

INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS KARSTIVOS COSTEROS: APLICACION AL LITORAL ESPAÑOL

Resumen

1. Introducción

2. Hidrodinámica del Karst Costero

2.1. Aspectos generales

2.2. Aspectos geológicos y climáticos

3. Aspectos hidroquímicos

4. Problemática en los acuíferos kársticos costeros Españoles

5. Conclusiones

6. Bibliografía

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España), 1988

INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS KARSTICOS COSTEROS : APLICACION
AL LITORAL ESPAÑOL

Francisco Javier BURILLO PANIVINO. Geólogo.
Juan José DURAN VALSERO. Inst. Geológico y Minero de España.
Tomás PEINADO PARRA. Instituto Geológico y Minero de España.

"Algunos piensan que la tierra recupera el agua que vierte y que el mar no aumenta de caudal, porque no se lo apropia sino que devuelve inmediatamente el que recibe.

El agua entra en la tierra por caminos secretos; sale en pleno día, pero retorna secretamente. Es filtrada en su paso desde el mar, pues azotada por muchas tierras y piedras en su trayecto, deja la sal y en la inmensidad del suelo atravesado abandona su mal sabor y recobra su pureza".

L. ANNEUS SENECA

Naturales Quaestiones, Libro I: De las aguas (terrestres), Capítulo V. (Años 62 y 63 de n.E.).

RESUMEN

Los acuíferos kársticos costeros pueden presentar, al igual que los detríticos, procesos de intrusión marina, con peculiaridades hidrodinámicas e hidroquímicas propias. Las características arquitecturales heredadas ("paleoniveles" y "paleoconductos"), la heterogeneidad direccional del macizo kárstico y el propio carácter dinámico de los procesos físico-químicos en el karst costero, otorgan un especial interés a estos fenómenos, puntualmente importantes en algunas zonas del litoral mediterráneo español.

1. INTRODUCCION. -

De todos es sabido que la intrusión marina en acuíferos costeros es uno de los mayores problemas de contaminación de aguas subterráneas. En la mayoría de las ocasiones, la salinización es consecuencia de la sobreexplotación de estos acuífe-

ros, produciendo una ruptura del equilibrio agua dulce/agua salada que promueve un desplazamiento del límite entre ambas hacia el interior del continente, en función de cómo se sitúen los puntos de extracción. Este es un fenómeno relativamente bien conocido en acuíferos detríticos ya que ha sido objeto de numerosos estudios.

Las relaciones agua dulce/agua salada en macizos calcáreos karstificados presentan grandes dificultades en cuanto a su interpretación dada la heterogeneidad del medio. Por otro lado, España es un país kárstico por excelencia con gran parte de su superficie cubierta por materiales karstificables (I.G.M.E., 1986). Algunas sectores costeros españoles presentan acuíferos kársticos salinizados por la invasión del agua del mar. Estas zonas se localizan, esencialmente, a lo largo del litoral mediterráneo peninsular e insular, donde la demanda de aguas subterráneas es alta y los recursos escasos.

2. HIDRODINAMICA DEL KARST COSTERO.-

2.1. Aspectos generales.-

En los aspectos fundamentales, el funcionamiento hidrodinámico de un karst costero es como el de cualquier karst continental, con una circulación de agua a favor de conductos o zonas de permeabilidad preferente ligadas a la disolución de los materiales a través de las discontinuidades del macizo rocoso. Es evidente que esas discontinuidades condicionan un medio anisótropo, con diferentes respuestas según las porciones analizadas.

La evolución natural del karst conlleva una jerarquización progresiva de los conductos, concentrando, más o menos puntualmente, la descarga de aguas infiltradas a nivel superficial a través de las típicas formas de absorción, o procedente de otros acuíferos anexos.

El karst se desarrolla con respecto a un nivel de base que puede generalizarse para todo el sistema o tomar ciertas componentes locales en función de la litoestratigrafía y estructura del macizo, e incluso de la acción del hombre.

En el caso del acuífero kárstico costero, el nivel de base esencial es, en principio, el del mar, aunque, como veremos más adelante, determinados aspectos tectónicos y climáticos pueden alterar el sistema de acuerdo con la variación del nivel de referencia marino. Así se constata la existencia de surgencias kársticas submarinas, según conductos ("paleoconductos" funcionales o activos) que constituyen niveles de base heredados ("paleoniveles" de karstificación).

A partir de un equilibrio supuesto para la interrelación acuífero costero/mar, la reducción del flujo de agua dulce hacia el mar (natural o inducida), provocará una invasión de agua salada en busca de un nuevo equilibrio. En acuíferos detríticos libres la invasión se puede calificar de "general". La anisotropía, esencialmente vertical, existente en un acuífero multicapa hace que la contaminación se dirija hacia los niveles explotados (esto constituye un factor importante a la hora de decidir la profundidad de los pozos o sondeos y su

explotación racional). El acuífero kárstico es anisótropo por excelencia, y la invasión marina va en relación con los conductos afectados por la explotación y las zonas "capacitativas" adyacentes a éstos, de acuerdo con el modelo conceptual de MANGIN (1975). En determinados casos, con un alto grado de fisuración y kárstificación del medio, se establece un cierto grado de "homogeneidad" en el conjunto, a escala de macizo.

La intrusión marina en un medio kárstico costero es un fenómeno relativamente rápido dada la alta permeabilidad de los conductos en cuestión. Así, algunas explotaciones relativamente retiradas del mar, sufren de salinización en cuestión de pocas horas o días una vez en funcionamiento. Haciendo nuevamente referencia al modelo de MANGIN (1975), podemos distinguir dentro del karst una serie de bloques capaces de almacenar agua según una microfisuración, y una red de conductos que, en función de su "nivel de aguas", se comportan como receptores o donantes de agua con respecto a las unidades capacitivas. Estas últimas tienen siempre una respuesta bastante más lenta que la de los "canales", dotando de una "memoria" y de la necesaria capacidad de almacenamiento al acuífero para que éste se constituya como tal. Es ésta una cuestión importante a considerar de cara a cualquier tipo de contaminación, ya que será siempre más difícil "limpiar" el acuífero si sus unidades capacitivas han sido afectadas.

Los estudios llevados a cabo sobre algunos casos espafíoles (p.e. CUSTODIO, 1975) demuestran que incluso los medios kársticos se atienen de manera bastante aceptable, mientras no son alterados, a la conocida ley de GHYBEN-HERZBERG, según la cual "la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a cuarenta veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto", aunque con frecuencia la interfase no es una superficie nítida, sino una espesa zona de mezcla que ocupa una amplia porción del acuífero y que se extiende, con las irregularidades propias del medio kárstico, por encima y por debajo de la teórica línea de GHYBEN-HERZBERG (CUSTODIO, 1983). Los conductos más permeables pueden concentrar el flujo de agua dulce incluso en esa zona, pero también pueden tomar una cierta cantidad de agua salina del entorno capacitivo si ese flujo no es lo suficientemente importante; esto puede servir de explicación para algunas surgencias de agua salobre que a primera vista resultarían incongruentes.

2.2. Aspectos geológicos y climáticos.-

Como ya habíamos comentado anteriormente, estructura y estratigrafía geológica son los principales factores que condicionan la geometría y circulación hídrica de un acuífero. En cuanto al clima, éste establece la disponibilidad de agua. Esto es generalizable tanto para un acuífero por porosidad primaria como para otro por fisuración y/o disolución.

La tectónica de fractura es determinante esencial de las redes de kárstificación. La circulación de aguas, y por tanto la disolución de la roca, se produce preferentemente a favor de las discontinuidades existentes y en especial de las ten-

sionales por su mayor disposición a estar abiertas. Esto nos hace entender la gran importancia del estudio de la fracturación y de la historia tectónica de un macizo rocoso cuando queremos determinar las direcciones de drenaje en el subsuelo, sin olvidar el importante papel de los movimientos neotectónicos, que nos ayudarán a determinar el régimen de esfuerzos actual o reciente que soportan las rocas.

Las variaciones relativas del nivel de los océanos con respecto a los continentes, unas veces por motivos tectónicos y otras climáticos (movimientos glacioeustáticos), han dado lugar a distintos niveles de karstificación, apareciendo en la actualidad surgencias activas a distintas profundidades en el mar, llegando a alcanzar varias decenas de metros bajo su nivel actual. Estas surgencias, constituyen paleoniveles de base heredados, que han condicionado la evolución de la arquitectura kárstica y condicionan su dinámica actual. Naturalmente, las antiguas cavidades pueden estar rellenas de sedimentos o simplemente exentas de funcionamiento. El fenómeno en su conjunto es un tema esencial a contemplar en la distribución y relaciones entre las fases de agua dulce y salada que hoy encontramos, a veces, un tanto curiosas (ver CUSTODIO, 1983).

Es también importante la posible relación entre acuíferos kársticos y detríticos; así por ejemplo, la existencia de una zona karstificada infrayacente con respecto al acuífero detrítico puede facilitar y acelerar el proceso de contaminación salina de éste último, debido a la rápida evolución lateral de la salinización por el karst (CUSTODIO, 1983).

El elevado número de variables que introduce la geología y la fenomenología kárstica en sí, hace de cada caso un problema particular que deberá ser estudiado detenidamente como tal, con planteamientos *ad hoc*.

3. ASPECTOS HIDROQUÍMICOS.-

El mejor indicador de la intrusión salina es el ión Cl^- , aunque en ocasiones su origen es distinto al marino (esto suele ser fácilmente detectable por criterios geológicos); en todo caso, tiene la ventaja de no alterarse en su recorrido por el terreno.

Por otra parte, encontramos como indicador muy apropiado la relación $r\text{Cl}^-/r\text{CO}_3\text{H}^-$ ($r=\text{meq/l}$), puesto que el agua marina, al contrario que la continental, no aporta cantidades significativas de CO_3H^- y sí de Cl^- . Relaciones como $r\text{Mg}^{++}/r\text{Ca}^{++}$ pierden fiabilidad dados los procesos de cambio iónico que se pueden dar entre el terreno y el agua salinizada (dolomitización de la caliza en determinadas condiciones) (CUSTODIO, 1986).

La capacidad de cambio iónico es mayor en calizas arenosas o con cierta proporción arcillosa que en calizas muy puras (CUSTODIO, 1986). Los procesos de cambio iónico que nos interesan, así como sus consecuencias, los podemos resumir como siguen (CUSTODIO, 1986):

- Invasión del agua salada: Adsorción de Na^+ y cesión de Ca^{++} y Mg^{++} por el terreno. Menor capacidad para solución

de carbonatos en el agua. Floculación de arcillas.

- Retirada del agua salada: Adsorción de Ca^{++} y Mg^{++} y cesión de Na^+ por el terreno. Mayor capacidad para solución de carbonatos en el agua. Defloculación de arcillas (posibilidad de removilización y obstrucción de poros).

Sin embargo, no son los procesos de cambio iónico los únicos que actúan en la relación del terreno con las aguas mezcladas. La zona de mezcla constituye un cuerpo con distintas características físicas y químicas que las dos fases que la componen. Dado que la relación entre esas características físicas y químicas (fuerza iónica, presión parcial de CO_2 , temperatura, etc...) y el contenido del agua en carbonatos no es lineal, surgen posibilidades de mezcla (incluso a partir de aguas en teórico equilibrio), en las que el resultado es un agua agresiva capaz de disolver carbonatos, o sobresaturada, originando la precipitación de éstos (HANSHAW and BACK, 1979).

En general, el balance global suele estar a favor de la disolución según demuestra la práctica, y así sucede que la intrusión marina suele significar una mayor capacidad de karstificación en la zona de mezcla (HANSHAW and BACK, 1979 y BACK and HANSHAW, 1983). En el archipiélago Balear se ha comprobado recientemente la activación de la espeleogénesis en la zona de mezcla por HERMAN, BACK and POMAR (1986).

Existen modelos teóricos basados en los balances de masa que, a partir de los datos comparados de campo y laboratorio, permiten establecer la posible evolución del agua en el acuífero cuestionado, siendo estos modelos una herramienta fundamental para el estudio de la cinética de los acuíferos carbonatados kársticos (MERCADO, 1977).

4. PROBLEMATICA EN LOS ACUIFEROS KARSTICOS COSTEROS ESPAÑOLES.-

El problema de acuíferos kársticos con intrusión marina por sobreexplotación no es demasiado abundante en España, al contrario de lo que sucede con los acuíferos detríticos. Los casos se concentran en el litoral mediterráneo y en las islas Baleares, y más concretamente en las zonas donde coinciden las formaciones carbonatadas karstificadas con una importante demanda de agua.

Los puntos afectados más notables son los siguientes, la mayoría de los cuales ya fueron citados por CUSTODIO (1981):

- Macizo de Garraf (Barcelona): Constituye uno de los casos más importantes de contaminación salina en el litoral kárstico español, estudiado por CUSTODIO (1975), CUSTODIO (1981), PASCUAL et al. (1986 b); en cuestión de una decena de años la sobreexplotación del acuífero ha llevado a niveles de salinización que alcanzan los 5-6 gr/l de cloruros en la zona costera (I.G.M.E., 1985). Se trata de una potente formación mesozóica carbonatada que constituye un acuífero inter-

- medio fisurado, karstificado de tipo mixto abierto costero según la clasificación tipológica de BAYO et al (1986) (PASCUAL et al., 1986 a); su principal punto de descarga es la notable surgencia submarina de La Falconera.
- Macizo de Vandellós (Tarragona): El bloque cretácico de Perelló-Vandellós no presenta una explotación de aguas subterráneas demasiado importante. Constituye un acuífero intermedio según PASCUAL et al. (1986 a). Las concentraciones de cloruros son en general bastante bajas, oscilando entre 13 y 230 mg/l, aunque localmente alcanzan valores de hasta 2.8 gr/l (I.G.M.E., 1985).
 - Macizo de Montgrí (Gerona) y Macizo de Montsiá (Tarragona): Constituyen dos pequeños macizos calcáreos con algún problema local de salinización (CUSTODIO, 1981).
 - LLano de Palma (Mallorca): Se ha detectado salinización con contenido de cloruros de hasta 6 gr/l (I.G.M.E., 1985). Se trata esencialmente de un proceso de ascensión salina por los pozos desde unos niveles carbonatados inferiores intensamente salinizados. Se han tomado medidas como la reducción del bombeo y cierta recarga artificial. En algunos pozos se han cementado los tramos inferiores para impermeabilizar CUSTODIO (1982) y BARON et al. (1984).
 - Sierra de Levante (Mallorca): Contenido en cloruros entre 550 y 800 mg/l. Existen puntos a unos 5 Kms del mar cuya concentración es de 1 gr/l (I.G.M.E., 1985).
 - Zona de Mitjorn (Menorca): Acuífero calcarenítico y recifal con características mixtas detrítico-kársticas. En la actualidad no presenta muchos problemas, pero la evolución de niveles freáticos y la sobreexplotación del acuífero hacen pensar que éstos no tardarán en aparecer (CUSTODIO, 1981).
 - Zona de Cullera-Gandía-Denia-Jávea (Valencia, Alicante): Presenta algún problema de carácter local (CUSTODIO, 1981).
 - Sierra de Gádor (Almería): Acuífero kárstico compartimentado; alguno de sus bloques se hunde bajo el acuífero detrítico del Campo de Dalías, fuertemente explotado y con problemas de intrusión (I.G.M.E., 1980).
 - Sierras de Tejeda y Almijara (Málaga, Granada): La explotación a que está siendo sometido el bloque más meridional en los últimos años (CASTILLO et al. 1986), ha hecho disminuir sensiblemente las surgencias de agua dulce submarinas en el sector de Maro-La Herradura.

Será preciso un control riguroso para evitar la intrusión.

5. CONCLUSIONES. -

La intrusión marina en acuíferos kársticos costeros es un fenómeno poco conocido dada la gran casuística que presenta, lo que impone un estudio particular de cada caso.

El desarrollo del agente contaminante (agua salada), suele ser bastante rápido una vez iniciado el bombeo intenso (sobreexplotación) de las aguas subterráneas. La contaminación afecta, en primer lugar, a los conductos explotados y, posteriormente, a las zonas capacitivas adyacentes a éstos. La presencia de acuíferos detríticos en relación con niveles kársticos puede facilitar la salinización de los primeros, bien lateral o verticalmente.

La zona de mezcla suele presentar una compleja actividad química que pasa por procesos de intercambio iónico y de disolución-precipitación de carbonatos. En general, predomina una significativa capacidad de karstificación en las aguas de la interfase. La mayor parte de estos procesos están bastante estudiados pudiendo incluso reproducirse, al menos teóricamente, su evolución en el acuífero.

Los cambios en el nivel del mar (tanto por motivos climáticos como tectónicos), han dado lugar a distintos niveles de karstificación, alguno de los cuales sigue activo aún encontrándose bajo el mar ("paleoconductos y paleoniveles" heredados). Esto introduce un factor más de complejidad en el funcionamiento del karst costero.

La solución a los problemas de intrusión salina en karst costeros son evidentemente difíciles; Las medidas recomendadas son las de tipo preventivo: permitir el suficiente flujo de agua dulce hacia el mar y realizar un control hidroquímico riguroso.

En España, la cuestión de los acuíferos kársticos salinizados no es en la actualidad demasiado alarmante. Los casos detectados se concentran en Cataluña (Garraf y Vandellós), Baleares (Mallorca y Menorca sobre todo), y algún punto aislado de Levante. En la vertiente Sur (Almería, Granada y Málaga), deberá ponerse especial atención para no dar lugar en un futuro próximo a problemas.

Es necesario destacar la imperiosa necesidad de preservar de la sobreexplotación los acuíferos kársticos costeros que aún poseen una buena calidad hidroquímica de sus aguas, al objeto de no volver a reproducir en éstos los procesos de intrusión marina y salinización ya presentes en numerosos acuíferos detríticos en el litoral español.

6. BIBLIOGRAFIA. -

BACK, W. and HANSHAW, B.B. (1983). Effect of sea-level fluctuations on porosity and mineralogic changes in coastal aquifers. U.S. Geological Survey Circular 822: Paleoclimate and Mineral Deposits. Cronin, T.M.; Cannon, W.F., Poore, R.Z. (Eds). pp 6-7.

BARON, A.; FAYAS, J.A.; GONZALEZ, C.(1984). Proceso de salinización de las aguas subterráneas en el Llano de La Palma (Isla de Mallorca). I Congreso Español de Geología. Tomo IV, pp.53-63. Segovia.

BAYO, A.; CASTIELLA, J.; CUSTODIO, E.; NINEROLA, S.; y VIRGOS, L.(1986). Ensayos sobre diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Identificación, técnicas de estudio y estrategia de captación y explotación. Jornadas del karst en Euskadi. San Sebastián.

CASTILLO, E.; GOLLONET, F. y DELGADO, J.(1986). Características hidrodinámicas de materiales carbonáticos alpujarrides en el sector Nerja-La Herradura (Granada). Simposium sobre el agua en Andalucía. pp. 267-276. Granada.

CUSTODIO, E.(1975). Metodología y resultados del estudio hidrogeológico del macizo kárstico de Garraf (Barcelona). Boletín Geológico y Minero. Tomo LXXXVI-I, pp.31-44. Madrid.

CUSTODIO, E.(1981). Evaluación y causas de la contaminación por invasión de agua marina en los acuíferos de la costa peninsular y en las áreas insulares. Actas de las jornadas sobre análisis y evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas de España. I, pp.447-503. Barcelona.

CUSTODIO, E.(1982). Calidad del agua y protección de los acuíferos kársticos ante la contaminación. Reunión monográfica sobre el karst-Larra 82. pp.291-326. Larra (Navarra).

CUSTODIO, E.(1983). Relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras. En Hidrología subterránea. 2a. ed. Tomo II, Sección 13, pp. 1315-1339. Ediciones Omega. Barcelona.

CUSTODIO, E.(1986). Hidroquímica del karst. Jornadas sobre el karst en Euskadi. Ponencia mecanografiada. 36 pp. San Sebastián.

HANSHAW, B.B. and BACK, W.(1979). Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems. Journal of hydrology. Vol.43, pp.287-312. Amsterdam.

HERMAN, J.S.; BACK, W. and POMAR, L.(1986). Speleogenesis in the groundwater mixing zone: The coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain. 9o. Congreso Internacional de Espeleología. Vol.I, pp.13-15. Barcelona.

IGME.(1980). Calidad de las aguas subterráneas en las Cuencas del Sur de España. Colección Informe. 172 pp. Madrid.

IGME.(1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. 3 tomos. Madrid.

IGME.(1986). Mapa y Memoria del karst de España. 68 pp. y un

mapa. Madrid.

MANGIN, A.(1975). Contribution a l'etude hydrodinamique des aquifers karstiques. Thèse de l'Université de Dijon. pp.710. Dijon.

MERCADO, A.(1977). The kinetics of mineral dissolution in carbonate aquifers as a tool for hydrological investigations,II: hydrogeochemical models. Journal of hydrology. Vol.35, pp.365-384. Amsterdam.

PASCUAL, J.M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E. y BAYO, A.(1986). Los acuíferos mixtos abiertos costeros: ejemplo de aplicación de la tipología de acuíferos en rocas carbonatadas: aplicación a los acuíferos de Garraf y de Vandellós (Cataluña). Symposium sobre el agua en Andalucía. Vol. II. pp.403-412. Granada.

PASCUAL, J.M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E.; IRIBAR, V. y BAYO, A.(1986). Intrusión marina en calizas costeras: aplicación a Garraf Sur y Vandellós (Cataluña). Jornadas sobre el karst en Euskadi. pp.287-299. San Sebastián.