

# Posibilidades de recarga artificial del acuífero de Crestatx (Mallorca) con excedentes de las Ufanés de Gabellí

J. A. de la Orden<sup>(1)</sup>, J. M. Murillo<sup>(1)</sup>, Catalina Sesmero<sup>(2)</sup> y Oscar Blasco<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. 28003. Madrid. España.  
ja.delaorden@igme.es; jm.murillo@igme.es

(2) Mina de cobre Las Cruces.  
catisesmero@yahoo.com

(3) EPTISA.  
oblasco@eptisa.com

## RESUMEN

Se presenta un estudio sobre las posibilidades de recargar artificialmente el acuífero de Crestatx, en Mallorca, utilizando excedentes procedentes de las fuentes Ufanés de Gabellí. Estas fuentes presentan un funcionamiento kárstico típico, caracterizado por una rápida respuesta frente a las precipitaciones intensas, y drenan caudales muy elevados en períodos de tiempo cortos. Su régimen de funcionamiento es variable, en función de la pluviometría, pero aportan agua como media 6 ó 7 veces al año, con caudales que han llegado a superar los 30 m<sup>3</sup>/s. Estas aguas circulan por el torrente de San Miguel hasta el mar, situado unos pocos kilómetros aguas abajo de los manantiales. Esta circunstancia hace muy difícil el aprovechamiento hídrico de estos caudales, con el factor añadido de que alimentan, en su desembocadura, a una albufera natural y protegida conocida como Albufera de Alcudia. No obstante, existe la posibilidad de aprovechar parte de los excedentes generados durante los episodios de descarga mediante la recarga artificial del acuífero de Crestatx. En el presente artículo se presentan los primeros resultados sobre la viabilidad de aplicar esta técnica en el acuífero en estudio, así como los primeros diseños de la instalación de recarga artificial.

Palabras clave: Crestatx, Mallorca, recarga artificial, sólidos en suspensión, Ufanés de Gabellí

## ***Possibilities for artificial recharge in Crestatx aquifer (Mallorca) using water surpluses from Ufanés de Gabellí springs***

### ABSTRACT

*In this paper we show an study about the possibilities of artificially recharge the Crestatx aquifer, in Majorca, using water surpluses from Ufanés de Gabellí springs. These springs are typically karstic, characterized by a very quick response to intense precipitation. Water flows drained are very high in very short time periods. The discharge pattern is very variable, depending on the rainfall pattern, but we can say that, as an average, there are 6 or 7 drainage episodes per year. Recorded water flows have been up to 30 m<sup>3</sup>/s. Drained water is driven to the sea, a few kilometers downstream, by the Torrente de San Miguel. This makes very difficult to exploit the springs water resources, even more by the fact of in the river mouth there is a large wetland named Albufera de Alcudia, which is protected by the law. Nevertheless there is a possibility to use a part of the surpluses to make the artificial recharge of Crestatx aquifer. In this paper, the first results of the artificial recharge feasibility study are shown, and too the first design of the future artificial recharge plant.*

*Key words: artificial recharge, Crestatx, Mallorca, suspended solids, Ufanés de Gabellí*

## **Introducción**

El acuífero de Crestatx constituye una estructura carbonatada emplazada en las estribaciones meridionales de la sierra de Tramuntana, en la isla de Mallorca. Actualmente, se utiliza para abastecimiento urbano de las poblaciones costeras de la bahía de Alcudia, extrayéndose un volumen anual cercano al hectómetro cúbico. Es un acuífero aislado del mar y que, por tanto, no presenta problemas de intrusión marina

(López-García y Mateos, 2003; MMA-IGME, 1997), registrando una calidad de agua excelente durante el período histórico que abarca la explotación del mismo. En su límite sur está en contacto con la masa de agua subterránea del Llano de Inca-Sa Pobra, formada por materiales detríticos cuaternarios. Existe una transferencia de agua de manera natural entre ambos acuíferos, desde Crestatx hasta el llano.

Sobre la superficie del Llano de Inca-Sa Pobra se ha desarrollado una agricultura que, con el tiempo,

está induciendo problemas de contaminación en el agua subterránea por elevados contenidos en nitratos procedentes de las actividades agrícolas (Mateos y López-García, 2001; Wallis *et al.*, 2007).

Para paliar esta incipiente contaminación, se ha planteado clausurar algunas explotaciones de agua en el llano de Inca-Sa Pobra y sustituir el agua que actualmente explotan por agua procedente del acuífero de Crestatx. Esta actuación implicaría un incremento de extracciones en este último. Para compensar este incremento, y respetar los derechos de extracción actualmente existentes en Crestatx, se ha propuesto hacer una recarga artificial en el mismo con aguas procedentes de los excedentes de los manantiales conocidos como Ufanés de Gabellí, situados pocos kilómetros aguas arriba de Crestatx y con una calidad muy adecuada para los usos a que se destina el agua del acuífero.

Las operaciones de recarga artificial en la isla de Mallorca ya se plantearon por primera vez en un estudio que se realizó conjuntamente por el Servicio Geológico de Obras Públicas (Ministerio de Obras Públicas), Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Industria) e Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (Ministerio de Agricultura) (SGOP-IGME-IRYDA, 1973). En este informe se proponían varias actuaciones, entre las cuales figuraba el aprovechamiento de excedentes pluviales para recarga artificial de acuíferos, haciendo hincapié en la difícil regulación de los mismos, dado el carácter marcadamente torrencial que presentan. Las instalaciones de recarga artificial que se proponían estaban basadas en la utilización de pozos, balsas o represas en los cauces.

También el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE, 1997; IGME, 1987) ha realizado estudios previos sobre la viabilidad de recargar artificialmente varios acuíferos de la isla de Mallorca con recursos superficiales captados en diferentes torrentes de la isla, uno de los cuales es el torrente de San Miguel.

Además, la posibilidad de utilizar la recarga artificial en la gestión de los recursos hídricos de la isla se contempla en la Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación de Baleares, en concreto en el programa número 6, "Recarga Artificial de Acuíferos y Almacenamiento-Recuperación" (DGRHGIB, 2008).

Con objeto de poner en marcha la recarga artificial en el acuífero de Crestatx, la Dirección General de Recursos Hídricos del Gobierno Balear y el Instituto Geológico y Minero de España plantearon, a finales de 2005, un estudio previo sobre la disponibilidad de excedentes para la recarga artificial y un diseño inicial de una instalación que fuera capaz de tratarlos y

recargarlos en el acuífero. En esta publicación, se presentan los primeros resultados de dichos estudios.

## Metodología y análisis de los resultados

### **Caracterización geológica e hidrogeológica del acuífero de Crestatx.**

El acuífero de Crestatx se localiza en la parte septentrional de la isla de Mallorca, entre las poblaciones de Pollensa y Sa Pobra. Desde el punto de vista orográfico, conforma una zona moderadamente montañosa, alargada en dirección NE-SO, de unos 8 km de longitud y 2,5 km de anchura, subparalela a la Sierra de Tramuntana. En la misma pueden distinguirse dos conjuntos de relieves principales:

- el área nororiental, culminante en el Puig de Son Vila (327 m snm)
- el área suroccidental, o área de Crestatx propiamente dicha, cuyas principales alturas son el Puig de Navarra (234 m snm), Puig de María (327 m snm), Puig des Fangar (191 m snm) y Puig de Sant Miquel

La antigua Unidad Hidrogeológica de Crestatx está actualmente subdividida en dos masas de agua subterránea diferentes: la 18.11 M4, Navarra, y la 18.11 M5, Crestatx. Está constituida por materiales carbonatados de edad Triásica y Jurásica pertenecientes a una serie de escamas tectónicas cabalgantes con orientación ENE-OSO del borde meridional de la sierra de Tramuntana. El nivel de despegue de las escamas es el Keuper, que desde el punto de vista hidrogeológico puede considerarse impermeable. El techo de las escamas puede llegar a estar constituido por materiales margosos del Dogger-Cretácico inferior de baja permeabilidad. Por tanto, el núcleo de las escamas está compuesto por materiales permeables, que son dolomías tableadas y carniolas del Triásico – Lías, y calizas y dolomías del Dogger – Lías. Estos materiales carbonatados han sufrido procesos de karstificación y constituyen los niveles permeables de la unidad. La presencia de materiales poco permeables del Keuper o del Cretácico entre las distintas escamas provoca la compartimentación de la unidad en acuíferos cuyo funcionamiento puede ser diferente en función de la posición de dichos materiales, si afloran, subafloran o se encuentran a mayor profundidad.

Desde el punto de vista geológico, el macizo de Crestatx está constituido por cuatro unidades tectónicas o escamas principales y otra más pequeña (IGME, 2008b), que en general presentan direcciones NE-SO, aunque en el extremo suroccidental del macizo se

curvan un poco, adoptando direcciones N-S e incluso NNO-SSE. De oeste a este, estas unidades y los accidentes tectónicos que las separan son los siguientes (figura 1) (DGRHGIB, 2008):

- Unidad o escama del Puig de San Miguel.
- Unidad o escama de Puig Caselles – Puig de Son Corró.
- Unidad o escama del Puig de Navarra – Puig de María – Puig d'es Fangar.
- Unidad o escama del Pujol d'en Font – Ses Paretés de Moros.
- Unidad de Crestatx.

Desde el punto de vista hidrogeológico, se han definido dos acuíferos: el acuífero de Navarra y el acuífero de Crestatx. El acuífero de Navarra está constituido por las tres primeras escamas de las citadas en el párrafo anterior y el de Crestatx por las dos últimas.

El modelo de funcionamiento hidrogeológico es muy similar en ambos acuíferos: la recarga se produce por la infiltración de la precipitación y las salidas se producen por transferencias subterráneas entre sectores o a otras masas de agua subterránea y por

bombes. Éstos últimos son de 0,26 hm<sup>3</sup>/año en el acuífero de Navarra, destinados al abastecimiento urbano de Campanet, y de aproximadamente 1,25 hm<sup>3</sup>/año en el acuífero de Crestatx, mayoritariamente destinados también al abastecimiento urbano. Por lo que respecta a las salidas subterráneas, en el acuífero de Navarra se producen en dos direcciones, como consecuencia de la existencia de una divisoria hidrogeológica: por una parte hacia el NE, y por otra hacia el sur, al Llano de Inca-Sa Pobla. El acuífero de Crestatx solo tiene transferencias subterráneas hacia el Llano de Inca-Sa Pobla. En este acuífero existe un drenaje natural a través del manantial de S'Ull, en el borde este, inactivo desde que comenzó la explotación del mismo.

El acuífero que se pretende recargar es el de Crestatx, ya que su actual explotación ha originado la existencia de suficiente capacidad de almacenamiento libre como para admitir el agua de recarga, lo cual es la condición previa que debe cumplir cualquier acuífero para poder ser recargado artificialmente (Custodio, 1986).

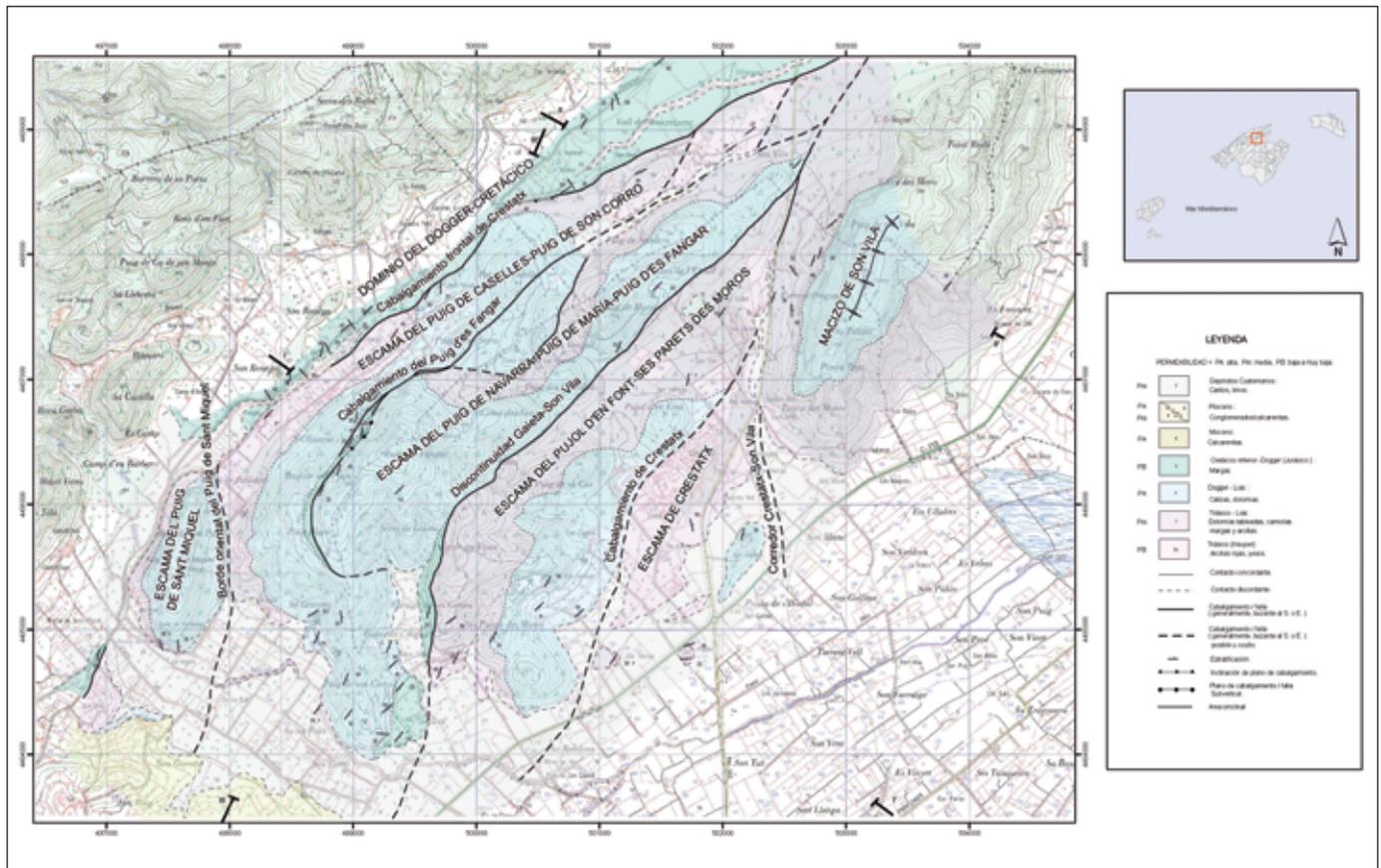


Figura 1. Esquema geológico e hidrogeológico del macizo de Crestatx  
Figure 1. Geological and hydrogeological scheme of Crestatx aquifer

### **Estudio de excedentes hídricos disponibles a partir de la descarga de las fuentes Ufanes de Gabellí.**

Las Fonts Ufanes se encuentran situadas en la finca de Gabellí Petit, en el término municipal de Campanet y constituyen una fuente vaclasiana con surgencias intermitentes producidas por el desbordamiento del acuífero carbonatado Ufanes. Las descargas se producen de forma difusa y como respuesta a fuertes lluvias sobre los afloramientos del acuífero. El caudal surgente es recogido por el arroyo de San Miguel, el cual desemboca finalmente, después de atravesar la llanura de Sa Pobla en la Albufera de la Alcudia, en el sector noreste de la isla de Mallorca.

Desde el año 2001, Las Fonts Ufanes de Gabellí fueron declaradas espacio natural protegido por la categoría de Monumento Natural, con una extensión total de 50,19 hectáreas (BOIB, 2001). Con el objetivo de proteger este entorno singular, la finca pasó a ser propiedad de la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de las Islas Baleares en el año 2005.

En el análisis del régimen de aportaciones de las Fuentes de Les Ufanes se han tomado los datos de la estación de aforos nº 11/04 Torrent de San Miquel perteneciente a la red foronómica oficial de la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno Balear, de la cual, ha sido posible disponer de una serie histórica de 31 años de aportaciones diarias que comprende desde el año hidrológico 1976-1977 hasta el año hidrológico 2006-2007, lo que supone un total de 11.323 registros.

Partiendo del análisis estadístico de la serie de aportaciones mensuales de esta estación, se ha establecido, mediante la aplicación de la función de Goodrich, la distribución de frecuencias de las aportaciones correspondientes a las descargas de las fuentes de Les Ufanes. Este análisis ha permitido estimar que las aportaciones correspondientes a un año pluviométricamente de tipo seco son menores que 2,8 hm<sup>3</sup>/año, las correspondientes a un año de tipo húmedo mayores que 21,5 hm<sup>3</sup>/año, y las correspondientes a un año medio las situadas entre ambos valores. La tabla 1 muestra la serie de los valores de aportación de la estación 11/04 y su análisis estadístico.

Del estudio de esta serie, se pueden extraer una serie de características que se resumen a continuación:

- Del total de días registrados (11.323 días), el 67,5% (7.653 días) el caudal es nulo.
- Las descargas se producen, por lo general entre los meses de diciembre a mayo.
- Los valores medios mensuales más altos corresponden a los meses de diciembre, con una aporta-

ción media de 3,22 hm<sup>3</sup>, enero con una aportación media de 3,06 hm<sup>3</sup> y febrero con una aportación media de 2,15 hm<sup>3</sup>.

- Los meses de diciembre, enero y febrero concentran el 52% de las aportaciones medias anuales.
- Los valores medios mensuales más bajos se registran en los meses de julio con una aportación media de 0,03 hm<sup>3</sup>, agosto con una aportación media de 0,07 hm<sup>3</sup> y septiembre con una aportación media de 0,11 hm<sup>3</sup>.
- La velocidad de descarga es rápida, produciéndose por lo general en periodos inferiores a un mes. La atenuación total de la descarga se produce por lo general en periodos de 18 a 20 días, aunque muchas veces el manantial deja de fluir pasados 5 ó 6 días desde que comienza a hacerlo.
- El caudal instantáneo máximo registrado corresponde a 33 m<sup>3</sup>/s y el mínimo de 0,03 m<sup>3</sup>/s, siendo el valor medio de 0,6 m<sup>3</sup>/s. El percentil 75 corresponde a 2 m<sup>3</sup>/s y el de 90 a 3,5 m<sup>3</sup>/s.

En la serie disponible se han detectado un total de 6 años secos, considerando como años tipo seco aquellos que presentan una aportación anual inferior al valor correspondiente al 25% de la probabilidad correspondiente a la función de distribución ajustada para la serie de aportaciones utilizada; 10 años húmedos, en los que el valor de la aportación anual registrada es superior al valor correspondiente al 75% de la probabilidad de la función de distribución ajustada para la serie de aportaciones utilizada y 15 años medios en los que el valor de la aportación anual se encuentra comprendida entre los valores correspondientes al 25 y 75% de la función de distribución ajustada.

Se ha realizado un análisis de eventos tipo de descarga del manantial para diferentes episodios de funcionamiento. En la figura 2 se muestra la forma de un hidrograma típico de la descarga del manantial ante un evento fuerte de precipitación. Esta figura da una idea de la dificultad de regular los caudales drenados por el manantial, tanto por razón de su magnitud como por la poca duración de los mismos. Este aspecto es muy importante de cara al diseño de la instalación de recarga artificial.

Por tanto, los caudales potencialmente aprovechables para la recarga artificial del acuífero de Crestatx son los que se muestran en la tabla 1, haciendo la salvedad de que hay que respetar el caudal ecológico necesario para el mantenimiento de la Albufera de Alcudia. Los caudales ecológicos no han sido definidos hasta ahora, ni en el Plan Hidrológico de las Islas Baleares ni en estudios previos. Por tanto, su estimación es uno de los pasos previos pendientes al diseño final de la instalación.

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
1976-77	5,82	0,61	0,00	2,71	0,37	0,13	0,11	2,15	2,46	0,28
1977-78	0,00	0,29	3,18	10,60	2,61	2,81	4,09	2,05	0,52	0,23
1978-79	11,68	0,72	1,96	0,43	1,05	10,54	1,05	0,39	0,15	0,00
1979-80	1,71	0,26	11,31	13,13	1,98	1,99	1,22	2,13	0,42	0,12
1980-81	0,00	0,10	2,14	4,02	0,36	0,24	3,78	0,85	0,38	0,00
1981-82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,84	0,26	0,00	0,00	0,00
1982-83	0,60	0,23	2,20	0,10	0,00	0,13	0,05	0,00	0,00	0,00
1983-84	0,02	0,00	0,00	0,15	0,37	1,92	0,05	0,10	0,00	0,00
1984-85	0,00	1,39	0,00	2,42	0,54	3,29	0,27	0,00	0,00	0,00
1985-86	0,00	3,42	1,25	1,30	3,71	0,90	0,62	0,15	0,00	0,00
1986-87	5,06	2,32	5,26	8,24	9,39	2,02	0,27	0,00	0,00	0,00
1987-88	0,00	0,72	2,29	0,90	0,68	0,18	1,14	2,39	0,22	0,00
1988-89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1989-90	0,00	0,00	0,66	2,22	1,07	0,27	0,73	0,00	0,00	0,00
1990-91	11,61	4,10	0,84	8,84	8,57	2,81	0,99	5,25	0,29	0,00
1991-92	0,00	0,00	0,00	1,89	0,03	0,00	2,56	0,83	0,00	0,00
1992-93	2,16	0,00	1,38	0,08	0,32	0,11	0,22	1,68	0,00	0,00
1993-94	0,00	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1994-95		1,16	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1995-96	0,00	1,16	1,42	0,00	0,52	0,91	1,51	0,21	0,74	0,00
1996-97		1,39	13,72	8,36	0,21	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
1997-98	0,87	2,73	7,53	5,87	7,37	4,69	0,00	1,35	0,00	0,00
1998-99	0,00	3,24	9,17	3,19	1,80	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00
1999-00	0,02	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000-01	0,89	0,26	0,03	0,90	0,70	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
2001-02	0,00	17,06	8,20	9,10	5,14	1,82	15,63	7,33	0,59	0,29
2002-03	0,58	5,50	5,06	4,31	10,42	4,13	1,50	0,27	0,00	0,00
2003-04	0,76	0,79	1,66	0,00	0,40	0,97	1,03	2,23	0,00	0,00
2004-05	0,00	3,62	9,94	0,79	0,80	2,64	0,00	0,00	0,00	0,00
2005-06	0,00	0,00	0,05	2,95	7,80	2,54	0,00	0,00	0,00	0,00
2006-07	2,02	0,00	10,64	1,88	0,30	3,59	6,47	0,39	0,11	0,00
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuartil 25%	0,00	0,05	0,01	0,13	0,26	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Promedio	1,51	1,71	3,22	3,06	2,15	1,62	1,41	0,96	0,19	0,03
Mediana	0,00	0,72	1,42	1,88	0,54	0,90	0,27	0,15	0,00	0,00
Cuartil 75%	0,89	2,10	5,16	4,17	2,30	2,59	1,18	1,52	0,19	0,00
DesvEstan	3,16	3,20	4,10	3,70	3,17	2,17	3,02	1,67	0,47	0,08
Máximo	11,68	17,06	13,72	13,13	10,42	10,54	15,63	7,33	2,46	0,29

Tabla 1. Aportaciones registradas en la estación de aforos 11/04  
 Table 1. Water inflow measured in 11/04 gauge station

Dado que uno de los condicionantes más importantes para la recarga artificial es el problema de la colmatación, y más en instalaciones de tipo pozo o sondeo, como las que se prevé construir para recargar este acuífero, se ha considerado de especial interés para este estudio comparar los valores de aportaciones proporcionados por los manantiales con su contenido en sólidos en suspensión. Para ello, y dado que no existen datos históricos sobre este parámetro,

se realizó una campaña de medidas durante el evento de descarga registrado durante los días 16 a 20 de abril de 2007, con objeto de correlacionar en la medida de lo posible el caudal con el contenido en sólidos en suspensión. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 2.

En total se tomaron 5 muestras. La distribución temporal de las aportaciones descargadas por el manantial durante el episodio estudiado, de 4 días de

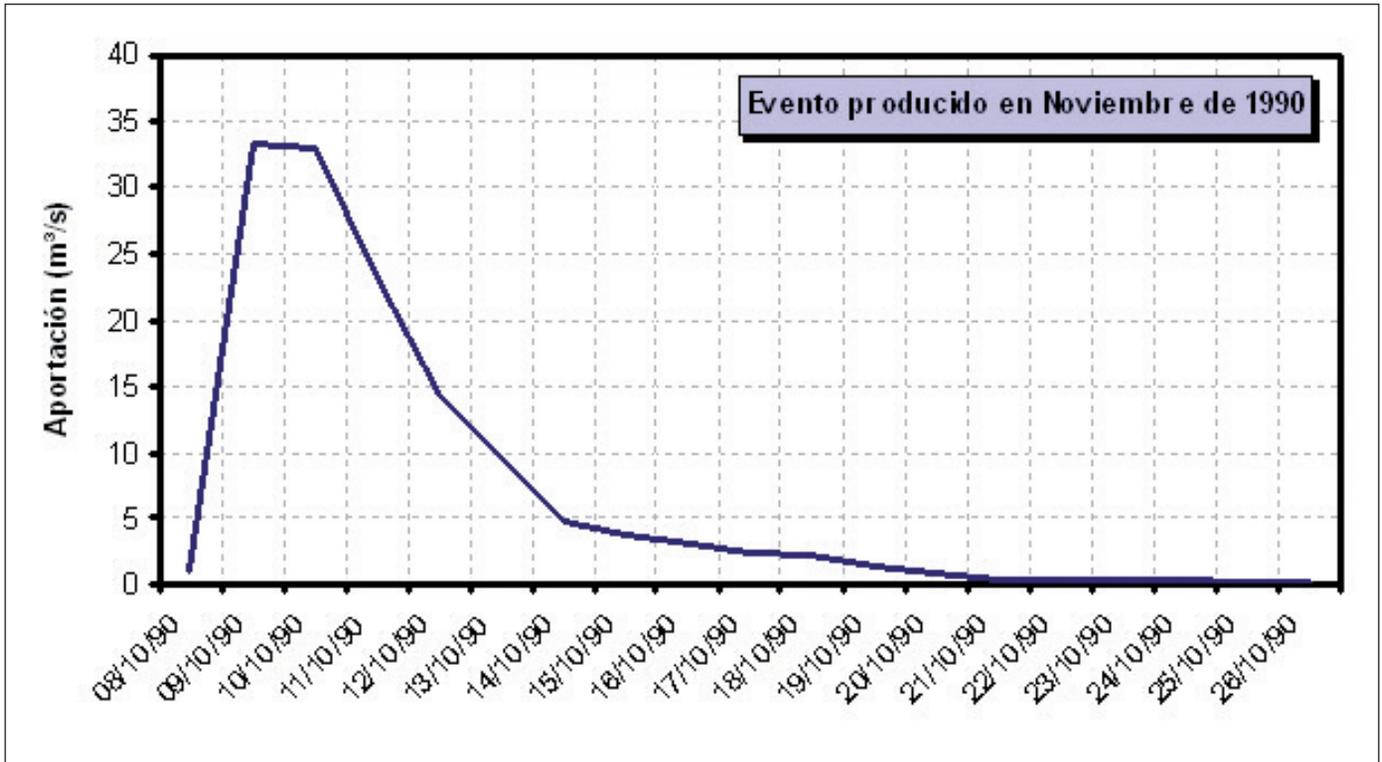


Figura 2. Hidrograma típico de un evento de descarga de las fuentes Ufanes de Gabellí  
 Figure 2. Typical hydrograph of a discharge event of Ufanes de Gabellí springs

FECHA	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN mg/l	CAUDAL CIRCULANTE m³/s
16/4/07	12,4	10,25
17/4/07	3,9	7,86
18/4/07	1,5	5,6
19/4/07	1,8	4,42
20/4/07	0,9	3,52

Tabla 2. Contenido en sólidos en suspensión de las muestras tomadas en el torrente de San Miguel durante el evento del mes de abril de 2007

Table 2. Suspended solids contents in water samples taken in the San Miguel torrent during the discharge of april 2007

duración, muestra (figura 3) que el mismo corresponde a una única descarga que se atenúa en un espacio de 10 días, respondiendo perfectamente al modelo hidrogeológico de funcionamiento de las fuentes de las Ufanes.

Con estos datos, se ha construido una curva de regresión que relaciona el caudal con los sólidos en

suspensión para este evento concreto. La ecuación correspondiente a dicha curva de regresión corresponde a la siguiente ecuación exponencial (figura 4):

$$Ss=0,260e^{0,36338q} \quad (1)$$

Donde:

Ss es el contenido en sólidos en suspensión en mg/l y q es el caudal en m³/s circulante por el Torrent San Miguel a la altura de la estación de aforos 11/04

La extrapolación de esta ecuación a toda la serie histórica de aportaciones registrada en la estación de aforos 11/04 (octubre de 1967 y septiembre de 2007), permite generar una serie temporal sintética diaria de aportaciones de sólidos en suspensión. En general, la validez de esta extrapolación es discutible, puesto que se ha utilizado un único evento para extrapolar una serie de 31 años. Lo que ocurre es que ha habido que utilizar esta forma de trabajar puesto que solamente se dispone de la relación caudal-contenido en sólidos en suspensión para un único evento. Una vez generada esta serie sintética, aplicando la curva de regresión construida a la serie de aportaciones dia-

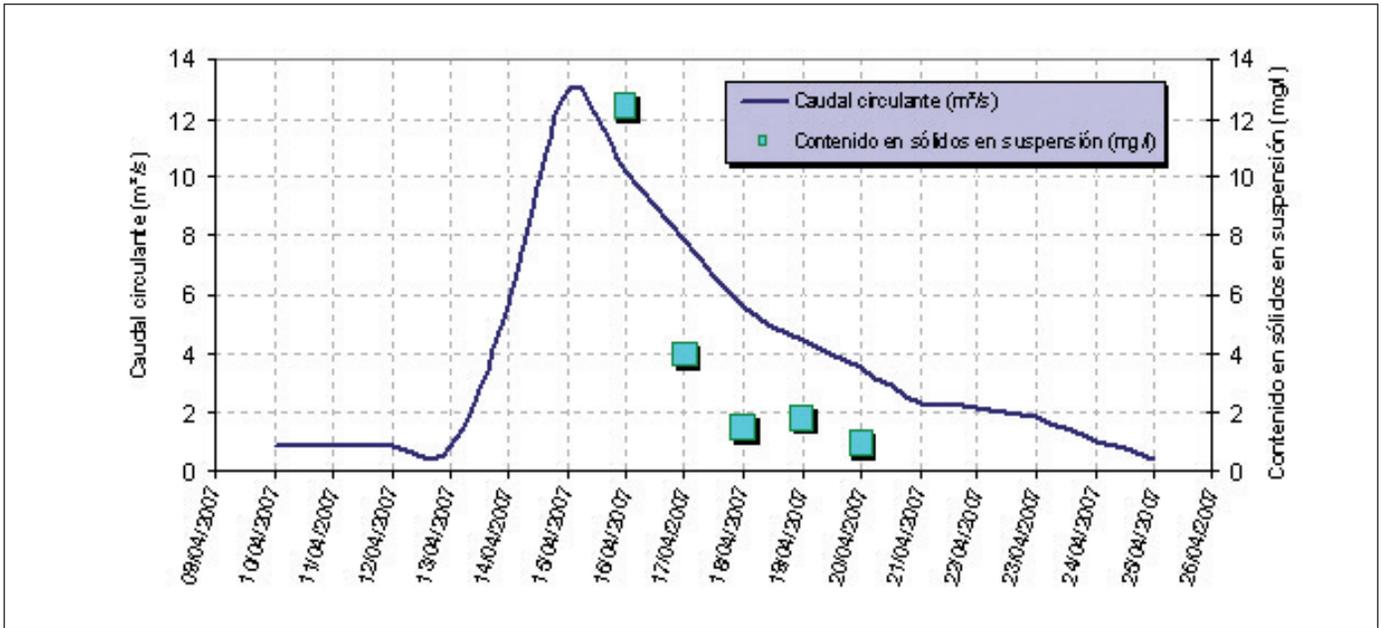


Figura 3. Caudal circulante en el Torrent San Miquel durante el episodio de descarga de abril de 2007 y contenido de sólidos en suspensión de las muestras  
 Figure 3. Water inflow of San Miquel torrent during the discharge event of april 2007, and suspended solids content of the water samples

rias del manantial Ufanes de Gabellí, se ha realizado sobre la misma un análisis estadístico cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

El análisis de la serie muestra que el contenido

medio en sólidos en suspensión es de 56 mg/l y el valor máximo de 47.891,5 mg/l, aunque es importante mencionar que este valor máximo extremo es consecuencia del carácter exponencial de la curva de

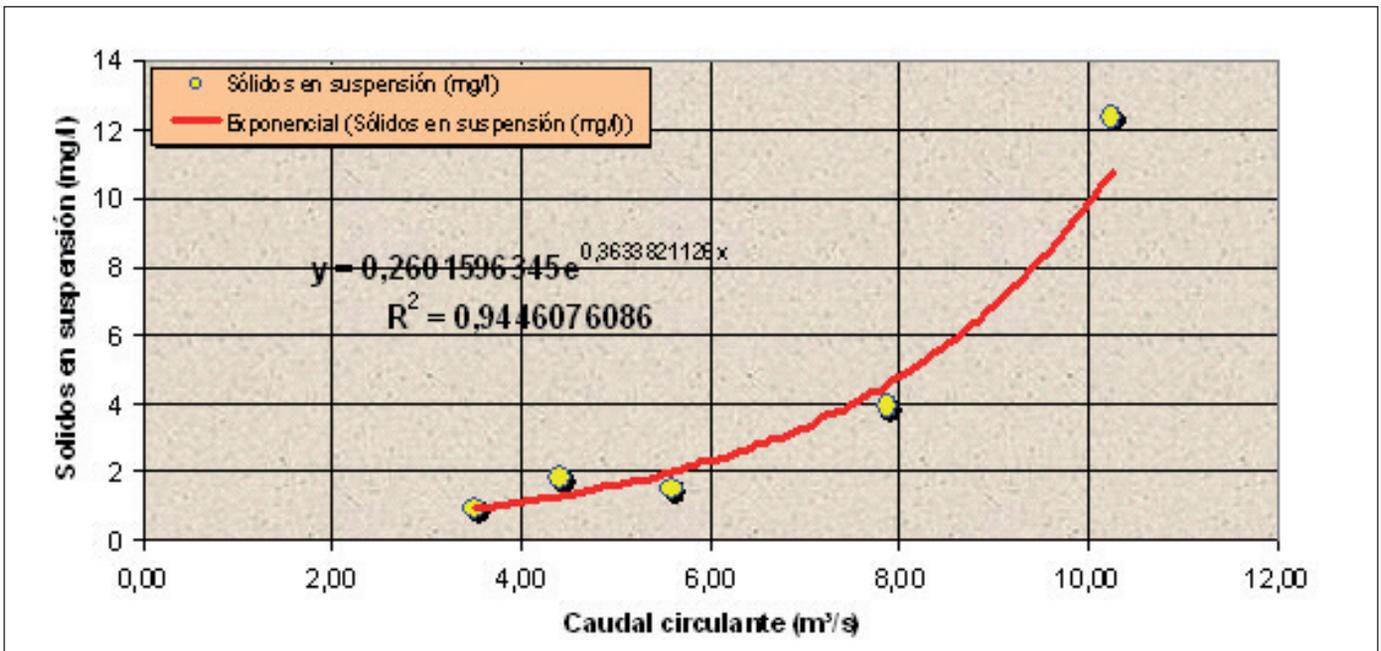


Figura 4. Curva de regresión caudal circulante vs contenido en sólidos en suspensión  
 Figure 4. Regression curve, water inflow vs. suspended solids content

Contenido en sólidos en suspensión (mg/l)	
Mínimo	0,26
Promedio	56,0
Máximo	47.891,5
Percentil 75	0,57
Percentil 85	0,71
Percentil 99	64,95

Tabla 3. Valores estadísticos de la serie sintética de contenidos en sólidos en suspensión

*Table 3. Statistic analysis of the synthetic sequence of suspended solids content*

ajuste empleada, de forma que como se observa en la tabla 3 el 99% de las muestras presentan un contenido en sólidos en suspensión por debajo de 64,95 mg/l, siendo este valor excepcional y relacionado con el mayor dato de aportación registrado en la serie, que fue de más de 30 m<sup>3</sup>/s. Estos valores no tienen demasiado sentido físico, ni pueden tomarse como condicionantes de la operación de recarga artificial. Lo único que indican es una operación matemática sobre una serie temporal de datos en la cual, los caudales máximos registrados presentarían una cantidad de sólidos en suspensión teórica como la que se muestra en la tabla 3. Esos caudales son excepcionales y, por supuesto, su aprovechamiento en la instalación de recarga artificial está totalmente descartado. Asimismo, el valor promedio está muy influenciado por estos valores máximos, con lo cual tiene poca representatividad del fenómeno físico que se está estudiando. Los valores más útiles de la tabla 3 son los percentiles, que sí dan una idea más aproximada de cómo se comporta el contenido de sólidos en suspensión en función del caudal circulante. En concreto, el análisis realizado indica que el 85% de los caudales circulantes presentan un contenido en sólidos en suspensión menor de 0,71 mg/l, que sí les hace perfectamente utilizables para la recarga artificial.

### **Diseño de la instalación de recarga artificial**

La localización prevista para la instalación de recarga es la zona en donde están actualmente las captaciones que se utilizan para abastecimiento urbano de la costa de la bahía de Alcudia. Los motivos de esta selección son fundamentalmente administrativos, ya que en esta zona se concentran las concesiones de explotación, y en la misma zona se autorizaría el

incremento de las mismas una vez recargado el acuífero. Serán por tanto los parámetros hidrodinámicos que definen el acuífero de Crestatx en esta zona (IGME, 2007) los que determinen los parámetros de diseño de la planta de recarga artificial. A continuación se incluyen las principales características hidrodinámicas del acuífero de Crestatx deducidas a partir de los resultados obtenidos en los estudios previos realizados por el IGME (IGME, 2008a; IGME, 2008b; IGME, 2006a):

- La unidad de Crestatx se comporta como un acuífero calcáreo único de funcionamiento libre y de permeabilidad secundaria por fisuración y karstificación.
- En planta, el acuífero se acuña hacia el norte, en las proximidades de Puig Son Vila, incrementando su anchura hacia el sur, ocupando una superficie aproximada de 6,3 km<sup>2</sup>.
- La cota del muro impermeable oscila entre un mínimo de 175 m, b.n.m. en la zona norte del acuífero, y un máximo de 800 m, b.n.m. en las proximidades del núcleo de población de Crestatx. (IGME, 2006). En el entorno donde está previsto ubicar la planta de recarga artificial el muro del acuífero se sitúa en torno a 700 m b.n.m.
- La dirección principal del flujo subterráneo es de oeste a este, hacia la mitad del límite este del acuífero, donde se localiza el cono de bombeo provocado por los sondeos de abastecimiento localizados en el núcleo de Crestatx y también hacia la unidad acuífera del Llano de Sa Pobla en contacto con el acuífero de Crestatx por el límite sur y sureste. (IGME, 2008b)
- La piezometría varía entre niveles superiores a 20 m s.n.m. en el límite oeste del acuífero y niveles inferiores a -20 m s.n.m. en la zona influenciada por los bombeos. (IGME, 2008b). En el entorno de la ubicación proyectada para la planta de recarga, la superficie piezométrica estaría comprendida entre valores de -10 y -20 m s.n.m y el espesor saturado entre valores de 680 y 690 m
- El gradiente hidráulico varía entre valores inferiores al 1% en la mitad occidental y valores superiores al 6% en la zona influenciada por los bombeos. (IGME, 2008b). La porosidad eficaz de las formaciones permeables se estima entre valores de 0,5 y 3%. (IGME, 2006a)
- De la interpretación de los ensayos de bombeo realizados en abril de 2007, sobre la formación de calizas y dolomías que constituyen el acuífero de Crestatx, en el entorno próximo donde se proyecta construir la planta de recarga, se obtuvo un valor de transmisividad del acuífero de Crestatx de 400 m<sup>2</sup>/d, lo que suponiendo un espesor saturado

de 685 m, supone valores medios de permeabilidad de 0,5 m/d (IGME, 2007).

- La explotación actual del acuífero se cifra en torno a 1-1,5 hm<sup>3</sup>/año. (IGME, 2008b)

El dispositivo de recarga que se propone para el acuífero de Crestatx consta de los siguientes elementos:

- Elementos de regulación y decantación
  - Embalse de regulación (Cantera de Coma S'aigua)
  - Dispositivo de decantación (humedal artificial)
- Elementos de conducción.
  - Captación
  - Conducción desde la captación al elemento intermedio de regulación
  - Aliviadero
  - Conducción desde el embalse de regulación hasta el dispositivo de decantación
  - Impulsión desde el dispositivo de decantación hasta la planta de recarga.
- Planta de recarga

- Sondeos de inyección
- Dispositivos de medida y control

En la figura 5 se muestra la localización, con base de fotografía aérea, de todos los elementos propuestos.

El dispositivo de recarga artificial diseñado constituye un sistema mixto, en el que se combinan infraestructuras hidráulicas superficiales y subterráneas, aprovechando de esta forma los factores positivos técnico-ambientales que proporcionan cada uno de los sistemas. Por un lado las infraestructuras superficiales permiten la captación, transporte y regulación de los recursos de una manera rápida y controlada, al mismo tiempo que se reutiliza un espacio medioambientalmente degradado, como es la cantera de Coma de S'aigua (figura 6) y se crea un humedal artificial que funciona como infraestructura de decantación, otorgando, de esta forma, un valor ecológico y social añadido al entorno. Por otro lado, la utilización de pozos de inyección permite reducir costes de inversión, al necesitar mucho menos suelo, muy caro

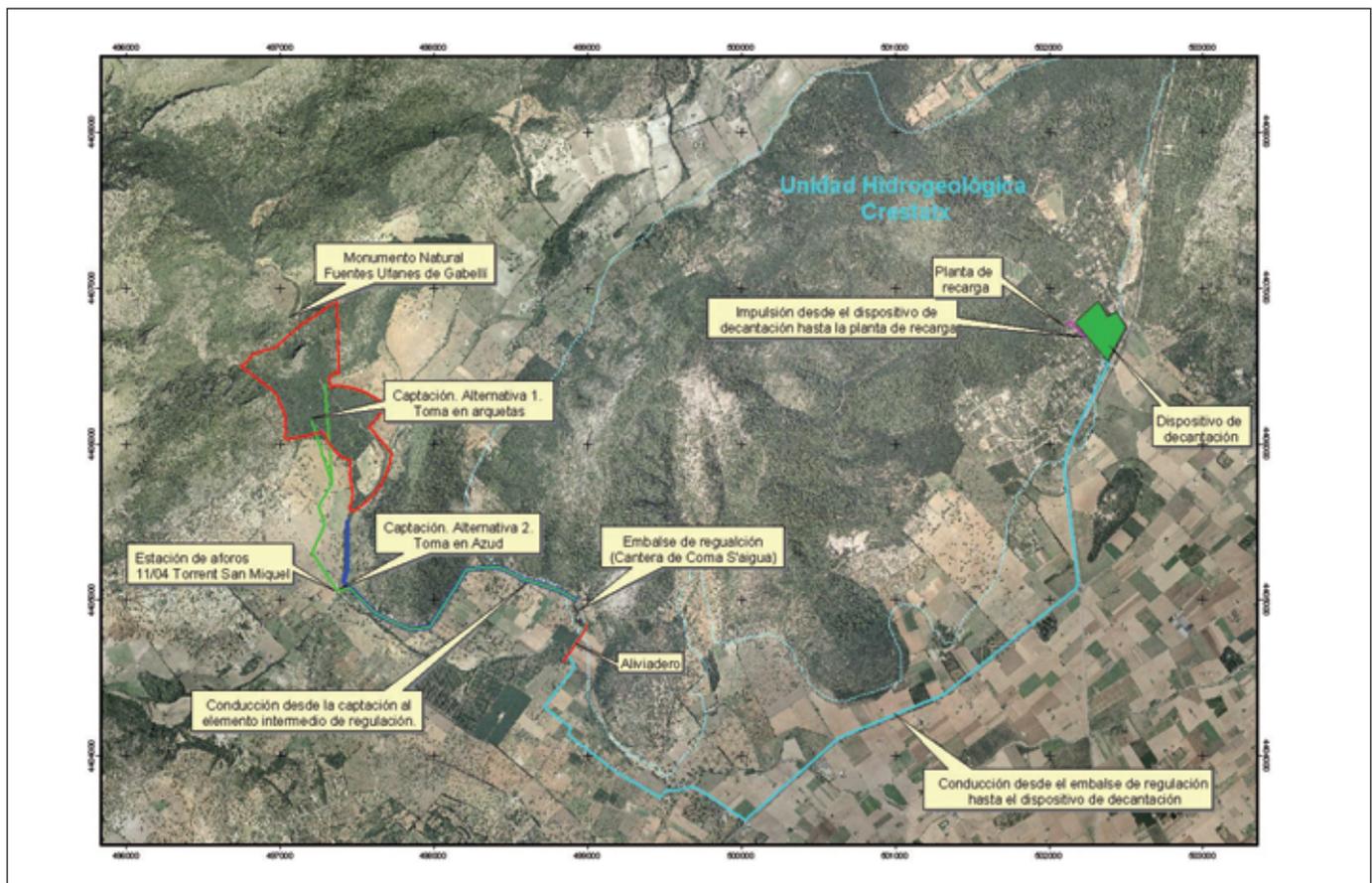


Figura 5. Localización de los elementos del dispositivo de recarga artificial propuesto  
*Figure 5. Location of all devices of the artificial recharge plant proposed*

en la isla de Mallorca, que las infraestructuras de recarga de tipo superficial.

El dimensionamiento de los elementos integrantes del dispositivo de recarga se ha llevado a cabo considerando distintas hipótesis o escenarios de trabajo en los que se ha contemplado, por un lado, los factores intrínsecos derivados de la naturaleza del acuífero receptor y del recurso a inyectar, descritos en los apartados anteriores, y por otro, la capacidad de regulación del sistema derivado de la capacidad de embalse del elemento regulador (Cantera de Coma S'aigua). A continuación se describen brevemente cada uno de los elementos considerados en la planta de recarga.

### Conducciones

Todas las conducciones, salvo el aliviadero del elemento de regulación, deberán ir instaladas en una zanja excavada de forma paralela al terreno con una profundidad media de 3 m. Los taludes de excavación de la zanja serán 1H: 5V, salvo en condiciones especiales en las que la falta de resistencia del terreno obligue a trabajar con taludes mayores. En los cruces con el Torrent de San Miquel, los taludes de excavación de la zanja serán 1H: 1V, y la tubería será cubierta de hormigón hasta una altura mínima de 30 cm por encima de la misma para evitar problemas de corrosión. El resto de la zanja será cubierta con áridos de granulometría gruesa.

Dentro de la zanja, las tuberías deberán apoyarse



Figura 6. Vista de la cantera de Coma de S'aigua, a utilizar como elemento de regulación y almacenamiento

Figure 6. Coma de S'aigua quarry. It will be used as regulation and storage device

sobre una cama de arena de 15 cm de espesor mínimo y estar recubiertas con material seleccionado hasta un mínimo de 15 cm por encima de la tubería. En los cruces con caminos y carreteras el recubrimiento de material seleccionado cubrirá la tubería, al menos, 30 cm. El resto de la zanja podrá ser cubierta con relleno ordinario. El ancho de la base de la zanja será 80 cm superior al diámetro de la tubería.

### Elemento de regulación. Cantera de Coma de S'aigua.

La cantera de Coma de S'aigua, en la actualidad inactiva, se localiza al este de las fuentes de las Ufanés de Gabellí en el municipio de Campanet. Se sitúa sobre los materiales carbonatados del Jurásico y durante su periodo activo se destinaba a la extracción de áridos. Estos materiales presentan un elevado grado de fisuración, condicionada por su génesis, incrementado por el método extractivo utilizado.

En el marco del presente estudio se ha valorado la utilización de la cantera Coma S'aigua como dispositivo de regulación. Como paso previo al análisis de la viabilidad de su utilización se consideró necesario abordar un estudio geotécnico para determinar la estabilidad de sus taludes y realizar un levantamiento topográfico de detalle de la cantera que permitiera cubicar con precisión la capacidad de almacenamiento de la misma (IGME, 2006b).

A partir del levantamiento topográfico de detalle de la cantera de Coma S'aigua se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) que ha permitido elaborar la curva de embalse de la cantera en el estado actual y conocer el volumen de embalse disponible en función de la cota de llenado hasta la cota de rebose natural. Asimismo, se proponen dos alternativas para incrementar el volumen de la cantera, basadas en la construcción de un muro en el borde sur de la misma. La primera de ellas considera construir un muro de 5 metros de altura, y la segunda, de 10. De esta manera, se podría incrementar al volumen de agua que la cantera es capaz de regular.

La cota de rebose, en el estado actual, correspondería a 41 m s.n.m, mientras que la cota del fondo de la cantera es del orden de 25 m s.n.m. Por otro lado, en los cálculos de regulación y en la estimación de la capacidad de embalse de la cantera es necesario tener en cuenta, a su vez, que en este tipo de infraestructuras de almacenamiento de agua se debe mantener un volumen mínimo de resguardo que garantice la seguridad y evite que se produzca el rebosamiento del embalse por la coronación, ante la posible generación de oleaje o ante eventos extraordinarios de precipitación, a pesar de que la entrada

de agua en el embalse desde la toma estará controlada.

La altura de resguardo ( $R_u$ ) se estima a partir de la expresión siguiente (Dal-Re Tenreiro, 2003):

$$R_u = R_{u1} + R_{u2}$$

Donde:

$R_{u1}$  corresponde a la altura máxima, en metros, de oleaje calculada mediante la expresión:

$$R_{u1} = 0,9 * F^{1/4}$$

Siendo  $F$  (Fecht) la longitud máxima de la lámina libre de agua estimada para la cota correspondiente al embalse lleno expresada en km.  $R_{u2}$  corresponde al 3% de la altura máxima, en metros, del embalse.

Los cálculos realizados indican que la altura de resguardo sería 1,1 m para la cantera sin recrecer; de 1,2 para la cantera con el muro de 5 m, y de 1,4 m para la cantera con el muro de 10 m.

De esta forma, el nivel máximo de embalse que se podría alcanzar en el estado actual de la cantera sería de 40 m s. n.m. Considerando que la cota mínima de embalse útil es de 25 m s.n.m, la capacidad de embalse máxima de la cantera de Coma de S'aigua en el estado actual sería de 42.080 m<sup>3</sup>.

La construcción de un muro de 5 metros por encima de la cota de rebose natural, supondría incrementar la capacidad de embalse en 58.024,5 m<sup>3</sup> (capacidad total de embalse de 100.105,366 m<sup>3</sup> y cota máxima de llenado de 44,8 m s.n.m.) y la construcción de un muro de 10 m de altura por encima de la cota de rebose natural, supondría un incremento de la capacidad de embalse de 175.178 m<sup>3</sup> (capacidad total de embalse de 217.259 m<sup>3</sup> y cota máxima de llenado de 49,6 m s.n.m).

También se ha estimado la evolución de la sedimentación en el fondo de la cantera con el objetivo de analizar la disminución de la capacidad de embalse como consecuencia de la deposición de los sólidos en suspensión aportados por el agua procedente de las Fuentes Ufanes de Gabellí. Los cálculos realizados, siguiendo la metodología que se expone en el siguiente párrafo, muestran que el 2% del sólido en suspensión del agua procedente de las fuentes de las Ufanes, decanta en el embalse de regulación, lo que supone un promedio de 0,15 toneladas al año. Considerando una densidad media de las partículas sólidas de 2,65 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad para el lodo que se genera en el fondo a partir de las partículas decantadas del 30%, se estima que el volumen medio de lodos generado al año es de 0,072 m<sup>3</sup>. Para un

periodo de vida útil del dispositivo de recarga artificial de 15 años el volumen total de lodos acumulado en el fondo sería de 1,08 m<sup>3</sup>, lo que supondría una altura de la capa de lodos sobre el fondo del embalse de tan sólo 0,01 m. Por lo que se puede considerar que la pérdida de capacidad de embalse por este concepto es prácticamente nula.

#### *Elemento de decantación. Humedal artificial*

No existe unanimidad en el criterio respecto del contenido máximo de sólidos en suspensión en el agua admisible en instalaciones de recarga profunda. Peter Dillon (Dillon, comunicación verbal), considera que dicho valor puede ser muy variable, en función de la litología y tipología del acuífero receptor y fundamentalmente de la composición mineralógica y del estado físico en que se encuentra la materia en suspensión. En general dicho autor considera que se acepta comúnmente que no debe recargarse en sondeos agua con un contenido en sólidos en suspensión superior a 1 mg/l. Sin embargo, otros autores (Pyne, 1995), hablan de un contenido máximo de sólidos en suspensión a la entrada de los sondeos de recarga de 2 mg/l.

Para diseñar el elemento de decantación, el parámetro fundamental de diseño es el contenido en sólidos en suspensión, tanto a la entrada como a la salida. Con los criterios establecidos en el párrafo anterior, en este caso se ha dimensionado el elemento para que dicho contenido a la salida, y, por tanto, a la entrada de los sondeos de recarga, sea de 2 mg/l. Por tanto, se propone limitar la entrada en el sistema de recarga proyectado, de aquellos caudales con contenidos en sólidos en suspensión superiores a 2 mg/l, que serán desviados de los sondeos de recarga mediante los oportunos sistemas de control.

La sedimentación de partículas discretas no floculantes está regida por la acción de la gravedad y por tanto el tamaño de los dispositivos de decantación o balsas de sedimentación será aquel que permita que el tiempo de tránsito de la partícula entre el punto de entrada y el de salida sea superior al tiempo necesario para que la partícula se deposite en el fondo de la balsa de decantación.

La velocidad de sedimentación de la partícula ( $V_c$ ) puede calcularse utilizando la ley de Stokes a partir de la expresión:

$$V_c = \frac{g * (\rho - S) * d^2}{18\mu}$$

Dónde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la den-

sidad del fluido,  $S$  es la densidad de la partícula,  $d$  es el diámetro de la partícula y  $\mu$  es la viscosidad del fluido

El área transversal al flujo de la balsa de decantación ( $A$ ) requerida para que decanten todas las partículas de velocidad de sedimentación  $V_c$  o inferior para un caudal de entrada a la balsa  $Q$  se determina mediante la expresión:

$$A = \frac{Q}{V_c}$$

En el dimensionamiento de los sistemas de sedimentación no ha sido posible disponer de datos sobre el tamaño medio de las partículas en suspensión del agua procedente de las Ufanés, por lo que se ha considerado que el 100% de las partículas contenidas presenta el tamaño mínimo decantable (0,02 mm) y una densidad de partícula de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, a fin de considerar la peor de las situaciones posibles. La velocidad de sedimentación ( $V_c$ ) para la que se han dimensionado los dispositivos de sedimentación es, por tanto, de 0,01 cm/s. Esta simplificación ha sido

necesaria por la ausencia de datos disponibles acerca del tamaño y forma reales de los sólidos en suspensión del agua de las Ufanés.

Como caudal de entrada ( $Q$ ) en los dispositivos de sedimentación, se han tomado los caudales de inyección considerados en los escenarios de regulación definidos a partir de los resultados de un modelo matemático de flujo elaborado al efecto (IGME, 2009), que proporciona un caudal máximo recargable en el acuífero de 100 l/s.

Mediante el empleo de la curva sintética caudales-contenido en sólidos en suspensión generada a partir de la ecuación (1), se ha calculado que el caudal correspondiente a una carga de sólidos en suspensión de 2 mg/l es de 5,61 m<sup>3</sup>/s. De esta forma, cuando el caudal circulante sea superior a 5,61 m<sup>3</sup>/s se procederá al cierre de la válvula situada en la toma, evitando la entrada en la conducción hacia el embalse de regulación y permitiendo que circule por el torrente.

El agua captada, antes de llegar al dispositivo de decantación se almacena previamente en el embalse de regulación, donde experimentará un primer proce-

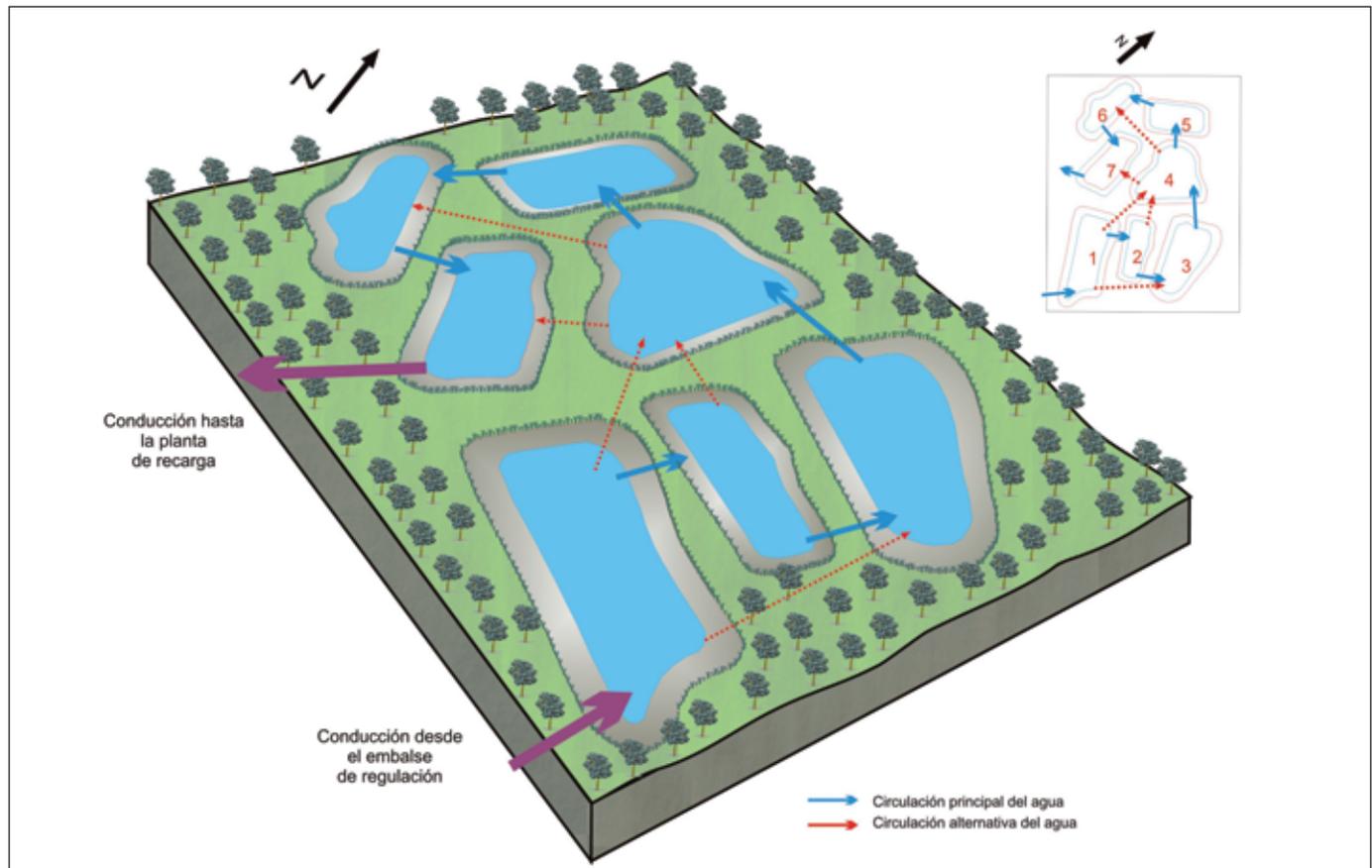


Figura 7. Humedal artificial propuesto como elemento de decantación previo a los sondeos de recarga  
 Figure 7. Artificial wetland proposed as decantation pond previous to recharge boreholes

DISEÑO DE BALSAS DE DECONTAMACIÓN (Caudal: 100 l/s)					
<b>Cálculo de la velocidad de partícula</b>					
Díámetro de partícula (mm)	0,02 mm				
Peso específico de partícula	2,6 gr/cm				
Velocidad de partícula	0,01 cm/s				
Velocidad de partícula	8,64 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d				
<b>Cálculo de la sección de entrada en la balsa</b>					
Caudal circulante	100 l/s				
Carga circulante	8640 m <sup>3</sup> /d				
Factor de seguridad	1				
Área para la decantación del 100%	1000 m <sup>2</sup>				
<b>Cálculo de la decantación en la cantera</b>					
Contenido en sólido disuelto inicial	2 mg/l				
Caudal circulante	3000 l/s				
Caudal circulante	259200 m <sup>3</sup> /d				
Factor de seguridad	1				
Área para la decantación del 100%	30000 m <sup>2</sup>				
Decantación en la cantera	0%				
Decantación en la cantera	0,000 mg/l				
<b>Cálculo de la decantación en el circuito de balsas de decantación</b>					
Contenido en sólido disuelto de entrada en la balsa	2,00 mg/l				
Contenido en sólido disuelto máximo permitido	1 mg/l				
Balsa	Ancho de entrada (m)	Profundidad Balsa (m)	Área (m <sup>2</sup> )	% de decantación	Material decantado (mg/l)
1	50	2,5	125	12,5	0,25
2	32,5	2,5	81,25	8,1	0,14
3	42,25	2,5	105,625	10,6	0,17
4	37,5	2,5	93,75	9,4	0,13
5	30	2,5	75	7,5	0,10
6	35	2,5	87,5	8,8	0,11
7	30	2,5	75	7,5	0,08

Tabla 4. Parámetros operativos del humedal artificial  
Table 4. Working parameters of the artificial wetland

so de decantación. La sección transversal del embalse de regulación, en el punto de entrada de la conducción, que discurre desde la toma a la cantera de Coma S'áigua, es de 672 m<sup>2</sup>. El caudal máximo de entrada en el embalse, de los considerados en los escenarios de regulación planteados, es de 3 m<sup>3</sup>/s (259200 m<sup>3</sup>/d) y la velocidad de decantación de las partículas considerada es de 0,01 cm/s (8,64 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d). A partir de la ecuación 2 se calcula que para que se produzca la sedimentación del 100% de las partículas sería necesario un área de entrada en la cantera de 30.000 m<sup>2</sup>. Dado que la sección transversal de entrada es de tan sólo 672 m<sup>2</sup> y considerando un contenido inicial de sólidos en suspensión es de 2 mg/l, se estima que el 2,24% del dicho contenido inicial de sólidos en suspensión en el agua procedente de las Ufanés se decanta en el embalse de regulación, lo que supone 0,045 mg/l.

Además de la recarga artificial del acuífero de Crestatx, el diseño de la instalación persigue también el objetivo de recuperar espacios degradados e integrar, en la medida de lo posible, los dispositivos del

sistema de recarga en el entorno. Por esta razón se ha proyectado un dispositivo de decantación que al mismo tiempo que cumple su finalidad técnica, permita crear un espacio natural que simule un humedal artificial constituido por un grupo de lagunas conectadas entre sí.

De esta forma se ha diseñado un sistema constituido por un total de 7 balsas de decantación, dispuestas tal y como se observa en los esquema de la figura 7. Los parámetros operativos del humedal artificial se muestran en la tabla 4. La altura máxima de la lámina de agua en cada balsa sería de 2,5 m y la altura total de la balsa de 3 m.

El fondo de las balsas se construirá con una inclinación de 0,5% con objeto de facilitar la evacuación total de agua, cuando sea necesario acometer tareas de limpieza del fondo o mantenimiento. El diámetro de las conducciones se corresponderá con los utilizados en la conducción desde el embalse de regulación hasta las balsas de decantación, dimensionados en función del caudal de infiltración de la planta de recarga. Las tuberías se colocarán en zanjas y con una pendiente mínima de 0,5% para garantizar la circulación por gravedad entre las distintas balsas. Estas tuberías dispondrán en su embocadura, situada en el interior de cada balsa, de un sistema de toma de agua constituido por un bulbo enrejillado o alcachofa, situado por encima del fondo de la balsa.

Además del circuito de conexión principal, las balsas de decantación estarán conectadas por un sistema alternativo que permitirá desconectar del circuito principal las balsas de forma independiente, lo que permitirá llevar a cabo la limpieza y mantenimiento de las balsas, sin necesidad de paralizar el proceso de recarga y permitirá utilizar circuitos alternativos con menor capacidad de sedimentación, cuando los valores de contenido en sólidos disueltos sean inferiores a los previstos en el dimensionamiento del sistema de decantación.

Las balsas de decantación se han situado sobre los materiales impermeables del Retiense. No obstante, para garantizar la impermeabilidad del dispositivo se recomienda, una vez terminada la excavación, compactar el terreno.

Como elementos de protección exterior se dispondrán losas de hormigón sobre el fondo de las balsas y de escollera de roca de 0,3 m de diámetro, en los taludes internos, los cuales serán excavados con pendiente 3H:1V. Las losas de hormigón en el fondo permitirán la entrada de maquinaria para llevar a cabo las tareas de limpieza y eliminación de los lodos del fondo, mientras que los laterales revestidos con escollera aportarán un aspecto más natural a las balsas de decantación.

Por otro lado, será necesario dotar las balsas de decantación de sistemas auxiliares de drenaje y de evacuación de gases que permitan mantener la estabilidad del vaso, evitando cambios de estado en las condiciones naturales del terreno que pudieran provocar deformaciones del terreno en la base y los taludes internos.

Las balsas estarán dotadas de una rampa de acceso de 4 m de ancho que permita la circulación de la maquinaria de mantenimiento y limpieza. El terraplén estará revestido por una capa de hormigón para facilitar el tránsito de la maquinaria.

Finalmente las balsas estarán dotadas de cuerdas anudadas de material resistente a las condiciones de intemperie y a las situaciones alternas de sequedad-humedad que faciliten la evacuación en caso de caída accidental.

### Sondeos de recarga

En el diseño de los sondeos de recarga artificial programada se ha considerado un caudal de inyección de 100 l/s que, como se ha señalado anteriormente, es el único que, según el modelo matemático elaborado, y dadas las condiciones hidrodinámicas del acuífero, es técnicamente viable.

La serie de caudales utilizada para simular los efectos de esta hipotética recarga artificial corresponde a los últimos 15 años de la serie de caudales disponible obtenida en el análisis de la capacidad de regulación de la cantera de Coma S'aigua.

Los parámetros hidrodinámicos utilizados en los cálculos proceden de los estudios previos realizados por el IGME (IGME, 2007) y se incluyen en la tabla nº 5

Los resultados obtenidos en los cálculos realizados para simular la hipótesis de recarga artificial ana-

Transmisividad	T	400	m <sup>2</sup> /d
Espesor saturado	H <sub>o</sub>	685	m
Porosidad eficaz	n <sub>e</sub>	0,02	
Difusividad	D	2,00E+04	m <sup>2</sup> /d
Profundidad del nivel estático	H <sub>po</sub>	50	m
Cota del emboquille	Z <sub>emb</sub>	35	msnm

Tabla 5. Parámetros utilizados en el cálculo de la batería de sondeos

Table 5. Parameters used for boreholes design

lizada muestran que será necesario construir un único punto de inyección, constituido por un sondeo principal y un sondeo auxiliar de 450 m de profundidad y con un diámetro de 600 mm. En las estimaciones realizadas, se ha considerado que el caudal de bombeo en las labores de limpieza es el doble que el caudal de inyección, esto es, 200 l/s y que estos bombeos de limpieza se llevarán a cabo cada 6 días de inyección, de forma que el volumen de limpieza supone un 33% del volumen de inyección total.

En la tabla 6 se incluyen los resultados de los cálculos realizados. Como se observa en dichas tablas, el total de días al año en los que es posible efectuar la recarga de 100 l/s, varía entre un mínimo de 17 días y un máximo de 216. El volumen inyectado al cabo de los 15 años de funcionamiento ha sido de 14,81 hm<sup>3</sup>, lo que supone una media anual de 0,98 hm<sup>3</sup>/año. El volumen de bombeos de limpieza sería de 4,48 hm<sup>3</sup>, lo que supone un promedio anual de 0,32 hm<sup>3</sup>/año.

En la figura 8 se muestra la evolución de los niveles piezométricos en el punto de inyección que se obtendría como respuesta ante las condiciones de inyección indicadas en la hipótesis de recarga. Las variaciones piezométricas oscilan entre una cota máxima del orden de 16,5 m s.n.m y una cota mínima del orden de -53 m s.n.m, siendo la variación específica máxima del orden de 1,7 m

Por último, se ha analizado la capacidad de regulación del sistema para la hipótesis de recarga artifi-

	Nº de días de inyección	Nº de días de limpieza	Volumen inyectado acumulado (hm <sup>3</sup> )	Volumen bombeado acumulado (hm <sup>3</sup> )
año 1	88	28	0,76	0,25
año 2	17	6	0,90	0,29
año 3	82	26	1,59	0,52
año 4	145	47	3,07	0,99
año 5	147	47	3,73	1,20
año 6	152	47	5,04	1,64
año 7	126	36	6,12	2,00
año 8	26	12	6,34	2,06
año 9	75	26	6,98	2,27
año 10	202	62	8,71	2,84
año 11	216	65	10,58	3,45
año 12	125	37	11,64	3,80
año 13	112	33	12,61	4,12
año 14	62	20	13,14	4,29
año 15	195	60	14,81	4,84

Mínimo	17	6
Promedio	118	37
Máximo	216	65

Tabla 6. Resultados de la simulación de la hipótesis de recarga considerada

Table 6. Results of the simulation of the artificial recharge hypothesis considered

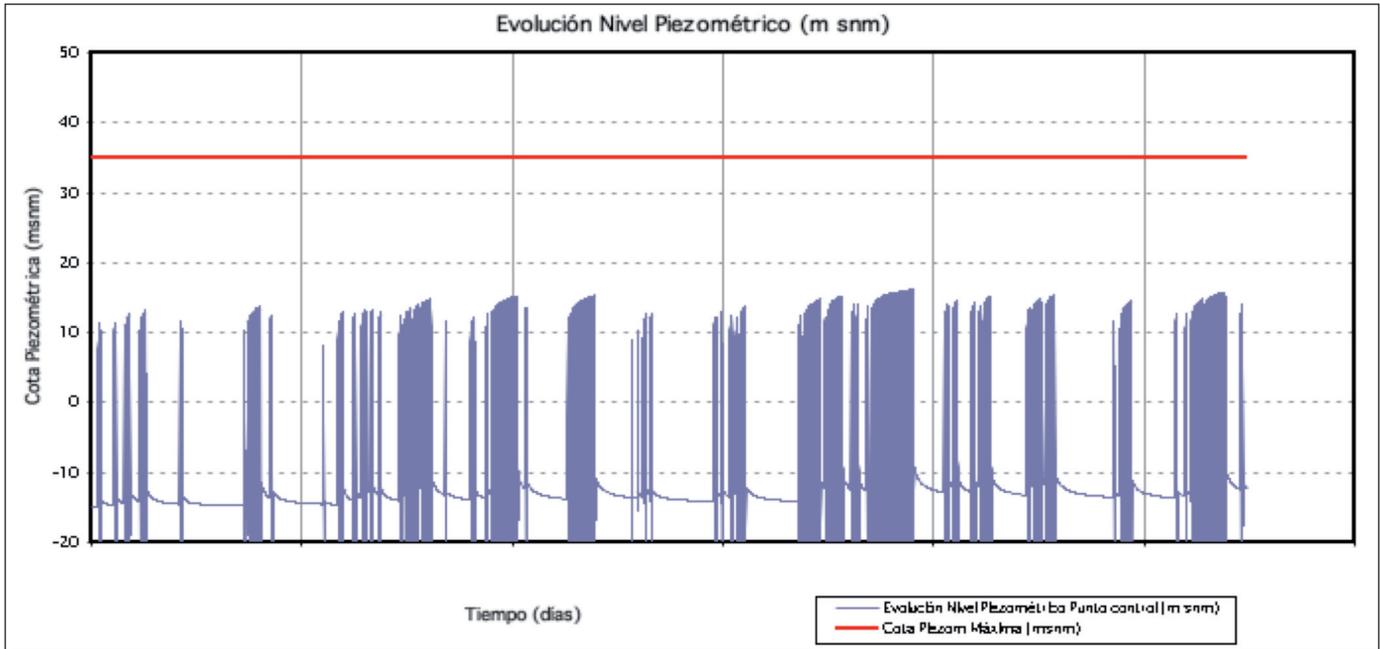


Figura 8. Evolución piezométrica en el sondeo de recarga bajo la hipótesis planteada  
 Figure 8. Piezometric evolution in the recharge borehole under the considered conditions

cial planteada, es decir, una capacidad del embalse de regulación de 0,042 hm<sup>3</sup> y un caudal de inyección de 100 l/s. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- volumen regulado: 1,14 hm<sup>3</sup>/año
- garantía de suministro del recurso en la planta de inyección: 36,4 %
- días de funcionamiento al año: 133

### Resumen y conclusiones

- Los problemas incipientes de contaminación por nitratos en el acuífero del Llano de Inca-Sa Pobra han concienciado a la administración pública del agua de la isla de Mallorca de la necesidad de sustituir parte del agua explotada de este acuífero por otra de mejor calidad, especialmente aquella parte que se dedica al abastecimiento urbano.
- Esta operación de sustitución de recursos pretende utilizar agua del acuífero de Crestatx, que se obtendría aumentando la explotación actual de dicho acuífero. Para hacer esta gestión sostenible, el acuífero de Crestatx debe ser previamente recargado artificialmente, para lo cual se pretende utilizar agua procedente de las descargas de las fuentes "Ufanes de Gabellí".

- Las fuentes Ufanes de Gabellí conforman la descarga natural de la masa de agua subterránea denominada "Ufanes". Su funcionamiento es típicamente kárstico, respondiendo rápidamente ante importantes precipitaciones y proporcionando elevados caudales en pocos días. Como media, existen entre 6 y 7 eventos de descarga anuales y los caudales medios anuales drenados por las fuentes, a tenor del análisis de los datos de la estación de aforos que mide los caudales circulantes por el torrente de San Miguel, aguas debajo de las ufanes, son de unos 16 hm<sup>3</sup>/año, lo que proporciona caudal suficiente para las operaciones de recarga artificial.
- Como condicionante para el cálculo de excedentes, es necesario rechazar todos aquellos caudales cuyo contenido en sólidos en suspensión sea tal que induzca problemas de colmatación en las instalaciones de recarga. Por ello, se ha truncado la serie de caudales poniendo como límite el contenido en sólidos en suspensión. De esta manera, los caudales disponibles disminuyen hasta algo menos de 6 hm<sup>3</sup>/año, pero aún así siguen siendo suficientes para plantear la recarga artificial.
- La planta de recarga propuesta estaría compuesta por los siguientes elementos: un embalse previo de regulación de caudales, el cual está previsto

que sea la cantera abandonada de S'aigua, previos los trabajos de acondicionamiento que sean necesarios; un elemento de decantación, que se ha diseñado en forma de humedal artificial para integrarlo en el entorno y disminuir los impactos medioambientales y sociales negativos; y un sondeo de recarga capaz de inyectar en el acuífero un caudal de 100 l/s.

- Los resultados obtenidos indican que el total de días al año en los que es posible efectuar la recarga de 100 l/s, varía entre un mínimo de 17 días y un máximo de 216. El volumen inyectado al cabo de 15 años de funcionamiento teórico simulado ha sido de 14,81 hm<sup>3</sup>, lo que supone una media anual de 0,98 hm<sup>3</sup>/año. El volumen de bombeos de limpieza sería de 4,48 hm<sup>3</sup>, lo que supone un promedio anual de 0,32 hm<sup>3</sup>/año.
- El análisis de la capacidad de regulación del sistema muestra que el volumen regulado es de 1,14 hm<sup>3</sup>/año, la garantía de suministro del recurso en la planta de inyección del 36,4 % y los días de funcionamiento al año 133.

## Agradecimientos

El presente artículo constituye una síntesis de los trabajos contemplados en el convenio de colaboración en materia de aguas subterráneas suscrito entre el IGME y la dirección General de Recursos Hídricos del Gobierno Balear. Los autores desean agradecer a D. Alfredo Barón, Cap de Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídricos de la Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears, por el asesoramiento que les ha prestado a lo largo de la realización del trabajo, que ha dado origen al presente artículo. Asimismo quieren agradecer el apoyo logístico que les ha prestado Rosa María Mateos y José María García López de la oficina del Instituto Geológico y Minero en Palma de Mallorca.

## Referencias

Boletín Oficial de las Islas Baleares. 2001. Decreto 11/2001 por el que se declaran Ses Fonts Ufanes monumento natural. Boletín del 11 de septiembre de 2001.

Custodio, E. 1986. Recarga artificial de acuíferos, avances y realizaciones. Boletín nº 45 del Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 134 pp y fotos.

Dal-Re Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-Prensa

DGOH-ITGE. 1988. Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas Baleares y

Síntesis de sus características. Dirección General de Obras Hidráulicas. 18 pp.

DGRHGIB. 2008. Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares (Versión 1.0). Programas de Actuación e Infraestructuras. Govern de les Illes Balears. Conselleria de Medi Ambient. Direcció General de Recursos Hídricos. Servei d'Estudis i Planificació. 104 pp

IGME. 1987. Localización de zonas preferenciales para la recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales en las islas Baleares. Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado. 157 pp.

IGME, 2006a. Cartografía geológica de la zona de Crestatx (Mallorca). Interpretación geológica e hidrogeológica de datos geofísicos (técnica magneto-telúrica). Informe interno. 18 pp y anexos.

IGME. 2006b. Estudio de estabilidad de taludes en la cantera Coma de S'aigua (Campanet, Mallorca). Informe realizado para el convenio con el Gobierno Balear. 58 pp y anexos.

IGME. 2007. Informe sobre el bombeo de ensayo realizado en el acuífero de Crestatx en abril de 2007. Informe realizado para el convenio con el Gobierno Balear. 44 pp.

IGME. 2008a. Estudio de viabilidad de la recarga artificial del embalse subterráneo de Crestatx con los recursos superficiales de las fuentes "les Ufanes de Gabellí". Informe realizado para el convenio con el Gobierno Balear. 116 pp y anexos.

IGME. 2008b. Establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero de Crestatx (Mallorca). Informe realizado para el convenio con el Gobierno Balear. 58 pp.

IGME. 2009. Modelo matemático del acuífero de Crestatx y simulaciones de alternativas de recarga artificial. Informe realizado para el convenio con el Gobierno Balear. En prensa.

ITGE. 1997. Estudio de viabilidad de recarga artificial de acuíferos a partir de cursos de agua superficial en la isla de Mallorca. Acuífero receptor y selección de emplazamientos favorables para realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos. Instituto Tecnológico y Geomínero de España y Direcció General de Régim Hidráulic del Govern Balear. Informe inédito. 78 pp.

López-García, J.M. y Mateos Ruiz, R.M. 2003. La intrusión marina en los acuíferos de la isla de Mallorca. Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos costeros: Países Mediterráneos. Instituto Geológico y Minero de España. Tomo I. 383-392.

Mateos, R.M. y López-García, J.M. 2001. Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos de origen agrario en las Islas Baleares. Comunicaciones I Congreso Balear 2015 Palma de Mallorca. ISBN 84-95352-73-7

MMA-IGME. 1997. Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización. Predefinición del programa de actuación: Baleares. Ministerio de Medioambiente e Instituto Geológico y Minero de España. 43 pp. <http://aguas.igme.es>.

SGOP-IGME-IRYDA. 1973. Estudio de los recursos hídricos totales de las islas de Mallorca e Ibiza. Informe de Síntesis General. Tomo I. Memoria. Servicio Geológico de

Obras Públicas, Instituto Geológico y Minero de España e Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario, 268 págs.  
Pyne, D. 1995. Groundwater recharge and wells. A guide to aquifer storage and recovery. 337 pp.  
Wallis, K. J.; Mateos, R. M.; Candela, L and Cepuder, P. 2007. Nitrate leaching investigation using experimental plots

in Sa Pobla, Majorca (Spain). Water Pollution in natural Porous media at different scales. Assessment of fate, impact and indicators, WAPO2. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. N° 22 : 557-563. Madrid.

Recibido: agosto 2009

Revisado: septiembre 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009

