

---

# COMPORTAMIENTO Y EVOLUCIÓN DE UNA BARRERA GEOQUÍMICA EXPERIMENTAL RÍO AGRIO - AZNALCOLLAR - ESPAÑA

**BOLZICCO, José<sup>1</sup>; CARRERA, Jesús<sup>1</sup>; AYORA, Carlos<sup>2</sup>; CERON, Juan Carlos<sup>3</sup>;  
FERNANDEZ, Inmaculada<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería del Terreno, ETSICCPB. Universidad Politécnica de Cataluña(UPC) Barcelona.

<sup>2</sup>Instituto Jaume Almera, CSIC, Barcelona.

<sup>3</sup>Departamento de Geodinámica y Paleontología, Universidad de Huelva.

## RESUMEN

Con motivo de la rotura de la balsa minera de Aznalcollar en abril de 1998, el acuífero aluvial del río Agrio sufrió uno de los mayores impactos producto del vertido de lodos, siendo contaminado por aguas ácidas con elevada carga de metales pesados. Se proyectó y construyó una barrera geoquímica experimental con la finalidad de filtrar las aguas del acuífero, elevar su pH y retener los metales pesados. Desde noviembre de 1999 a la fecha se efectuó un seguimiento de las características hidrogeoquímicas e hidráulicas del acuífero en el entorno de la barrera, el cual se intensificó una vez finalizadas las obras de construcción de la misma en octubre de 2000. La barrera se compone de tres módulos con diferentes materiales reactivos, calcita, compost de tipo vegetal u orgánico y limaduras de hierro, mezclados en diferentes proporciones de acuerdo a las experiencias de laboratorio y antecedentes en el tema. Los resultados sobre la evolución del funcionamiento de la barrera son aceptables, dentro de ella los pH se sitúan en torno a 7 y las concentraciones de metales pesados son despreciables. Aguas abajo de la barrera al cabo de tres meses de su ejecución se tenían valores de pH en torno a 6 y bajas concentraciones de metales, situación que cambió luego de las intensas lluvias invernales (2000-2001), observándose nuevamente pH ácidos y aumento en las concentraciones de metales pesados. Se estima que la riada del Agrio provocó un intenso lavado de los suelos (aún con restos de contaminación) y una modificación local en el sentido del flujo en el acuífero, estando a la espera de su normalización.

**PALABRAS CLAVE:** Barrera Reactiva - Aguas Acidas - Metales Pesados - Evolución Espacio - Temporal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La barrera geoquímica experimental construida en el aluvial del río Agrio es una pantalla reactiva que permite el paso del agua, pero crea unas condiciones químicas tales que

reduce el paso de contaminantes, tal que por ejemplo, la generación de condiciones reductoras puede favorecer la precipitación de metales como sulfuros. La tecnología de barreras geoquímicas es relativamente moderna. Las referencias más antiguas no tienen una década (Blowes y Ptacek, 1992; Gillham y O'Hannesin, 1992) y no hay precedentes en España.

El río Agrio y su acuífero aluvial, se encuentran contaminados, contienen aguas ácidas y altas concentraciones de metales pesados, como era previsible luego de la riada de lodos provenientes de la balsa minera de Aznalcollar. Aunque la extensión, en el acuífero, de la pluma contaminante es menor que la esperada, el impacto ambiental resulta ser de gravedad. La construcción de una barrera geoquímica en el acuífero pretende corregir parte de ésta contaminación.

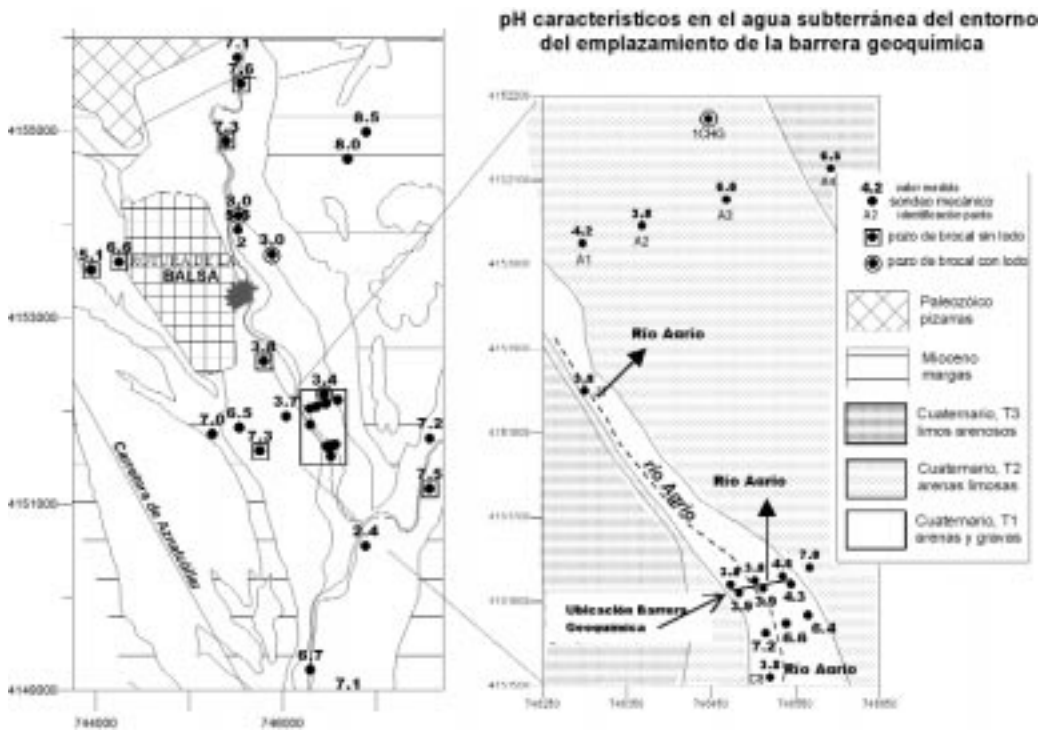
Se describen a continuación los tipos de materiales y la función que cumplen como relleno de la barrera, el diseño de la misma; una caracterización de la zona contaminada y la evolución espacio temporal de la misma hasta la actualidad. El artículo concluye con un avance de los resultados obtenidos hasta la fecha.

## **2. CARACTERÍSTICAS ZONA DE ESTUDIO**

El área con mayor afección ha sido aquella del valle aluvial del río Agrio comprendida entre el límite norte de la balsa y 1Km aguas abajo de la confluencia con el río Guadiamar. La zona, que carecía de suficiente información previa al desastre, fue caracterizada mediante cartografía de superficie, sondeos eléctricos verticales así como mediante la ejecución de sondeos, 18 de los cuales se encuentran en las proximidades de la barrera y otros 10 mas en un entorno de menos de 1Km (Figura 1). Se ejecutaron ensayos de bombeo, de trazadores, de pulso, perfilajes de temperatura y conductividad.

### **Geología**

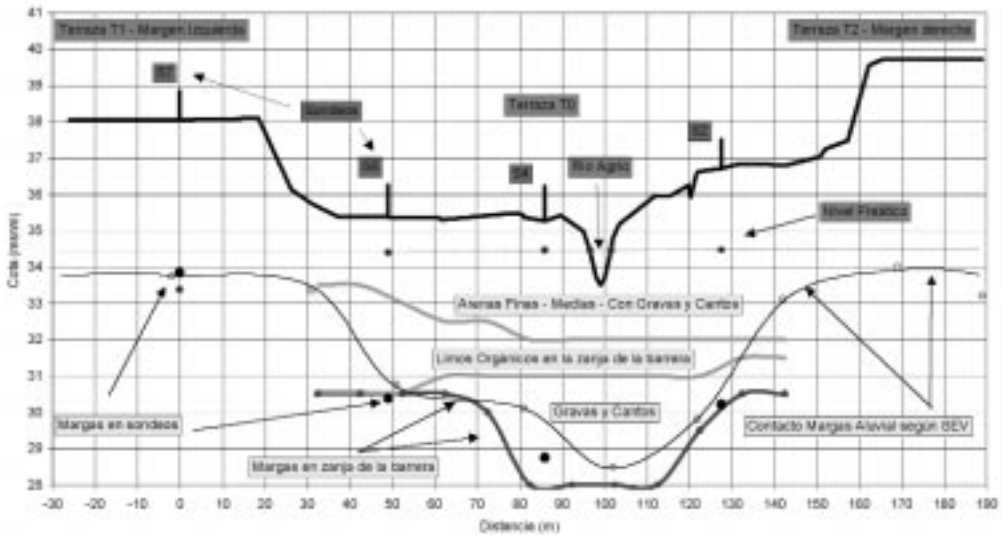
Desde el punto de vista geológico, el río Guadiamar y el Agrio (afluente del primero), están excavados en margas miocenas. Los depósitos fluviales se disponen en forma de terrazas tal como se aprecia en la Figura 1 donde T0 es la llanura de inundación actual, existiendo tres niveles mas denominados T1, T2 y T3. A pesar de esta típica disposición en terrazas, durante la construcción de la barrera fue posible detectar un paquete de limos arenosos con abundante materia orgánica intercalada, tal como se aprecia en la Figura 2, entre los materiales del aluvial formando un paquete continuo con espesores variados entre 0.50-3.00 m. El mismo fue confirmado mediante la ejecución de una serie de calicatas y estaría subyaciendo a las terrazas T0, T1 y T2, su origen sea probablemente lacustre, siendo aún motivo de investigación.



**Figura1.** Valores característicos de pH en el agua subterránea y superficial del aluvial del río Agrio y formaciones colindantes. Los datos corresponden a la mediana de varias campañas de muestreo entre mayo de 1998 y enero de 2000. En pozos de la barrera (zona ampliada a la derecha) debe tenerse presente la terraza T0 es solo una morfología y que realmente informan sobre la terraza T1. La numeración de estos pozos es como sigue: los de aguas abajo son S1, S3, S5, S10, S11 y S12 contando de Oeste a Este y de Norte a Sur, y los de aguas arriba son S2, S4 y S6. (Modificado de Carrera, J. 2001)

### Estado de la Contaminación

Los parámetros más representativos para medir el estado de la contaminación del aluvial del río Agrio siguen siendo hasta la actualidad el pH y el contenido de Zn de las aguas subterráneas y superficiales, considerándose como indicadores de contaminación cuando sus valores resultan ser inferiores a 5 y superiores a 10mg/lit respectivamente. Como se aprecia en la Figura 1, al norte de la balsa los valores de pH indicarían que el área no está contaminada. En cambio a partir del punto de ruptura de la balsa, punto a partir del cual se inundaron las terrazas T1 y T2 y el valle del río Agrio, y hasta algo mas aguas abajo de la confluencia con el río Guadiamar, los valores de pH son ostensiblemente ácidos y las concentraciones de Zn superan en varias decenas el limite de aptitud (1.5mg/lit). Incluso los valores de pH y Zn del mismo río Agrio son indicadores de que el río a partir de la balsa de lodos descarga aguas ácidas sea proveniente del drenaje del acuífero aluvial o de posibles filtraciones de la balsa.



**Figura 2.** Perfil aguas arriba de la barrera geoquímica experimental. El contacto de las margas miocenas con el aluvial se definió con los sondeos exploratorios, SEV y la zanja de la propia barrera. La presencia de la capa de limos orgánicos intercalada entre dos niveles de material grueso hace presumir la presencia de un paleocanal con una genealogía diferente a la de las terrazas T1.

Esto último estaría de alguna manera confirmado por los bajos valores de pH que se registran en sondeos ubicados sobre la T2, en la margen derecha del río Agrio, zona que no fue alcanzada por los lodos, y elevadas concentraciones de Zn.

### 3. SELECCIÓN MATERIAL DE RELLENO PARA LA BARRERA

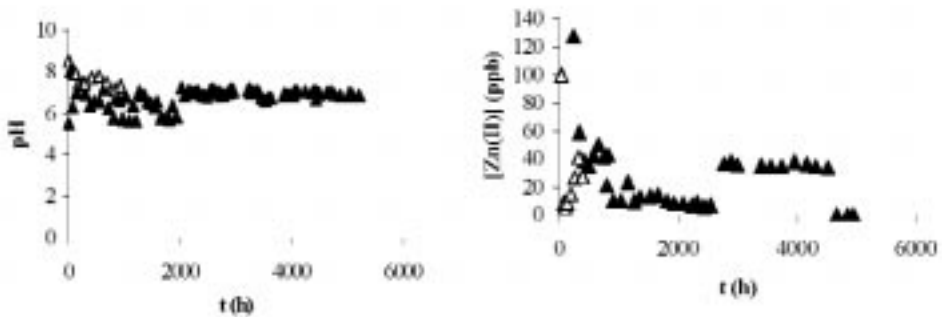
El material de relleno de la barrera debía cumplir diferentes objetivos, pero por sobre todas las cosas debía:

- Regular la acidez del agua y atenuar las concentraciones de metales pesados (Zn, Cd, principalmente). La barrera debe ser lo suficientemente reactiva como para atenuar dicha contaminación.
- Disminuir el elevado contenido en sulfatos
- Ser lo suficientemente permeable como para no modificar sustancialmente el flujo del agua subterránea local.
- Ser durable por un cierto período de años, manteniendo su reactividad y no colmatándose.
- Tener un costo razonable.

En base a todos estos elementos, se condujeron una serie de experimentos en columnas de laboratorio y simulaciones numéricas, que arrojaron como resultado la adopción del

modelo de relleno denominado barrera Tipo 3, siendo el mas adecuado a los fines perseguidos en la zona de Aznalcollar.

La misma propone para el control de la acidez la calcita, en tanto que para lograr la disminución de los metales tóxicos se adoptó la precipitación de los mismos en forma de sulfuros, para lo cual se requiere la reducción de los sulfatos del agua a sulfuros. Esto se logra en base a la adición de hierro metálico en forma de limaduras y materia orgánica (compost vegetal o de depuradora), en forma conjunta o separadamente.



**Figura.3.** Valores de pH (a) y Zn (b) en los Exp. Barrera Tipo 3: ▲ (Exp.1 Calcita + Materia orgánica), ▲ (Exp 2. Calcita + materia orgánica + Fe)

Los ensayos de la barrera Tipo 3 presentan valores óptimos, estabilizándose el pH a un valor de 6.9, y concentraciones de Zn relativamente estables del orden de 20ppb. De lo cual se deduce que resulta óptima la combinación de calcita con materia orgánica y una fuente de bacterias sulfatoreductoras, dando lugar a un control adecuado de la acidez del agua así como una disminución apreciable de la concentración de metales tóxicos. La adición de hierro en forma de limaduras no arrojó mayores diferencias en los resultados obtenidos, tal como se aprecia en la figura 3.

#### 4. CONSTRUCCION DE LA BARRERA

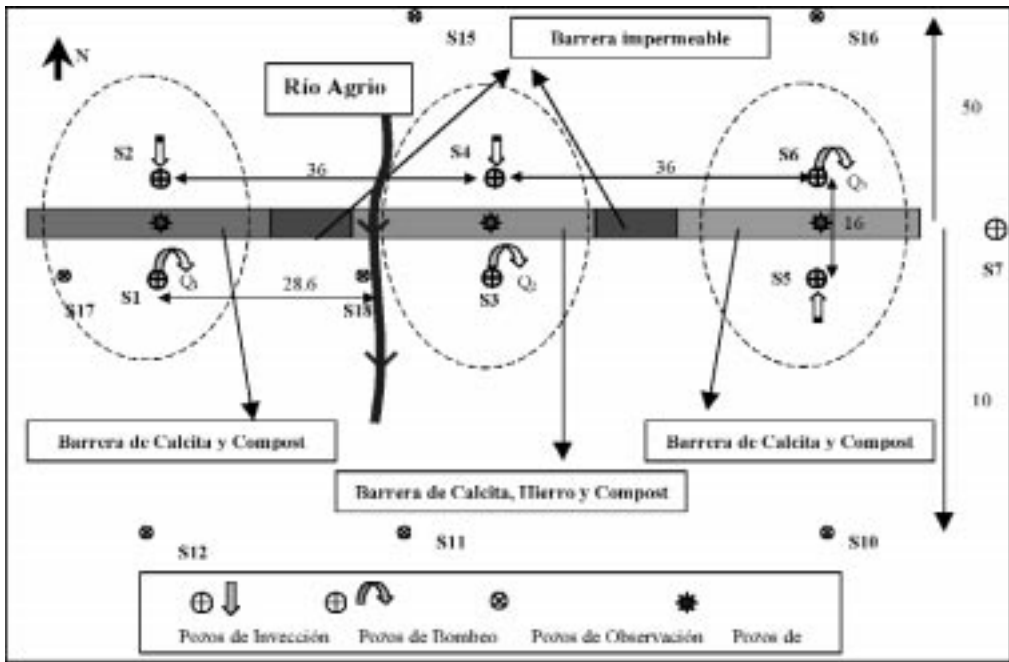
Entre setiembre y octubre del 2000 se procedió a la construcción de la barrera experimental y dado éste carácter experimental, se la construyó dividiéndola en tres módulos con algunas diferencias en la composición de su material de relleno.

La ubicación de la misma respondió a criterios geológicos, geomorfológicos y estratégicos desde el punto de vista de la contaminación del acuífero.

Posee una longitud total de 120 m., cada módulo se construyó de 30 m, separados por tramos de 10 m con relleno inerte poco permeable. Se reduce de ésta manera el costo y se separan mejor los tramos activos, lo que facilitaría la interpretación de los resultados.

El espesor de 1,40 m. surge como una combinación de la necesidad de que la barrera tuviese al menos un espesor de 1m (tal como se desprende de los ensayos de laboratorio) y el hecho de que el sistema de tablestacado utilizado para su construcción obligase a un ancho algo mayor lo que redunda en beneficio de la misma.

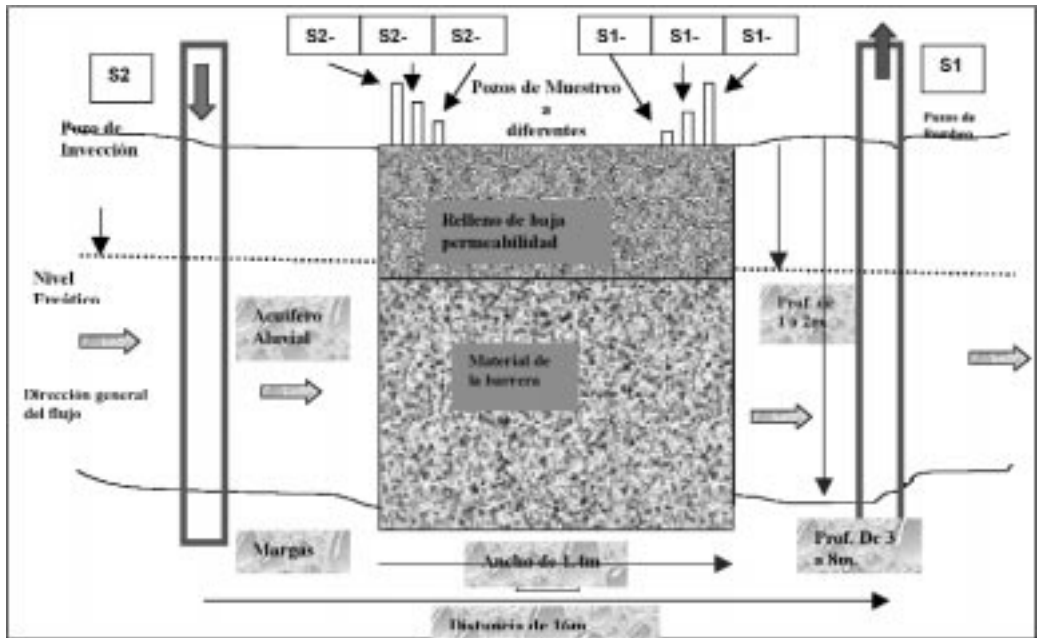
En resumen, la barrera consta de tres módulos de (1.40 x 30) m<sup>2</sup> separados por tramos inertes de baja permeabilidad de (1.40 x 10) m<sup>2</sup>, tal como se aprecia en la figura 4.



**Figura 4.** Barrera geoquímica experimental. Vista en planta. Distribución a lo largo de la barrera de los diferentes materiales de relleno y ubicación de sondeos de control y de ensayo.

En profundidad, el relleno activo va desde 0.5 m por debajo del contacto aluvial-margas hasta 0,80 m por debajo del nivel freático. La entrada en las margas se hace para asegurar que no se produzca un cortocircuito a través de material inerte. Desde 0.80 m por debajo del nivel freático hasta la superficie Del terreno se emplea material inerte poco permeable (raña) a fin de reducir costes y limitar la oxidación del relleno activo por exposición a condiciones atmosféricas u oscilaciones del nivel freático. En la figura 5 se aprecia la sección lateral de la barrera. Se ven además los sondeos de muestreo dentro de la propia barrera.

Como se comentó previamente el relleno quedó constituido finalmente por caliza, virutas de hierro y dos tipos de compost. Con estos materiales se preparan las siguientes mezclas



**Figura 5.** Barrera geoquímica experimental. Vista sección longitudinal. Detalle de los elementos constructivos y posición de los materiales de relleno. Sondeos de muestreo dentro de la barrera como de los de ensayo fuera de la misma.

Módulo margen derecha: 50% caliza; 50 % compost-1

Módulo central: 46% caliza; 46% compost-2; 8% hierro

Módulo extremo margen izquierdo: 66% caliza; 33% compost-2

Dichas mezclas se presentan en volúmenes y en la figura 4 se observa su distribución en planta.

## 5. RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA BARRERA

A los fines de tener un adecuado control de la barrera y de su funcionamiento se colocaron una serie de puntos de control fuera y dentro de ella, efectuándose muestreos cada 15 días.

Los sondeos S1 a S18 (ver figura 4) situados en torno a la barrera, tanto aguas arriba como aguas abajo, sirven para controlar la calidad del agua que se aproxima a la barrera como la calidad del agua que sale y circula aguas abajo. Estos sondeos han sido muestreados con cierta periodicidad antes de la construcción de la barrera. También son sondeos utilizados

para ejecutar diferentes tipos de ensayo (bombeo, trazadores, slug, etc.) a los fines de ajustar las características hidráulicas del acuífero.

Dentro de la barrera se han instalado 18 piezómetros, anidados de a tres, sobre las secciones de aguas arriba y abajo de la barrera, a diferentes profundidades. Su objetivo evaluar la calidad del agua dentro de la barrera, ver si existe algún tipo de estratificación dentro de la misma o flujos preferenciales. También se utilizan para tomar muestras del material de relleno y evaluar el comportamiento y evolución de las bacterias sulfatoreductoras.

El análisis del comportamiento de la barrera debe efectuarse analizando cada uno de los módulos dadas las diferencias que existen entre ellas.

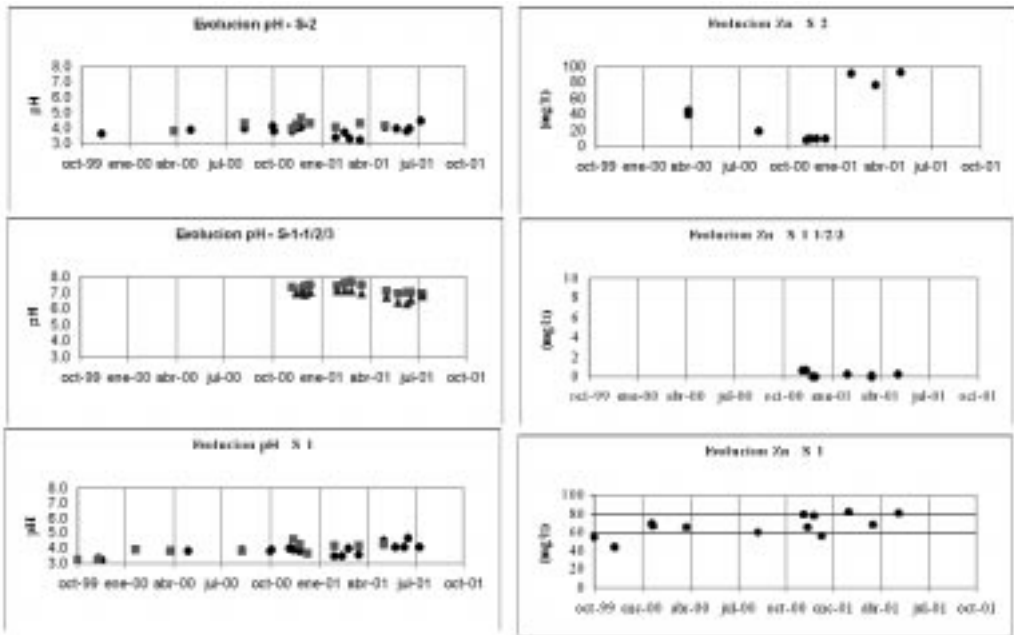


Figura 5. Evolución de Ph y Zn en módulo margen derecha. Sondeos S1 (aguas abajo), S2 (aguas arriba) y S-1(1-2-3) (dentro) de la barrera geoquímica experimental Fin construcción barrera octubre 2000.

**El módulo de la margen derecha** parece no haber funcionado correctamente. Ni el pH ha subido ni el Zn ha bajado apreciablemente respecto a los valores anteriores a la construcción de la barrera (octubre de 2000), aún mas aguas abajo hay valores mas altos que aguas arriba de la barrera. Por otro lado y si bien dentro de la barrera los parámetros químicos responden a lo esperado, la permeabilidad es extraordinariamente baja. Ello sugiere que la barrera se ha colmatado o que el compost utilizado contenía arcillas expansibles que al humectarse y expandirse han reducido la permeabilidad drásticamente. Esto contrasta con los ensayos de laboratorio y con el comportamiento de los otros módulos y sugiere que el compost no ha funcionado hidráulicamente como se esperaba.



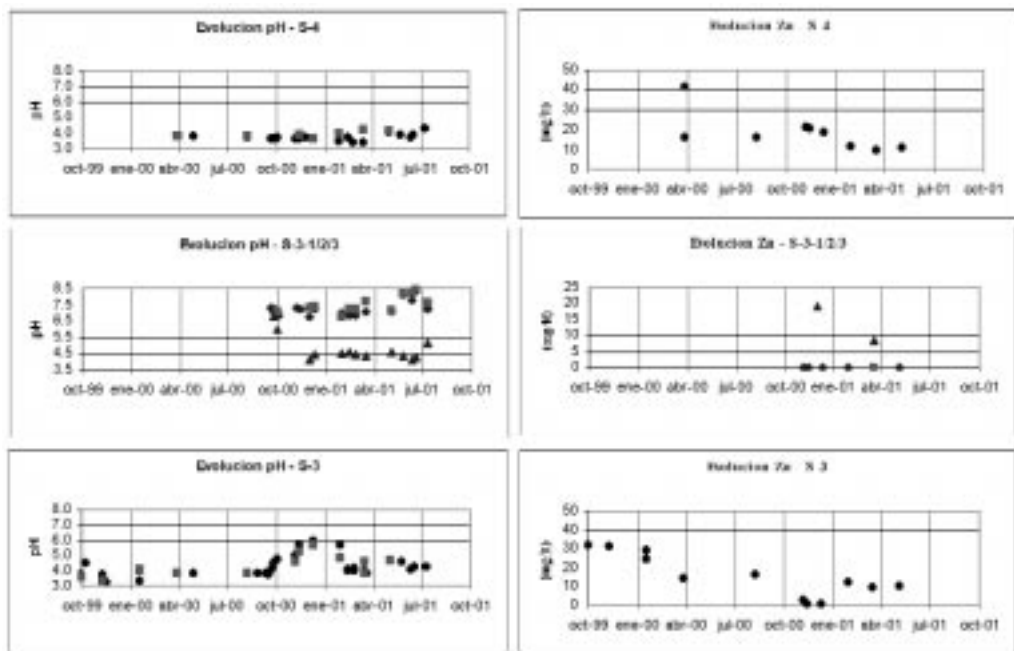


Figura 6. Evolución de Ph y Zn en módulo central. Sondeos S3 (aguas abajo), S4 (aguas arriba) y S-3(1-2-3) (dentro) de la barrera geoquímica experimental Fin construcción barrera octubre 2000.

**El módulo central (margen izquierda del río)** funcionó muy bien durante tres meses. El pH subió a valores de 6 y las concentraciones de Zn bajaron a niveles admisibles (Fig.6). De acuerdo con los ensayos de laboratorio y la modelación numérica, esto sugiere la disolución de calcita. El Zn puede retenerse como sulfuro o coprecipitar.

No obstante entre noviembre y enero se produjeron lluvias muy intensas, de manera que la terraza  $T_0$  se inundó y los sondeos sobre la margen izquierda del río Agrío fueron superados por los niveles del río. Además de las pérdidas de equipo, en las campañas posteriores se han detectado valores bajos de pH y valores altos de Zn, los que aún no se han recuperado. En este momento se están estudiando las causas de este deterioro. Básicamente, se apuntan a diferentes hipótesis. Por un lado, es posible que la inundación haya desplazado el agua del aluvial, que haya cambiado el régimen de flujo en el mismo., o que se halla producido un lavado de los suelos aún con lodos, o que el río al erosionar las márgenes tenga una mayor conexión con los sondeos de aguas abajo y ya que por el circulan aguas ácidas éstas se infiltren y cambien las condiciones de los sondeo que están siendo utilizados como de control. Por otro, es posible que el relleno haya perdido efectividad por arrastre de finos o algún otro mecanismo.

**El tercer módulo, sobre margen izquierda** es análogo al módulo central en cuanto a su comportamiento. No obstante se observa una leve recuperación de los valores de pH, que habían caído hasta 5 y hoy se encuentran en 6, aunque los valores de Zn se mantienen

elevados. Esto tal vez confirmaría las hipótesis de un lavado de suelos (aporte de metales pesados que no disminuye en el modulo central y en el de margen izquierda) y la de la influencia del río que en los sondeos S5 es menos apreciable que en los S3 dada su lejanía, lo que ha permitido recuperar los valores de pH.

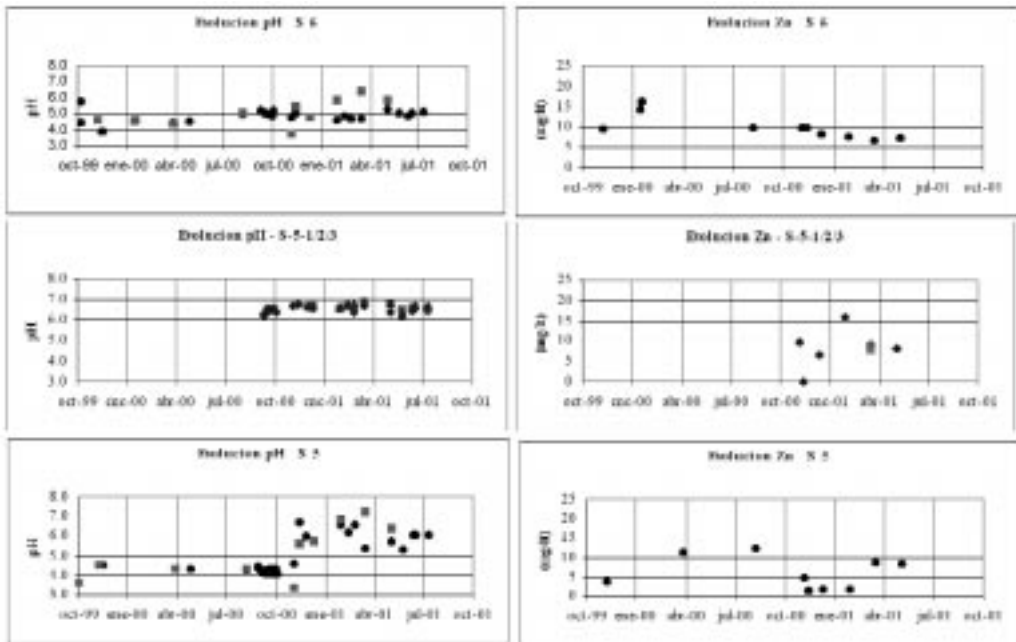


Figura 7. Evolución de Ph y Zn en módulo margen izquierda. Sondeos S5 (aguas abajo), S6 (aguas arriba) y S-5(1-2-3) (dentro) de la barrera geoquímica Fin construcción barrera octubre 2000

## 6. CONCLUSIONES

De la barrera de Aznalcóllar se extraen varias conclusiones.

- 1) Es importante caracterizar y normalizar el compost. El que se terminó usando es distinto del empleado en los ensayos de laboratorio. Si bien los dos módulos de la margen izquierda han funcionado de acuerdo con lo esperado, el de la margen derecha ha perdido permeabilidad.
- 2) Las lluvias intensas de noviembre a enero han reactivado la contaminación. El impacto sobre el funcionamiento de la barrera todavía es incierto. Sin embargo, las aguas de los sondeos de la barrera muestran un pH alto y concentración de Zn bajo, así como de otros metales pesados. Además su permeabilidad sigue siendo alta. Todo ello hace esperar que la contaminación se corregirá una vez que se normalice la situación.

## 7. ACCIONES FUTURAS

Con motivo de los hechos comentados se prevé continuar con los muestreos sistemáticos de la barrera dentro y fuera de ella. Asimismo se prevé la ejecución de nuevos sondeos que permitan ajustar la evolución de la calidad del agua en su entorno, puesto que a la luz de nuevos aspectos geológicos y posibilidades de modificación del flujo del acuífero es necesario mejorar aún mas el conocimiento que se tiene de la zona, con el objetivo final de que la barrera cumpla el cometido para la cual fue concebida.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado en parte por el Ministerio de Medio Ambiente a través de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, quien ha construido la barrera. El proyecto de investigación recibió financiación de la CICYT (con financiación parcial del programa FEDER) y gestionado por el IGME. Finalmente, el seguimiento se está realizando con cargo al V Programa Marco de la UE (Proyecto PIRAMID EVK1-1999-0097).

## 9. REFERENCIAS

- Ayora C., Bernet O., Bolzicco J., Carrera J., Domenech C., Cerón J.C., Fernández I., Gómez P., Jaén M., Mantecón R., Manzano M., Martín Machuca M., Mediavilla C., Moreno L., Navarrete P. y Salvany J.M. (2001). Hidrogeología del valle del Guadiamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuífero. Boletín Geológico y Minero (ITGE, Ministerio de Ciencia y Tecnología). Volumen Especial: Las Aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar, pp. 69-92.
- Alcolea A., Ayora C., Bernet O., Bolzicco J., Carrera J., Cortina J.L., Coscera G., De Pablo J., Domenech C., Galache J., Gibert O., Knudby C., Mantecón R., Manzano M., Saaltink M. y Silgado A. (2001). Barrera geoquímica. Boletín Geológico y Minero (ITGE, Ministerio de Ciencia y Tecnología). Volumen Especial: Las Aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar, pp. 229-257.
- Blowes, D.W. y C.J. Ptacek (1992). Geochemical Remediation of Groundwater by Permeable Reactive Walls: Removal of Chromate by Reaction with Iron-bearing Solids. In Proceedings of the Subsurface Restoration Conference, U.S. Environmental Protection Agency, Kerr Laboratory, June 21-24 Dallas, TX, pp. 214-216.
- Carrera J., Ayora C., Bolzicco J., Alcolea A., Bernet O., Cortina J.L., Coscera G., De Pablo J., Domenech C., Galache J., Gibert O., Knudby C., Mantecón R., Manzano M., Saaltink M. y Silgado A. (2001) Diseño, construcción y resultados preliminares de la barrera geoquímica de Aznalcóllar. VII Simposio de Hidrogeología, pp 281-289.
- Carrera J., Ayora C., Bolzicco J., Alcolea A., Bernet O., Cortina J.L., Coscera G., De Pablo J., Domenech C., Galache J., Gibert O., Knudby C., Mantecón R., Manzano M., Saaltink M. y Silgado A. (2001) An experimental geochemical barrier at Aznalcollar. Groundwater Quality 2001, Third International Conference on Groundwater Quality, pp 407-409.
- Fryar, A. E.; Schwartz, F. W. Hydraulic-conductivity reduction, reaction-front propagation, and preferential flow within a model reactive barrier. Journal of Contaminant Hydrology. 1998, 32, 333-351.

- Gillham, R.W. y S.F. O'Hannesin (1992). Metal-catalyzed Abiotic Degradation of Halogenated Organic Compounds. In IAH Conference Modern Trends in Hydrogeology, Hamilton, Ontario, May 10-13. International Association of hydrogeologists, Markham, Ontario, Canada, pp. 94-103.
- UPC, 1998. Propuesta de caracterización y seguimiento de la contaminación por metales de las aguas subterráneas (zonas saturada y no saturada) en el entorno afectado por el vertido de lodos de las minas de Aznalcóllar. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Waybrant, K. R.; Blowes, D. W y Ptacek; C. J. (1998) Selection of reactive mixtures for use in permeable reactive walls for treatment of mine drainage. *Environmental Science & Technology*, 32 (13), 1972-1979.