

BARRERA HIDRÁULICA CONTRA LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO PRINCIPAL DEL DELTA DEL LLOBREGAT (BARCELONA, ESPAÑA)

ORTUÑO, Felip¹; MOLINERO, Jorge²; JUAREZ, Iker²; ARCOS, David²; FRAILE, Josep¹; NIÑEROLA, Josep M^a¹ y GARRIDO, Teresa¹

RESUMEN

El acuífero del Delta del Llobregat es una reserva estratégica de agua para el abastecimiento a la ciudad de Barcelona, y está afectado por procesos de intrusión marina desde 1970, producto del uso intensivo de las aguas subterráneas. Para resolver esta situación, la Agencia Catalana del Agua está promoviendo la construcción de una barrera hidráulica positiva, con inyección de agua regenerada. Este proyecto es el primero de estas características que se hace en España y es también pionero en Europa. La barrera, formada por una serie de 14 pozos de inyección, eleva el nivel de agua del acuífero cerca de la costa y evita que el agua salada penetre tierra adentro, recargando además el acuífero. El presente trabajo muestra los principales datos del funcionamiento de la fase piloto de la barrera durante su primer año de operación.

ABSTRACT

The Llobregat Delta Aquifer constitutes a strategic reserve of water for the city of Barcelona (Spain) but it is affected by marine water intrusion since the 1970's due to the groundwater intensive use. In order to face this situation, the Catalan Water Agency is promoting the construction of a positive hydraulic barrier, by injecting reclaimed water in 14 wells, increasing the hydraulic head and thus preventing the advance of the marine water front inland and also enhancing aquifer recharge. This work shows the main data

¹ AGENCIA CATALANA DEL AGUA. C/ Provenza 204-208, E08036-Barcelona. España. Email: fjortuno@gencat.net

² AMPHOS XXI Consulting S.L., Passeig de Rubí 29-31, E08197-Valldoreix. Barcelona. España. Email: jorge.molinero@amphos21.com

about the performance of the pilot phase of the hydraulic barrier during the first year of operation.

Palabras clave: barrera hidráulica, intrusión marina, agua regenerada, acuífero del Llobregat, Barcelona.

1.- INTRODUCCIÓN

El acuífero principal del Delta del Llobregat tiene un descenso piezométrico generalizado bajo el nivel del mar desde principios de los años 70, producto del aumento de las explotaciones. Ello ha comportado la aparición y el avance de la intrusión salina en el acuífero, facilitado también por las excavaciones de la capa impermeable de contacto entre el acuífero y el mar, lo que ha resultado en un empeoramiento progresivo de la calidad del agua subterránea. Las cuñas de intrusión marina avanzan actualmente por la Dársena del Puerto en la Zona Franca y por la zona de la Ricarda (Figura 1).



Figura. 1. Concentración de cloruros en el acuífero principal del Delta del Llobregat en el año 2007. Se observa la intrusión marina que afecta al acuífero por diversos puntos.

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 creación de una barrera hidráulica positiva contra la intrusión marina, lo que implica la inyección en el acuífero principal de agua regenerada por diversos tratamientos. La

primera fase o prueba piloto de este proyecto, transferida ya y explotada por la Agencia, está en marcha desde el mes de Marzo del 2007 inyectando agua en el acuífero. Actualmente el caudal de inyección es de 2.500 m³/día en tres pozos. La segunda fase está siendo ejecutada íntegramente por la Agencia Catalana del Agua, y prevé la inyección de caudal mínimo para la barrera de 15.000 m³/día con la construcción adicional de 11 pozos más de inyección y de 16 piezómetros de control en el acuífero.

2.- CARACTERÍSTICAS DE LA PRIMERA FASE DE LA BARRERA HIDRÁULICA

2.1.- Agua de inyección

El agua de inyección para la barrera hidráulica consistía inicialmente en un 50% de agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat, 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 ha sido substituida por agua también regenerada, de manera que toda el agua de inyección proviene ahora de la EDAR de El Prat. 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.

El agua procedente de la EDAR es sometida, después del tratamiento secundario, a tratamiento terciario, consistente en coagulación-floculación lastrada, decantación lamelar, filtración y desinfección por UV. El tratamiento terciario, que produce en su conjunto algo más de 3 m³/s, se utiliza para contribuir al caudal de mantenimiento del río Llobregat, para mantener algunas zonas húmedas cercanas, para regadíos, y también alimenta la planta de tratamiento para la barrera hidráulica. En esta planta se realizan los tratamientos de ultrafiltración, ósmosis inversa (sólo al 50%) y desinfección por UV, produciéndose un total de 2.500 m³/día que se distribuye a los pozos de inyección de la barrera (Figura 2).

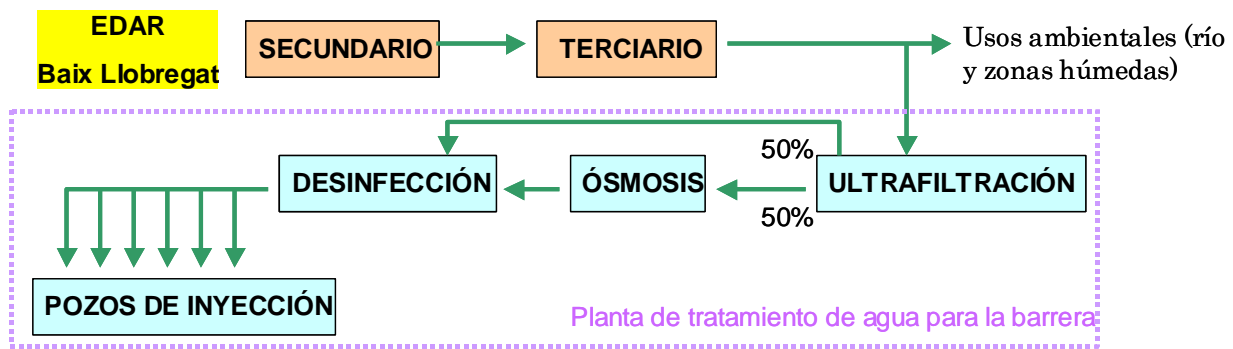


Figura. 2. Tratamientos del agua previos a su inyección en el acuífero. El agua inicial proviene del efluente terciario de la EDAR del Baix Llobregat, y después de pasar por procesos de ultrafiltración y osmosis (la osmosis sólo al 50% del agua), se desinfecta mediante UV y se envía a los pozos.

2.2.- Configuración de los pozos de inyección

Para esta 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 muy cercana a la planta de tratamiento terciario y ósmosis (Figura 3).

Los pozos tienen aproximadamente 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 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 ensayos hidráulicos realizados con posterioridad 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 tendrían una transmisividad menor (de 100 a 200 m²/día).

Debido a diversos problemas con las acometidas eléctricas a los pozos de inyección, tres de ellos están equipados con sistemas de limpieza por aire comprimido, mientras que el pozo P1 sí 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 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 ya en uso.



Figura. 3. Detalle de los pozos de inyección para la primera fase de la barrera contra la intrusión marina en el acuífero principal del Delta del Llobregat.

2.3.- Red de control de niveles, parámetros físico-químicos y muestreos

La red de control hidroquímica y de niveles fue establecida por la Agencia Catalana del Agua utilizando varias simulaciones realizadas con modelos numéricos del acuífero.

Cada hora se registran automáticamente los niveles en los pozos de inyección, los caudales en cada pozo, los parámetros F-Q del agua de inyección, y niveles y conductividad en 3 piezómetros mediante CTD.

Semanalmente se realizan analíticas del agua de inyección para su control bacteriológico (Colis totales, E. Coli y nemátodos) y fisicoquímico (DBO, DQO, P total, N total, Cloruros nitratos y TOC).

Mensualmente se realizan analíticas del agua de inyección y de los puntos de la red local del acuífero para su análisis 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).

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 (8 puntos). La localización de los puntos de inyección y de control de la barrera se muestra en la Figura 4.

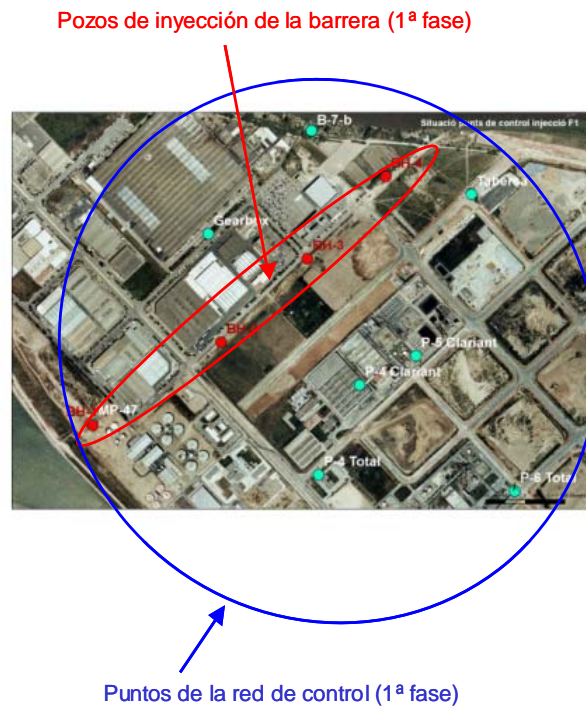


Figura. 4. Situación de los pozos de inyección y de la red de control local de la barrera hidráulica en el acuífero principal del Delta del Llobregat

3.- DESARROLLO DE LA PRIMERA FASE DE INYECCIÓN Y RESULTADOS

3.1.- Volumen de agua inyectado

La inyección de agua en el acuífero empezó el 26 de Marzo del 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, valorando también que el nivel piezométrico en los puntos de inyección no llegara a la superficie para no tener las cabezas de los pozos a presión por seguridad.

Así, en los pozos P1 y P3 se puede inyectar más agua que en los otros dos pozos, ya que su transmisividad puede situarse sobre los 700 a 2000 m²/día.

Inicialmente la inyección se realizaba en los pozos P3 y P4, pero éste último fue cerrado y cementado el 6 de Julio del 2007 porque presentaba deficiencias en su sellado anular, lo que provocó inundaciones de la arqueta subterránea y comunicación entre el acuífero principal y el superior. El pozo P1 entró en funcionamiento durante el mes de julio del 2008, una vez solucionados algunos problemas con el sistema de adquisición de datos y con los sistemas de limpieza del pozo. La planta de tratamiento del agua permite ya la inyección de agua las 24 horas del día, lo que no era posible inicialmente por problemas técnicos menores.

Hoy en día la inyección se realiza ya en los pozos P1, P2 y P3. A fecha de 23 de febrero del 2009 se han inyectado un total de 840.000 m³ de agua al acuífero, de los cuales un 7% ha sido en el pozo P1, un 18% en el pozo P2, el 74% en el P3 y un 1% en el P4.

3.2.- Calidad del agua de inyección

El agua de inyección es agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat con tratamientos secundario, terciario (coagulación-fluocolación lastrada, decantación lamelar, filtración, UV y cloración), ultrafiltración, ósmosis (sólo al 50%) y desinfección de nuevo por UV (Figura 5). Actualmente el agua se somete también a cloración antes de inyectarla, aunque se están realizando diferentes estudios para eliminar la adición de cloro por sus efectos nocivos y por la posible aparición de trihalometanos en el acuífero (THMs). Su conductividad eléctrica, pH y temperatura se miden de manera continua, y semanalmente se determinan además coliformes fecales, materia en suspensión, DBO, DQO, cloruros y nitratos. Mensualmente se analizan componentes mayoritarios y metales.

El contenido en cloruros del agua de inyección se encuentra sobre los 320 mg/l, la dureza de 250 a 270 mg/l, la conductividad eléctrica del agua está sobre los 1.600 µS/cm, y el pH es siempre cercano a 7,0. No han aparecido coliformes fecales en ninguna de las muestras analizadas y el contenido total de materia en suspensión siempre ha sido menor a 10 mg/l, lo cual garantiza que los procesos de colmatación física en los pozos serán mínimos.

El cálculo de los índices de saturación del agua de inyección a partir de las analíticas revela que este agua está en equilibrio con cuarzo y sobresaturada en calcita. Aunque no

se ha observado ningún fenómeno de colmatación en los pozos de inyección (disminución de su rendimiento), actualmente se están analizando los geles y sólidos de sus limpiezas de los pozos para identificarlos.

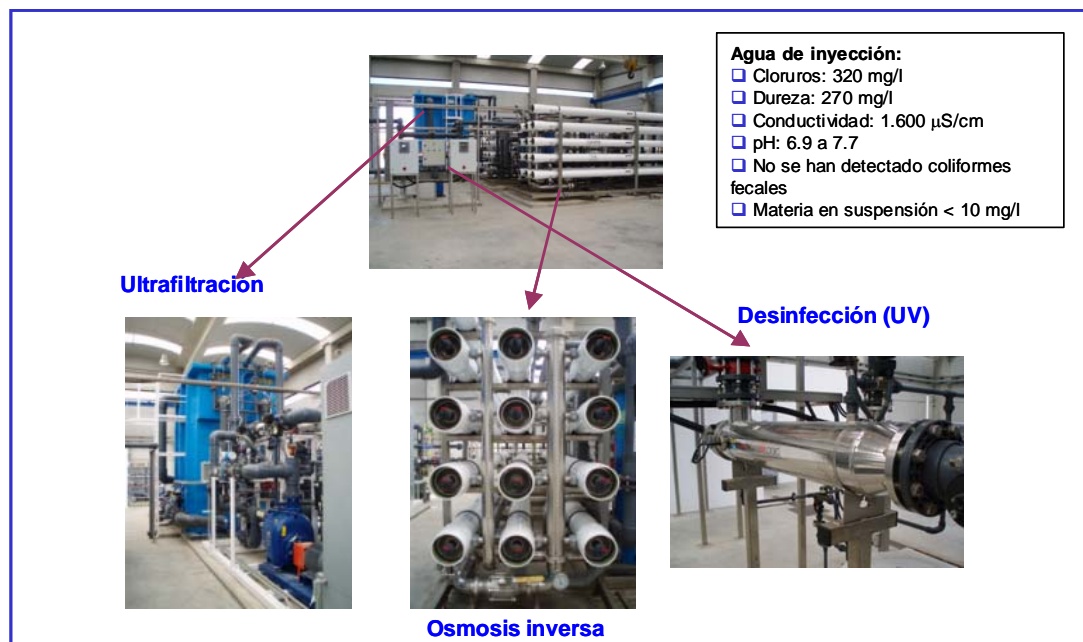


Figura. 5. Tratamientos del agua previos a su inyección en el acuífero, y principales características del agua de inyección.

3.3.- 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. En algunos de ellos estos efectos aun tardarán algún tiempo en verse netamente, dependiendo de la distancia a los puntos de inyección y de las características del medio subterráneo. Estos puntos están situados a distancias de 250 a 800 m del pozo de inyección P3, en el que se ha inyectado más del 70% del agua, a excepción es el piezómetro MP-47 situado a tan sólo 4 m del pozo de inyección P1 para observar fenómenos de colmatación.

En los puntos de observación del acuífero la conductividad ha disminuido claramente desde el inicio de la inyección del agua (Figura 6). Han disminuido también los contenidos en cloruro, sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfato y amonio, manteniéndose estables

los bicarbonatos. Los nitratos en el acuífero han aumentado muy ligeramente, ya que su contenido en el agua de inyección es de unos 5 mg/l.

En el pozo *Gearbox Prat* es donde los efectos de la barrera han sido mayores, bajando la conductividad progresivamente de 16.500 a menos de 4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que representa pasar de contenidos en cloruros en el agua subterránea de 6.500 mg/l a menos de 1.000 mg/l. Dado que la distribución de la salinidad en el acuífero no es inicialmente homogénea, también se han visto en algunos puntos de observación incrementos iniciales de la conductividad antes de su descenso, como en el 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.

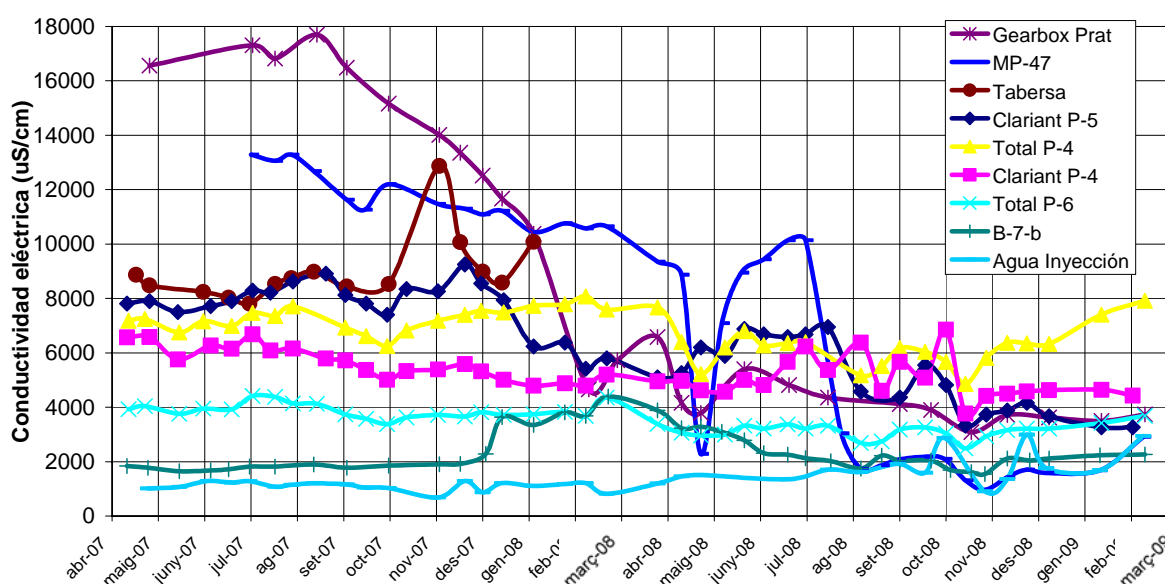


Figura. 6. Evolución de la conductividad del agua en el acuífero en los puntos de observación de la red de la barrera desde el inicio de la inyección.

En referencia a los porcentajes calculados de mezcla de aguas, los puntos de observación en el acuífero situados aguas abajo, tierra adentro, pueden tener ahora entre un 75 a 90 % del agua de inyección, mientras que los situados aguas arriba 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. Todos los puntos de control pueden tener ahora menos de un 8% de agua de mar.

El impacto observado en el acuífero después de un año de inyección se ha calculado como la diferencia de los mapas de cloruros realizados en mayo del 2007 y en mayo del 2008. En base a ello, la mejora de la calidad del agua puede estimarse que ha llegado hasta una distancia de 1 a 2 Km de los pozos de inyección (Figura 7).

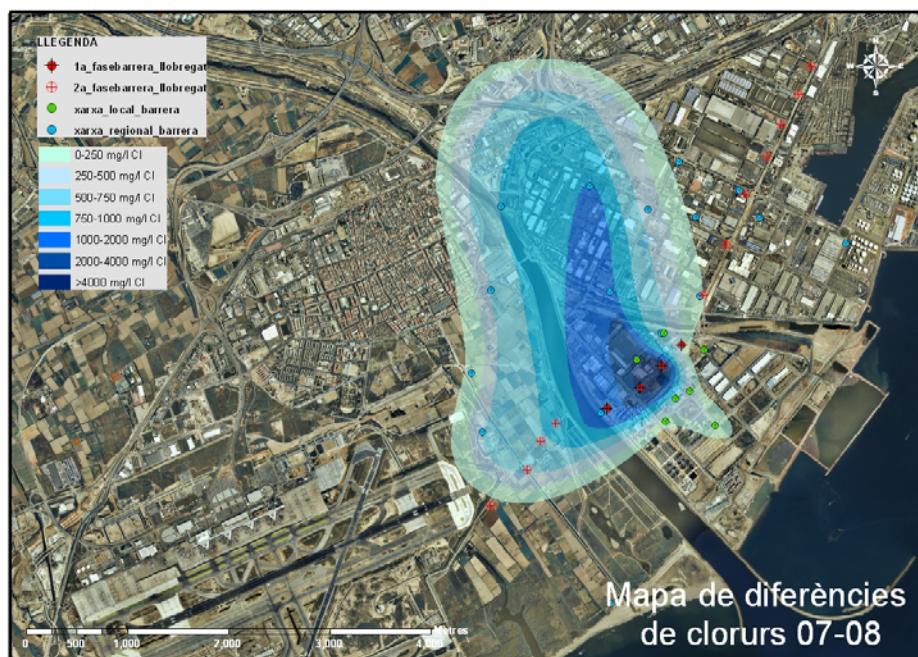


Figura. 7. Impacto actual aproximado de la inyección de la barrera hidráulica en el acuífero a mayo del 2008. Éste se ha calculado a partir de las diferencias de los mapas de cloruros de mayo del 2008 y mayo del 2007, este último coincidiendo prácticamente con el inicio de la inyección.

3.4.- 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 esta primera fase. Diversos problemas relacionados con el sistema de adquisición de datos y con la calibración de los sensores de presión de los pozos han provocado que no se tengan datos fiables y continuos de nivel hasta el 19 de Septiembre del 2007, casi 6 meses después de iniciarse la inyección. Actualmente ya han sido solucionados todos estos problemas.

Los niveles dinámicos en los pozos de inyección de la barrera se encuentran siempre en cotas inferiores al nivel del mar, oscilando entre los casi -10 msnm en abril del 2008 al final de la sequía, hasta los -4 msnm actuales, después de una primavera y otoño lluviosos. 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 poco variables y de 15, 20 y 68 m³/hora. De ello puede deducirse una relación caudal/ascenso actual de 2.400 m²/día para el pozo P1, 820 m²/día para el pozo P-2 y de 1.190 m²/día para el pozo P-3. Esta relación parece haberse 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 este caso, el ascenso de nivel sería mayor para un mismo caudal de inyección y cabría esperar una disminución progresiva de su caudal específico. La evolución piezométrica y el caudal de inyección para el pozo P3 se muestran en la Figura 8 para el periodo que se tienen datos disponibles. En ella se diferencian el intervalo en el que la inyección se realizaba sólo 8 horas al día las jornadas laborables, hasta el 5 de Noviembre del 2007, y el posterior donde la inyección ya es continua las 24 horas del día. Los ascensos en el pozo se superponen aquí de manera clara a las oscilaciones de base de unos 40 cm de amplitud causadas por los bombeos de diversas industrias cercanas en el Delta, las cuales afectan a todos los pozos de inyección.

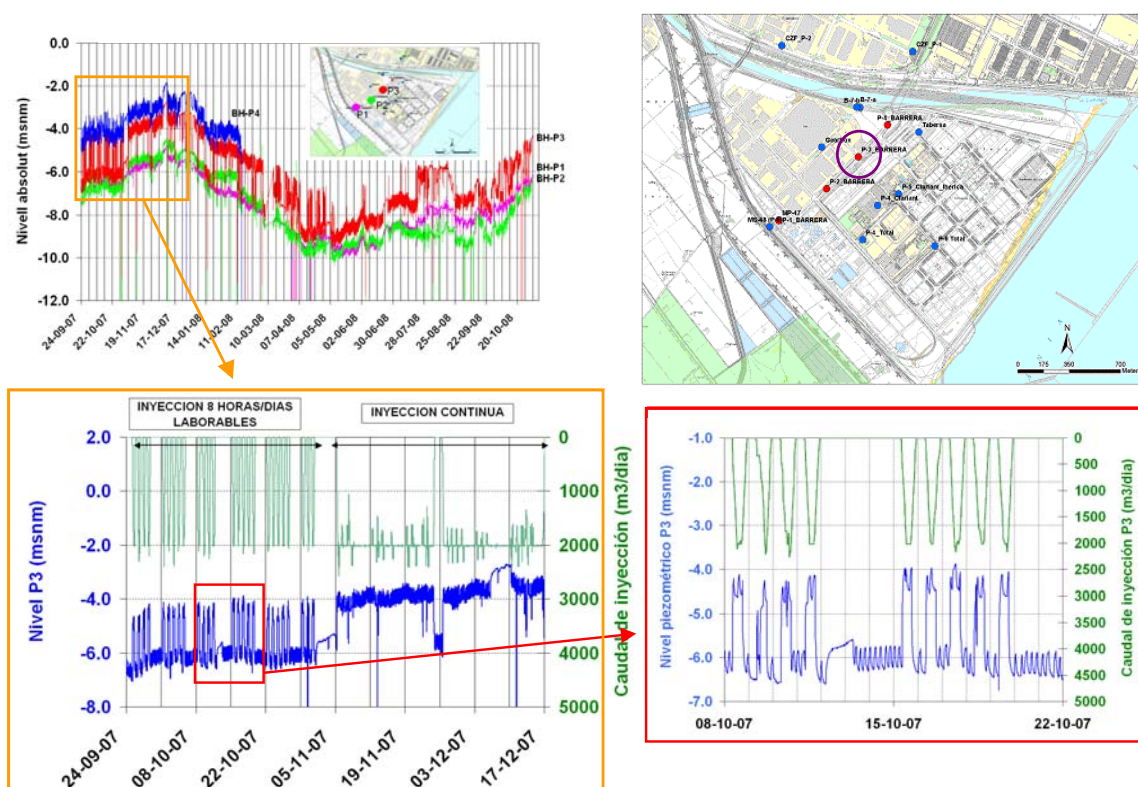


Figura. 8. Evolución del nivel piezométrico y del caudal de inyección en el pozo P3 de la barrera hidráulica.

3.5.- Principales problemas de la primera fase

La identificación, solución y documentación de los problemas que han ido apareciendo en esta primera fase de la barrera es de vital importancia para asegurar el éxito del proyecto en su conjunto. De esta manera, la ejecución de una primera fase o prueba piloto permite abordar con mejores garantías técnicas la siguiente fase, y pone también en rodaje a todos los equipos, administraciones y consultorías implicadas en el proyecto. Los principales problemas técnicos identificados ahora y que han sido solucionados con mayor o menor dificultad son los siguientes:

- Problemas con el sistema general de adquisición de datos para guardar datos de niveles, caudales y calidad del agua de inyección;
- Substitución en algunos pozos de inyección (P2, P3 y P4) de las electrobombas sumergibles por sistemas con aire comprimido para su limpieza por la imposibilidad de llevar suministro eléctrico hasta el pozo;
- Control continuo de los parámetros físico-químicos del agua de inyección;
- Calibrado y referenciado de los sensores de nivel de los pozos de inyección;
- Deficiencias en el sellado anular de uno de los pozos;
- Conveniencia de la no cloración del agua de inyección;
- Necesidad de estudios hidrogeoquímicos para conocer los procesos de mezcla de aguas en el acuífero.

4.- PLANIFICACIÓN PARA LA SEGUNDA FASE DE LA BARRERA HIDRÁULICA

La segunda fase de la barrera hidráulica será ejecutada íntegramente por la Agencia Catalana del Agua. En ella se prevé la inyección en el acuífero de 15.000 m³/día, que es el caudal mínimo necesario para frenar la intrusión marina en el Delta del Llobregat (Figura 9).

Para situar los pozos de inyección y establecer correctamente sus caudales se ha usado un modelo numérico de los acuíferos de la Cubeta de San Andreu, Vall Baixa y Delta del Llobregat de la Agencia Catalana del Agua. Los mapas actuales de salinidad y los escenarios de los modelos numéricos indican que la barrera hidráulica se ha de colocar

en los dos márgenes del río Llobregat para que sea efectiva. En el margen derecho del río, la ubicación de pozos es difícil por la existencia de una zona ZEPA (zona de especial protección para las aves) y por el aeropuerto, por lo que se planteó la inyección o bien en la línea de costa o tierra adentro. Los resultados obtenidos con los modelos, simulando a 30 años la inyección con las diferentes configuraciones de pozos en diferentes escenarios, mostraron que la mejor opción es la de situarlos tierra adentro .

Actualmente 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 a partir del terciario para su inyección en la segunda fase. Se han perforado ya los 11 nuevos pozos de inyección, 4 en la Zona Prat y 7 en la Zona Franca, y actualmente se está procediendo a su equipamiento e instrumentación. Igualmente se está acabando con la instalación de la tubería de distribución del agua a los pozos desde la planta. Los 16 nuevos piezómetros de control ya están perforados, y serán equipados en breve con sistemas automáticos de toma y envío de datos de temperatura, nivel y conductividad.

Se espera que la zona Prat de la segunda fase de la barrera hidráulica en el Llobregat está operativa en Junio del 2009, y que toda la barrera al completo pueda estar plenamente operativa en septiembre del 2009.



Figura. 9. Mapa de cloruros en el acuífero (2007) y situación de las zonas de inyección previstas para la segunda fase de la barrera hidráulica.

5.- CONCLUSIONES

La primera fase de la barrera hidráulica contra la intrusión marina del acuífero principal del Delta del Llobregat inició la inyección de agua en Marzo del 2007. Desde entonces se han inyectado ya más de 850.000 m³ de agua regenerada.

Se construyeron para ello cuatro pozos en esta primera fase, y se inyecta un caudal total de 2.500 m³/día. Su funcionamiento no ha dado ningún problema hasta la fecha, ni se han observado problemas por colmatación, que es la principal causa de fracaso en las experiencias de inyección directa de agua en acuíferos, y se controla aquí permanentemente con la relación entre el caudal que se inyecta y el ascenso de nivel en cada pozo. Ello es debido principalmente a la alta calidad del agua y al estricto régimen de limpiezas de los pozos de inyección. Las limpiezas se realizan mediante contralavados con electrobomba sumergible en el pozo P1, y mediante aire comprimido en los pozos P2 y P3 por la imposibilidad de llevar electricidad hasta el pozo. El pozo P4 ya no está operativo por diversos problemas constructivos.

Aunque inicialmente el proyecto fue planteado usando como agua de inyección un 50% de agua regenerada de la EDAR del Baix Llobregat y el 50% restante agua potable de red mezclada con la anterior, el agua de red fue rápidamente substituida por motivos económicos y de sostenibilidad ambiental. El agua de inyección es ahora agua regenerada de la EDAR con tratamientos secundario, terciario (coagulación-fluocolación lastrada, decantación lamelar, filtración, UV y cloración), ultrafiltración, ósmosis (sólo al 50%) y desinfección de nuevo por UV. La cloración final, aunque se ha realizado periódicamente, se ha eliminado por sus efectos nocivos y por la posible aparición de trihalometanos en el acuífero (THMs). La inyección se realiza ahora en continuo 24 horas al día, y todos los procesos de la planta de tratamiento del agua funcionan con escasísimas incidencias.

Se ha establecido una red de control para analizar el impacto de la barrera en el acuífero, la cual engloba todos los pozos y piezómetros situados en un radio aproximado de 1 Km de la inyección. El impacto de la inyección por la barrera está siendo altamente positivo en esta primera fase. Las analíticas y el seguimiento de campo muestran la disminución en el acuífero de cloruro, sodio, calcio, magnesio, hierro y amonio, y un muy ligero aumento de los nitratos, presentes también en el agua de inyección.

La ejecución de una primera fase en el proyecto ha sido de vital importancia para la identificación y solución de problemas y para la coordinación y puesta a punto de los equipos de trabajo. Los principales problemas técnicos aparecidos han tenido relación principalmente con los sistemas de limpieza de los pozos, con el sistema de adquisición de datos, el calibrado de los sensores de nivel y con el sellado anular de los pozos de inyección.

La segunda fase y ampliación de la barrera será ejecutada íntegramente por la Agencia Catalana del Agua, y estará finalizada en pocos meses. La ampliación de la planta de tratamiento permitirá obtener 15.000 m³/día de agua regenerada para la inyección, para lo cual se han construido ya 11 pozos más y 16 piezómetros de control en el acuífero.