

Ortuño Govern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España). *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250
ISSN: 0366-0176

La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga artificial en el acuífero del Llobregat (Barcelona, España)

F. Ortuño Govern⁽¹⁾, J.M. Niñerola Pla⁽¹⁾, J.L. Armenter Ferrando⁽²⁾ y J. Molinero Huguet⁽³⁾

(1) AGENCIA CATALANA DEL AGUA. C/ Provenza 204-208, E08036-Barcelona.
fjortuno@gencat.net

(2) AGUAS DE BARCELONA S.A. Torre Agbar, Avda. Diagonal 211, E08018-Barcelona.
jarmente@agbar.es

(3) AMPHOS XXI Consulting S.L., Passeig de Rubí 29-31, E08197-Vallldoreix (Barcelona).
jorge.molinero@amphos21.com

RESUMEN

El acuífero principal del Delta del Llobregat está afectado por procesos de intrusión marina desde 1970. Para detener su avance, la Agencia Catalana del Agua está llevando a cabo, entre otras acciones de recarga artificial en el acuífero, la construcción de una barrera hidráulica positiva mediante la inyección de agua regenerada tratada en 14 pozos. Es el primer proyecto de estas características que se realiza en España y pionero en Europa. La barrera eleva el nivel de agua del acuífero cerca de la costa y evita que el agua salada penetre tierra adentro, utilizando para ello agua regenerada de la EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) del Baix Llobregat (Barcelona) con tratamientos adicionales de ultrafiltración, ósmosis y desinfección. La primera fase lleva ya más de 2 años de funcionamiento con resultados altamente positivos, ya que se ha observado una mejora substancial de la calidad del agua subterránea en los pozos cercanos a los puntos de inyección y no han aparecido fenómenos de colmatación. La segunda fase está actualmente en construcción y se espera que esté operativa a finales de 2009.

Palabras clave: acuífero del Llobregat, agua regenerada, barrera hidráulica, intrusión marina, recarga artificial

Seawater intrusion barrier and artificial recharge in the deltaic Llobregat aquifer (Barcelona, Spain)

ABSTRACT

The main aquifer of the Llobregat Delta (Barcelona, Spain) is affected by seawater intrusion processes since 1970. The Catalan Water Agency is currently promoting several actions of enhanced aquifer recharge, including the construction of a positive hydraulic barrier in order to stop the advance of the seawater intrusion. Such a positive hydraulic barrier works by injecting reclaimed water in 14 wells. This is the first time that a project of this type is performed in Spain, and it is also pioneer in Europe. The positive hydraulic barrier produces the rise of the groundwater head near the coast and avoids seawater penetration inland. The injected reclaimed water comes from the WWTP of the Baix Llobregat after passing through several treatments (ultrafiltration, osmosis and disinfection). The pilot phase of the project has been working during the last 2 years, showing highly positive results. Substantial improvement of the groundwater quality has been observed in wells surrounding the injection points and no clogging has been appeared. The second phase of the project is currently under construction.

Key words: artificial recharge, hydraulic barrier, Llobregat aquifer, reclaimed water, seawater intrusion

Introducción

Los acuíferos del Valle Bajo y Delta del Llobregat

Los acuíferos asociados al tramo bajo y delta del río Llobregat, situados al oeste de la ciudad de Barcelona (Figura 1), están considerados como una de las fuentes más importantes y estratégicas de recursos de agua subterránea dentro de las Cuencas Internas de

Cataluña, y especialmente en el ámbito urbano y metropolitano de Barcelona. Desde mediados del siglo pasado se utilizaron intensivamente sus recursos tanto para el abastecimiento de boca como para usos industriales, y debido a la proximidad del área metropolitana y a su capacidad de explotación hoy en día todavía son una importante fuente de suministro de agua.

El Delta del Llobregat se desarrolla al pie de la

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

Cordillera Litoral Catalana donde forma una llanura litoral encajada en depósitos heterogéneos. El delta es un ejemplo clásico en el que los procesos fluviales dominan a lo largo del cauce y en la desembocadura, pero los procesos costeros como tormentas y deriva litoral son los más importantes a lo largo de la costa. Está formado por sedimentos de origen fluvial provenientes de la erosión de las unidades geológicas que atraviesa el río Llobregat y sus afluentes, desde su

nacimiento, en el Macizo de Collado de Alp (Pirineo Oriental, a 150 km al norte de la ciudad de Barcelona), atravesando la Depresión Central Catalana, hasta finalmente atravesar la Cordillera Litoral Catalana para llegar al mar Mediterráneo. Los materiales detríticos de estas formaciones cuaternarias deltaicas, encajados en materiales que varían desde el Paleozoico hasta el Plioceno, son de edad Pleistocena a Holocena.

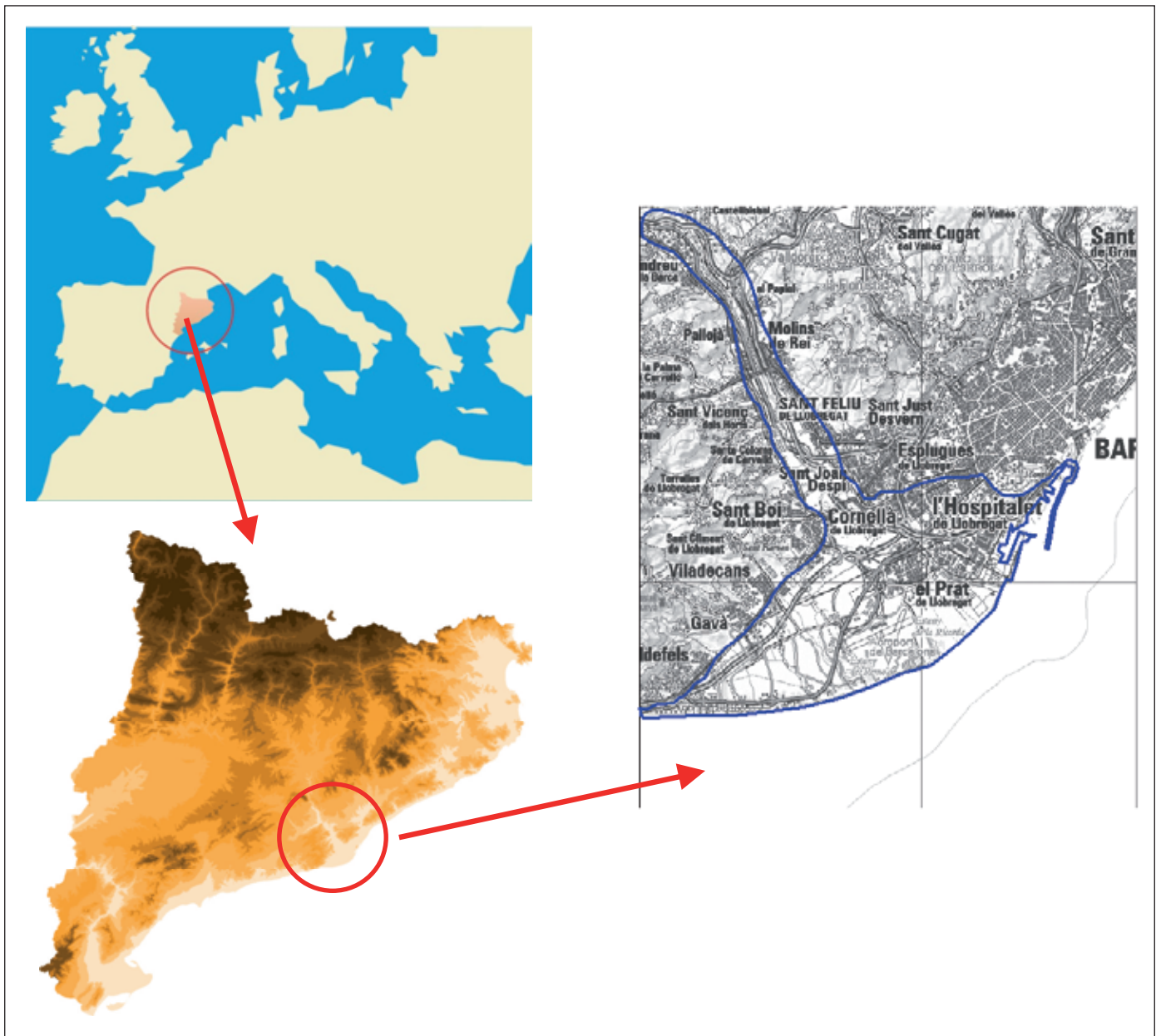


Figura 1. Situación de los acuíferos del Valle Bajo y Delta del Llobregat
 Figure 1. Location of the Llobregat valley and deltaic aquifers

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

La geología del delta se conoce bien desde mediados del siglo XX (Marqués, 1984; Simó *et al.* 2005). De manera genérica, y sin entrar al detalle de todas las secuencias estratigráficas deposicionales presentes en el delta y descritas actualmente (Gámez, 2007), se puede hablar de la presencia de una cuña de limos y arcillas que separa dos paquetes acuíferos de arenas y gravas: uno superior hasta cotas de -15 m por debajo del terreno actual y uno inferior de cotas de -55 a -70 m aproximadamente. Estos paquetes de arenas y gravas son lo que se conoce como *acuífero superior* y *acuífero principal* respectivamente. El *acuífero principal* es el de mayor importancia, el que concentra la mayor parte de las extracciones de agua subterránea, tanto para uso industrial como para uso de boca, y el

que está afectado por intrusión marina. Es un acuífero confinado en su mayor parte, aunque semiconfinado y libre en los bordes, y tiene transmisividades hidráulicas moderadamente elevadas (entre 1.000 y 5.000 m²/día, llegando incluso hasta 10.000 en algunas zonas).

La intrusión marina en el acuífero principal del Delta del Llobregat

El acuífero principal del Delta del Llobregat tiene un descenso piezométrico generalizado bajo el nivel del mar desde principios de los años 70, producto de la sobreexplotación. Ello ha comportado la aparición y el

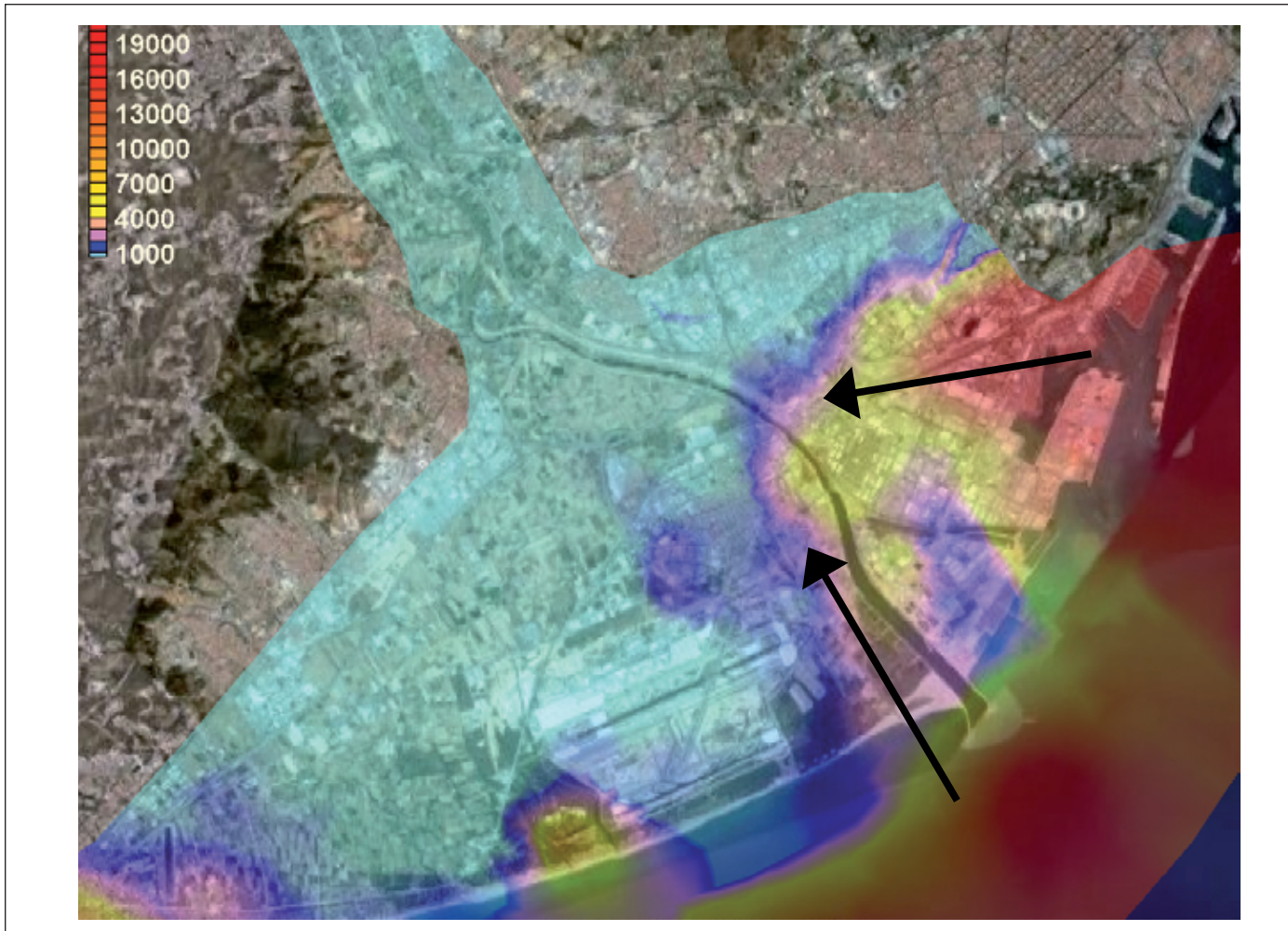


Figura 2. Concentración de cloruros en el acuífero principal del Llobregat en 2007 (datos de la Agencia Catalana del Agua). La intrusión marina afecta ya una tercera parte de la superficie del delta, y progresa desde el mar tierra adentro por el Puerto (al norte) y por la Ricarda (al Sur) en el sentido que indican las flechas

Figure 2. Chloride concentration in the Llobregat aquifer in 2007 (Catalan Water Agency). The seawater intrusion affects the third part of the deltaic area, and progresses inland in the direction indicated by the arrows

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

avance de la intrusión marina en el acuífero, facilitado también por las excavaciones de la capa impermeable de contacto entre el acuífero y el mar en el puerto, lo que ha originado un empeoramiento progresivo de la calidad del agua subterránea (Custodio, 1987; Custodio *et al.* 1976; Custodio *et al.* 1989; Iribar, 1992; Iribar, 1997). Las cuñas de intrusión marina (Figura 2) avanzan actualmente por la Dársena del Puerto en la Zona Franca y por la Ricarda, ocupando actualmente una tercera parte de la superficie del Delta.

Acciones de recarga artificial en el Llobregat

La recarga artificial en el Llobregat

Las extracciones de agua en el acuífero principal del Llobregat son actualmente de unos 55 hm³/año, cuando el valor sostenible para evitar el deterioro de la

calidad del agua subterránea en todo el acuífero puede situarse sobre los 40 hm³/año. Para paliar el déficit hídrico y recuperar el buen estado de la masa de agua subterránea, y de acuerdo con los mandatos que se derivan de la Directiva Marco del Agua, la Agencia Catalana del Agua está llevando a cabo toda una serie de acciones conveniadas con la Comunidad de Usuarios del Delta del Llobregat, la Entidad Metropolitana y la Sociedad General de Aguas de Barcelona. Estas acciones se muestran en la Figura 3, y son principalmente la realización de un Plan de Ordenación de Extracciones, la creación de una barrera hidráulica positiva para parar la progresión de la intrusión marina, y la construcción de balsas de infiltración. Aguas de Barcelona (Agbar S.A.) hace años que realiza también recarga artificial en este ámbito mediante el escarificado periódico del lecho del río y la inyección directa de agua potable en los pozos de Cornellá.

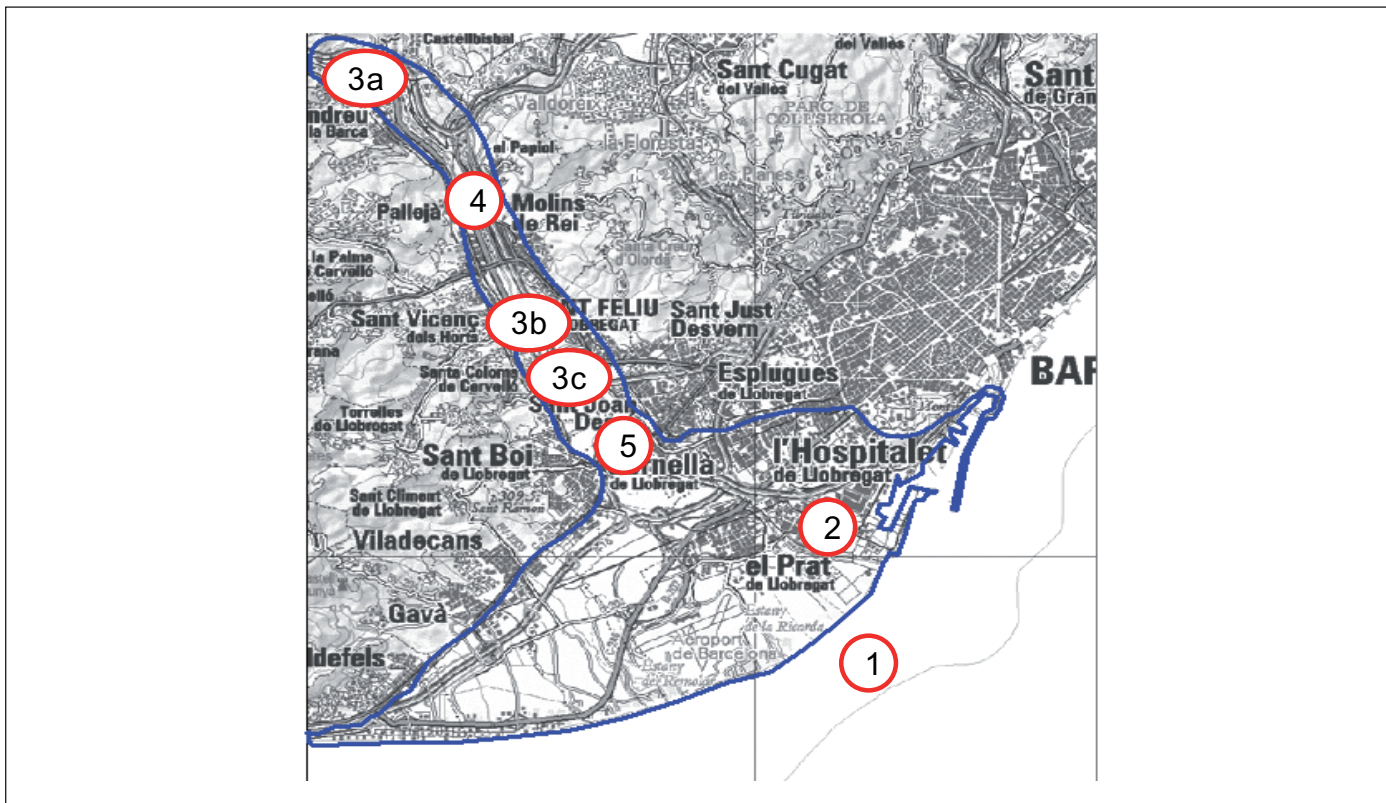


Figura 3. Acciones para la mejora del recurso y de la calidad del agua en los acuíferos del Valle Bajo y Delta del Llobregat. 1) Plan de Ordenación de Extracciones; 2) Barrera hidráulica contra la intrusión marina; 3) Balsas de recarga. 3a: Can Albareda; 3b: Sant Vicenç; 3c: Sta. Coloma); 4) Escarificado del lecho del río; 5) Inyección directa en los pozos de Cornellà

Figure 3. Actions for the improvement of the water resources and water quality in the aquifers of the Llobregat Low Valley and Delta. 1) Extractions arrangement; 2) Hydraulic barrier against the seawater intrusion; 3) Recharge ponds. 3a: Can Albareda; 3b: Sant Vicenç; 3c: Sta. Coloma); 4) Scarification of the river bed; 5) Injection wells of Cornellà

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

Escarificado del río

Aguas de Barcelona (Agbar S.A.), cuyos pozos de captación de agua del acuífero están situados en Cornellà, justo en la confluencia entre el Valle Bajo y el Delta, practica desde hace varios años el aumento de la recarga escarificando el río unos kilómetros aguas arriba de los pozos de captación. La escarificación (Figura 4) consiste en el arado del lecho del río Llobregat con la finalidad de romper la capa limosa que se deposita en el fondo, poniendo los limos en suspensión y dejando al descubierto las gravas del lecho. Con ello se aumenta temporalmente la capacidad de infiltración del río, que en este tramo es influente o perdedor, y el acuífero se recarga.

Para que el escarificado sea efectivo éste se realiza cuando el caudal del río Llobregat es superior a 10 m³/s. A partir de este caudal los limos de fondo que se ponen en suspensión fluyen aguas abajo y no se depositan inmediatamente de nuevo. No obstante, cuando el caudal es superior a 35 m³/s resulta ya peligroso para la maquinaria permanecer en el lecho fluvial. Otras condiciones que limitan el escarificado son la turbidez del agua del río (100 NTU), el amonio (1 mg/l) y los cloruros (350 mg/l), de manera que no se realiza la recarga cuando alguno de los valores supera estos límites.

Aunque no se dispone hasta la fecha de estudios específicos que permitan valorar la capacidad de infiltración de la escarificación, puede estimarse que ésta

se sitúa sobre los 40.000 m³/día. El coste del agua recargada mediante esta técnica podría situarse sobre los 0,02 €/m³, siendo una de las más efectivas y económicas.

Recarga mediante pozos en Cornellà

Algunos de los pozos de captación de agua de la sociedad Agbar S.A. también están equipados para inyectar agua en el acuífero proveniente de los excedentes de la planta potabilizadora. Agbar S.A. practica de esta manera la recarga artificial desde hace décadas, y aunque ahora los volúmenes de recarga son bajos, durante la década de los 90 llegaron a inyectarse entre 5 y 15 hm³ por año con el fin de incrementar las reservas, mejorar la calidad del agua del acuífero, elevar los niveles piezométricos y reducir los costes posteriores por el bombeo durante la captación. El número de pozos de extracción-inyección es de 12 siendo la capacidad máxima de recarga de 75.000 m³/día.

Balsas de recarga en el Llobregat

La Agencia Catalana del Agua está llevando a cabo 3 proyectos de construcción de balsas de recarga artificial en el Llobregat (Figuras 3 y 5): 1) las balsas de Can Albareda, en la Cubeta de Sant Andreu; 2) las bal-



Figura 4. Dispositivos de escarificado del lecho del río Llobregat para el aumento de la recarga al acuífero. El río en este tramo es influente
Figure 4. Scarification devices of the Llobregat river bed

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250



Figura 5. Balsas de recarga artificial en fase de construcción en el Valle Bajo del Llobregat y. Se muestran las balsas de Can Albareda (arriba, izq.), las de Sant Vicenç (arriba der.) y las de Sta. Coloma (abajo). El volumen total de recarga se estima que será de 6 a 10 hm³/año
Figure 5. Recharge ponds at the Llobregat Valley. The ponds of Can Albareda are shown (above, left), Sant Vicenç (above right.) and Sta. Coloma (down). The total infiltration volume will be from 6 to 10 hm³/year

sas de Sant Vicenç dels Horts, en el Valle Bajo; y 3) las balsas de Santa Coloma de Cervelló, cercanas a las anteriores. Los volúmenes de infiltración previstos son de 1,7 , 0,4 y 4.2 hm³/año respectivamente, lo que dará una capacidad total de recarga artificial mediante balsas de unos 6,3 hm³/año. Previsiones más optimistas sitúan la futura recarga sobre los 10 hm³/año. El agua de infiltración procederá del río Llobregat en las balsas de Can Albareda, pero también está previsto que las otras dos balsas puedan alimentarse con agua regenerada tratada de la EDAR de El Baix Llobregat. Su coste total de ejecución puede situarse sobre los 8 M€ aproximadamente.

Todos los proyectos se encuentran en fases de ensayos piloto, pruebas previas a su entrada en funcionamiento o redacción de proyecto constructivo,

esperando que se encuentren plenamente operativos en el 2011. Participan en ellos diversas entidades subscritas a un convenio para su financiación, construcción, puesta en marcha y explotación: la Agencia Catalana del Agua (ACA), la Comunidad de Usuarios de Aguas del Delta del Llobregat (CUADLL), Aguas de Barcelona (AGBAR), el Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de la Generalitat de Catalunya (DMAiH) y la Entidad de Medio Ambiente del Área Metropolitana de Barcelona (EMSHTR). Otras entidades también participan en proyectos específicos de investigación de recarga: el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), el Centro Tecnológico del Agua (CETAQUA), la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

El proyecto de barrera hidráulica contra la intrusión marina

La sociedad Depurbaix S.A., participada en un 85% por el Ministerio de Medio Ambiente y en un 15% por la Agencia Catalana del Agua, elaboró el proyecto constructivo para la fase piloto de una barrera hidráulica positiva contra la intrusión marina en el acuífero principal del Llobregat (Payá *et al.*, 2004). Esta primera fase está en marcha desde el mes de marzo de 2007 inyectando agua regenerada en el acuífero. Su explotación fue transferida en el año 2008 a la Agencia Catalana del Agua, y mantiene un caudal de inyección de 2.500 m³/día en tres pozos.

La segunda fase (Figura 6) está siendo ejecutada íntegramente por la Agencia y prevé la inyección de un caudal para la barrera de 15.000 m³/día con la construcción adicional de 11 pozos más de inyección y de 16 piezómetros de control específicos en el acuífero. Las obras de construcción fueron adjudicadas en abril de 2008, y se espera que la barrera esté plenamente operativa a finales del año 2009.

La barrera hidráulica ha de evitar la entrada de agua desde el mar hacia tierra y el deterioro del agua subterránea, mejorando la calidad del agua. El modelo numérico hidrogeológico del acuífero, elaborado por la Universidad Politécnica de Catalunya con el código VisualTransin (Vázquez-Suñé, 2006) indica que si no se ejecuta ninguna acción la intrusión marina

progresará y a un horizonte de 30 años ocupará la mitad de la extensión de todo el delta (Figura 7).

Características de la primera fase de la barrera hidráulica

Agua de inyección

El agua de inyección para la barrera hidráulica consistía inicialmente en un 50% de agua regenerada de la EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) del Baix Llobregat (Barcelona), mientras que el 50% restante era agua de red, de manera similar a como se realiza en California en el *Orange County Water District* o en el *West Basin Municipal Water District*. Por motivos económicos y de sostenibilidad ambiental, el agua potable de red fue rápidamente substituida por agua también regenerada, de manera que toda el agua de inyección proviene ahora de la EDAR del Baix Llobregat. Esto se extenderá también a la segunda fase, lo que con un caudal de inyección total de 15.000 m³/día supondrá un ahorro de 2,7 M€ anuales y una ganancia neta de recurso, ya que el agua de red es aquí agua subterránea que se capta en el mismo acuífero.

El agua procedente de la EDAR es sometida, después del tratamiento secundario, a tratamiento terciario, consistente en coagulación-floculación lastrada,

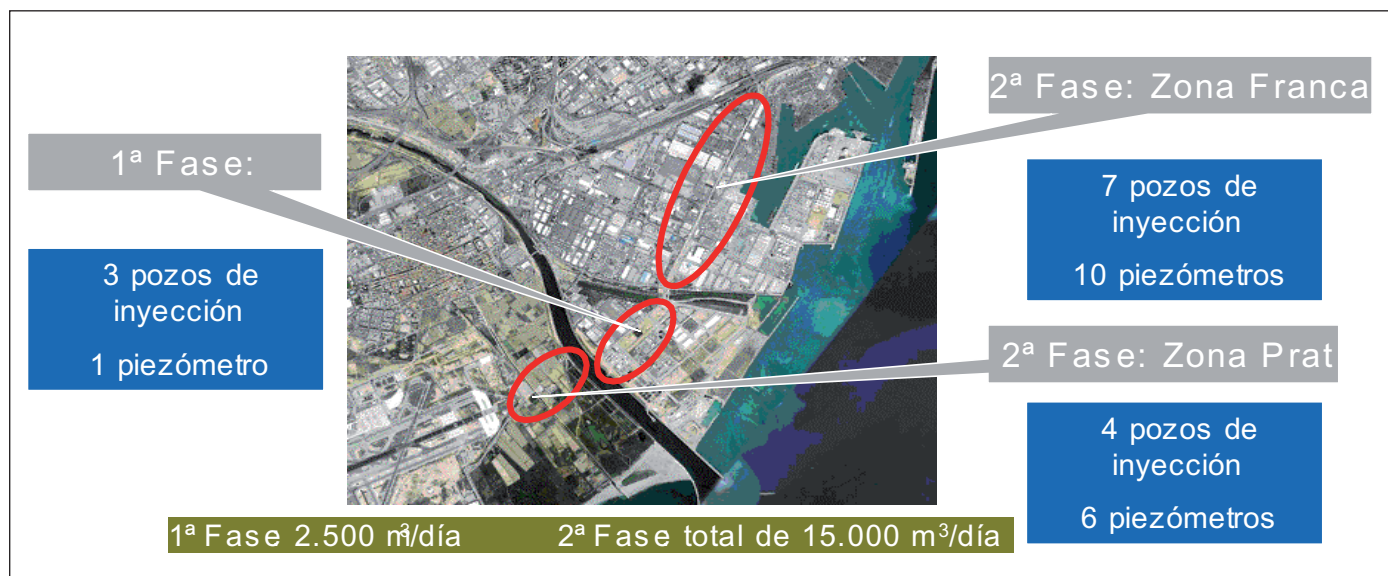


Figura 6. Situación de las fases del proyecto de barrera hidráulica. Se indican el número de pozos de inyección y de piezómetros de control para cada fase. La fase I lleva ya más de 2 años en funcionamiento y la fase II se espera esté operativa a finales de 2009

Figure 6. Location of the two phases of the hydraulic barrier project. The first pilot phase of the project has been working for 2 years. Phase II will be operative at the end of 2009

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

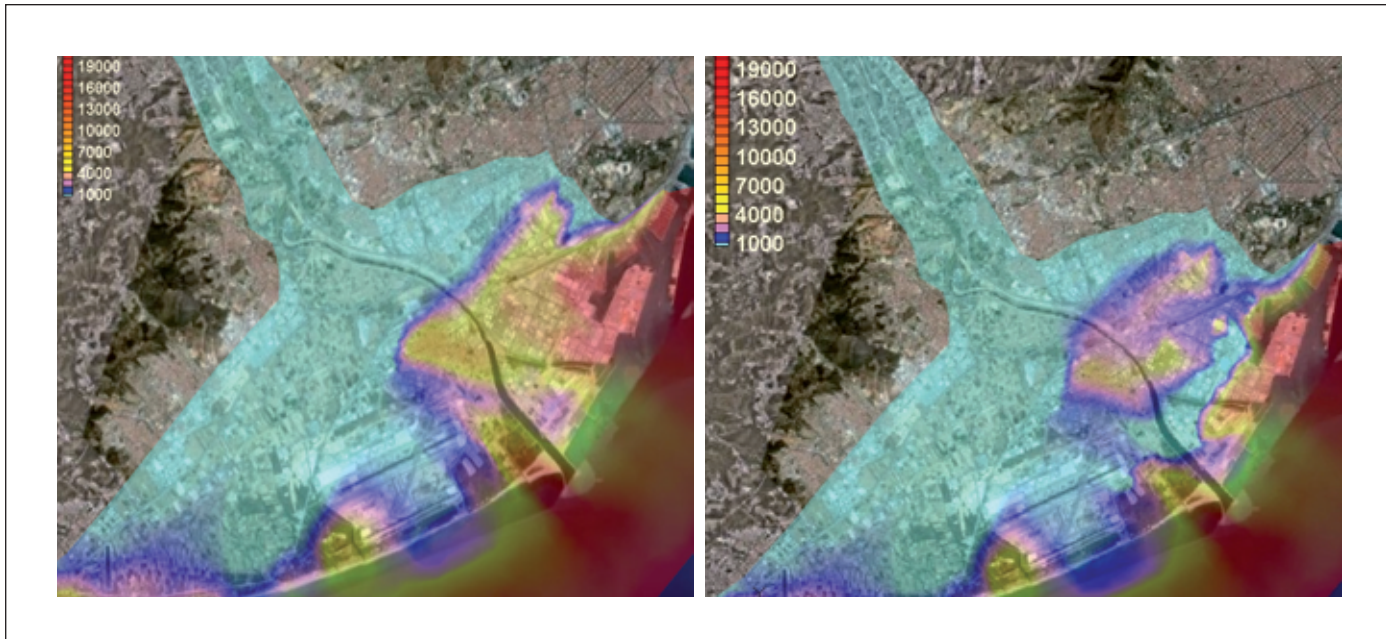


Figura 7. Simulación a 30 años de la progresión de la intrusión marina en el acuífero realizada con el código VisualTransin (UPC). A la izquierda sin ninguna medida correctora, y a la derecha incluyendo las balsas de recarga y la barrera hidráulica

Figure 7. Simulation of the progression of seawater intrusion in the aquifer after 30 years, carried out with the VisualTransin hydrogeological code (UPC). Left: without any action; right: including the recharge ponds and the hydraulic barrier

decantación lamelar, filtración y desinfección por UV y cloro. El tratamiento terciario, que produce en su conjunto algo más de 3 m³/s, se utiliza para contribuir al caudal ecológico del río Llobregat, para mantener algunas zonas húmedas cercanas, para regadíos, y también alimenta la planta de tratamiento para la barrera hidráulica (Cazurra, 2008). En esta planta se realizan los tratamientos avanzados adicionales de ultrafiltración, ósmosis inversa (al 50% del agua) y desinfección por UV, produciéndose un total de 2.500 m³/día que se distribuye a los pozos de inyección (Figura 8). Actualmente el agua se somete también a cloración antes de inyectarla, aunque ésta se eliminará en breve por sus potenciales efectos nocivos y por la posible aparición de trihalometanos en el acuífero.

Configuración de los pozos de inyección

Para la primera fase se perforaron y equiparon cuatro pozos de inyección, los cuales están situados a unos 1.500 m de la costa, dispuestos de manera paralela a ella y separados entre sí unos 300 m. Su situación es cercana a la planta de tratamiento del agua (Figura 9). Los pozos tienen unos 70 m de profundidad, y están enrejillados en su tramo final de aproximadamente 6 m en el acuífero principal. Los materiales del acuífero

son gravas y arenas finas, y en esta zona están bien confinados por un paquete de limos grises de unos 40 m de potencia. Los pozos están perforados a 610 mm de diámetro y entubados con acero inoxidable a 350 mm. Los cabezales son estancos y los pozos están equipados con caudalímetros, electroválvulas automáticas para mantener el caudal constante y un sensor de presión para controlar el nivel de inyección. Todo ello se controla de manera remota en la estación de la planta de tratamiento de agua de la barrera.

Debido a diversos problemas con las acometidas eléctricas a los pozos de inyección, tres de ellos están equipados con sistemas de limpieza de las rejillas por aire comprimido, mientras que el pozo P1 tiene instalada para ello una electrobomba sumergible. La limpieza es necesaria para evitar fenómenos de colmatación (*clogging*) tanto en la rejilla de los pozos como en las zonas adyacentes del acuífero, y se realiza periódicamente con la extracción de agua durante un corto periodo de tiempo a un caudal superior al de inyección. Las limpiezas se efectúan cada dos días en el pozo P1, semanalmente en el pozo P2 y cada dos semanas en el pozo P3. El pozo P4 no está en uso ya que tuvo que ser cementado por problemas con su sellado anular.

Los ensayos hidráulicos realizados con posteriori-

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

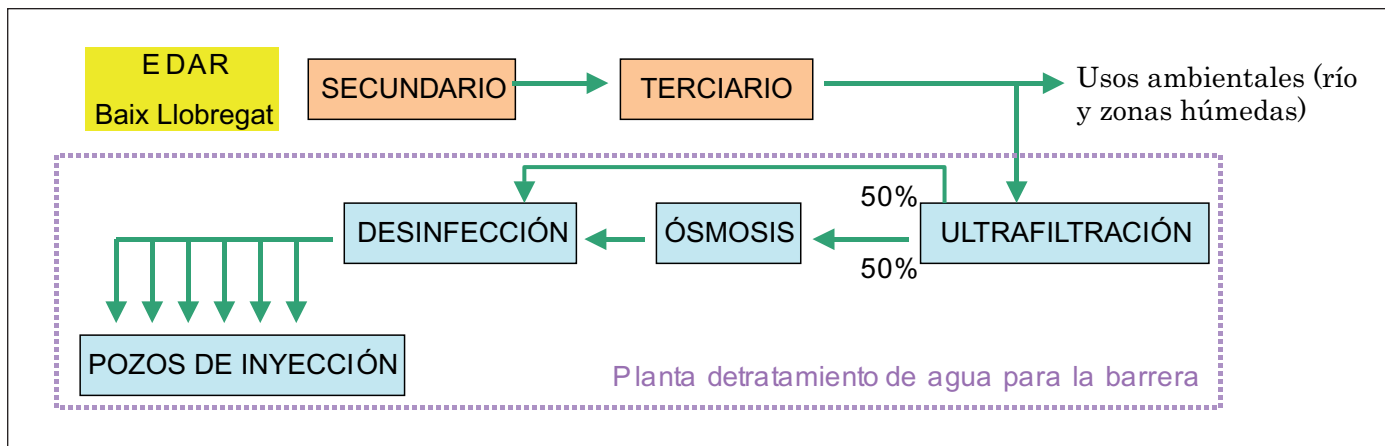


Figura 8. Tratamientos del agua previos a su inyección en el acuífero en la primera fase de la barrera. El agua proviene del efluente terciario de la EDAR de Baix Llobregat (Barcelona) y después de pasar por tratamientos avanzados de ultrafiltración, osmosis y desinfección se envía a los pozos

Figure 8. Water treatments previous to its injection into the aquifer. Water comes from the tertiary effluent of the Llobregat WWTP, and it is sent to the wells after passing through ultrafiltration, osmosis and disinfection treatments

dad a la perforación resultaron en que los pozos P1 y P3 son los más transmisivos (de 700 a 2.000 m²/día) mientras que los pozos P2 y P4 tienen una transmisividad hidráulica menor (de 100 a 200 m²/día).

Red de control de niveles, parámetros físico-químicos y muestreos del acuífero

La red de control en el acuífero está formada por todos los pozos y piezómetros en un radio menor a un kilómetro de los pozos de inyección. Tiene un total de 8 puntos. La localización de los mismos se muestra en la Figura 10. La cadencia de medidas y los parámetros que se controlan en ellos son los siguientes: Cada hora se registran automáticamente los niveles en los pozos de inyección, los caudales en cada pozo, los parámetros físico-químicos del agua de inyección y los niveles y conductividad en 3 piezómetros.

Semanalmente se realizan análisis del agua de inyección para su control bacteriológico (Colis totales, E. Coli y nemátodos) y físico-químico (DBO, DQO, fósforo total, nitrógeno total, cloruros, nitratos y TOC).

Mensualmente se hacen análisis del agua de inyección y de los puntos de la red del acuífero para su control en elementos mayoritarios y metales. Esporádicamente se realizan también otras determinaciones, como compuestos organohalogenados volátiles o análisis bacteriológicos. También se miden in situ mensualmente los parámetros fisicoquímicos

del agua en todos estos puntos (conductividad, Eh, pH y temperatura).

Resultados de la primera fase

Volumen de agua inyectado

La inyección de agua en el acuífero empezó el 26 de Marzo de 2007. La distribución inicial de caudales en los pozos de inyección fue realizada tomando como referencia la transmisividad obtenida de los ensayos de caracterización hidráulica que se ejecutaron después de la perforación de cada pozo, y a sus valores de conductividad eléctrica y cloruros. De esta manera, se decidió inyectar más agua en los pozos más transmisivos y más salinos.

Inicialmente la inyección se realizaba en los pozos P2, P3 y P4 pero éste último fue anulado y cementado en julio de 2007 porque presentaba deficiencias en su sellado anular. El pozo P1 entró en funcionamiento más tarde, en el mes de julio de 2008, una vez solucionados algunos problemas con el sistema de adquisición de datos y con los sistemas de limpieza.

Hoy en día la inyección se realiza en los pozos P1, P2 y P3 las 24 horas del día, lo que no era posible inicialmente por problemas técnicos. Desde su inicio se han inyectado cerca de 1.100.000 m³ de agua regenerada al acuífero, de los cuales un 21% ha sido en el pozo P1, un 16% en el pozo P2 y el 62% en el P3.

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250



Figura 9. Detalle de los pozos de inyección de la primera fase de la barrera hidráulica. Los pozos están equipados con controladores automáticos de caudal, sondas de nivel y electrobombas para la limpieza
Figure 9. Injection wells of the pilot phase of the hydraulic barrier. Wells are equipped with automatic controllers of flow, level sensors and electrical pumps for their cleaning

Calidad del agua de inyección

El contenido medio en cloruros del agua de inyección es de 347 mg/l, similar al que se encuentra en el acuífero en las zonas no afectadas por la intrusión marina. Dado que la salinidad del efluente terciario de la EDAR es alta, sobre los 640 mg/l de cloruros, se osmotiza el 50% del agua para conseguir un valor objetivo de concentraciones similar al del acuífero. Los bicarbonatos se sitúan en 170 mg/l, los nitratos en 5,8 mg/l, el potasio en 29 mg/l, el sodio en 169 mg/l, el calcio en 74 mg/l y el magnesio en 25 mg/l. En referencia a los metales presentes en el agua tan sólo hay que destacar el boro (141 mg/l), aluminio (37 mg/l), manganeso (24 mg/l), níquel (15 mg/l) y cinc (24 mg/l).

La conductividad eléctrica del agua está entorno a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el pH es siempre cercano a 7,4. La turbidez es inferior a 0,09 NTU, el TOC está en 4,9 mg/l, y la DBO y DQO por debajo de 10 y 30 mg/l respectivamente.

No han aparecido coliformes en ninguna de las 58 muestras analizadas semanalmente hasta la fecha. Desde agosto de 2008 también se analizan semanalmente *Escherichia coli* y nemátodos sin que se hayan detectado en ninguna de las 32 analíticas realizadas.

El cálculo de los índices de saturación del agua de inyección revela que está actualmente ligeramente sobresaturada en calcita, aunque no se ha observado ningún fenómeno de colmatación en los pozos de inyección ni disminución de su rendimiento hasta la fecha.

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

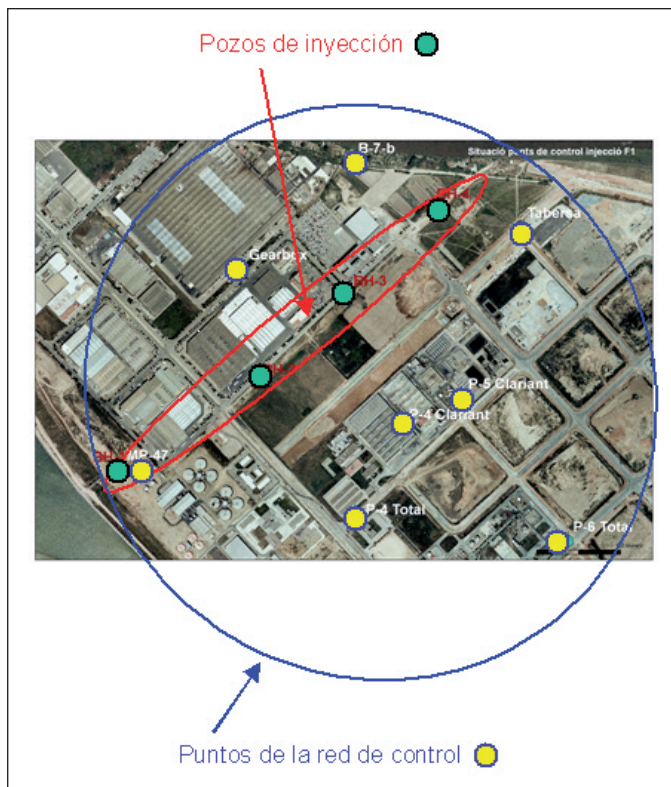


Figura 10. Situación de los pozos de inyección y de la red de control en el acuífero en la primera fase de la barrera hidráulica
 Figure 10. Location of the injection wells and the monitoring network in the aquifer for the pilot phase of the hydraulic barrier

Evolución de la calidad del agua en el acuífero

Globalmente el impacto de la barrera sobre el acuífero ha alcanzado a todos los puntos de observación de esta primera fase, y la magnitud de ello depende de la distancia a los puntos de inyección y de las características del medio subterráneo (Ortuño *et al.*, 2008). Los puntos de observación están situados a distancias de 250 a 800 m de los pozos de inyección, a excepción del piezómetro MP-47 situado a tan sólo 4 m del pozo de inyección P1 para observar fenómenos de colmatación (Pavelic *et al.*, 2007).

En los puntos de observación del acuífero la conductividad eléctrica ha disminuido claramente desde el inicio de la inyección del agua (Figura 11). Han disminuido las concentraciones de cloruro, sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfato y amonio, manteniéndose estables los bicarbonatos. Los nitratos han aumentado ligeramente ya que el contenido inicial en el acuífero es nulo y están presentes en el agua de inyección (5,8 mg/l).

El pozo industrial *Gearbox Prat*, situado a 257 m

del pozo de inyección P3, es donde los efectos de la barrera han sido mayores, bajando la conductividad progresivamente de 16.500 a menos de 2.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que representa pasar de contenidos en cloruros en el agua subterránea de 6.500 mg/l a menos de 680 mg/l.

Dado que la distribución de la salinidad en el acuífero no era inicialmente homogénea, también se han observado en otros puntos incrementos iniciales de la conductividad antes de su descenso, como es el caso del piezómetro *B-7-b*. Esto puede suceder si la salinidad del agua entre el punto de inyección y el de observación es más elevada que la de este último, ya que la inyección provoca el desplazamiento del agua más salina hasta el punto de muestreo, llegando más tarde el agua inyectada.

El impacto de la barrera es oxidante en un medio reductor, por lo que se están analizando las consecuencias que ello pueda tener en el acuífero, en especial la movilización de algunos metales. Actualmente se están realizando también estudios hidroquímicos de mezclas teóricas de aguas para identificar fenómenos de intercambio iónico, entre los que se han identificado la desaparición de potasio y el intercambio del sodio por calcio, siendo el principal problema la existencia de tres componentes de mezcla (agua de mar, agua del acuífero y agua de inyección). Los primeros resultados indican que los puntos de observación en el acuífero situados en el sentido de flujo pueden tener ahora entre un 75 a 90 % del agua de inyección (*Gearbox*, *B-7-b*), mientras que los situados más cercanos al mar pueden tener entre un 25% y un 40% del agua que se inyecta, lo que es coherente con el movimiento del agua y con el funcionamiento de la barrera.

La extensión del impacto en el acuífero provocada por la barrera puede estimarse mediante la diferencia de las concentraciones de cloruros de años consecutivos (Figura 12). Para este caso se han escogido las fechas de mayo de 2007 y mayo de 2008, cuando se muestrea, además de la red de control de la barrera, la red regional de observación de la Agencia en el delta del Llobregat y se tiene un mayor número de puntos. En base a ello, la mejora de la calidad del agua por la inyección de la barrera puede estimarse que ha llegado en un año hasta una distancia de 1 a 2 km de los pozos de inyección.

Evolución piezométrica en los puntos de inyección

El seguimiento del nivel piezométrico en los puntos de inyección ha sido en la práctica uno de los aspectos más problemáticos de la primera fase. Diversos

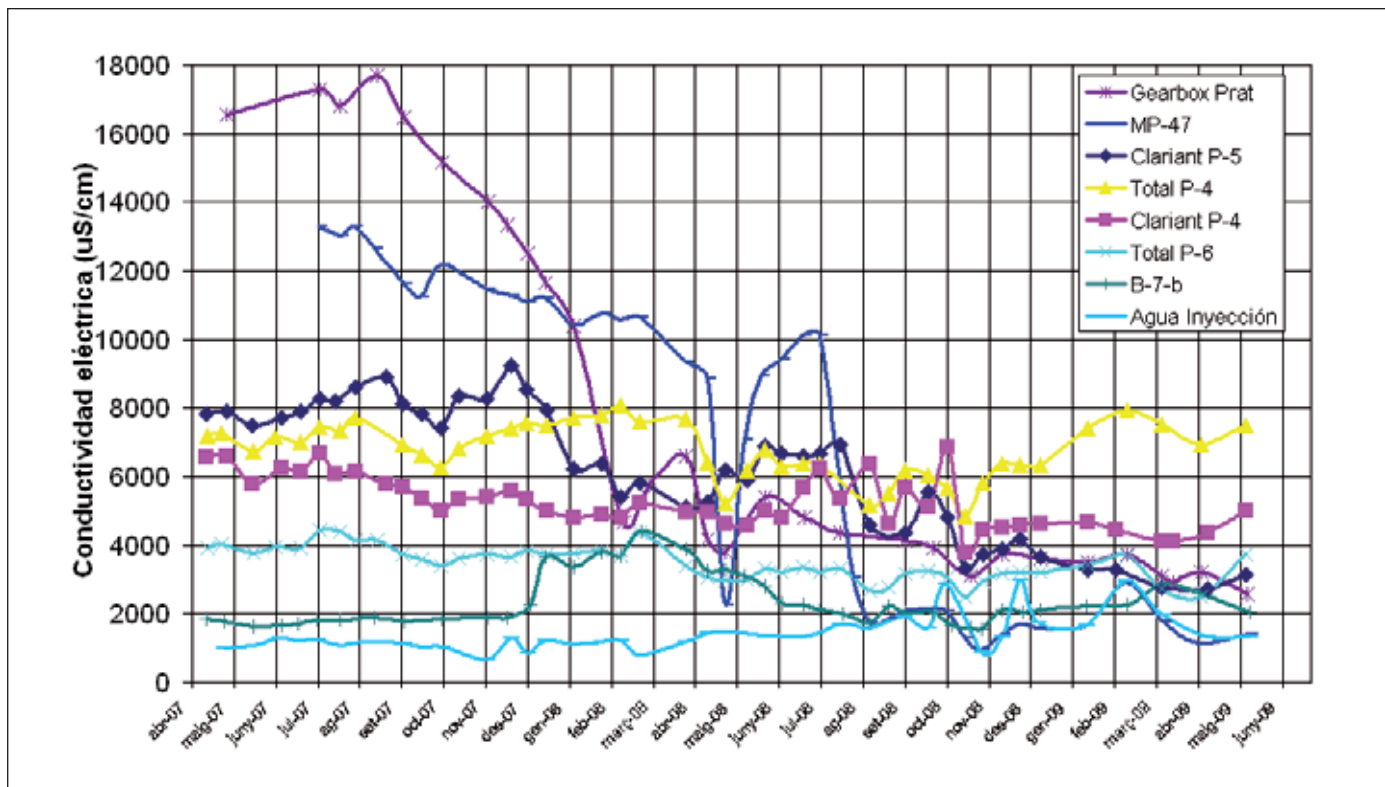


Figura 11. Evolución de la conductividad eléctrica del agua en el acuífero en los puntos de observación de la primera fase de la barrera hidráulica desde el inicio de la inyección. La salinidad ha disminuido en la mayoría de los puntos de control
 Figure 11. Evolution of electrical conductivity in the groundwater at the monitoring points since the beginning of the injection

problemas relacionados con el sistema de adquisición de datos y con la calibración de los sensores de presión de los pozos provocaron que no se tuvieran datos fiables y continuos de nivel hasta el 19 de Septiembre de 2007, casi 6 meses después de iniciarse la inyección.

La inyección en los pozos implica ascensos de nivel de 0,15, 0,58 y 1,68 m respectivamente para los pozos P1, P2 y P3, siendo los caudales de inyección constantes de 15, 20 y 68 m³/hora. De ello puede deducirse una relación caudal/ascenso de 2.400 m³/día para el pozo P1, 820 m³/día para el pozo P2 y de 1.190 m³/día para el pozo P3. Esta relación se ha mantenido estable desde que se tienen datos disponibles, lo cual indica que de momento no se están produciendo fenómenos de colmatación en los pozos. En ese caso el ascenso de nivel sería mayor para un mismo caudal de inyección y cabría esperar una disminución progresiva de su caudal específico.

Segunda fase de la barrera hidráulica

La segunda fase de la barrera hidráulica inyectará en

el acuífero 15.000 m³/día, que es el caudal mínimo que se estima necesario según los modelos numéricos para frenar en su totalidad la intrusión marina. Esta fase prevé la ampliación de la planta de tratamiento avanzado de agua del efluente terciario de la EDAR, la perforación y equipamiento de 11 nuevos pozos de inyección y de 16 nuevos piezómetros, y la ejecución de todas las conducciones necesarias.

Ya está en fase de pruebas la ampliación de la planta de tratamiento de agua que ha de permitir la obtención de 15.000 m³/día de agua regenerada ultrafiltrada y osmotizada (el 50%) a partir del terciario para su inyección en la segunda fase. Se han perforado ya y equipado con bombas de limpieza los 11 nuevos pozos de inyección, 4 en la Zona Prat y 7 en la Zona Franca. Los pozos están equipados con sistemas automáticos de control de caudal y con sondas de conductividad, temperatura y nivel que envían los datos de manera remota al centro de control. Igualmente se está acabando con la instalación de la tubería de distribución del agua a los pozos desde la planta de tratamiento de agua. Los 16 nuevos piezómetros de control ya están perforados, y han sido equipados también con sistemas automáticos de

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

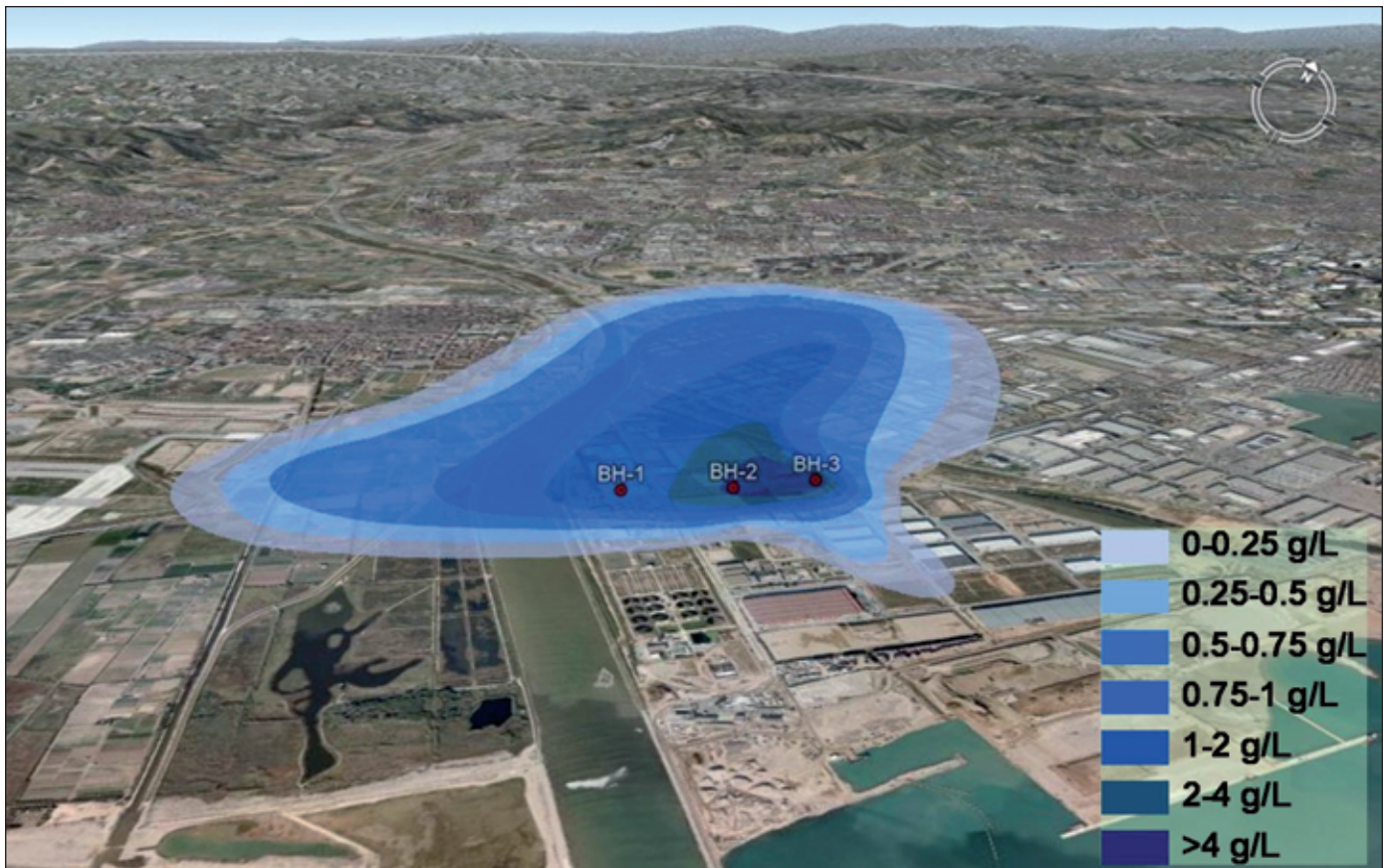


Figura 12. Impacto estimado de la barrera hidráulica en el acuífero del Llobregat a mayo de 2008. El mapa muestra las diferencias entre las concentraciones de cloruros de mayo de 2007 a mayo de 2008. El agua de la barrera puede haber llegado en un año a una distancia de 1 a 2 km de los puntos de inyección

Figure 12. Impact of the hydraulic barrier in the aquifer (May 2008). The map shows the differences between the chloride concentrations measured in May 2007 and in May 2008. The injected water has affected a distance of 1 - 2 km around the injection points in one year

toma y envío de datos de temperatura, nivel y conductividad del agua.

La red de control de la barrera contará con 51 puntos de control (Figura 13): 14 pozos de inyección, 17 piezómetros con seguimiento continuo y remoto de nivel, conductividad y temperatura, 12 pozos de industrias existentes, 7 piezómetros existentes de la Agencia, y el agua de inyección. Ya se han realizado las campañas de muestreo inicial en todos estos puntos. Se espera que la Zona Prat de la segunda fase esté operativa en septiembre de 2009 y que toda la barrera al completo pueda estar funcionando en diciembre de 2009.

Conclusiones

El acuífero principal del Valle Bajo y Delta del Llobregat está afectado por procesos de intrusión

marina desde 1970. La sobreexplotación histórica de los recursos hídricos subterráneos, junto a la excavación de parte de la capa confinante, han facilitado el empeoramiento progresivo de la calidad del agua subterránea. El acuífero es estratégico para el abastecimiento a la ciudad de Barcelona, ya que se utiliza tanto para uso de boca como industrial, y tiene ya salinizada una tercera parte de la superficie del delta. Las extracciones suman aproximadamente unos 54 hm³/año, cuando el valor sostenible para evitar el deterioro de las aguas subterráneas puede estar sobre los 40 hm³/año.

Para paliar el déficit hídrico, la Agencia Catalana del Agua, junto con las administraciones del ámbito, Agbar S.A. y la Comunidad de Usuarios, está llevando a cabo diversas acciones de recarga artificial. En el Valle Bajo se están ejecutando balsas de recarga en tres zonas que supondrán un total de infiltración de 6 a 10 hm³/año, y Agbar practica también el escarifica-

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

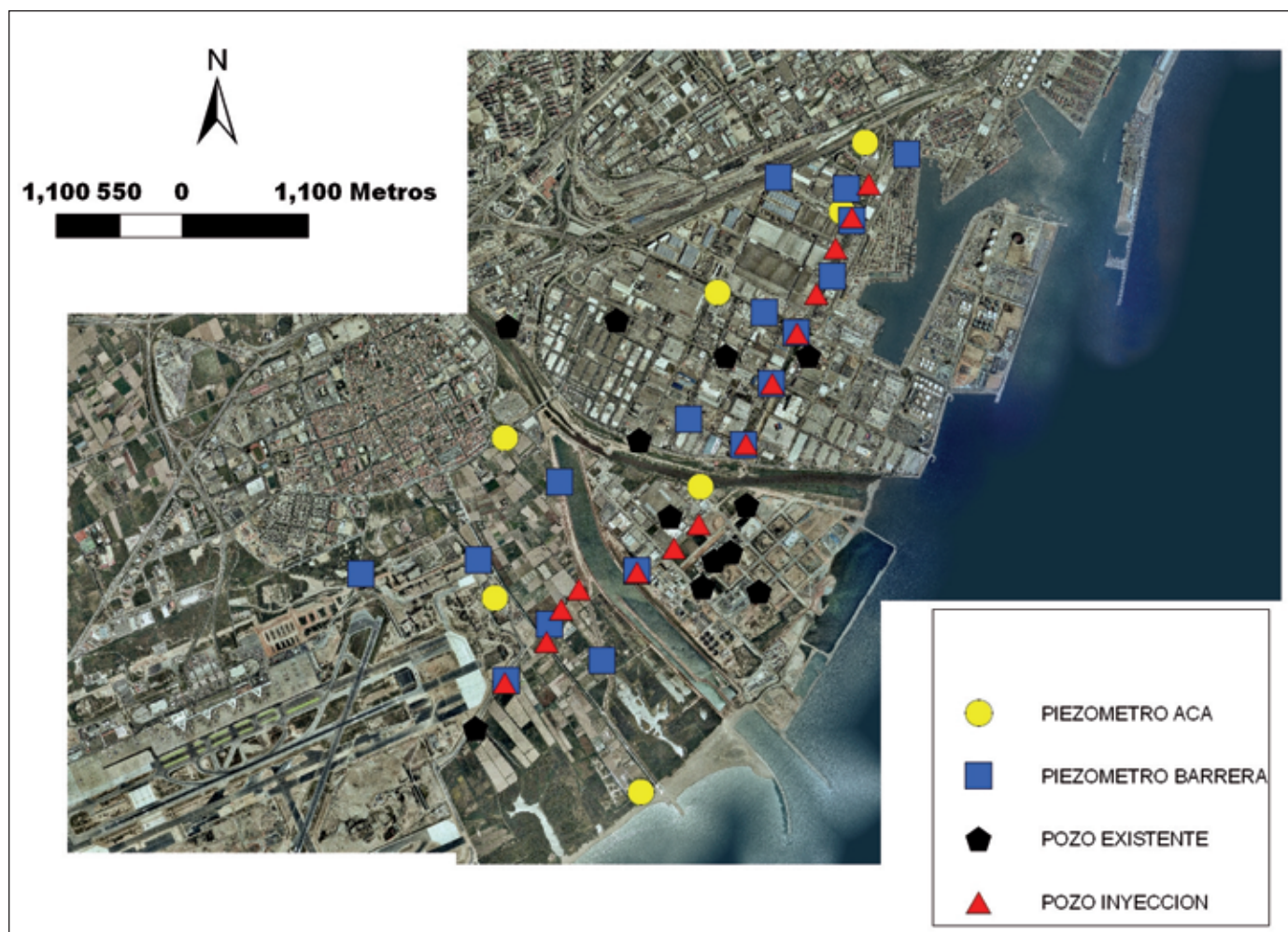


Figura 13. Red de control para la segunda fase de la barrera hidráulica en el Llobregat. Además de los 14 pozos de inyección se realizará el seguimiento con 17 nuevos piezómetros automatizados con sondas remotas de temperatura, nivel y conductividad, 7 piezómetros existentes y 12 pozos industriales

Figure 13. Monitoring network for the second phase of the Llobregat hydraulic barrier. There are 14 injection wells, 17 new piezometers equipped with remote sensors for temperature, head and electrical conductivity, 7 previously existing piezometers and 12 industrial wells

do del río Llobregat en su tramo influente y la recarga directa con pozos de inyección en Cornellá.

El proyecto más emblemático es la construcción de una barrera hidráulica de inyección de agua regenerada en el delta para parar el avance de la intrusión marina. La barrera se implementa en dos fases, llevando la primera de ellas ya más de dos años en funcionamiento. La segunda fase está ahora mismo en construcción de manera que se espera esté operativa a finales de 2009. El desarrollo de un proyecto de estas características en dos fases ha resultado altamente positivo para aprender de los propios errores, poner en rodaje a los diferentes equipos, administraciones y empresas implicadas, y abordar con mayor garantía el éxito del proyecto en su conjunto.

La primera fase inyecta un total de 2.500 m³/día de agua en tres pozos, y se inició en marzo de 2007. Se ha inyectado algo más de 1 hm³ de agua en el acuífero. El agua de inyección proviene de los tratamientos secundario y terciario de la EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) del Baix Llobregat, a la cual se aplican tratamientos adicionales de ultrafiltración, osmosis (al 50%) y desinfección por UV. De esta manera se recarga agua de calidad similar a la existente en las zonas del acuífero no afectadas por intrusión marina.

No se han apreciado cambios en los caudales específicos (relación caudal/ascenso) de los tres pozos de inyección en los dos años de funcionamiento, lo que implica que no han aparecido fenómenos

Ortuño Gobern, F. *et al.*, 2009. La barrera hidráulica contra la intrusión marina y la recarga... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 235-250

de colmatación. Ello se atribuye por una parte a la alta calidad del agua, ya que la ósmosis y la ultrafiltración previenen la colmatación física, y la desinfección la bacteriológica, y por otra parte al estricto régimen de limpiezas. Estas se realizan en los pozos mediante contralavados con electrobombas o bien con aire comprimido.

Para la primera fase se estableció una red de control que englobaba todos los puntos en el acuífero situados a una distancia inferior a 1 km de los pozos de inyección. Las analíticas y el seguimiento de campo muestran la disminución progresiva en el acuífero de cloruro, sodio, calcio, magnesio, hierro y amonio, y un muy ligero aumento de los nitratos, presentes en el agua de inyección. El impacto de la barrera es claramente oxidante sobre el medio reductor, por lo que se están realizando diferentes estudios hidroquímicos y de transporte reactivo por si existiera movilización de metales. Hasta el momento se han identificado intercambios iónicos del sodio por el calcio, y se ha detectado que el agua de inyección está ligeramente sobresaturada en calcita. Estos estudios hidroquímicos, al igual que los que se realizan para identificar procesos de colmatación, son importantes para entender el comportamiento de la barrera y realizar una correcta gestión de la misma en un futuro.

La segunda fase y ampliación de la barrera ya está en construcción. La ampliación de la planta de tratamiento de agua permitirá obtener 15.000 m³/día de agua regenerada para la inyección, para la cual se han construido ya 11 pozos más y 16 nuevos piezómetros de control. Todos ellos han sido equipados con sistemas automáticos de toma y envío de datos de temperatura, nivel y conductividad del agua. La red de control del acuífero, formada por 51 puntos, se encuentra ya operativa para identificar el impacto de la barrera cuando la segunda fase empiece la inyección de agua.

Referencias

- Cazurra, T. 2008. Water reuse of south Barcelona's wastewater reclamation plant. *Desalination* 218 (2008) 43-51.
- Custodio, E. 1987. Sea-water intrusion in the Llobregat delta, near Barcelona (Catalonia, Spain). *Groundwater Problems in Coastal Areas*, UNESCO. *Studies and Reports in Hydrology* n° 45. UNESCO, París: 436-463.
- Custodio, E., Cacho, F., Peláez, M.D., García, J.L. 1976. Problemática de la intrusión marina en los acuíferos del delta del Llobregat. II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Sección de Ciencias Hidrológicas. Barcelona.
- Custodio, E., Manzano, M. Y Jones, B. (1989). Saline water in Llobregat delta aquifers, Barcelona, Spain. 28th International Geological Congress. Washington D.C. Abstracts: 3.288-3.289.
- Gámez, D. 2007. Sequence Stratigraphy as a tool for water resource management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat delta (Barcelona, Spain). Tesis Doctoral. Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences (ETCG). Technical University of Catalonia (UPC). 1-177 + An.
- Iribar, V. 1992. Evolución hidroquímica e isotópica de los acuíferos del Baix Llobregat. Tesis Doctoral. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. Universidad de Barcelona.
- Iribar, V., J. Carrera, E. Custodio y A. Medina, 1997. Inverse modelling of seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer. *Journal of Hydrology*, 198 (1-4), pp. 226-247.
- Marqués, M.A. 1984. Las formaciones cuaternarias del delta del Llobregat. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad de Barcelona: 1-280.
- Ortuño, F.; Niñerola Pla, J.M.; Teijon, G. y Candela, L. 2008. Desarrollo de la primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina en el acuífero principal del Delta del Llobregat. IX Simposio de Hidrogeología, Elche (España), 28 a 30 de enero de 2008.
- Pavelic, P.; Dillon, P.J.; Barry, K.E.; Vanderzalm, J.L.; Correll, R.L. y Rinck-Pfeiffer, S.M. 2007. Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer. *Journal of Hydrology* 334, 1-16.
- Payá, E.; Cazurra, T.; Méndez, D.; Reig, B. y Alegría, J. 2006. Proyecto constructivo de las instalaciones contra la intrusión salina en el acuífero del Baix Llobregat - Primera Fase. *Tecno Ambiente*, 14, (137), pp 15 a 21.
- Simó, J.A., D. Gamez, J.M. Salvany, E. Vazquez-Suñé, J. Carrera, A. Barnolas, F.J. Alcalá, 2005. Arquitectura de facies de los deltas cuaternarios del río Llobregat, Barcelona, España. Pp. 171-174. *Geogaceta*, 38, 2005.
- Vázquez-Suñé, E., Abarca, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D., Pool, M., Simó, T., Batlle, F., Niñerola, J.M. e Ibáñez, X. 2006. Groundwater modelling as a tool for the European Water Framework Directive (WFD) application. The Llobregat case. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31 (17): pp 1015-1029.

Recibido: septiembre 2009

Revisado: septiembre 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009

