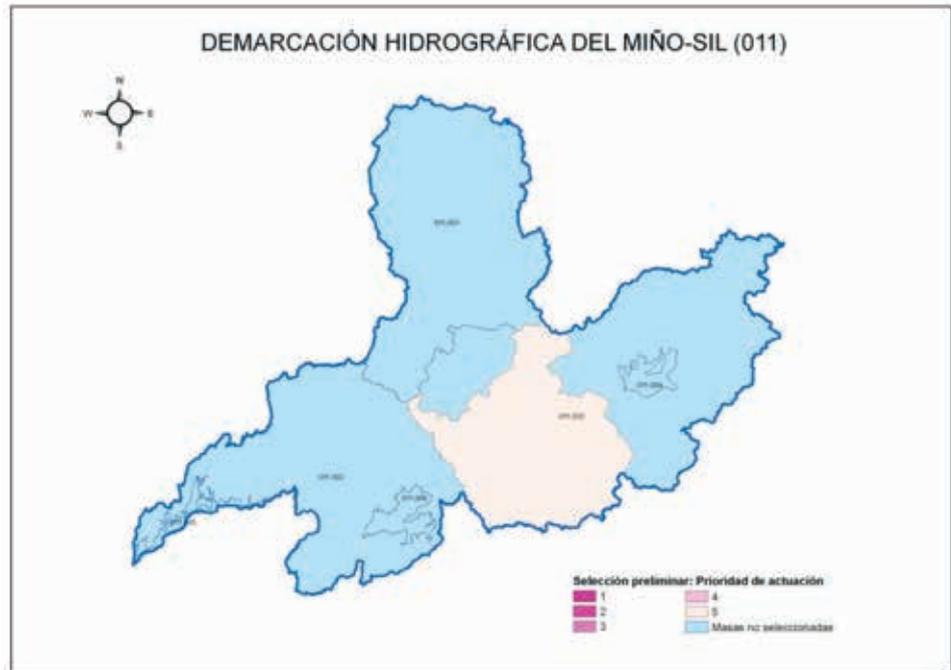


Figura 6. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico

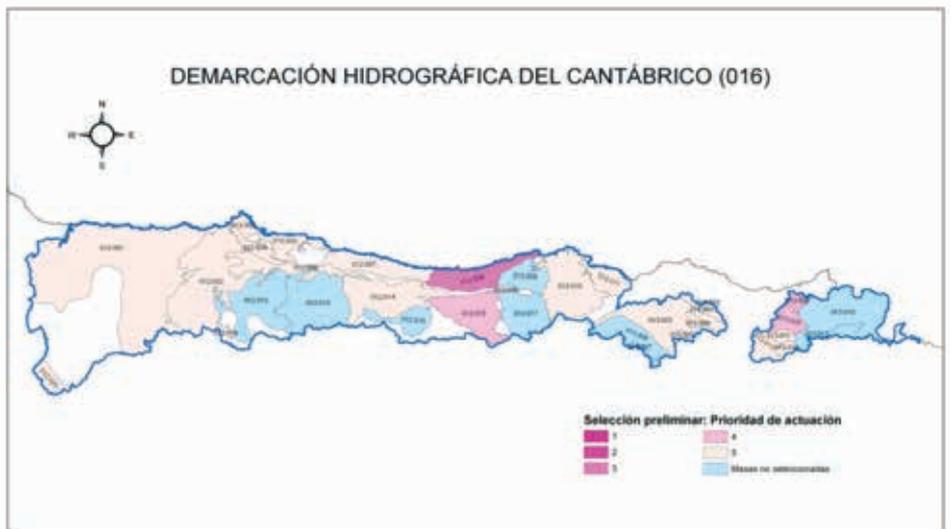
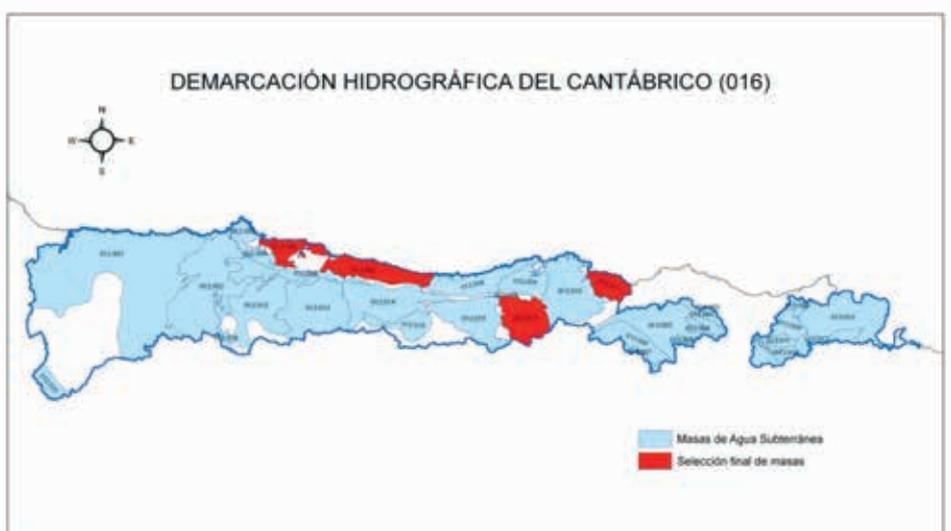


Figura 7. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico



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 disminuir 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 ur-

bano 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 Arriendas, 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 ARLANZAMASb 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 Hornazuela, 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 DUEROMASb 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 Pisuegra, 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 Cuéllar 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 Cuéllar 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 Camporendon 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 hm³/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 afluente 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 Arquillos*

Se propone evaluar los caudales invernales del río Salado y su calidad, en las proximidades del núcleo de Arquillos, 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.

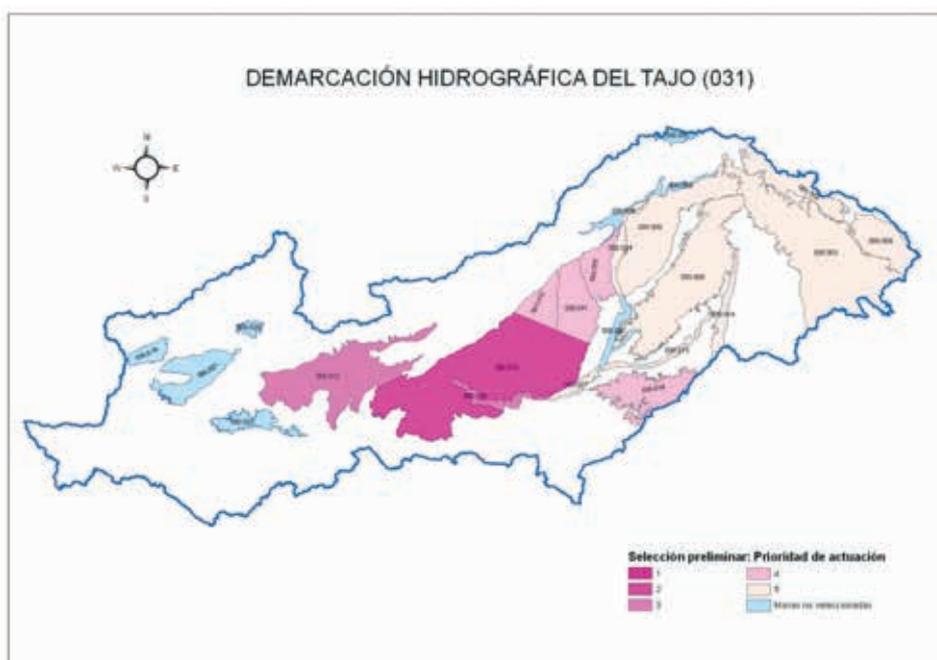
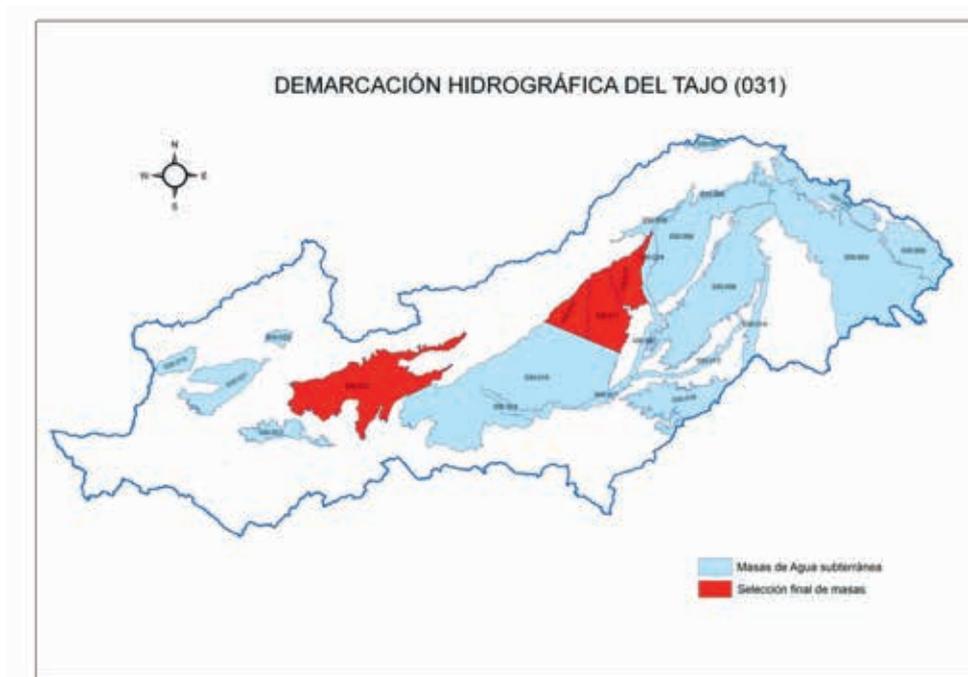


Figura 10. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Tajo

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 embal-

ses 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 Detritico 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 Detritico 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 hm³), 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 río Guadiana y sus afluentes*

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

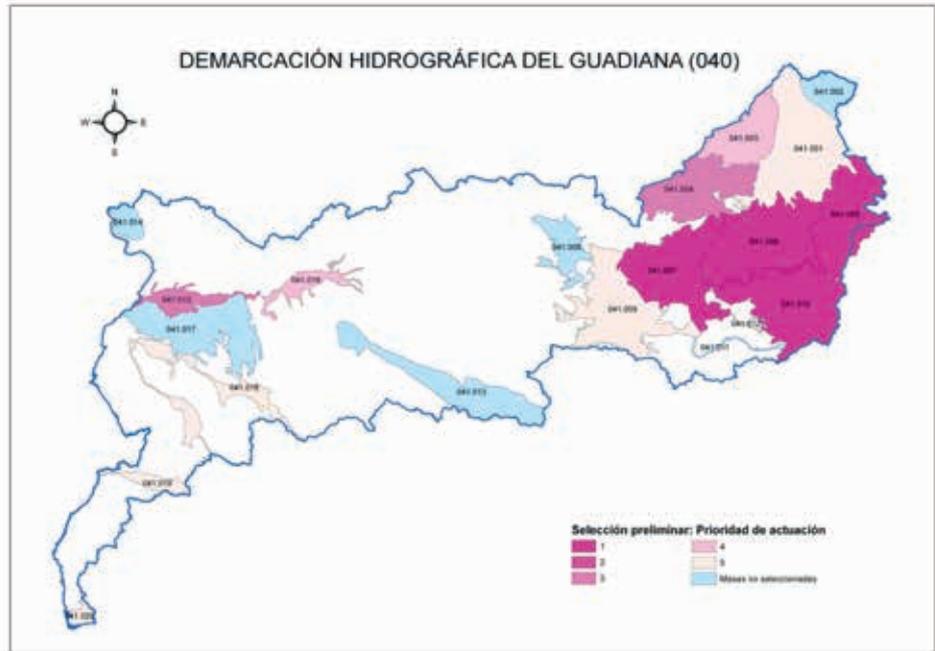
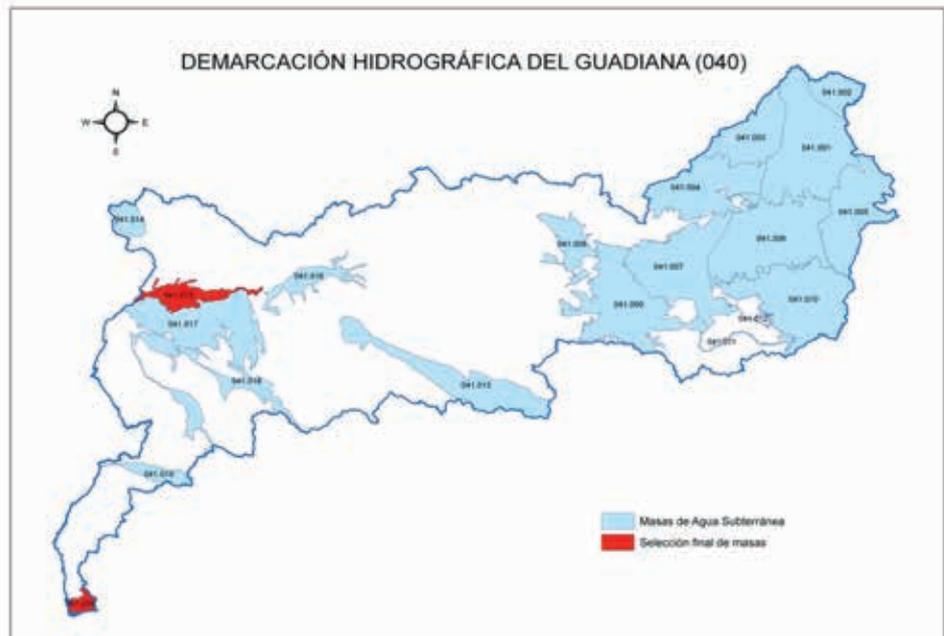


Figura 13. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana



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 SURMASb 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 Mencil, 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 GUADIAMARMASb 05.49 Niebla-Posada

Actuación: Recarga artificial desde el río o embalse Agrijo y desde el río Guadiamar sobre los afloramientos

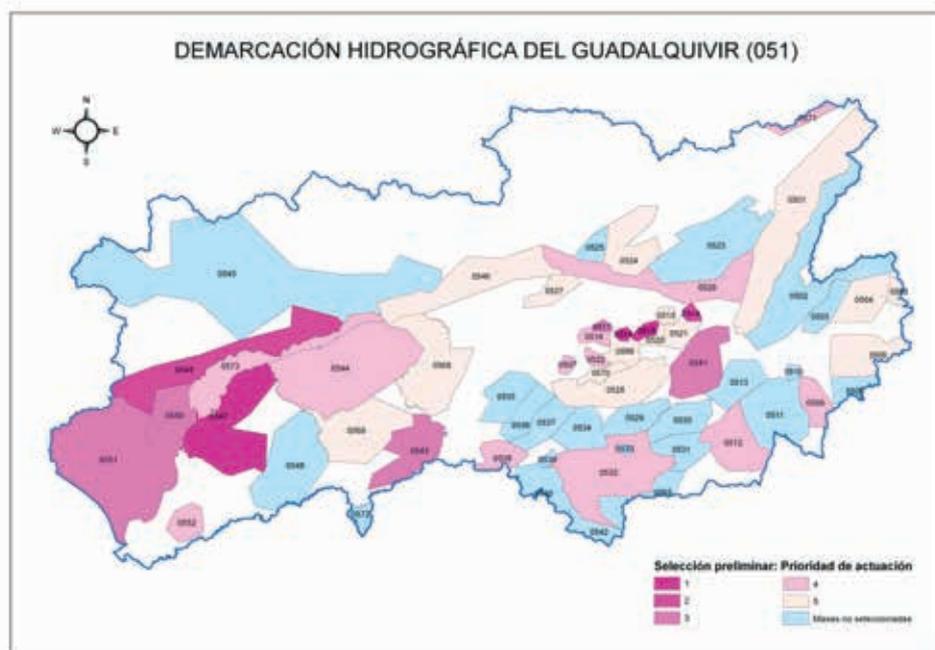
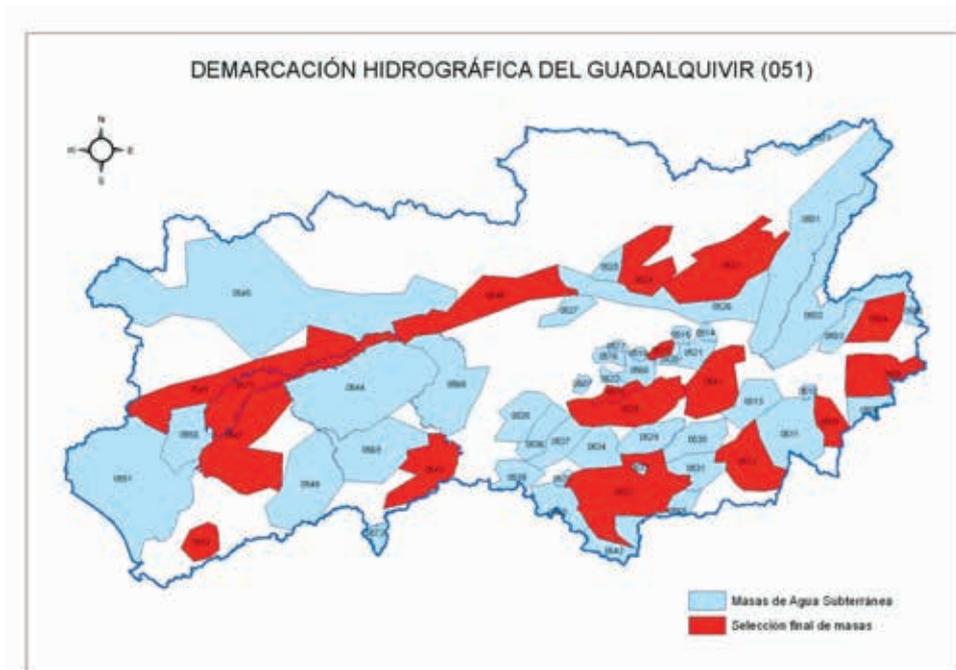


Figura 14. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir

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 extraer caudales del río Agrío a su

paso por los afloramientos de mioceno o, si la distancia es pequeña, derivar el agua desde la cerrada del embalse Agrío y hacerla llegar mediante una conducción directa a los afloramientos. Esta opción también resulta adecuada para el río Guadalquivir 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 hm³/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 hm³/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 hm³/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 superfi-

cial conjunta de los ríos Valcabra y Galopón. En proyectos previos la aportación mínima se evaluaba en 11 hm³/año, si bien las condiciones de los últimos años hacen que prudentemente se aconseje rebajar esta cifra a 3 hm³/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 hm³/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-Víboras*

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 hm³, 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 hm³/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 hm³/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 Rumbler*
La proximidad del embalse de Rumbler 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 hm³/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-

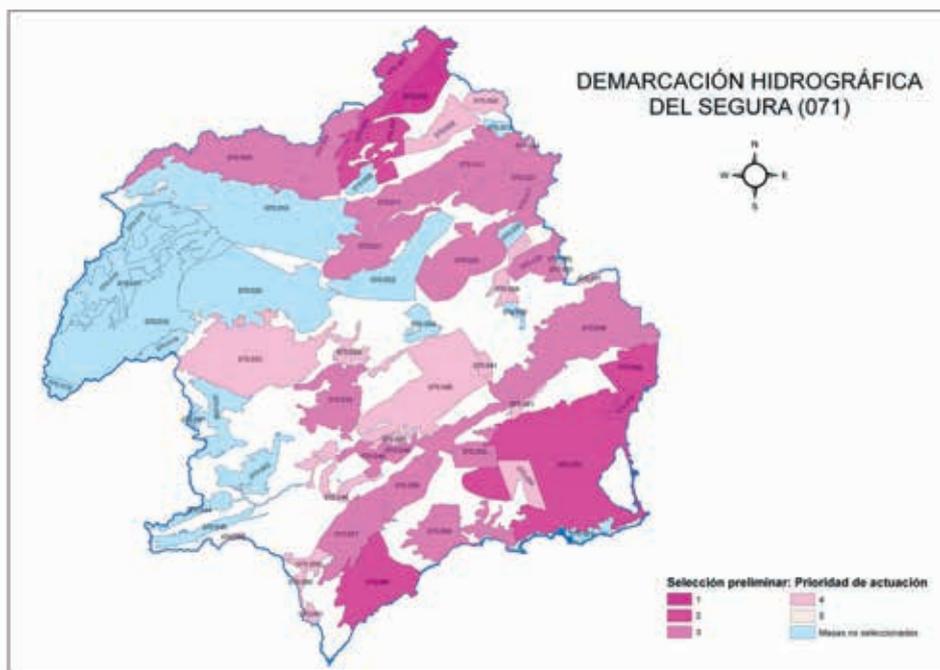


Figura 16. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Segura

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

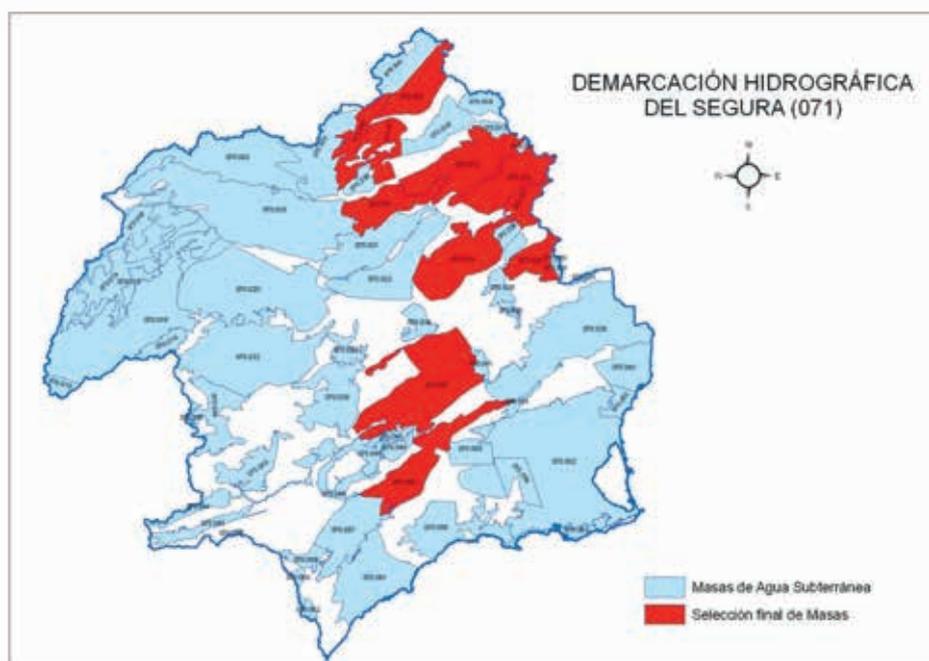
Actuación: Recarga artificial del acuífero carbonatado de la formación Chorros con agua del embalse de laminación de Los Charcos

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 Quibas 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 derivando 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 pliocuaternalio 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

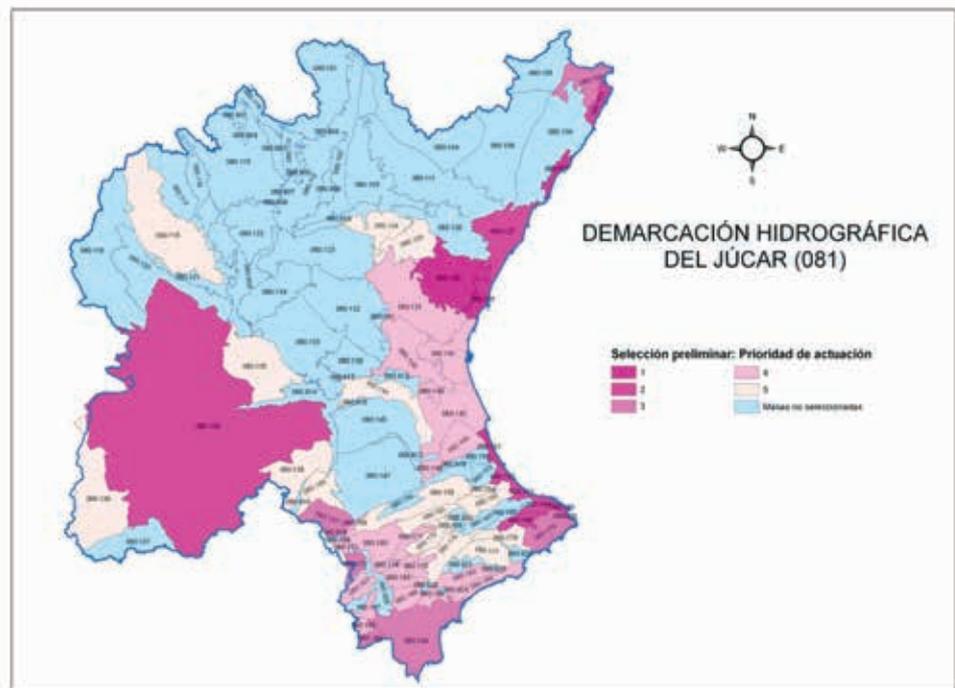
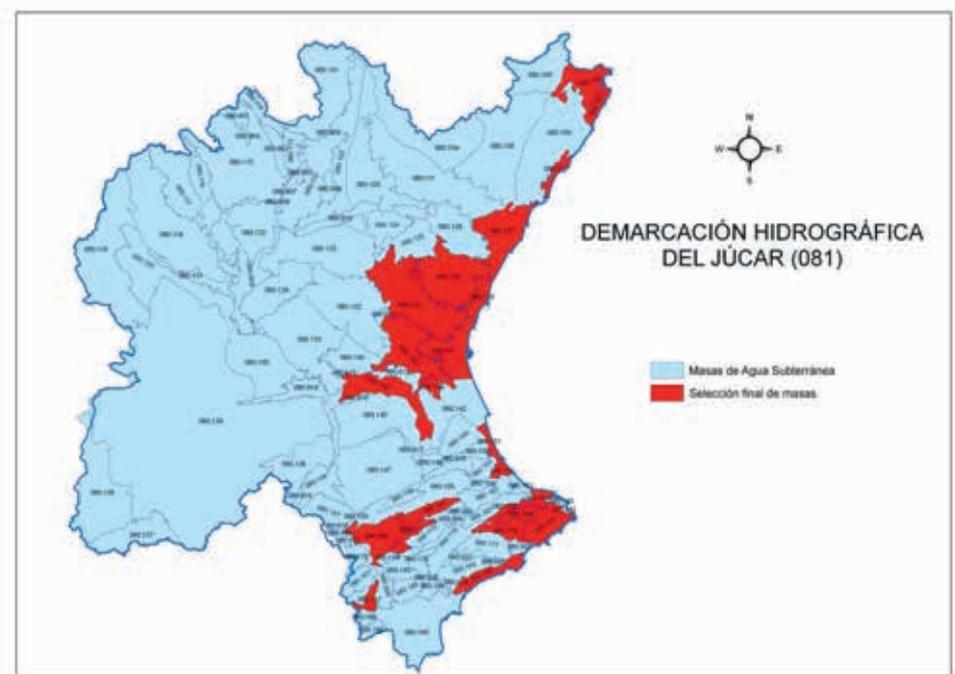


Figura 19. Selección final de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Júcar



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-MAESTRAZGOMASb 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 CASTELLÓNMASb 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 M^a 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 Alfari, 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 hm³/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 hm³/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 tratamien-

to 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 ($\approx 0,25$ 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 ($\approx 0,5$ 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 ($\approx 0,5$ 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 ($\approx 2,73$ 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 acuífero

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

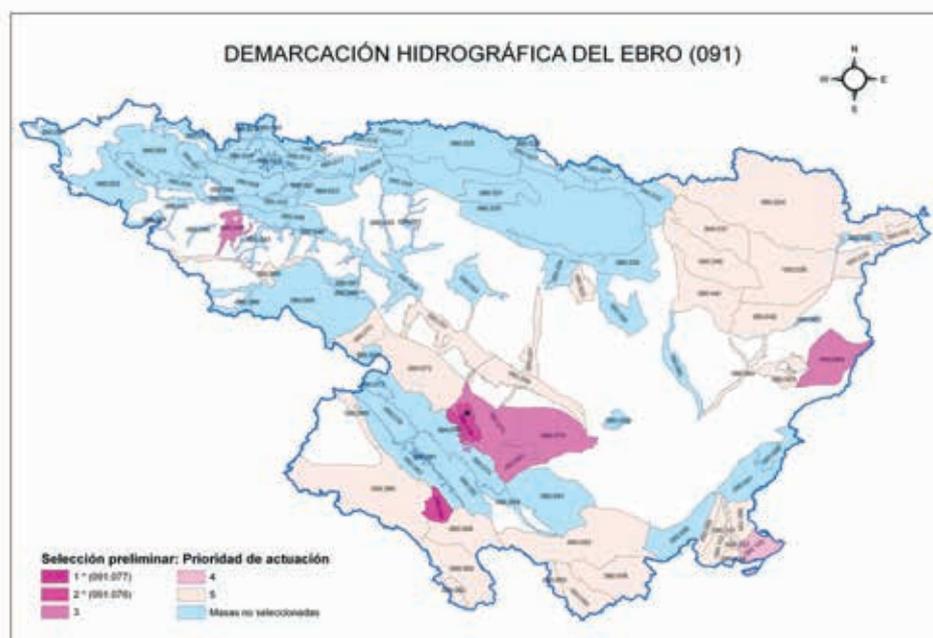
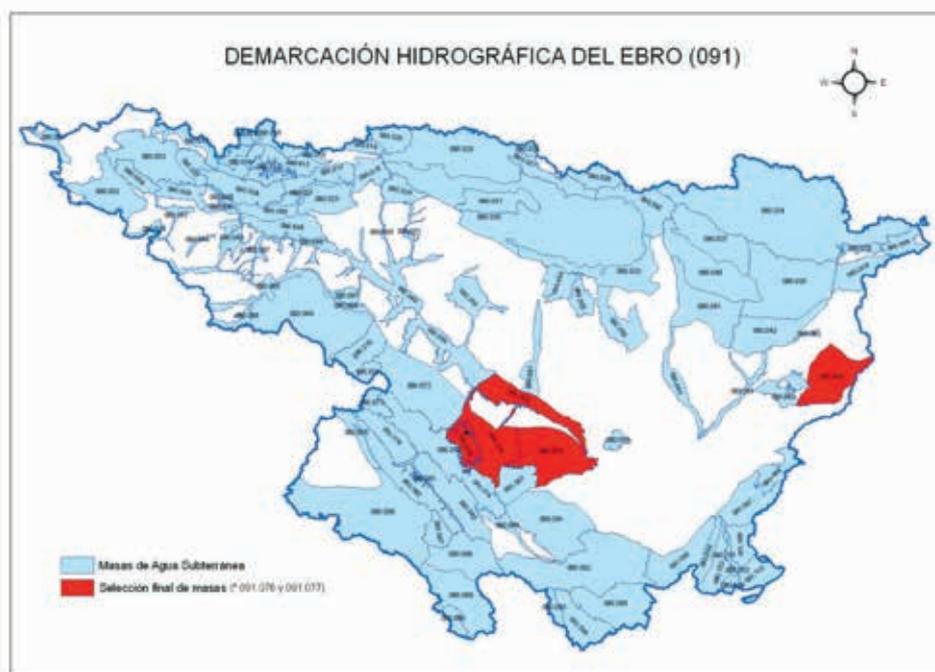


Figura 20. Selección preliminar de MASb en la Demarcación Hidrográfica del Ebro

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 Pliocuatrnario de Alfamén

Actuación: Recarga artificial del acuífero Pliocuatrnario 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 efectuarse 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 HIDROGRÁFICA	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 HIDROGRÁFICA	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

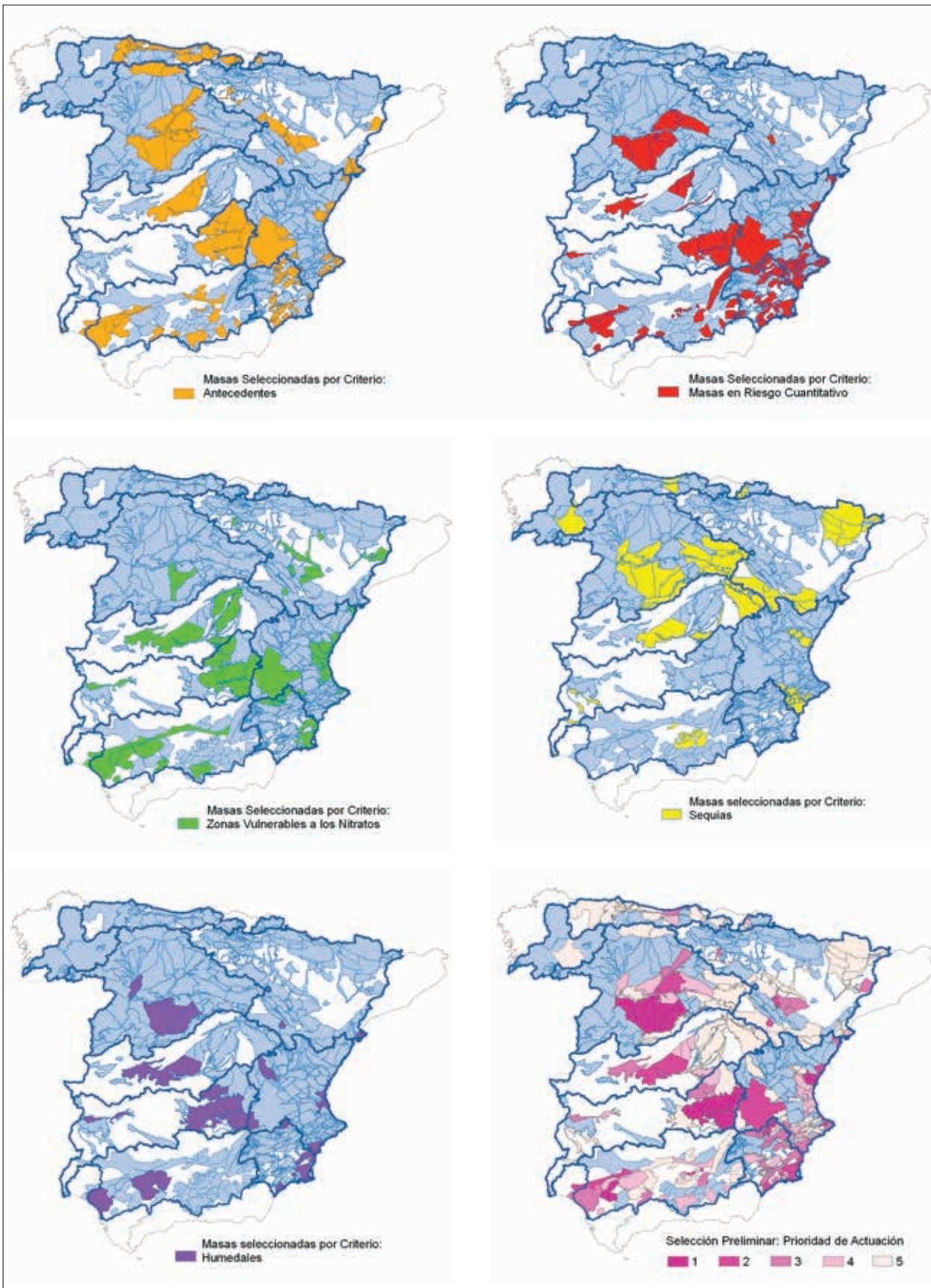


Figura 22. Selección Preliminar: MASb seleccionadas por tipo de criterio y prioridad de actuación resultante del proceso de valoración conjunta de los criterios

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.

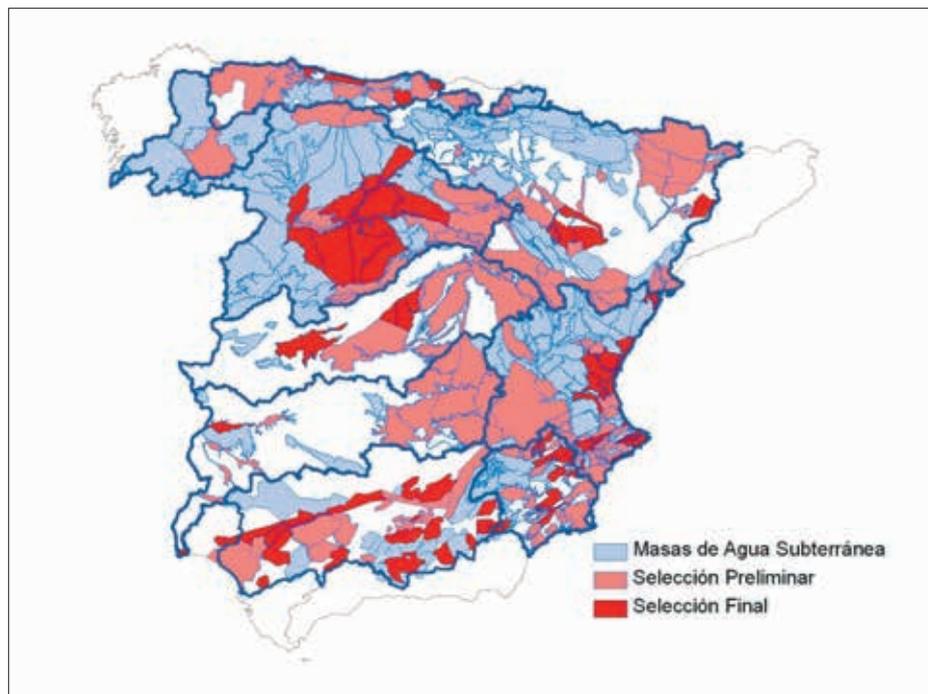


Figura 23. Selección final de MASb en las Demarcaciones Hidrográficas Intercomunitarias

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 Rodríguez 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 que 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 meteorológica, 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 únicamente 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 hídricos, al amparo del artículo 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,

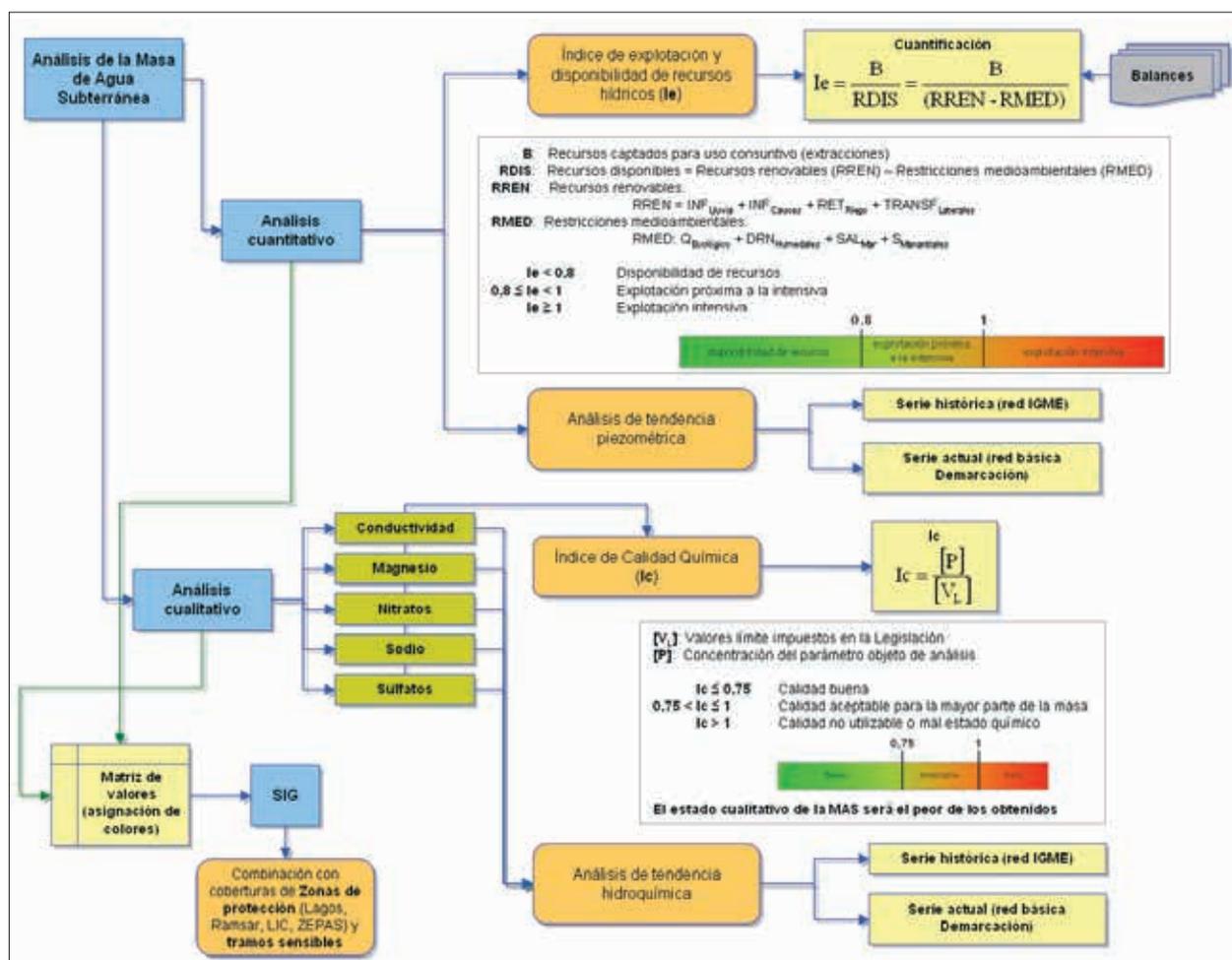


Figura 1. Metodología empleada para el cálculo de los Índices de Disponibilidad (I_e) y Calidad (I_c) de una Masa de Agua Subterránea

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).

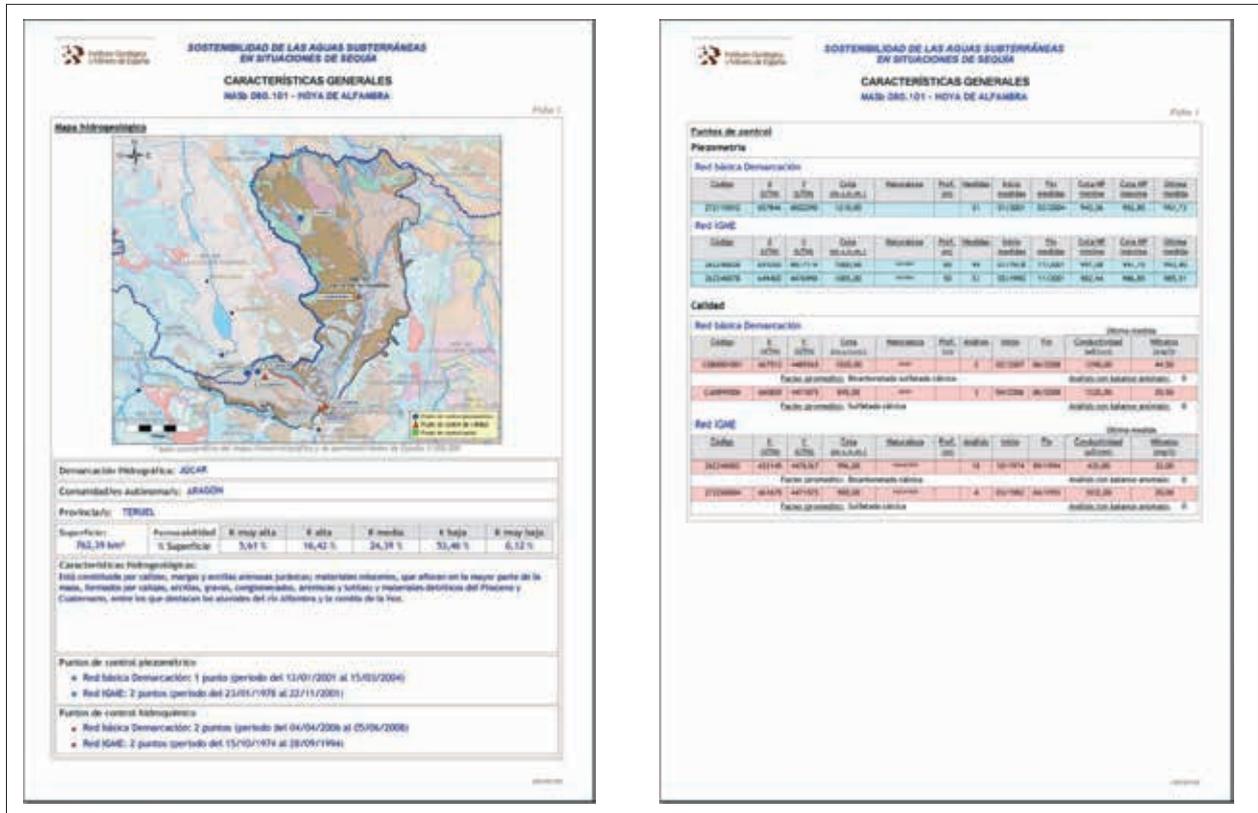


Figura 2: Ficha de características generales (anverso y reverso)

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 laterales¹ (TRANS_{LATERALES}).

De tal forma que $RREN = (INF_{LLUVIA}) + (INF_{CAUCES}) + (RET_{RIEGO}) + (TRANS_{LATERALES})$

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 $0,8 \leq Ie < 1$, 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 $Ie \geq 1$, 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.

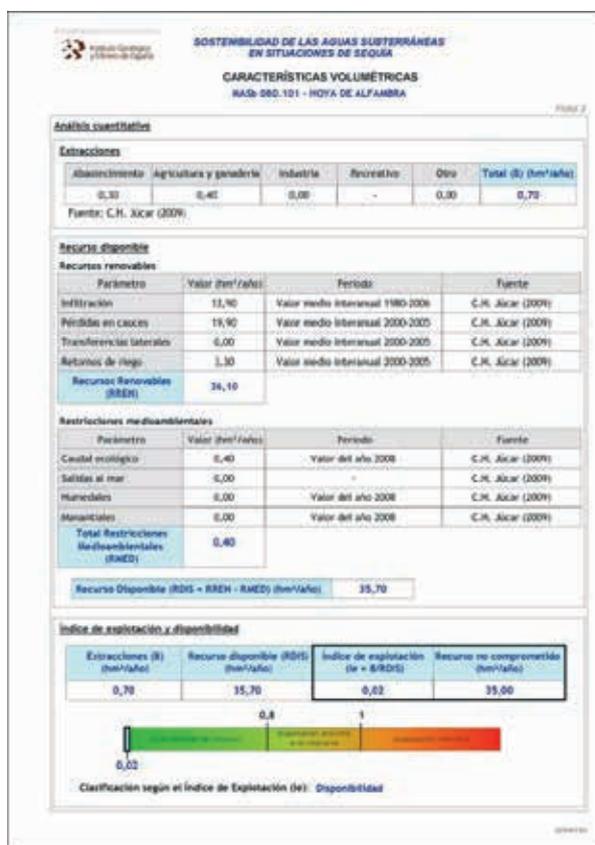


Figura 3. Ejemplo de la ficha de características volumétricas

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 diferen-

tes 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*).

Los indicadores de calidad hidroquímica de cada parámetro considerado ($I_{C_{[p]}}$), 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 $I_{C_{[p]}}$ 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 (I_c), que resumen el conjunto de los indicadores de calidad hidroquímica ($I_{C_{[p]}}$), adoptando el valor máximo de ellos.

Se ha establecido un rango para el Índice de Calidad de cada parámetro:

- Si $I_c \leq 0,75$, el índice es bueno, y por lo tanto la calidad para el parámetro analizado es buena.
- Si $0,75 < I_c \leq 1$, el índice es aceptable.
- Si $I_c > 1$, 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 I_c calculado no constituye un indicador excluyente respecto a la utilización de una

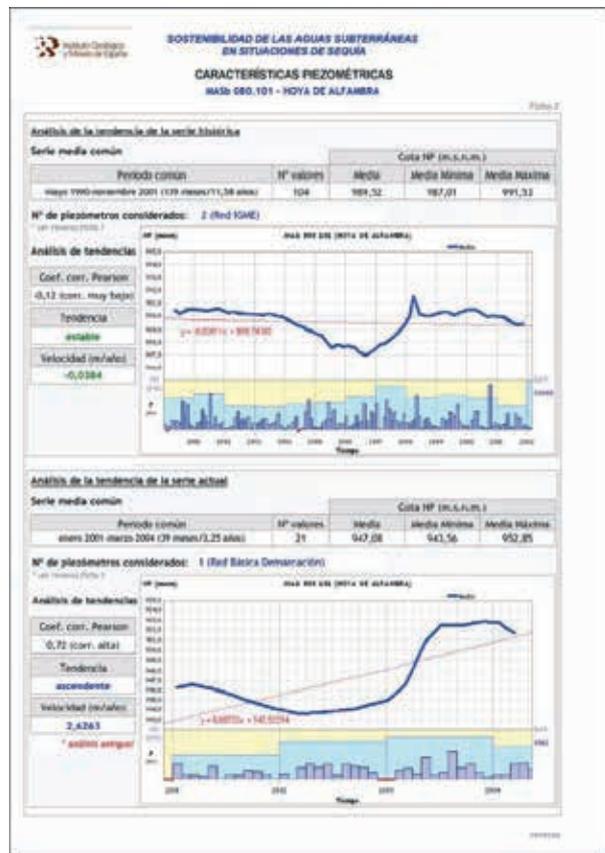


Figura 4. Ejemplo de la ficha de características piezométricas

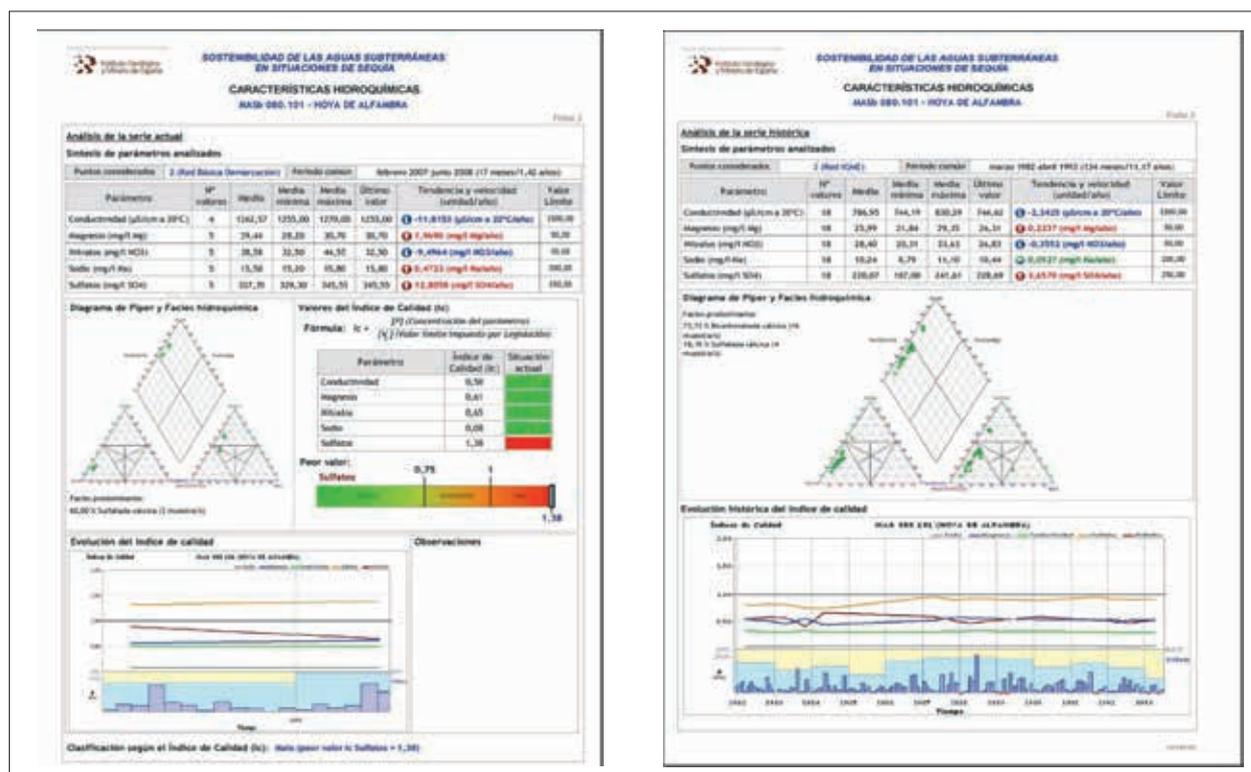


Figura 5. Fichas de características hidroquímicas actuales e históricas Zonas sensibles

determinada MASb para la ampliación 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 evolución temporal de los índices 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.

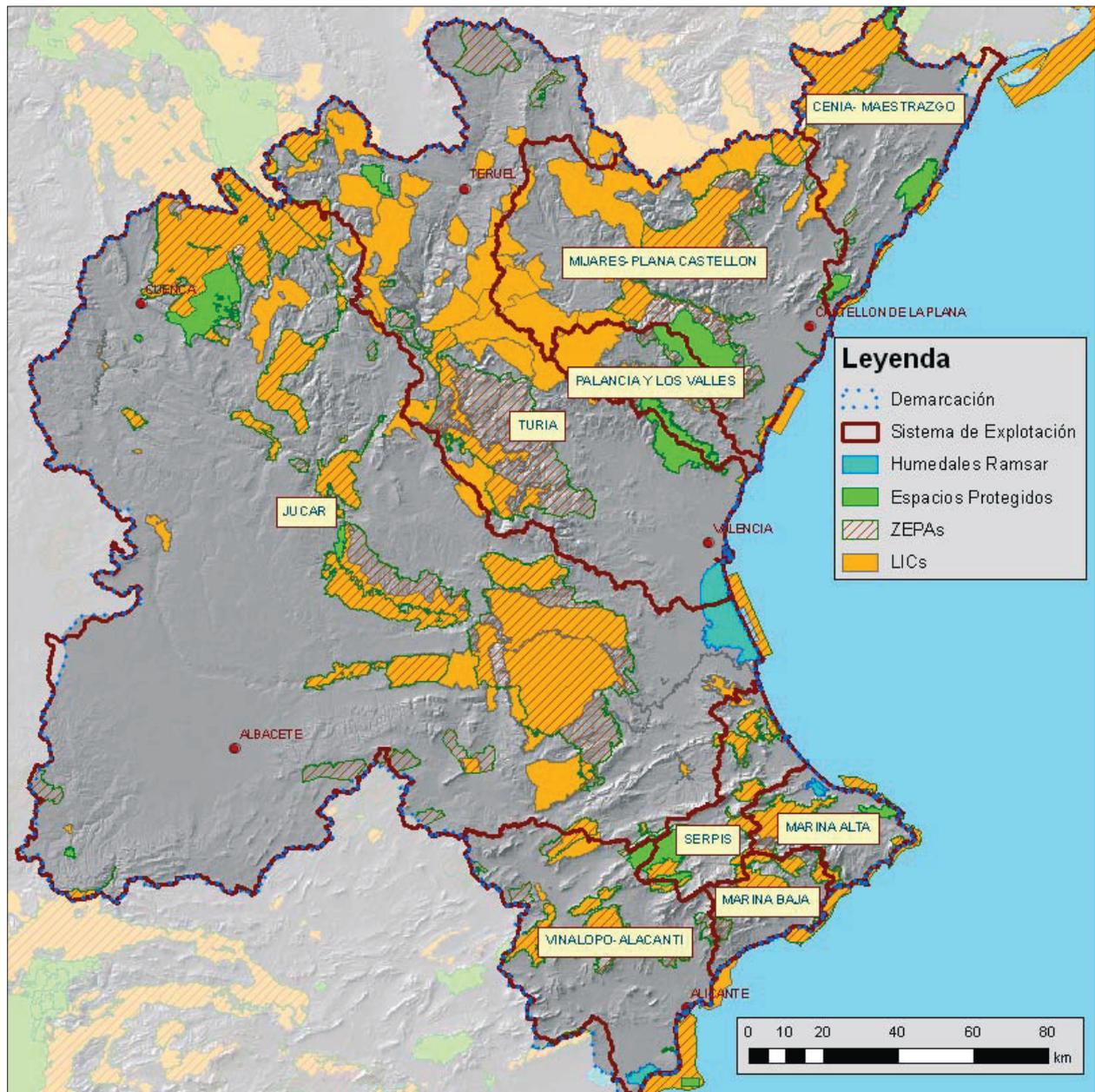


Figura 6. Figuras de Protección en la Demarcación Hidrográfica del Júcar

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 situa-

ción 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.

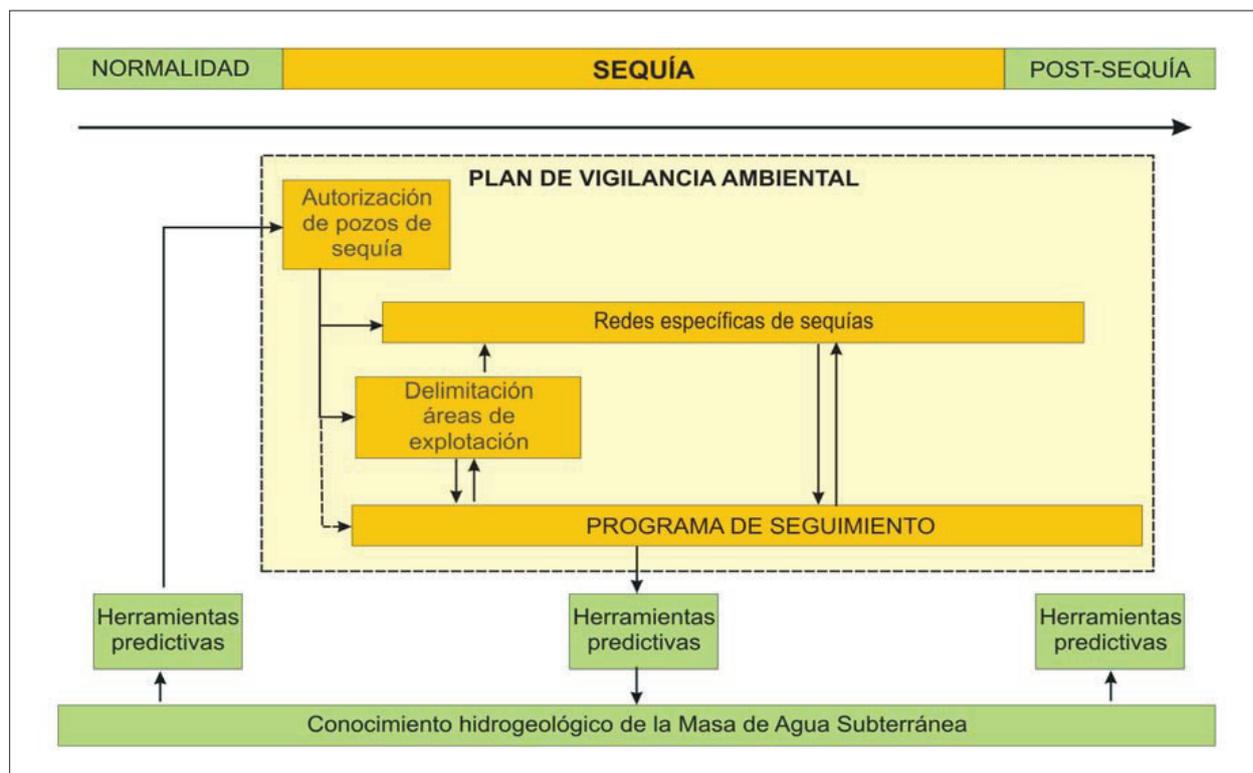


Figura 7. Componentes directos e indirectos del Plan de Vigilancia Ambiental

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 comportamien-

to 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

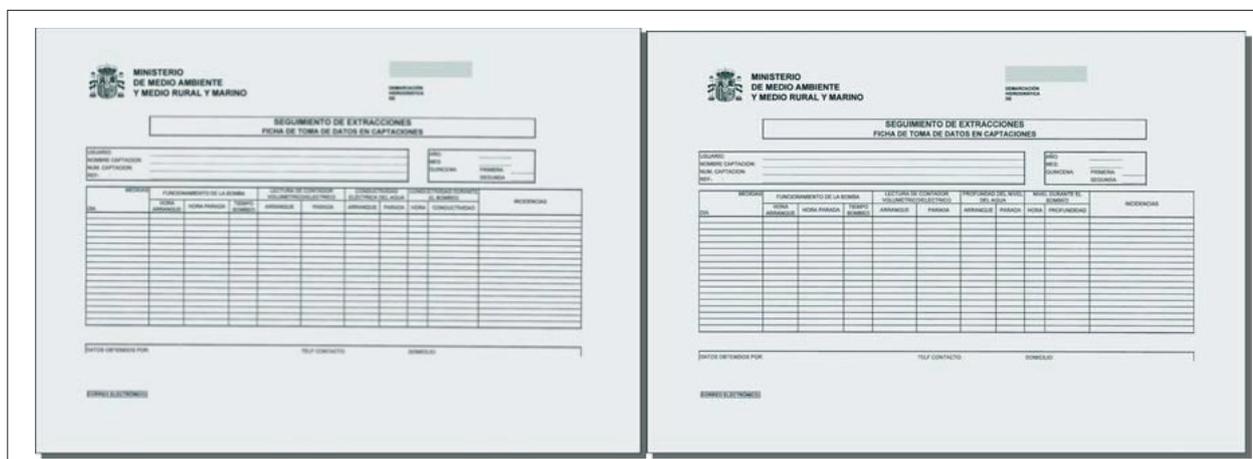


Figura 8. Estadillos para la presentación de datos de control de volúmenes extraídos, piezometría y calidad

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 (m ³)	
	Nivel piezométrico (msnm)	Conductividad (µS/cm)	Cloruros (mg/L)	Piezometría (msnm)		Conductividad (µS/cm)		Cloruros (mg/L)		Mes	Total desde
				Con mes anterior	Con medida inicial	Con mes anterior	Con medida inicial	Con mes anterior	Con medida inicial		
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 comprensión 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 pre-alerta) 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 bibliografía).

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

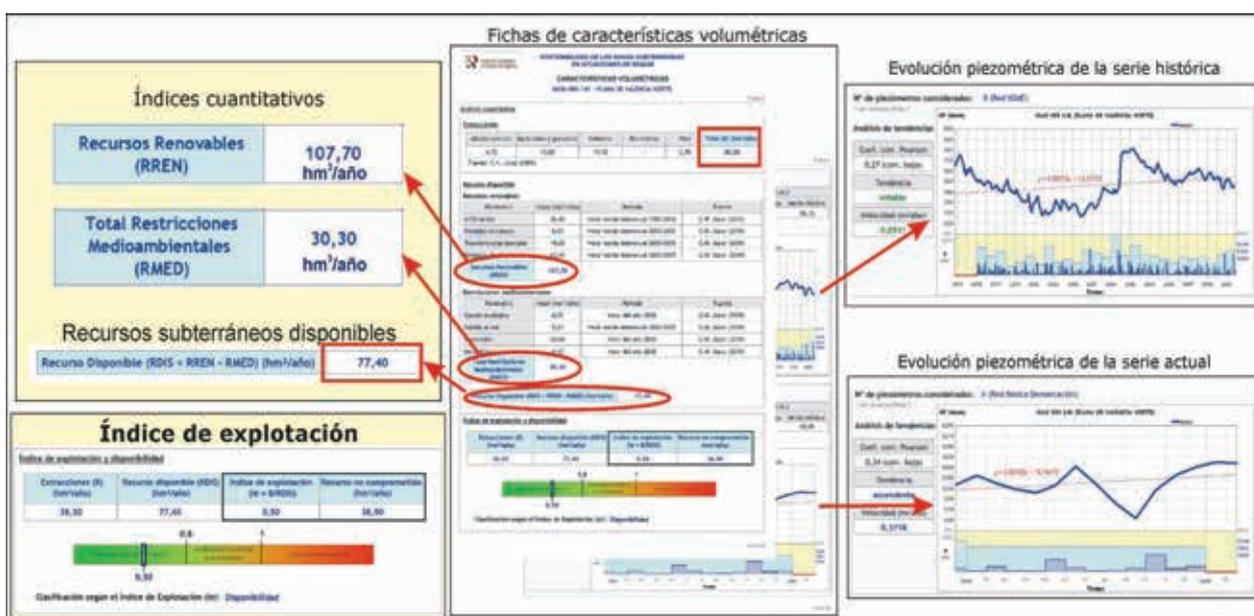


Figura 10. Datos cuantitativos utilizados en tablas y mapas

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 próxima 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, exponiéndose 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 Explotación (*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 piezométricos 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) (hm ³ /a)	Restricciones Ambientales (RMED) (hm ³ /a)	Recursos Disponibles (RDIS) (hm ³ /a)	Extracciones (B) (hm ³ /a)	Recursos NO Comprometidos (RNC) (hm ³ /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		4010,40	768,92	3241,48	1483,43	1950,50	—

Tabla 1. Evaluación de Recursos Disponibles en las Masas de Agua Subterránea de la DH del Júcar

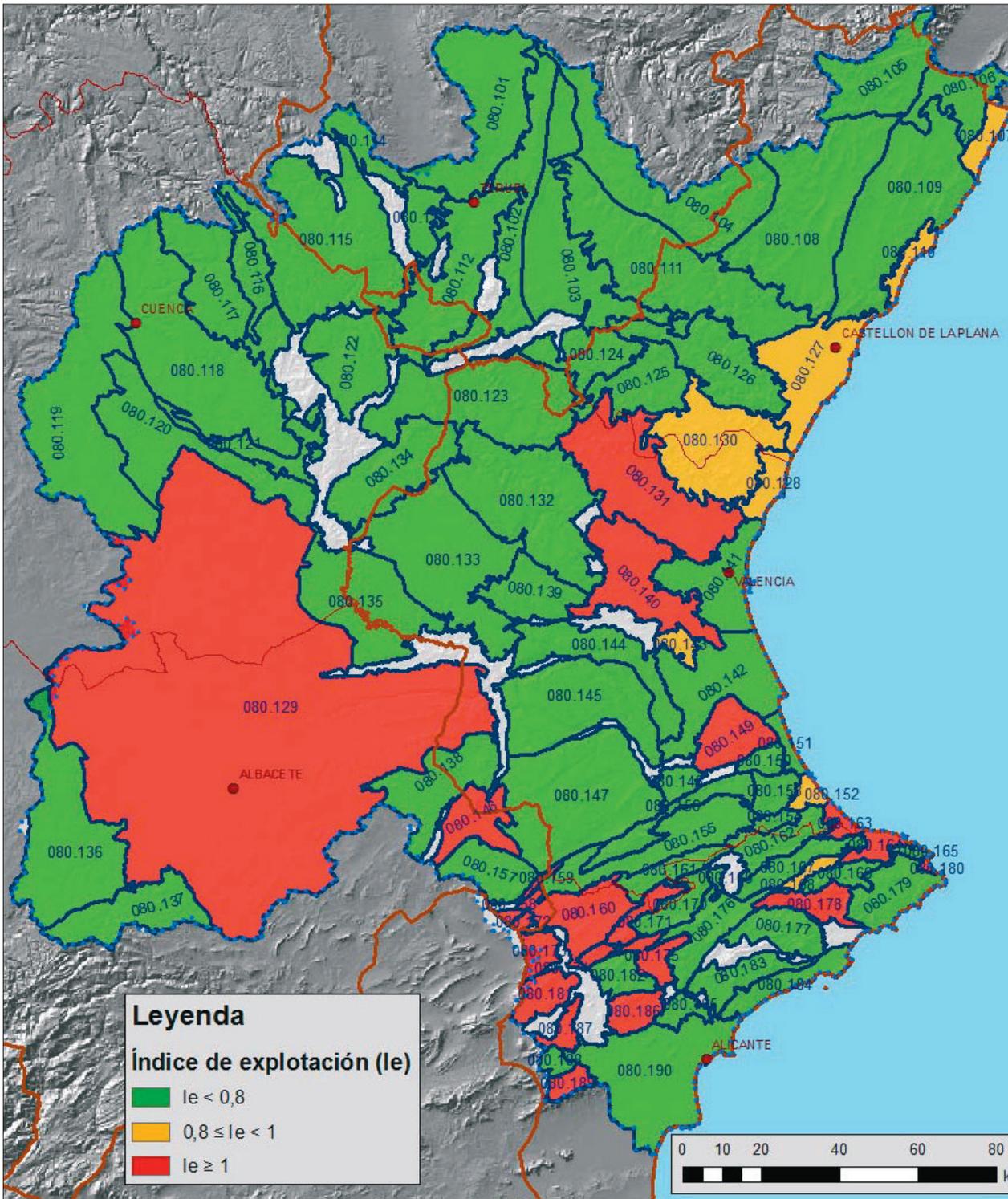


Figura 11. Valores del Índice de Explotación (Ie) de las Masas de Agua Subterránea de la DH del Júcar

Como ejemplo de la caracterización 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-

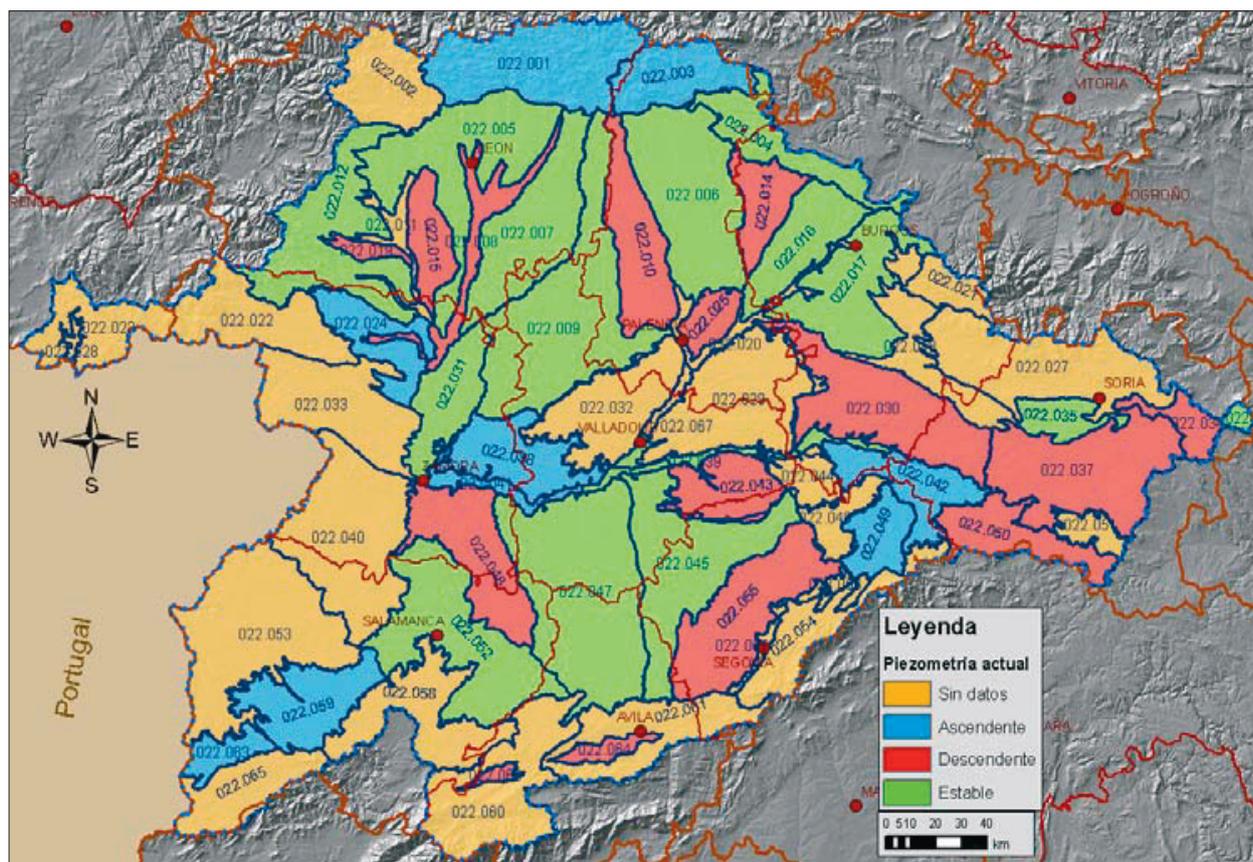


Figura 12. Análisis de la piezometría actual de las MASb de la Demarcación Hidrográfica del Duero

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) (hm ³ /a)	Requerimientos Ambientales (RMED)(hm ³ /a)	Recursos Disponibles (RDIS) (hm ³ /a)	Extracciones (B)(hm ³ /a)	Recursos NO comprometidos (RNC) (hm ³ /a)	Índice 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

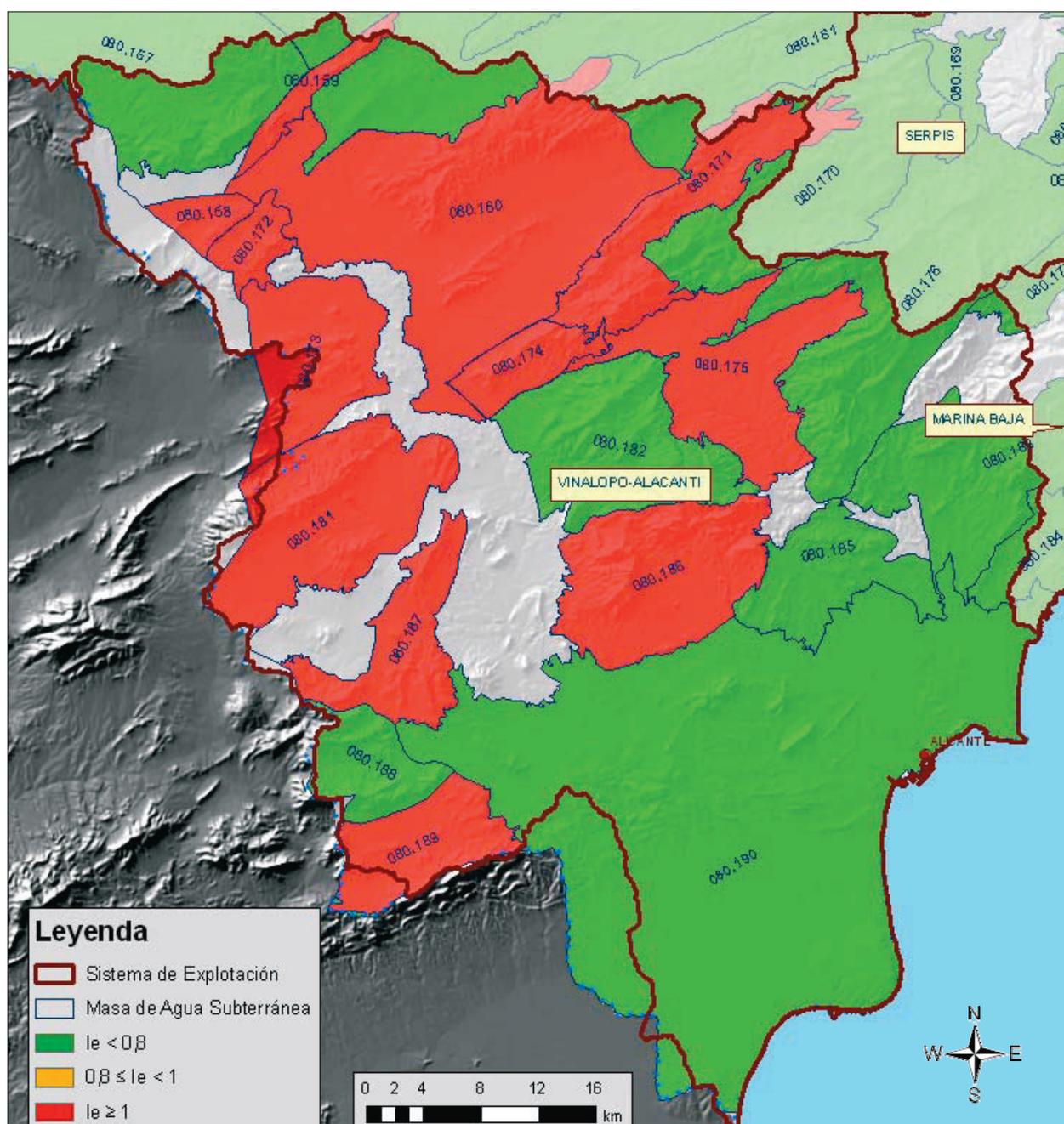


Figura 13. Masas de Agua Subterránea en el Sistema de Explotación del Vinalopó-Alacantí.

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 pota-

bilidad 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 ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C), magnesio (mg/L), nitratos (mg/L), sodio (mg/L) y sulfatos (mg/L). Los datos de la características hidroquímicas se recogen en las fichas de las masas de agua subterránea y se extraen en figura 14

En cada uno de los trabajos de las Demarcaciones se presentan los índices de calidad los diferentes parame-

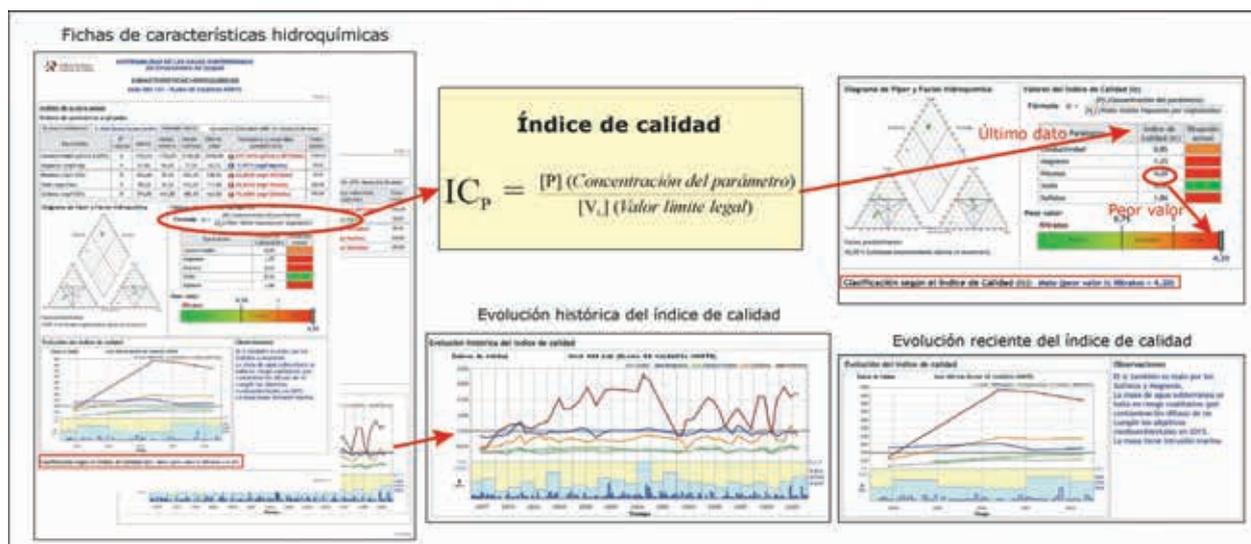


Figura 14. Datos cualitativos utilizados en tablas y mapas

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 de-

finitivo 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 físico-químicos 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.

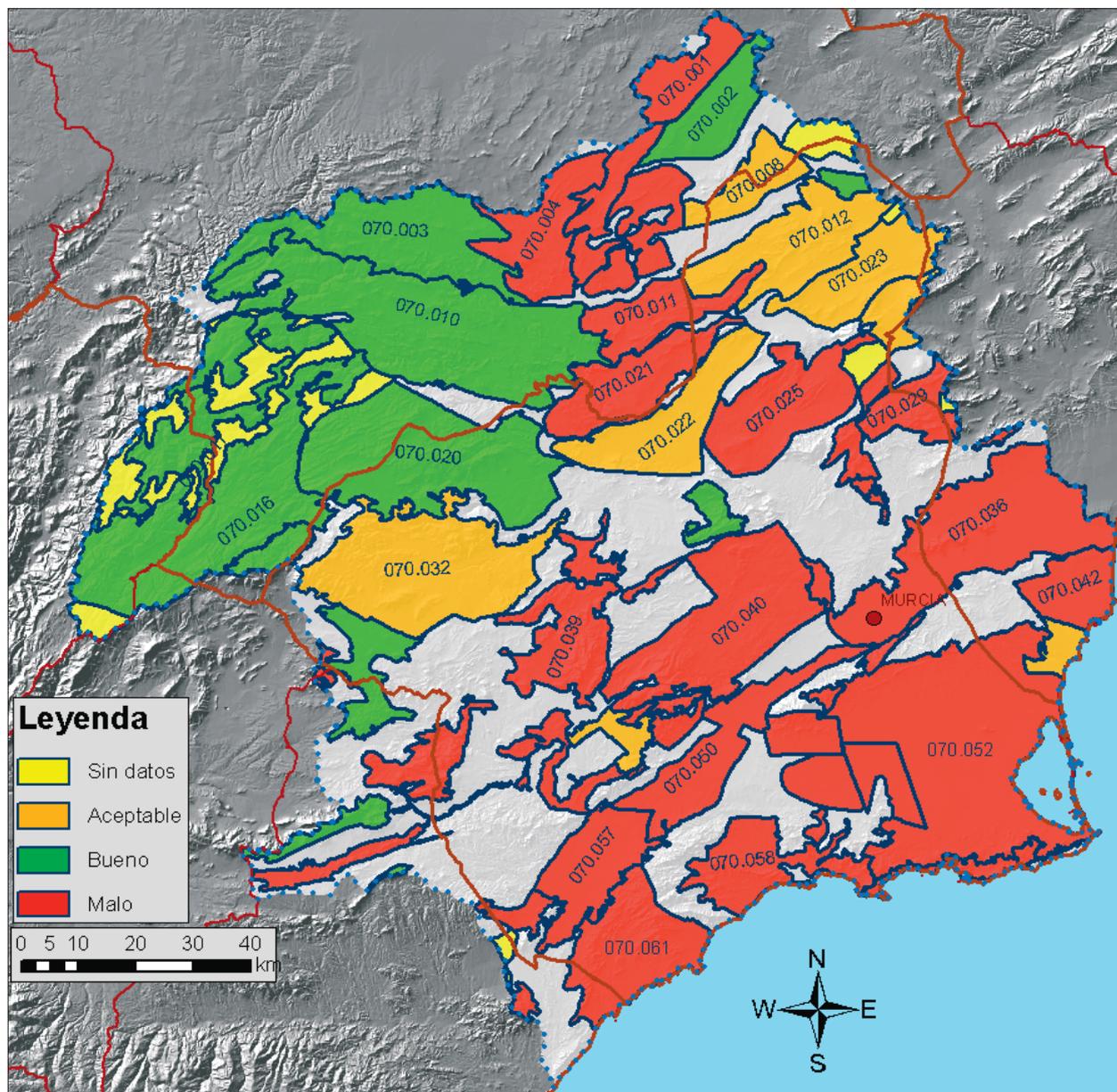


Figura 15. Clasificación de las Masas de Agua Subterránea en la DH del Segura, según *Ic* (datos de la Red Básica)