

SOBRE LA INTERACCIÓN ENTRE ACUÍFEROS Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

Jesus CARRERA* y Enric VÁZQUEZ-SUÑÉ*

(*) Institut Jaume Almera de Ciencias de la Tierra (CSIC). Lluís Solé i Sabarís, s/n. 08028
Barcelona. jcarrera@ija.csic.es ; evazquez@ija.csic.es

RESUMEN

Se analizan brevemente diversos factores de interacción entre acuíferos y obras públicas, desde la perspectiva de la experiencia reciente. La interacción es bidireccional. Las obras subterráneas pueden generar graves impactos sociales y ambientales sobre los acuíferos. Si no se adoptan medidas se pueden producir descensos que provoquen el secado de pozos, la intrusión marina, daños a ríos, humedales, manantiales o freatofitas, etc. También pueden producir ascensos de nivel (efecto barrera) que den lugar a inundación de edificaciones subterráneas (sótanos, metro o similares), encharcamientos, salinización por evaporación freática o contaminación por lavado piezométrico. Las interacciones también se producen en sentido contrario. El nivel de agua en el acuífero puede dificultar la excavación, ya sea por el empuje del agua sobre la estructura, por arrastre de finos o por rotura del suelo. También pueden provocar problemas de cambios de calidad química inducidos por la excavación o por el sistema de drenaje (arcillas sensibles, hinchamiento por cambios mineralógicos o colapso por disolución). Los dos conjuntos de problemas pueden reducirse si existe una buena interacción entre hidrogeólogos y geotécnicos, si existe una buena base geológica (no restringida a la traza de la obra) y si se respetan los principios y protocolos básicos.

Palabras clave: *Interacción, efecto dren, efecto barrera, impactos*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto una proliferación de obras subterráneas, metro en las grandes ciudades y líneas de tren de alta velocidad. Muchas de ellas han tenido problemas que en algunos casos han tenido una gran repercusión pública, por ejemplo, en el hundimiento del terreno en el barrio del Carmel o en los socavones en la línea de alta velocidad a la entrada de Barcelona. A su vez, esta repercusión ha generado un debate público que fuerza a cuestionarse la causa de los problemas.

El hecho es que obras subterráneas se han ejecutado siempre, pero se tiene la sensación de que nunca han tenido tantos problemas como ahora. Podría argumentarse que nunca se habían ejecutado tantas obras en acuíferos como ahora. De hecho, los metros de la primera mitad del siglo XX no se construyen propiamente en acuíferos. Esto es verdad tanto en Madrid, donde

las “arenas de miga” no pueden considerarse acuífero, como en Barcelona, donde los niveles de agua se mantuvieron bajos hasta final de siglo. Por otro lado, tradicionalmente, los túneles de ferrocarriles y carretera solían restringirse a las zonas de montaña, donde la conductividad hidráulica tiende a ser baja. Tampoco es cierto que antes no hubiese accidentes. Baste recordar las “bolsas de lodo” que “aparecían” durante la construcción del Metro de Madrid o en el Túnel del Talave. Debe recordarse, y con espanto, especialmente por las víctimas que produjeron aquellos accidentes, pero también por las explicaciones que se dieron. Es difícil saber qué pensaban los técnicos involucrados, pero lo cierto es que en el imaginario público ha quedado la idea de que existen en el terreno grandes burbujas de lodo, cuya presencia es impredecible que desbordan cuando se pinchan. A esta imagen ha contribuido el aura épica con que se rodeaban algunas de estas obras. De hecho, excavar en un acuífero era épico. Hasta los años 1960 era relativamente frecuente excavar las cimentaciones de puentes en lechos muy permeables con cajones de aire comprimido (Figura 1), lo que ocasionaba múltiples accidentes por la descompresión (PRESA y ERASO, 1970). Pero todo esto, que antes se excavase en terrenos más fáciles y que, cuando no lo eran, hubiese accidentes, no justifica los que han ocurrido recientemente.

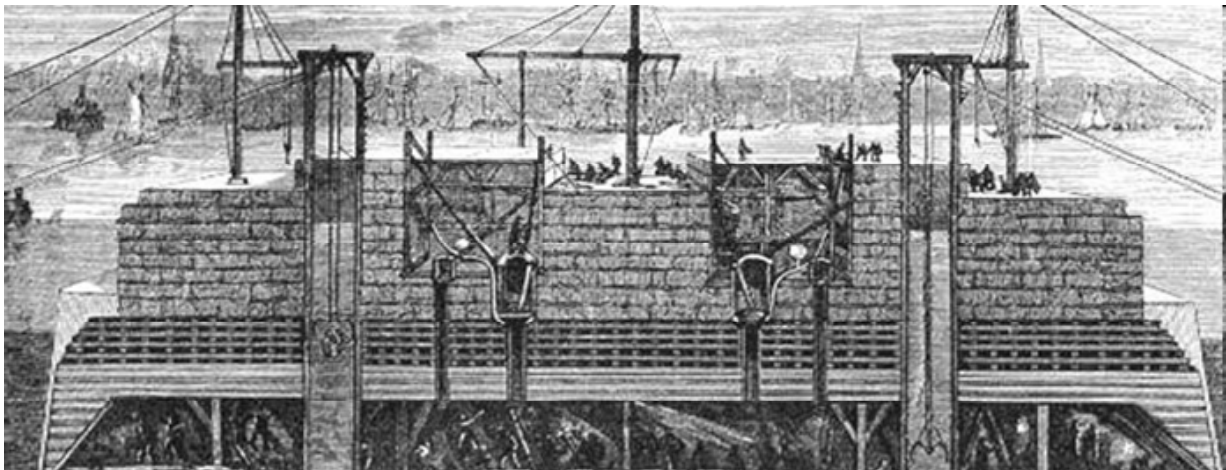


Figura 1. Cajón con aire comprimido empleado en la cimentación del puente de Brooklin, sobre el Río Hudson. Este método se siguió empleando hasta la segunda mitad del siglo XX para excavar bajo el nivel freático cuando no era factible el agotamiento (<http://projects.olin.edu/ahs/HOT2005/Transportation/caisson.htm>, originalmente de BURR, 1885).

La popularización de los accidentes tiene diversas implicaciones. Hay miedo y se pierde confianza. Eso conduce a decisiones absurdamente caras. Más grave aún es que la prioridad de la seguridad hace olvidar otros aspectos también importantes. En particular, se pierden de perspectiva los posibles impactos ambientales de la obra. Es cierto que es preceptivo realizar un estudio de impacto ambiental y adoptar las medidas, correctivas y preventivas, oportunas. Sin embargo, cuando se entra en una dinámica de preocupación, es frecuente que dichas medidas pasen a ocupar un lugar secundario.

Es difícil entender el porqué de tantos errores. Los principios básicos que hay que respetar se encuentran en libros de texto (por ejemplo, CUSTODIO y LLAMAS, 1976 JIMÉNEZ-SALAS, et al., 1975), por lo que deben suponerse conocidos. Hay varios factores, sin embargo, que contribuyen a que no siempre se apliquen estos principios básicos. En primer lugar, el conocimiento es cada vez más especializado. Para tratar sobre la interacción de

acuíferos y aguas subterráneas hay que saber hidrogeología y geotecnia, y nadie sabe mucho de las dos cosas. De hecho, sólo recientemente se ha empezado a introducir el estudio hidrogeológico como parte de los proyectos de obras públicas. Pese a ello, es probable que la mayoría de hidrogeólogos, acostumbrados a proyectos de captación de aguas, no estén en condiciones de responder a las necesidades que plantea una obra. También parece probable que la mayoría de los ingenieros geotécnicos desconozcan las metodologías habituales de caracterización de acuíferos.

Es en este contexto que se enmarca este artículo, en el que se pretenden sintetizar algunas de las experiencias de los autores con el objetivo de poner de manifiesto la necesidad de colaboración. Para ello se revisan brevemente los impactos de las obras subterráneas sobre los acuíferos y lo de éstos sobre el proceso constructivo.

EFECTO DREN

El término efecto dren se refiere al impacto causado en el acuífero por la extracción de agua. La extracción da lugar a descensos de nivel que pueden producir un amplio abanico de impactos, incluyendo el secado de manantiales y de freatofitas, afecciones a pozos, avance de cuña de intrusión, secado de humedales, subsidencia, etc. (Figura 2), sobre algunos de estos impactos volveremos más adelante. Cabe insistir en que pequeñas variaciones del nivel pueden ser suficientes para que algunos de estos impactos sean graves. Por ejemplo, un descenso de 1 m provoca un ascenso de unos 40 m en una cuña de intrusión marina en equilibrio según Ghyben y Herzberg. Pequeñas variaciones del nivel también pueden dar lugar a efectos desproporcionados en el caso de manantiales y humedales. Cabe insistir también en que, aunque la Figura 2 concentra la mayoría de los impactos atribuibles a efecto dren, cosa poco realista, el ejercicio no es teórico. Todos los impactos que se muestran ocurren con relativa frecuencia.

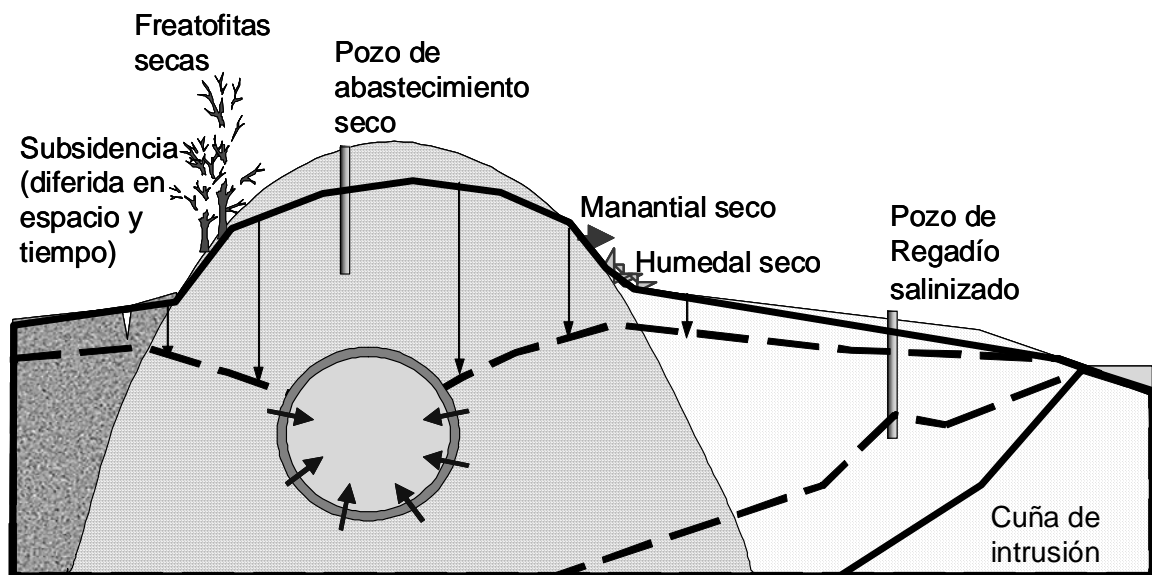


Figura 2. Efecto dren: impactos causados por el rebajamiento del nivel freático desde su posición inicial (línea continua) hasta la final (a trazos).

La extracción de agua y el descenso pueden tener causas diversas. Aquí queremos destacar dos, el drenaje hacia túneles sin revestimiento y los bombeos para agotamientos.

El efecto dren en túneles es pequeño mientras el túnel atraviese zonas de baja permeabilidad, porque el descenso queda acotado a la zona comprendida entre fracturas permeables. Sin embargo, cuando las corta, pueden producirse entradas de agua importantes que darán lugar a descensos generalizados en una gran porción del macizo. Independientemente de los problemas que la entrada de agua genere sobre la obra, es seguro que se producirán impactos ambientales. Ejemplos de estos impactos pueden encontrarse en la mayoría de los túneles, Bracons, túnel base de Gotardo, túnel de Guadarrama. Lo más grave es que algunos de estos efectos pueden ser irreversibles. El descenso produce un aumento importante de las tensiones efectivas, en una zona muchísimo más extensa que la debida a la propia deformación del túnel. Si los reajustes de tensiones producen cizalla, es seguro que aumentará la transmisividad de las fracturas más permeables y, con ello, la permeabilidad efectiva del macizo. Este aumento puede no corregirse con el revestimiento del túnel, con lo que el descenso de nivel sería irreversible. Por ello, sorprende que no sea práctica habitual inyectar antes de la excavación los tramos más permeables.

La segunda causa de descensos importantes es la extracción de agua para agotamiento de excavaciones. Cuando la excavación es profunda y se realiza en un acuífero permeable, el caudal a extraer puede ser altísimo. Nuevamente, al margen del desperdicio de agua, si se gestiona, ese agua puede recuperarse, la situación comporta un cierto riesgo, el cese del bombeo puede tener efectos desastrosos. Por ello, en estos casos, es mejor bombear dentro del recinto a excavar.

Ambos casos (túneles y agotamiento) son relativamente fáciles de abordar con las formulaciones que se encuentran en libros de texto.

Aunque el impacto sobre los acuíferos es grande, la mayoría del trabajo se ha centrado en evaluar cómo evoluciona el caudal drenado por un túnel. En realidad, el túnel puede considerarse como un pozo en el que se impone un nivel igual a la cota del túnel. Por tanto, el caudal drenado por una fractura intersectada por un túnel viene dado por la conocida expresión de JACOB y LOHMAN (1952), para el caudal extraído por un pozo a descenso constante. Esta fórmula puede aproximarse muy bien, con error inferior al 0,5%, por (PERROCHET, 2005):

$$Q = \frac{2\pi T \Delta h}{\ln(1 + \sqrt{\pi t_D})} \quad , \quad t_D = \frac{Tt}{Sr_t^2} \quad [1]$$

donde T es la transmisividad, Δh el descenso impuesto por el túnel (nivel inicial menos cota del túnel), t_D es el tiempo adimensional, que depende de la difusividad hidráulica (T/S , donde S es el coeficiente de almacenamiento) y r_t es el radio del túnel. Esta expresión puede interpretarse como la ecuación de Thiem con radio externo creciente con el tiempo y también puede deducirse de la de Jacob.

El único parámetro incierto de la Ecuación [1] es la transmisividad de la fractura. En realidad, los medios fracturados son muy heterogéneos, por lo que es difícil definirla. Peor aún, suelen presentar efectos de escala (CARRERA, et al., 1990; MARTÍNEZ-LANDA y CARRERA, 2005). Es decir, la transmisividad efectiva tiende a crecer con la escala, cosa que

sucede siempre que los puntos más conductivos estén bien conectados (SÁNCHEZ-VILA, et al., 1996). Esta situación debe esperarse siempre en medios fracturados, por lo que el caudal drenado se reducirá un poco más lentamente de lo que predice la Ecuación [1]. En todo caso, la transmisividad efectiva a gran escala puede estimarse con bastante precisión mediante un ensayo de bombeo, si se interpreta por el método de COOPER y JACOB (1946). Incluso si no se puede asegurar un bombeo constante, la recuperación puede proporcionar una estimación buena (WILLMAN, et al., 2007).

La ecuación [1] sólo sirve mientras no se afecte el contorno. A largo plazo, para tiempos del orden de Sp^2/T , siendo p la profundidad del túnel, el caudal pasa a estar controlado por las condiciones de contorno, y el caudal que drena hacia el túnel se hace igual al que capta de las masas de agua naturales. Para evaluarlo es preciso realizar modelos numéricos (ver, por ejemplo, MOLINERO, et al., 2002; o MARTÍNEZ-LANDA y CARRERA, 2005).

De todas maneras, se puede obtener una primera idea de la magnitud de los caudales bajo condiciones idealizadas, como la que se muestra en la Figura 3, un macizo homogéneo bajo un nivel permeable (sistema superficial). El caudal que capturaría un túnel de dicho sistema superficial viene dado por (GOODMAN, et al., 1965):

$$\frac{Q}{L} = \frac{2\pi K_{roca} (h_{aqf} - h_{tunnel})}{\ln 2p/R_{tunnel}} = \frac{2\pi K_{roca} p}{\ln (2p/R_{tunnel})} \quad [2]$$

donde Q/L es el caudal drenado por el túnel (por unidad de longitud del túnel), K es la permeabilidad del macizo (supuesta uniforme) y p es la profundidad del túnel por debajo del nivel del acuífero (supuesto horizontal y a presión nula). Esta ecuación resulta de aplicar la teoría de las imágenes a la Fórmula de Thiem. Si el entorno del túnel se impermeabiliza, por ejemplo mediante inyecciones, el caudal viene dado por:

$$\frac{Q}{L} = \frac{2\pi p K_{roca} K_{inj}}{K_{roca} \ln \frac{R_{tunnel} + e}{R_{tunnel}} + K_{inj} \ln \frac{2p}{R_{tunnel} + e}} \quad [3]$$

donde K_{inj} es la permeabilidad de la zona inyectada y e es el espesor de impermeabilización. Para tiempos intermedios entre los iniciales, período de validez de la Ecuación [1], y el estacionario final puede adoptarse la media entre ambas propuesta por RENARD (2005). En todo caso, desde el punto de vista constructivo, lo importante es el corto plazo, Ecuación [1] y desde el ambiental, el largo plazo, Ecuaciones [2] y [3]. Los caudales obtenidos a largo plazo se muestran en la Figura 3. Obsérvese que, estas ecuaciones también permiten evaluar el caudal drenado por una fractura desde el momento que fue intersectada por el túnel. Para ello, Q/L debe sustituirse por Q , caudal drenado por la fractura, y K por T , transmisividad de la fractura.

La Figura 3 ilustra varias cosas. Para permeabilidades por debajo del 10^{-9} m/s, el impacto del túnel es despreciable, aunque no se impermeabilice. Por encima de 10^{-7} m/s, el caudal drenado es muy grande, tanto que se captura prácticamente toda la recarga y las ecuaciones anteriores dejan de ser válidas. Si se realiza una inyección, es necesario asegurar su efectividad. Si la permeabilidad de la zona inyectada es del orden de 10^{-8} m/s, el caudal drenado es todavía muy importante, independientemente del espesor de la zona inyectada, caudales del orden de 20 l/s/km si el espesor es de unos 5 m.

Dada la naturaleza muy heterogénea de los macizos fracturados, la mayoría del macizo

tiene una permeabilidad por debajo de los 10^{-9} m/s, estos resultados sugieren que se podrían inyectar sólo las zonas de permeabilidad más alta, cosa que probablemente se haya de hacer en todo caso para cuestiones de estabilidad. La realidad, sin embargo, es que estas zonas no están aisladas y que todo el macizo tiene una cierta permeabilidad. Por tanto, inyectar sólo las zonas más permeables tiene una efectividad parcial. Se reduce su caudal, pero se dirige a las zonas sin inyectar adyacentes. Es decir, para asegurar la efectividad no es suficiente con inyectar sólo en las zonas más permeables, se ha de inyectar un buen trozo, del orden de 20 m, a cada lado.

A la vista de la posible magnitud de los impactos, el principio de prudencia indica que siempre se habría de considerar seriamente la opción de impermeabilizar. Sólo cuando su pueda asegurar la baja permeabilidad, digamos por debajo de los $2 \cdot 10^{-9}$ m/s efectivos, del macizo, tiene sentido no impermeabilizar. De las opciones de impermeabilización sólo hemos considerado aquí la de inyección, porque es la más económica cuando la profundidad del túnel es grande y la resistencia de la roca, alta. Bajo estas condiciones, la inyección ayuda a que la roca trabaje a compresión, como a anillo, lo que aleja de la condición de rotura, al reducir la tensión desviadora relativa a la media.

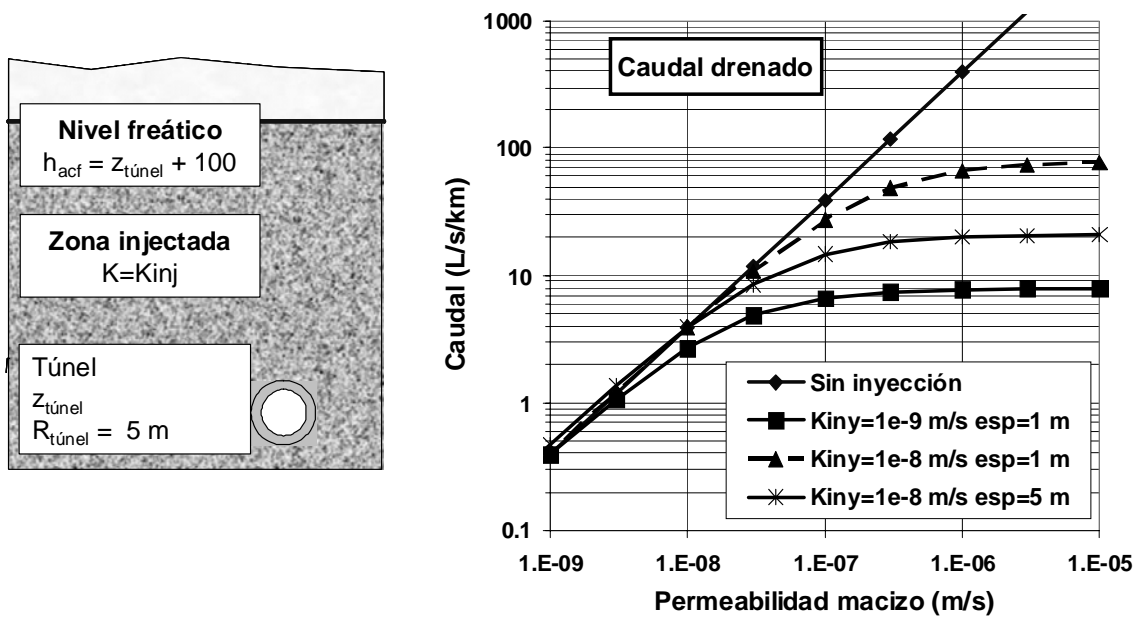


Figura 3. Caudal drenado por un túnel de 10 m de diámetro a 100 m de profundidad bajo un acuífero en función de la permeabilidad del macizo para varias hipótesis de inyección. Los cálculos son idénticos para fracturas empleando la transmisividad en lugar de la permeabilidad, en cuyo caso el eje vertical es el caudal drenado por la fractura. A efectos comparativos, debe notarse que una recarga de 200 mm/año es una franja de 500 m es de unos 3 L/s/km.

Dicho esto, la opción de inyectar es cara y difícil. En primer lugar, si no se dispone de un sistema de drenaje activo o de un andamio, es posible que la inyección misma rompa el revestimiento provisional. De hecho, en las zonas más débiles se puede producir, incluso, la rotura de bloques, aumentando, irónicamente, el caudal drenado en el túnel. Eso sugiere que puede ser mejor inyectar antes de excavar, ya que se reducen no sólo las filtraciones iniciales sino también la deformación del macizo y los riesgos durante la excavación.

EFECTO BARRERA

El efecto barrera es una obstrucción, parcial, del acuífero que provoca una pérdida de carga localizada s_B . Dependiendo de las condiciones de contorno, este efecto puede dar lugar a alteraciones en el régimen natural de flujo de las aguas subterráneas, ascenso aguas arriba, y/o descenso aguas abajo de la obstrucción (Figura 4). Este fenómeno se produce debido a que muchas obras subterráneas seccionan total o parcialmente el acuífero comportándose como un obstáculo al paso del agua subterránea. Ante esta situación, el agua modifica su dirección de flujo natural para bordear la obstrucción alterándose la superficie piezométrica natural del acuífero en torno a la estructura.

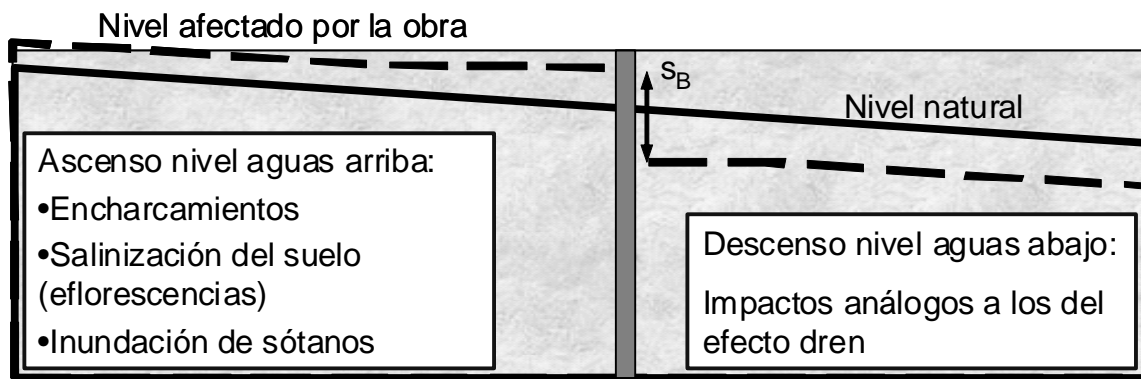


Figura 4. Ilustración del “efecto barrera”. La obstrucción del acuífero hace cambiar el nivel natural (línea continua) dando lugar a un ascenso del nivel aguas arriba y a un descenso aguas abajo (línea a trazos).

Este efecto puede traer consigo una serie de consecuencias negativas. La depresión del nivel freático aguas abajo puede tener efectos análogos a los discutidos en la sección anterior: pérdida de cultivos y flora colindante, secado de pozos, etc. Además, un desnivel muy pronunciado puede dañar estructuralmente a la propia barrera. Una sobreelevación del nivel freático aguas arriba puede favorecer la inundación de aparcamientos subterráneos o cualquier tipo de estructura civil subterránea colindante. Puede empantanar el suelo si el nivel sube demasiado, o provocar inestabilidad en taludes. Además, si el nivel se acerca a la superficie puede producirse salinización por evaporación freática o, en cualquier caso, contaminación por lavado piezométrico de vertederos abandonados (NAVARRO, et al., 1992).

Si bien el efecto barrera es un problema común en la obra civil, la bibliografía existente referente a este problema es escasa. En todo caso, su cuantificación no es compleja, la magnitud del ascenso y del descenso depende de las condiciones de contorno. Sin embargo, suponiendo que el flujo total se mantenga inalterado, que es lo más habitual, la suma de ascenso y descenso, s_B , sólo depende del gradiente natural y de la geometría de la obstrucción. Obsérvese que no depende de la transmisividad del acuífero. De manera genérica, el s_B se calcula como:

$$s_B = s_{BD} \cdot i_N \cdot b \quad [4]$$

donde s_{BD} es el efecto barrera adimensional, que depende de la geometría de la barrera, i_N es la componente del gradiente natural perpendicular a la barrera y b es una longitud característica, su significado también depende de la geometría de la barrera.

Para ilustrar la metodología, consideremos el caso de una obstrucción parcial que deja abierto b_A y cerrado b_B . En este caso, s_{BD} viene dado por:

$$S_{BD} = \frac{\pi}{30} \ln \frac{b^7}{b_A^6 b_B} \quad [5]$$

donde b_A es el espesor abierto de acuífero y b_B es el que queda ocluido por la obstrucción ($b = b_A + b_B$).

La manera más efectiva de luchar contra el efecto barrera es la construcción de obras de paso (*bypasses*). Las funciones que debe cumplir el dispositivo son:

- Captar el agua del acuífero, transportarla a través de la estructura, para finalmente descargarla al otro lado. Dado que concentrarán caudales importantes los elementos de captación y descarga deben ser muy permeables y presentar una superficie permeable al acuífero tan grande como sea posible. Como se puede observar en la Figura 5, a este fin puede disponerse de una pantalla de gravas, construida con la misma maquinaria que las pantallas del túnel. No es muy efectivo poner sólo un pozo, porque el flujo radial hacia el pozo da lugar a importantes pérdidas de nivel.

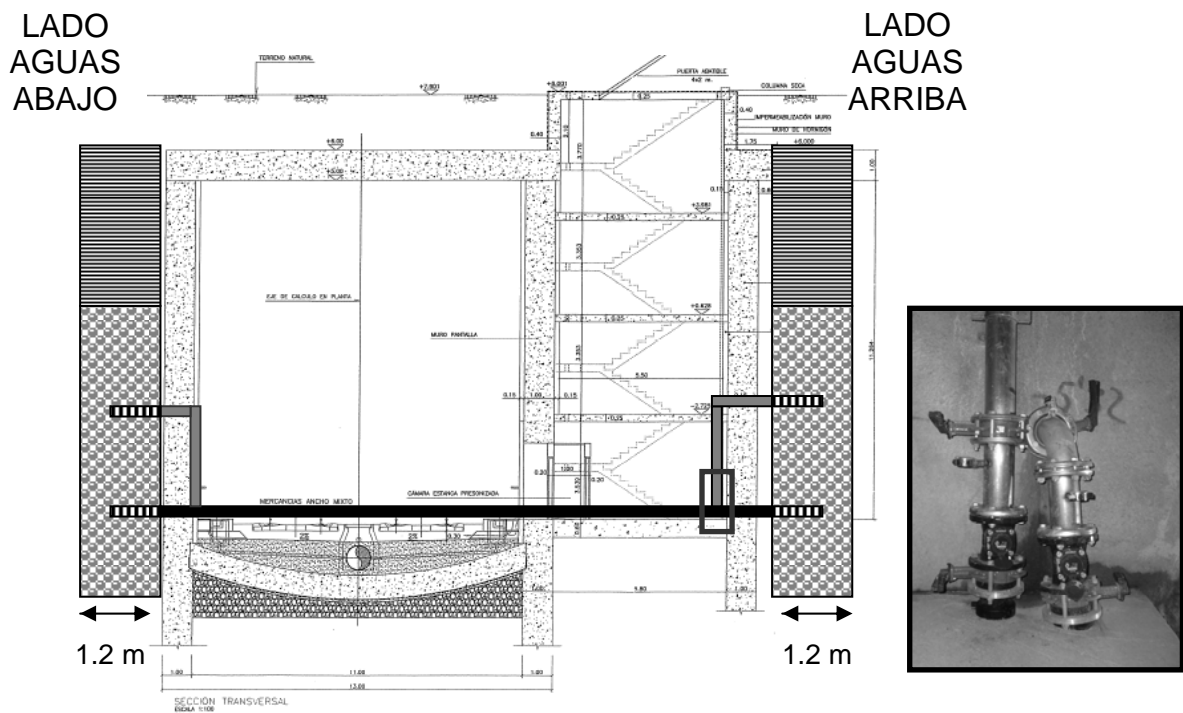


Figura 5. Dispositivo de paso (*bypass*) para mitigar el “efecto barrera”. Se disponen pantallas de grava a cada lado del túnel y están conectadas por dos tuberías que acaban en pozos para reducir la mezcla de aguas diversas. Es necesario disponer de una sala con contadores, válvulas y dispositivos de acceso al tubo para realizar tareas de mantenimiento.

- El flujo debe ser natural, no inducido.
- La distribución piezométrica resultante debe parecerse lo más posible a la natural, al menos a partir de una cierta distancia.
- Debe asegurarse la durabilidad, para minimizar las operaciones de mantenimiento, frente a colmatación, tanto por finos como química. Es por ello que en el dispositivo de

la Figura 5 se separa la captación de las aguas más superficiales (oxidantes) de las profundas (reductoras).

- Bajo coste, poco aparatoso y de fácil construcción.

En líneas generales cada dispositivo bypass debe contener un elemento enfrentado al acuífero cuya principal misión será captar o descargar agua según nos encontremos aguas arriba o aguas abajo de la barrera. Por otro lado es necesario un elemento interno a la estructura que transporte el agua de la zona de captación a la de descarga. Tanto la captación el transporte y la descarga se deben realizar sin ningún dispositivo que induzca este flujo. El propio desnivel freático a ambos lados del túnel debe ser capaz de inducir este flujo.

Tanto los dispositivos de captación como de descarga se basan en principios similares. Para captar y conducir importantes volúmenes de agua deben ser altamente permeables. Serán tanto más efectivos cuanto mayor superficie permeable presenten ante el acuífero. Su durabilidad estará condicionada por su resistencia ante fenómenos como la colmatación por finos, la colmatación química originada por precipitados.

Respecto al diseño y elementos constituyentes debe tenerse presente lo siguiente:

- Tanto la grava gruesa como la arena o gravilla fina deben ser de naturaleza silíceo para que la hipotética precipitación de óxidos de hierro, que genera acidez, no favorezca la disolución.
- Se debe colocar gravilla fina o arena en la zona más externa para favorecer el efecto filtro y prevenir la colmatación por finos.
- Las tuberías deben ser de material plástico para minimizar los efectos auto-catalíticos.
- La utilización de dos tuberías para canalizar el agua a través de la estructura sirve para prevenir la colmatación química (fundamentalmente por óxidos de hierro). Este fenómeno puede ser causado por procesos redox por mezcla de aguas oxidadas (más superficiales) con aguas anóxicas (más profundas). El objetivo es que las aguas más superficiales viajen por una tubería y las más profundas por otra.
- Los contadores de caudal servirán para controlar el correcto funcionamiento del dispositivo y detectar la posible colmatación.
- Las llaves de paso y entradas a la tubería servirán para el mantenimiento, limpieza, etc.

CONTAMINACIÓN

Las obras públicas pueden producir contaminación del agua subterránea. La contaminación puede ser activa (vertido de escombros, lixiviados de materiales de construcción, fugas de aceites, etc.) o pasiva (facilitar el acceso a zonas sensibles, zonas preferentes de vertidos ilegales, etc.). CUSTODIO y CARRERA (1989) discuten estos efectos. Pese a ello, las obras públicas no deben ser consideradas como una actividad especialmente contaminante.

Las obras subterráneas, en particular, son de las menos peligrosas desde el punto de vista de la contaminación. Si están bajo el nivel freático, el flujo de agua se dirigirá hacia la obra, por lo que cualquier vertido tenderá a quedar confinada. Más bien, el problema puede ser de tipo indirecto, el flujo de agua inducido por la obra puede movilizar contaminantes. Por ejemplo, el descenso de nivel puede favorecer la intrusión marina (Figura 2). También puede producirse contaminación por ascenso de nivel producido por ejemplo, por Efecto Barrera. El ascenso de nivel puede dar lugar a encharcamiento, a salinización por evaporación freática, o

a lixiviación de suelos contaminados por lavado piezométrico (NAVARRO, et al., 1992). A su vez, la movilización de contaminantes y, en general, los cambios en la química del agua pueden producir efectos adversos dañinos para la obra.

SUBSIDENCIA

De forma genérica se entiende por subsidencia el descenso de la superficie del terreno y por asiento la magnitud del descenso. En este artículo nos restringiremos a la subsidencia causada por rebajamiento del nivel piezométrico. Vaya por delante que, según la Ley de Terzaghi, el peso total del terreno se reparte entre la presión del agua y la efectiva, que es la que provoca deformación del suelo. Por tanto, cualquier rebajamiento del nivel provocará un aumento de la tensión efectiva y el correspondiente asiento. De hecho, en primera aproximación, despreciando la expansión del agua y los reajustes de tensión efectiva, el asiento producido por un descenso Δh del nivel piezométrico puede expresarse como:

$$s = S_s b \Delta h$$

donde $s(m)$ es el asiento, $S_s(m^{-1})$ el coeficiente de almacenamiento específico y $b(m)$ el espesor afectado por el descenso de nivel (en principio, espesor del acuífero). Por ejemplo, si $\Delta h = 10m$, $S_s = 10^{-5} m^{-1}$ y $b=20 m$, el asiento será de 2 mm.

Resulta evidente que, en general, el asiento será pequeño, pero puede llegar a ser del orden de metros cuando alguno(s) de los factores anteriores sea grande. Estas situaciones se dan, por ejemplo, en:

- Materiales sedimentarios “blandos”, normalmente consolidados. Se trata típicamente de depósitos holocenos que no han estado sometidos nunca a cargas importantes y que se han depositado en condiciones subacuáticas (depósitos lacustres o costeros). En estos casos, no es estrictamente válido hablar de coeficiente de almacenamiento, que es un concepto elástico (reversible). De hecho, los ensayos de bombeo en estos materiales suelen presentar una recuperación mucho más rápida (almacenamiento bajo) de lo que sugiere la fase de bombeo. Este tipo de comportamiento queda mejor descrito por la curva edométrica, que relaciona la reducción del índice de poros en la tensión efectiva (Figura 6). Como puede verse, la primera vez que aumenta la tensión efectiva, el índice de poros baja según la rama noval. Es esta rama, los granos del suelo se reorganizan de manera irreversible, que es lo que los geotécnicos llaman consolidación y los geólogos compactación. Si la tensión efectiva se reduce (por ejemplo, porque vuelvan a subir los niveles), el índice de poros aumenta según la rama de hinchamiento, por lo que no se recupera el asiento inicial. Lo importante, sin embargo, es que, en los sucesivos ciclos de carga-descarga, el suelo se comportará de acuerdo con la rama de hinchamiento, siempre que no se supere la tensión efectiva máxima que ha sufrido el suelo (tensión de preconsolidación). Por ello, los suelos preconsolidados (y lo son todos los que han sufrido descarga por erosión o descensos de nivel importantes en el pasado) no deben presentar grandes asientos. El valle de San Joaquín (Figura 7) o Ciudad de México son ejemplos de importantes espesores de suelos no preconsolidados.
- Grandes espesores. Incluso los materiales muy rígidos pueden dar lugar a asientos importantes cuando el descenso se produce sobre un espesor grande. Esta situación no es rara en túneles, en los que el drenaje puede producir un descenso del nivel en toda la vertical del túnel. Un caso llamativo es el del túnel base de San Gotardo, excavado en Granitos a más de 1000 m de profundidad y que ha dado lugar a asientos centimétricos (OLIVELLA, et al., 2008).

- Grandes descensos. Además del susodicho caso de túneles profundos, suelen producir asientos importantes las extracciones de petróleo, en las que la reducción de la presión de fluido puede ser de centenares de m. Tal es el caso de Houston, en Tejas.

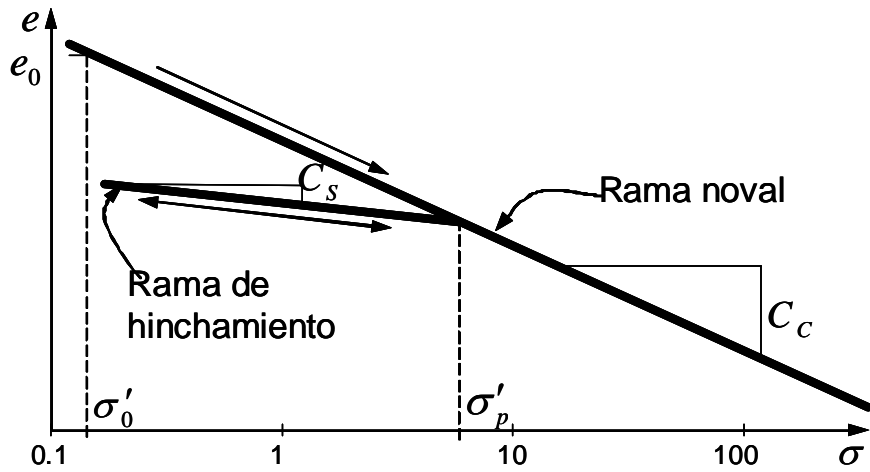


Figura 6. Curva edométrica que describe la reducción del índice de poros al aumentar la tensión efectiva. Cuando el suelo está normalmente consolidado, se deforma según la rama noval. Si en algún momento baja la carga, el suelo conserva la memoria de la máxima tensión a la que fue sometido (tensión de preconsolidación, σ'_p) y, mientras no se supere, se deformará según la rama de hinchamiento.

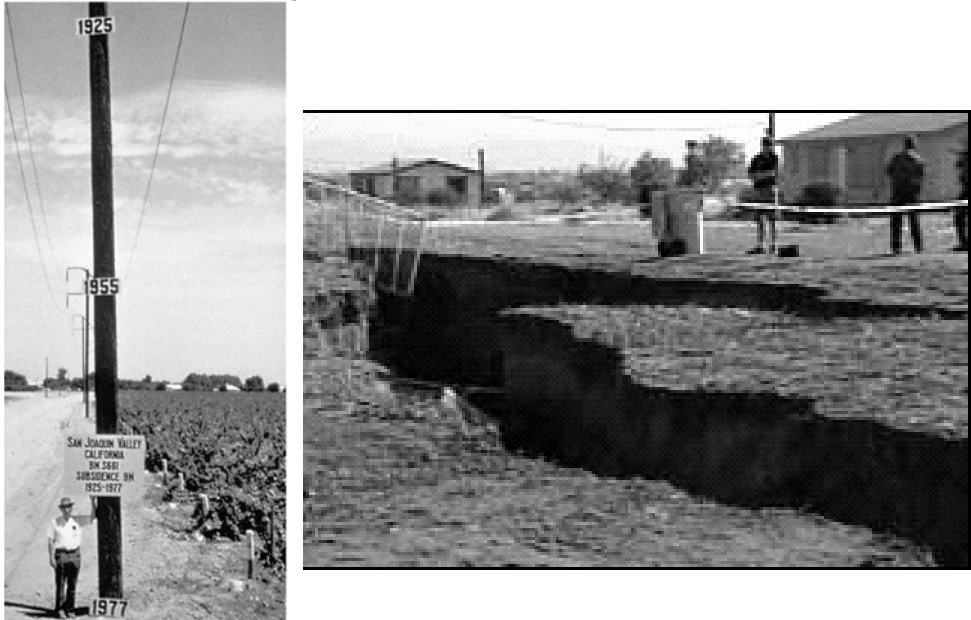


Figura 7. Imágenes típicas de subsidencia en el Valle de San Joaquín (California) que descendió 9 m entre 1925 y 1977 (izquierda) y el borde de la cuenca de Tucson (Arizona). En ambos casos se trata de sedimentos holocenos normalmente consolidados.

Estos casos, muy conocidos por todos los ingenieros geotécnicos y apoyados en imágenes como las de la Figura 7, han generado un cierto miedo a cualquier extracción de agua. Lo cierto es que el miedo no está justificado. Las extracciones, para agotamientos de obras suelen

tener una duración corta, por lo que el volumen de suelo afectado será pequeño; suelen hacerse en materiales permeables, que suelen ser poco compresibles; por el mismo motivo los gradientes hidráulicos y, por tanto, los asentamientos diferenciales serán pequeños, por lo que no deben provocar mucho daño. En fin, el fenómeno es conocido y fácil de estudiar.

La actitud contraria, habitual entre los hidrogeólogos, es igualmente criticable. El bombeo produce asentamientos. Cuando se realiza en materiales poco consolidados, con espesores muy variables, y se producen descensos importantes, estos asentamientos pueden ser grandes. Si, además, el espesor afectado es variable, cosa que invariablemente sucede en los bordes de cuenca, se producirán asentamientos diferenciales, que pueden llegar a producir grietas en el terreno (Figura 7).

La conclusión obvia es que es necesario conocer la geología, incluyendo su historia. Ciertamente, no basta con conocer la geología de la traza, sino que debe contextualizarse.

IMPACTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS SOBRE LAS OBRAS

Agotamiento de excavaciones

El agotamiento, o drenaje, de excavaciones es la extracción de agua de una excavación para mantenerla en seco. De hecho, el objetivo primordial del agotamiento es poder trabajar en seco. Sin embargo, el agotamiento puede tener otros objetivos, como reducir la subpresión y el riesgo de sifonamiento, reducir la presión de agua sobre elementos estructurales, mejorar la resistencia del suelo o la estabilidad de taludes, identificar problemas de sellado en los elementos de cierre (*jet grouting* o pantallas).

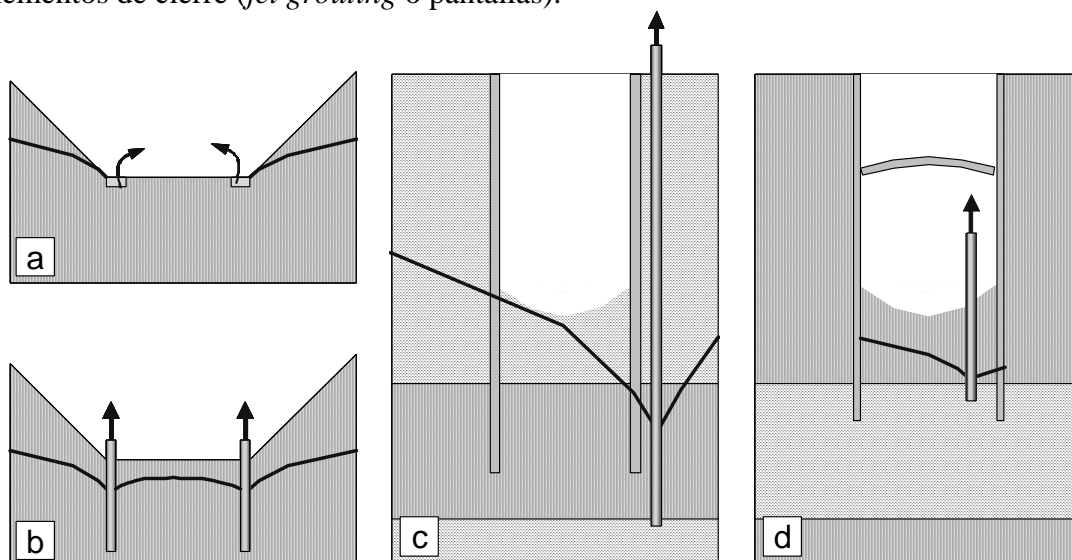


Figura 8. Excavación en trinchera, drenando con zanjas (a) o pozos (b). Excavación entre pantallas bombeando en el interior (c) o exterior (d) del recinto.

Para excavar bajo el nivel freático existen dos conjuntos de posibilidades. Se puede impermeabilizar la zona a excavar o rebajar el nivel freático, o ambos. La primera opción consiste en sellar la zona a excavar mediante pantallas, pilotes, tablestacas, o similares. Dado

que es difícil asegurar el sellado efectivo, el cierre suele complementarse con un bombeo desde el interior del recinto para conseguir rebajar el nivel freático en el interior de la zona de trabajo. Desde el punto de vista de impacto, esta opción es siempre la óptima, ya que se minimiza el caudal extraído. Sin embargo, dependiendo de la ubicación de la obra, de la profundidad y de la geología, puede resultar demasiado costosa. Por ello, es muy frecuente excavar con bombeo exterior.

Los sistemas de bombeo se sintetizan en la Figura 8. La opción de bombear con zanjas (Figura 8a) es la más económica, pero puede presentar problemas de estabilidad de los taludes, erosión, lodo en la zona de trabajo, etc. Por todo ello, los sistemas de bombeo con pozos o *well-points* suelen ser preferibles. Entre sus ventajas cabe citar:

- Reducen el riesgo de entradas de agua y, por tanto, de arrastre de sólidos en suspensión.
- Aumentan, de manera isotrópica, las tensiones efectivas del suelo, con lo que reduce el riesgo de rotura.
- Pueden ayudar a diagnosticar problemas constructivos.
- Permiten reducir sensiblemente la longitud de pantallas o columnas de jet-grouting.

No entraremos aquí en los métodos de cálculo, que, dependiendo de la situación, pueden requerir simplemente ecuaciones convencionales de hidráulica de pozos o modelos numéricos. En lo que sí entraremos es en cuatro recomendaciones básicas para la excavación en recintos cerrados, que tantos problemas han dado en Barcelona.

1. No excavar sin haber rebajado el nivel freático. El nivel freático debe llevarse a cotas inferiores a las de excavación, mediante el bombeo de los pozos que constituyen el sistema de drenaje. No se debe excavar por debajo del nivel freático para evitar principalmente dos problemas, rotura plástica y arrastre de finos. El hecho de excavar por debajo del nivel freático produce unos gradientes hidráulicos muy elevados en el frente de excavación que llevan al suelo a rotura. Estos mismos gradientes favorecen que el agua que entre por el frente de excavación arrastre finos. El proceso puede tener un “feedback” positivo, en el sentido de que el arrastre de finos conduzca a un aumento de caudal, con riesgo de colapso.
2. Identificación de problemas en los elementos de cierre. Como ya se ha mencionado previamente, la creación de recintos estancos se consigue a base de columnas de pantallas, columnas de jet-grouting, o similares. Sin embargo, estos recintos no siempre consiguen la estanqueidad buscada y presentan zonas de conexión con el acuífero, por las que se producen entradas de agua. De cara a identificar los problemas de conexión con el acuífero se pueden adoptar los sistemas descritos por Pujades o Vilarrassa (este volumen) consistentes en perforar al menos un pozo de bombeo y un piezómetro dentro del recinto y al menos un piezómetro fuera del mismo. Asimismo, se deberá realizar un seguimiento de los caudales extraídos del pozo de bombeo. La observación de dichos niveles y caudales permitirá determinar de la existencia o no de aberturas. Por ejemplo, si los caudales bombeados son elevados, significa que el recinto está abierto y tiene entradas de agua del exterior. Para los casos en que se determine que el recinto está cerrado, las entradas de agua estarán controladas, pero no por ello habrá que dejar de estar atento a posibles complicaciones que pudieran surgir durante el avance de la excavación del túnel. Finalmente, en los casos en que se evidencie la ineficacia del sistema de cierre, se tendrá que proceder a realizar las reparaciones necesarias, con la incertidumbre de desconocer la ubicación exacta de las aberturas, o a bombear desde el exterior del recinto.

3. Observar niveles dentro y fuera del recinto de excavación. La observación de niveles tiene dos objetivos. Por un lado, se controla el impacto sobre el acuífero. Para poder identificar los posibles problemas de *jet-grouting* abierto, se deben observar los niveles piezométricos dentro y fuera de los recintos de columnas de *jet-grouting*.
4. No bombear mientras se inyecte. Para reparar juntas abiertas u otras aberturas, lo normal es inyectar lechada, resina o similar. Si al mismo tiempo se bombea, se genera un gradiente hidráulico hacia el pozo de bombeo. El producto inyectado reduce la conductividad hidráulica, ya que la viscosidad de la lechada es muy superior a la del agua. De esta forma, en el entorno de la inyección, el gradiente hidráulico generado por el bombeo, se ve incrementado, ya que las líneas de corriente aumentan su longitud. Si este aumento del gradiente es suficientemente grande, arrastrará el fluido inyectado, por lo que no se conseguirá el objetivo buscado con las inyecciones.

Sifonamiento

El sifonamiento es la fluidificación del suelo como consecuencia de la anulación de la tensión efectiva. En el contexto de este artículo nos limitaremos al caso de esta pérdida como consecuencia de que la presión de agua supere a la tensión total. No se entra en el caso de que la fluidificación sea debida a efectos dinámicos, que provocan una reducción del ángulo de rozamiento y también una aparente fluidificación. Tampoco debe confundirse con tubificación, que se produce por arrastre de sedimentos, ni con rotura del suelo, que se produce cuando las fuerzas que actúan superan la resistencia del suelo. Los tres fenómenos pueden estar relacionados, pero son distintos.

La caracterización del sifonamiento es sencilla. Dado que la presión efectiva σ' , es igual a la total menos la presión del agua, $\sigma - P_w$, tanto el aumento de la presión del agua como la reducción de la tensión total, pueden hacer que la tensión efectiva se anule. En estas condiciones, desaparecen las fuerzas que actúan entre los granos del suelo. Estos quedan en suspensión en el agua (su peso queda compensado con la fuerza de arrastre). Como consecuencia, el suelo pasa a comportarse como un fluido, en el sentido de que no presenta resistencia al corte, independiente de la tensión normal.

Para caracterizar el riesgo de sifonamiento basta, pues, calcular la tensión total y la presión del agua. Si la componente vertical de tensión total se calcula como el peso total por encima de una determinada cota, es habitual representar todas las tensiones en gráficas como las de la Figura 9, que expresan gráficamente la Ley de Terzaghi. De este tipo de gráficas se deduce la tensión efectiva y el riesgo de que se anule. Tiene interés conceptual analizar el caso en que el gradiente hidráulico no es suficiente para levantar toda la columna de suelo (unos dos metros en el caso de la Figura 9), pero el suelo es heterogéneo. Si la zona más permeable (p.ej., arena) es la superficial, se reduce el riesgo de sifonamiento. En este caso, es válido decir que el peso de la arena impide la flotación del material menos permeable. Por el contrario, si el material es menos permeable se encuentra en superficie, el sifonamiento es probable.

Una consecuencia de lo anterior es que basta con adoptar una carga de material permeable en superficie para evitar el sifonamiento. En excavaciones, eso no es posible, por lo que con frecuencia, la única opción es bombear para rebajar el nivel. Con ello, se consigue mejorar además el comportamiento mecánico de suelo (es menos compresible). El resultado neto es

una mejora del terreno. En el Delta del Llobregat se ha adoptado con frecuencia la alternativa de impermeabilizar en profundidad con columnas de jet grouting. Esta opción es muy cara y, en la práctica, de efectividad dudosa ya que el mortero inyectado tiene menos densidad que el suelo.

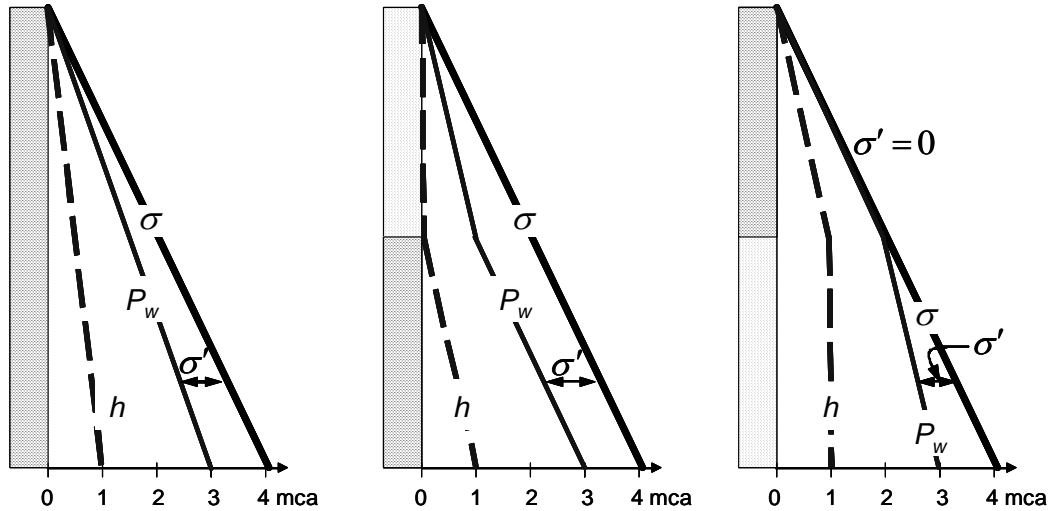


Figura 9. Perfiles de tensión total (σ), tensión efectiva (σ') y presión de agua (P_w) en una columna de suelo de 2 m sometida a un gradiente medio de 0.5. Si el suelo es homogéneo o la parte superior es más permeable que la inferior, la tensión efectiva es positiva (compresión) y el suelo no llega a sifonar. Por el contrario si la parte menos permeable es superficial, la tensión efectiva llega a anularse y se produce sifonamiento.

Efectos geoquímicos

Por efectos geoquímicos entenderemos los cambios en la química del agua ocasionados por la obra y que pueden afectarla negativamente. En general, se tratará de cambios en los patrones de flujo que darán lugar a que varíe la química del agua en contacto con el terreno. Estos cambios pueden, a su vez, dar lugar a fenómenos de disolución (asientos, dolinas, etc.), de precipitación (levantamiento), o de variaciones en el comportamiento mecánico del suelo.

Este efecto es relativamente raro, pero, cuando se produce, puede tener efectos muy llamativos. El caso más conocido en el literatura geotécnica es el causado por intercambio catiónico en arcillas. Cuando el catión de cambio es Ca^{2+} o Mg^{2+} , las arcillas suelen presentar mejores características mecánicas (menor plasticidad y mayor resistencia al corte) que cuando es catión de cambio es Na^+ . El problema puede surgir cuando una arcilla cálcica, o magnésica, entra en contacto con aguas muy sódicas, cosa que puede suceder, por ejemplo, si se provoca intrusión marina. El caso más documentado en la literatura geotécnica, ya estudiado por BJERRUM (1954), es el del lavado de los cationes de cambio cuando un agua dulce desplaza al agua salada residente de una arcilla. Si la arcilla es “sensible”, puede producirse una fluidificación rápida, como la que se produjo en Verdal (Noruega). Casos de este tipo no son habituales en España. Sí cabe citar, sin embargo, el pobre comportamiento de la cuña de limos del Delta del río Llobregat, probablemente debido a que se trata de arcillas sódicas, son depósitos de prodelta, que además no han sufrido preconsolidación.

Más frecuentes en España son los fenómenos de interacción con evaporitas. El caso más conocido es el de los yesos de Monegros, cuya disolución da lugar a simas que desde los años 60 han provocado problemas en las obras hidráulicas y más recientemente al AVE. Menos conocido, pero tal vez más serio, es el problema de la hidratación de anhidritas, cuando entran en contacto con agua dulce, dando lugar a yeso, cuyo volumen molar es mayor. El efecto final es el levantamiento del terreno (caso de la CN de Asco) o la convergencia (reducción de diámetro) en túneles (causa de los problemas del túnel de Montblanc, BERDUGO, et al., 2007). También cabe incluir en este apartado los hundimientos del terreno en La Coromina (Cardona) causados por la disolución de las sales de la cuenca salina catalana.

Es difícil dar pautas de actuación generales en estos casos. Lo que sí puede afirmarse es que, por formación, ni los ingenieros ni la mayoría de hidrogeólogos tienen la educación más adecuada para enfrentarse a problemas geoquímicos, que requieren la participación de especialistas. En todo caso, hay algunos principios básicos que conviene tener presentes:

- Las soluciones estrictamente estructurales no suelen ser suficientes. Si se trata de reprecipitación, las presiones de hinchamiento pueden ser brutales. Si se trata de disolución, el fenómeno tiende a progresar hasta el colapso.
- El bombeo puede empeorar la situación. Es muy probable que los problemas de La Coromina fuesen causados por bombeos, que tienden a acercar a la formación aguas lejanas que no están en equilibrio con el terreno original, lo que agrava el problema.
- Tampoco parece aconsejable, en general, la impermeabilización, ya que puede hacer aumentar el gradiente hidráulico (efecto barrera) provocando el flujo de agua por zonas que previamente no estaban afectadas.

Más efectivo parece ser favorecer el flujo por zonas no peligrosas o promocionar que se produzcan las condiciones hidroquímicas adecuadas. En todo caso, parece necesario contar con el concurso de geoquímicos, especialmente cuando se trate de rocas evaporíticas o arcillas sensibles.

CONCLUSIONES

La discusión que se ha presentado aquí da lugar a varios tipos de reflexiones. En primer lugar, la hidrogeología es necesaria en las obras subterráneas. Los impactos que pueden ejercer sobre los acuíferos son diversos y potencialmente muy importantes. El drenaje puede dar lugar a una reducción de los recursos de agua disponibles o a su contaminación, o provocar subsidencia (impacto social), puede afectar a ríos, humedales, bosques de ribera o manantiales (impacto ambiental). También puede ser severo el impacto del efecto barrera, que puede dar lugar a problemas análogos y además hacer aparecer agua donde no la había antes.

Lo contrario también es cierto, la hidrogeología puede contribuir a mejorar la seguridad y reducir el coste de las obras subterráneas, ya sea mejorando las técnicas de agotamiento de excavaciones, previniendo los arrastres de sólidos o el sifonamiento o neutralizando los efectos geoquímicos. Está claro que se puede hacer mejor. Esto implica cambios de actitud, tanto por parte de la comunidad hidrogeológica, como de la geotécnica. Para superar los problemas de comunicación hace falta entender al otro, sus métodos y un poco de su ciencia. Ello requiere estudio y superar prejuicios.

En todo caso, hay varias cosas que, pese a ser evidentes, conviene repetir:

- La geología no puede restringirse a la traza. La mera interpolación de los datos de sondeos sin una contextualización adecuada, no es sólo incorrecta, se ha demostrado peligrosa.
- La realización de un estudio hidrogeológico debe ser obligatoria en toda obra subterránea.
- Es preciso cuantificar, la hidrogeología es una ciencia cuantitativa. Esto es verdad siempre pero, mientras que en muchos problemas de recursos es suficiente el juicio de valor, en las obras no suele serlo.
- Es preciso asegurar la calidad. La inmensa mayoría de los ensayos de bombeo se hacen sin protocolos, no hay pautas claras para definir redes de observación, ni se aplican de manera habitual sistemáticas de muestreo. Obviamente, el tipo de cambio de paradigma que se defiende en este artículo requiere garantía de calidad.

AGRADECIMIENTOS

La experiencia en que se basa este artículo está fundamentada en diversos convenios con ADIF, GISA, ACA, Fomento de Construcciones y Contratas, COMSA, Dragados y otros. También se ha financiado en parte por la CICYT (proyecto HEROS).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERDUGO, I.R.; ALONSO, E.E.; GENS, A. & ROMERO, E.E. (2007). *Extreme expansive phenomena in a high-speed railway tunnel*. Congreso AETOS 2007: Los túneles, factor de transformación. Madrid.
- BJERRUM, L. (1954). *Geotechnical Properties of Norwegian Marine Clays*, Geotechnique, 4(1): 49-69.
- BURR, S.D.V. (1885). *Tunneling under the Hudson river: being a description of the obstacles encountered, the experience gained, the success achieved, and the plans finally adopted for rapid and economical prosecution of the work*. John Wiley & sons, New York.
- CARRERA, J.; HEREDIA, J.; VOMVORIS, S. & HUFSCHMIED, P. (1990). *Fracture Flow Modelling: Application of automatic calibration techniques to a small fractured Monzonitic Gneiss Block*. Hydrogeology of Low Permeability Environments. (Eds. Neuman & Neretnieks), IAH, Hydrogeology, Selected Papers, Vol. 2: 115-167.
- COOPER, H.H. & JACOB, C.E. (1946). *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history*, Am. Geophys. Union Trans., 27: 526-534.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, R. (1976). *Hidrología Subterránea*. 2 vol. Omega. Barcelona.
- CUSTODIO, E. y CARRERA, J. (1989). *Aspectos generales sobre la contaminación de las aguas subterráneas*. OP, 13: 96-112.
- GOODMAN, R.F.; MOYE, D.G.; VAN SCHAICKWYK, A. & JAVANDEL, I. (1965). *Ground water inflows during tunnel driving*. Bulletin of the International Association of Engineering Geologists 2, 1: 39-56.
- JACOB, C.E. & LOHMAN, S.W. (1952). *Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer*. Trans AGU 33(4):559-569.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A.; JUSTO ALPAÑES, J.L. y SERRANO GONZÁLEZ, A. (1975). *Geotecnia y Cimientos* I. Ed. Rueda, Madrid.

- MARTÍNEZ-LANDA, L. & CARRERA, J. (2005). *An analysis of hydraulic conductivity scale effects in granite (Full-scale Engineered Barrier Experiment (FEBEX), Grimsel, Switzerland)*. Water Resources Research, 41: Art. W03006.
- MOLINERO, J.; SAMPER, J. & JUANES, R. (2002). *Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks*. Engineering Geology 64, 4: 369–386.
- NAVARRO A.; CARRERA, J. y SÁNCHEZ-VILA, X. (1992). *Contaminación por lavado piezométrico a partir de vertederos enterrados: Aplicación a un acuífero aluvial* Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. XVI. pp. 371-387.
- OLIVELLA, S.; MOKNI, N. & CARRERA, J. (2008). *Surface movements in a rock massif induced by drainage associated to tunnel excavation*. UPC, CSIC, Barcelona.
- PERROCHET, P. (2005). *A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown*. Hydrogeology Journal 13, 5–6: 886–888.
- PRESA J.L. y ERASO, A. (1970). *Las cimentaciones realizadas con cajones de aire comprimido, una tecnología en trance de desaparecer*. Revista de Obras Públicas, Agosto, 855-862.
- RENARD, P. (2005). *Approximate discharge for constant head test with recharging boundary*. Ground Water 43, 3: 439–442.
- SÁNCHEZ-VILA, X.; CARRERA, J. & GIRARDI, J. (1996). *Scale effects in transmissivity*. Journal of Hydrology, 183 (1-2): 1-22.
- WILLMANN, M.; CARRERA, J.; SÁNCHEZ-VILA, X. & VÁZQUEZ-SUÑÉ, E. (2007). *On the meaning of transmissivity values obtained from recovery tests*. Hydrogeology Journal, 15 (5): 833 – 842.