

Investigación, captación y gestión de acuíferos costeros

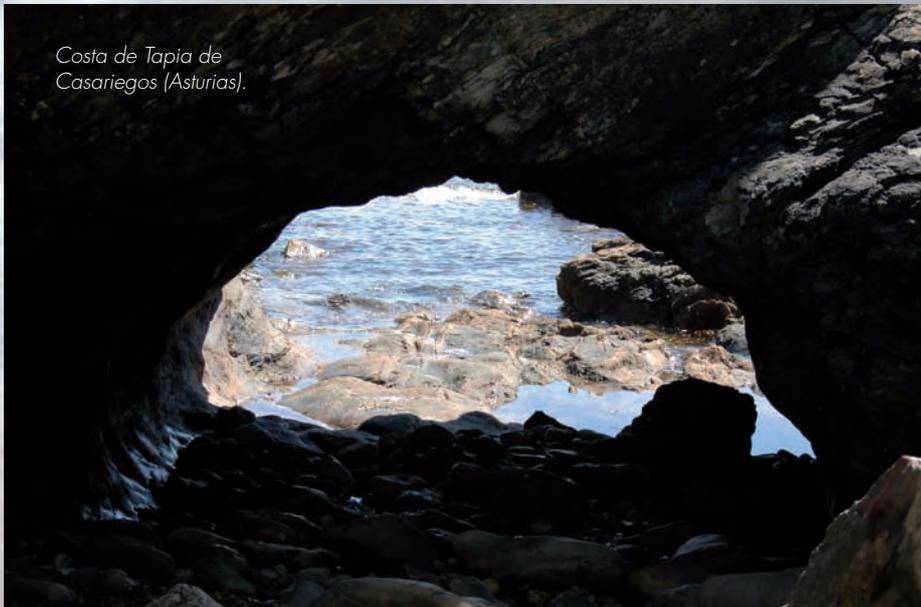
Rafael FERNÁNDEZ RUBIO

Dr. Ingeniero de Minas

Premio Rey Jaime I a la Protección de Medio Ambiente

Presidente del Consejo Asesor de Tecno Ambiente

CIDES - IIE



*Costa de Tapia de
Casariego (Asturias).*

Introducción

A lo largo de las costas, de muchos países, se localiza la gran demanda de agua, para uso agrícola, urbano e industrial y, cuando en esas áreas se cuenta con acuíferos, estos valiosos recursos resuelven muchas de estas necesidades pero, al mismo tiempo, su aprovechamiento no está exento del riesgo de afección a su calidad por salinidad, como consecuencia de la intrusión de agua marina.

Ante esta realidad, tiene que prestarse especial atención, en la planificación hidrológica, a la gestión racional de estos recursos hídricos, utilizando todas las herramientas

que la tecnología hoy nos ofrece, para evitar esas afecciones, que pueden no sólo inutilizar un agua tan valiosa, sino también arruinar inversiones muy costosas, dando lugar a situaciones económicas, sociales y ambientales críticas.

En este marco las mejores referencias tecnológicas las encontramos en las actas de los tres congresos sobre *Tecnología de la Intrusión de agua de mar en los Acuíferos Costeros*, de los cuales el TIAC'88 (1988) se celebró en Almuñécar, el TIAC'03 (2003) tuvo lugar en Alicante, y el TIAC'07 (2007), se desarrolló en Almería.

Pero esta valiosa información muchas veces pasa desapercibida,

incluso para técnicos y gestores, por lo que puede ser de interés presentar una síntesis del estado del arte, con apoyo en las aportaciones del TIAC'07, y también en reflexiones propias nacidas al hilo de los debates de este Congreso.

Ocasión que aprovecho para dejar constancia de agradecimiento a los coordinadores del TIAC'07, **Juan Antonio López Geta**, **Antonio Pulido Bosch** y **Gerardo Ramos González**, artífices de que fuera designado Presidente de Honor, justificado por los muchos años de quehacer en estos ámbitos, fomentando vocaciones hidrogeológicas entre quienes hoy son figuras preclaras de esta ciencia y esta técnica.

El marco de los acuíferos costeros

Como hemos indicado, las áreas costeras se corresponden, frecuentemente, con zonas de gran demanda de agua de calidad adecuada para uso urbano (con gran componente turística estacional) y agrícola, pero también para actividades industriales y de ocio.

En este contexto la España peninsular y la insular suman varios miles de kilómetros de longitud, lo que a su vez representa muchos kilómetros cuadrados de superficie adyacente, donde se ubica una población con gran tradición agrícola, apoyada por una climatología muy favorable y por la presencia de tierras aptas para cultivos de regadío. Pero también son zonas que albergan una alta densidad poblacional, lo cual requiere disponibilidad de caudales considerables de agua, especialmente en época estival, coincidente con el periodo más seco y, en general, con menores aportes de agua superficial.

Como consecuencia, en estas áreas litorales se ha venido acumulando un conocimiento muy pormenorizado de los sistemas acuíferos (o masas de aguas subterráneas), a veces como consecuencia de integrar acuíferos ya afectados por problemas de intrusión marina. Condiciones semejantes se presentan, en otros países costeros, con fuerte demanda de agua, y con indudable experiencia en su captación y manejo.

Es por ello que en estos congresos, con importante participación internacional, se pueden recoger experiencias contrastadas, con visión amplia, no sólo en las actas sino también en los debates e intercambios, con colegas de muy diversa procedencia, lo que supone un enriquecimiento en las tecnologías de aprovechamiento del agua subterránea, en estos entornos. Todo ello no sólo desde la perspectiva de la mejor gestión de los recursos de agua dulce, sino también de la necesidad de atender a la adecuada captación de aguas saladas o salobres, necesarias para alimentar a las plantas desaladoras.

En el caso de Congreso de Almería, se presentó una visión muy actualizada de las técnicas de investigación de acuíferos litorales, al

igual que de las técnicas de captación, control y gestión, a través de las comunicaciones y ponencias de especialistas de Alemania, Argelia, Bélgica, Croacia, Emiratos Árabes Unidos, España, Estados Unidos, Francia, Grecia, Holanda, India, Irán, Israel, Italia, Libia, Marruecos, México, República Dominicana, Rusia, Siria, Sultanato de Omán, Tanzania, Túnez, Turquía y Venezuela.

Hidrogeología de los acuíferos costeros

Los acuíferos más importantes son los detríticos, kársticos y volcánicos, muchos de ellos en contacto con el mar, y muy frecuentemente ligados a zonas húmedas, presentes en sectores litorales, en forma de marismas, albuferas, estuarios, etc.

Punto de partida obligado, para el correcto conocimiento de la hidrogeología de estos ámbitos, es la necesidad de identificar y caracterizar tanto al medio hidrometeorológico (precipitación y evaporación), como a las formaciones acuíferas y su entorno, en cuanto a litología, estructura, geometría y almacenamiento, lo que implica la aplicación de técnicas de: inventario de puntos de agua; geología e ingeniería (litología y es-

tructura); prospección geofísica; sondeos de investigación y control; caracterización hidrodinámica, piezométrica y geoquímica (en el espacio y en el tiempo); relaciones aguas superficiales – aguas subterráneas;... y todo ello con el apoyo de los sistemas de información geográfica, tratamiento de datos, etc.

En estos ámbitos hay que prestar especial atención a la proximidad del agua de mar, pero, además, en muchos sectores, al desarrollarse agricultura intensiva y ubicarse instalaciones industriales y emplazamientos urbanos, se presentan otras posibles fuentes de afección a la calidad de sus aguas subterráneas, como las derivadas de aportación de fertilizantes agrícolas, retornos de riegos, lixiviación de residuos industriales y fugas de efluentes urbanos.

Prospección geofísica en acuíferos costeros

Sin lugar a duda la prospección geofísica ha sido siempre, y ahora lo es más, un auxiliar muy valioso, en la adquisición de información en acuíferos costeros. Se incluyen aquí principalmente: técnicas geoeléctricas de resistividades (sondeos eléctricos verticales); prospecciones



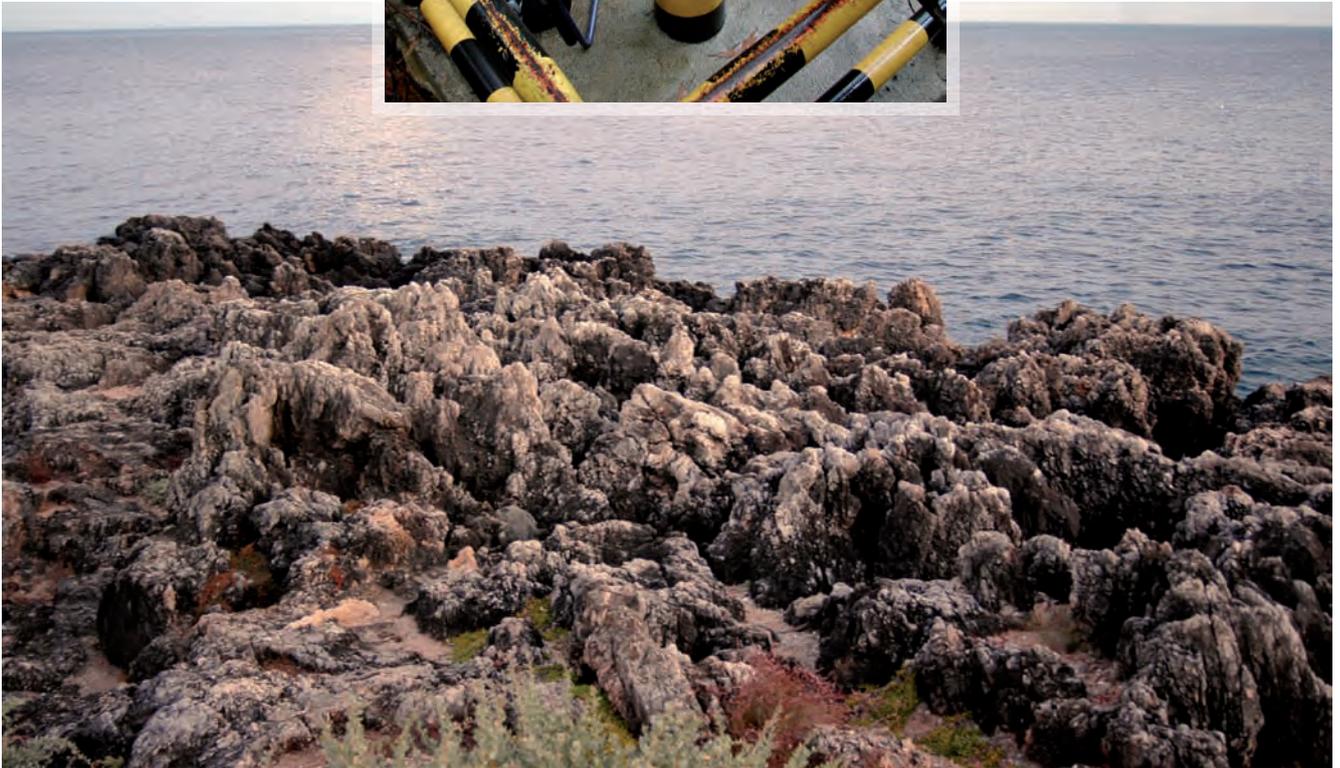
Acanitlados en la Isla de La Palma (Canarias).

electromagnéticas en el dominio del tiempo: tomografías eléctricas resistivas; sondeos de resonancia magnética y gravimetría.

Por otra parte la optimización de los dispositivos de medida, en los métodos eléctricos y electromagnéticos abre, en la actualidad, un panorama del máximo interés.



complementariedad de métodos geofísicos en los estudios de acuíferos costeros, con problemas de intrusión de agua salada, siempre que se empleen adecuadamente, teniendo bien presentes las posibilidades y limitaciones de los diferentes métodos. También hay que resaltar el interés de localizar prospecciones



Acuífero kárstico al Norte de Cascais (Portugal).

Estos estudios se enfocan hacia la identificación espacio-temporal de las diferentes masas de agua dulce, salobre y salada, a través de pseudo-secciones de resistividad aparente, y también, para determinados métodos, hacia la posibilidad de cuantificar parámetros, como porosidad, permeabilidad (transmisividad) y coeficiente de almacenamiento. La disponibilidad de registros de sondeos mecánicos presta un apoyo fundamental en la calibración e interpretación de los datos, al permitir parametrizar la interpretación geológica de los registros geofísicos, aportando así verdaderos cortes litológicos.

Estos estudios prestan las máximas aportaciones cuando, a la determinación paramétrica espacial, se une la temporal, permitiendo evaluar las modificaciones de la geometría y composición de las masas de agua dulce y salada subterráneas.

Otra aportación muy importante es la referente a la posibilidad de determinar la hidrodinámica de la intrusión, a lo largo del tiempo, así como las fluctuaciones estacionales del agua dulce – agua salada, y las modificaciones en la posición de la cuña salina. En este ámbito la instalación permanente de algunos dispositivos eléctricos, y la aplicación de las técnicas de transmisión de información, en tiempo real, permiten un seguimiento a distancia, con producción de imágenes geoelectricas volumétricas, mediante telecomunicaciones inalámbricas.

Igualmente, la determinación tridimensional de la geometría de la masa de agua, junto al conocimiento de la porosidad eficaz, permiten conocer el volumen de agua almacenado en el acuífero.

Es de destacar el interés que presenta, en muchas ocasiones, la

geofísicas realizadas con otros propósitos (por ejemplo: investigación petrolera en ámbitos costeros).

Entre estas aportaciones, complementarias y pluridisciplinarias, no podemos olvidar que la prospección geofísica puede contribuir con información valiosa para adquirir los datos que requiere la realización de modelos matemáticos de simulación.

Estudios geoquímicos y ambientales

En los acuíferos costeros los procesos de modificación de la calidad de las aguas no sólo se relacionan con la intrusión marina, sino que también pueden derivarse del retorno de aguas de riego, reutilización de aguas residuales industriales y urbanas, recarga artificial, desalación, etc. El uso integrado de parámetros hidroquímicos (iones mayoritarios;



Playa de Montíboli (Alicante).

elementos traza, como plomo, zinc, cobre y mercurio; relaciones iónicas, y parámetros isotópicos (oxígeno, hidrógeno, azufre, carbono, estroncio, boro, bromo, nitratos), aporta información muy valiosa para el conocimiento de dichos procesos y, en especial, de la interacción agua-roca, con posibilidad de movilización iónica. Igualmente son muy valiosos otros parámetros físicos como temperatura, pH y conductividad.

Los estudios isotópicos permiten determinar: origen de la intrusión salina y su evolución espacio-temporal; edad de las aguas y su renovación; velocidad de flujos subterráneos; mezcla de aguas; paleosalinidad; vulnerabilidad frente a la contaminación, etc. Igualmente estos estudios ayudan a prever posibles desequilibrios futuros y degradación de la calidad del agua, como consecuencia de: evaporación; mezcla de aguas; incremento de la extracción de caudales que supere los recursos renovables; etc. En estos casos se puede encontrar apoyo en los modelos reactivos de transporte, como el PHREEQC y el ACUAINTRUSION, que permiten tener en cuenta cambios de concentraciones por liberaciones iónicas.

En el caso de acuíferos kársticos el conocimiento de sus características hidroquímicas es fundamental, para interpretar procesos de disolución de las rocas carbonatadas, y para determinar el comportamiento en la zona de mezcla.



Planta desaladora de Carboneras (Almería).

En estos acuíferos presta gran apoyo, a su mejor conocimiento, la utilización de trazadores naturales o antrópicos, que permitan definir flujos salinos e interconexiones.

Hay que destacar que los estudios hidroquímicos requieren, frecuentemente, del tratamiento estadístico de grandes bases de datos analíticos, con apoyo en sistemas de información geográfica, así como el análisis cluster, para clasificar la calidad de las aguas en grupos hidrogeológicos homogéneos.

Captación de acuíferos costeros y control de las explotaciones

El aspecto más delicado corresponde, siempre, a la captación de agua dulce en acuíferos costeros y al régimen establecido para evitar la

intrusión de agua de mar. Muchas son las experiencias que pueden apoyar estas actuaciones, pero siempre van a requerir de un conocimiento muy pormenorizado y profundo del acuífero, y de la aplicación de tecnologías muy precisas, en evitación de producir males no deseados, especialmente cuando no existen barreras impermeables fiables.

Aspecto fundamental hoy es el referente a la captación de agua de mar para el abastecimiento de plantas desaladoras, en el que hay que dejar constancia de que es mucho más favorable, para la economía del proceso, realizar la captación me-

dante sondeos o drenes en la franja litoral, que efectuar la aparentemente simple toma directa de agua en el mar. Una técnica muy interesante de captación se presenta actualmente con las perforaciones sub-horizontales dirigidas, bajo el mar.

En cualquier caso las captaciones requieren de tecnologías muy perfectas, en cuanto a las características de diseño, función de la permeabilidad del acuífero, estratificación del agua dulce – agua salada, agresividad del agua de mar, necesidad de reducir los sólidos en suspensión, etc.

El control continuo de parámetros como salinidad y temperatura, en una red de piezómetros adecuadamente distribuidos, y con diferentes profundidades de registro, en el entorno de la captación litoral, aporta información muy valiosa para el co-

nocimiento del funcionamiento del sistema hídrico, del que se obtiene agua salada o salobre y, en especial, de la interfase agua dulce – agua salada. En el caso de las desaladoras existentes en el litoral almeriense esta investigación está contribuyendo, de forma decisiva, a este conocimiento y, en consecuencia, a su mejor gestión.

Por todo ello es indispensable acompañar, a toda instalación de planta desaladora, de una red de control hidrogeológico, que permita registrar todos los parámetros de in-

taurar la calidad del agua, siempre que se disponga de agua adecuada para este uso. La utilización de modelos, como el SUTRA, de transporte saturado – no saturado, en elementos finitos, al igual que las herramientas MODFLOW y MT3D, pueden ayudar a predecir el efecto de la recarga, y actuar en consecuencia.

En esta recuperación es necesario tener simultáneamente en cuenta los aportes por infiltración, derivada de las aguas de lluvia, a lo que ayuda el balance del ión cloruro, y la estratificación del ^{18}O en

análisis de datos pluviométricos, foronómicos y piezométricos.

En la estimación de balances hídricos, de acuíferos litorales, en situación de sobreexplotación, se encuentra la dificultad añadida de que, la mayoría de los métodos utilizables, parten de la suposición de que se encuentran en régimen natural, por lo que, en rigor, no podrían aplicarse.

Ante estas realidades es recomendable el diseño e implementación de planes de sostenibilidad, en el aprovechamiento de los recursos hídricos de los acuíferos litorales, sobre los que gravita agricultura pujante y desarrollo turístico creciente, frente a la limitación en la disponibilidad sostenible de agua. Para la ejecución de estos planes hay que contar con la concienciación de los usuarios, que tienen que autoimponerse limitaciones muy severas en el aprovechamiento de las aguas, debiendo considerar la posibilidad de obtener recursos hídricos de otro origen, para minimizar los impactos negativos. En estos recursos adicionales juega papel muy importante la desalación del agua de mar.

No cabe duda de que para esta gestión es fundamental la participación de los usuarios, lo que se puede favorecer mediante creación de comunidades de usuarios.

Modelos matemáticos de simulación

El modelado conceptual y matemático, tanto directo como inverso, de los acuíferos, se muestra como



Costa volcánica en Cabo de Gata (Almería).

terés en el proceso y, especialmente, los hidrodinámicos y los hidroquímicos, sin olvidar los referentes al medio marino en el que se realiza la descarga de la salmuera rechazo del proceso, por su posibilidad de afectación a la flora y fauna marina.

Recuperación de acuíferos salinizados. Recarga

En muchas áreas litorales la extracción excesiva de agua subterránea ha modificado, desfavorablemente, el equilibrio agua dulce - agua salada, especialmente en regiones áridas y semiáridas, pero también en otras con fuerte demanda, afectando a la calidad del recurso, y poniendo en situación de crisis al desarrollo económico de estas zonas.

La recarga artificial se presenta en estos casos como una posibilidad real, para mitigar el problema y res-

las aguas de lluvia, en relación con la altitud. Esta estimación de la recarga se ve ayudada con la aplicación de métodos como el APLIS o el MIKE SHE. Sin embargo la estimación de la descarga se dificulta, ante la imposibilidad de cuantificar las salidas submarinas, por lo que siempre hay que auxiliarse del



Acuífero sedimentario en Puerto San Julián (Patagonia Austral, Argentina).

herramienta de investigación y decisión muy valiosa, en los procesos de toma de decisión. En todo caso no podemos olvidar que se trata siempre de modelos complejos, por incluir flujo y transporte de solutos, en condiciones de densidad variable, cuyo interés se acentúa en las previsiones y toma de decisiones ante actuaciones antrópicas.

Los modelos permiten, además, el seguimiento de las evoluciones temporales y espaciales de la piezometría, en acuíferos litorales sobreexplotados, utilizando herramientas de simulación en régimen permanente o transitorio (por ejemplo el HST3D); o modelos de flujo en diferencias finitas tridimensionales, como el programa de modelización MODFLOW (empleando el *Ground Water Modelling System*), el MT3D o el MATLAB, así como diferentes códigos de libre distribución (SEAWAT) o paquetes de software (como el d3f, y el r3t), pero también con el apoyo de las bases de datos cartográficas y alfanuméricas en GIS, complementadas con procesos de interpolación.

Los modelos matemáticos son interesantes para verificar la fiabilidad de la información disponible, relativa al contexto hidrogeológico, a través de las tareas de pre-proceso y post-proceso, al tiempo que permiten analizar las modificaciones en los acuíferos, como consecuencia de acontecimientos naturales (inundaciones, sequías, mareas, ciclones, etc.), o actuaciones antrópicas (extracciones y recargas).

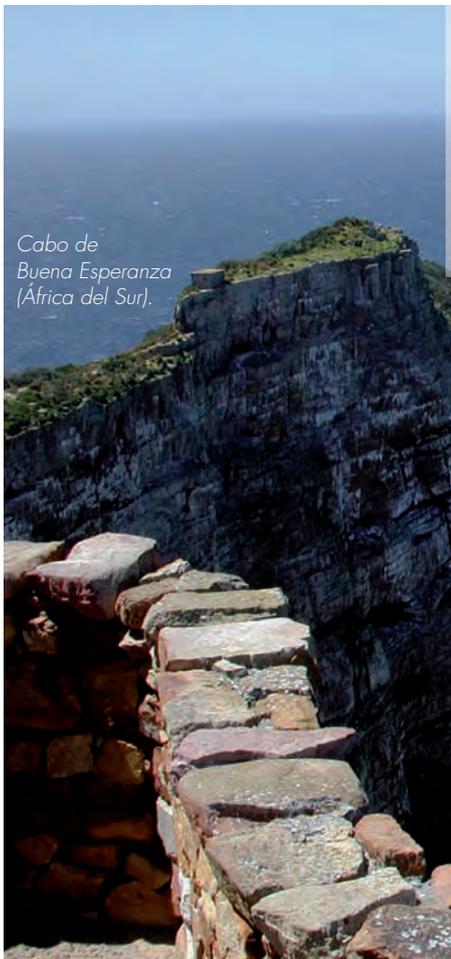
Todo ello requiere de procesos de calibración muy prolijos, tanto en estado de régimen permanente como transitorio, con apoyo de registros de series históricas temporales, extendidas por el área, y controles

de las fluctuaciones espaciales de niveles de agua, consecuencia a su vez de variaciones de la recarga/descarga, a lo largo del tiempo, derivadas de lluvias, riegos, evapotranspiración, drenaje, etc.

Un aspecto muy importante, al modelar los sistemas hidrogeológicos costeros, es el derivado de las variaciones de densidad de las aguas implicadas, que puede deberse tanto a la presencia de aporte de agua salina, como a la disolución de sales evaporíticas existentes en el contexto hidrogeológico, o a la presencia de aguas fósiles, desplazadas por las operaciones de bombeo, o al transporte de solutos.



Liendo
(Cantabria).



Cabo de Buena Esperanza
(África del Sur).



Costa septentrional de la Isla de Príncipe (Golfo de Guinea).

En la aplicación de los modelos destaca el interés de poder realizar pronósticos del comportamiento del acuífero, a corto y medio plazo, en relación con: las conexiones hidráulicas entre aguas superficiales y subterráneas; modificación de extracciones; realización de operaciones de recarga; etc. Todo ello tiene aplicación práctica, de gran interés, en procesos de optimización de la gestión de los recursos hídricos subterráneos, en zonas costeras, analizando diferentes escenarios de bombeo (por ejemplo con simulaciones PMWIN), con el correspondiente pronóstico de la evolución piezométrica (cantidad del recurso), y del quimismo del agua (calidad del recurso).

Estos aspectos son fundamentales para evaluar la sostenibilidad en la gestión de acuíferos costeros e, incluso, para establecer posibilidades de recuperación de acuíferos afectados por intrusión marina, estableciendo para su comprobación las adecuadas redes de control. Pero también es importante la modelación para determinar la evolución de la pluma de contaminación, derivada del empleo de fertilizantes y sustancias agrotóxicas usadas en el agua de riego.

Gestión, control y seguimiento

La extracción de agua subterránea en acuíferos costeros, en contacto con el mar, requiere el trabajo permanente de verdaderos especialistas en Hidrogeología, con muy buen conocimiento de las ca-

racterísticas de estos acuíferos, dado el riesgo de provocar intrusión salina. Complementariamente, y de cara a la posible evolución futura, el problema se agravaría de producirse la anunciada elevación del nivel del mar, debida al cambio climático, que impondría situaciones de mayor estrés hídrico, en estos sistemas acuíferos litorales.

Por ello, en la gestión de estos sistemas litorales, con demandas que crecen rápidamente, deben considerarse todas las posibles actuaciones complementarias, para disminuir los riesgos. Es el caso de la implementación de recarga artificial con aguas residuales, pero también la posibilidad de crear barreras negativas de depresión de la cuña salina, en el borde costero, como pueden ser las derivadas de la extracción de agua subterránea, para alimentar a las plantas desaladoras, que supone un beneficio adicional, al retraer y frenar el avance de la intrusión.

En todo caso, la gestión de estos acuíferos, así como toda actuación de bombeo, debe estar acompañada de programas de control de la calidad química de las aguas, en sondeos y piezómetros, con transmisión multimodal de datos, vía satélite o radio de baja frecuencia, para identificar anticipadamente cualquier efecto desfavorable. Estos programas muchas veces se apoyan en herramientas matemáticas, como los modelos de *Red Neural Artificial*, que permiten predecir las consecuencias de actuaciones antrópicas sobre la calidad de las aguas subterráneas, ayu-

dando a los planificadores a prever las cantidades de agua utilizables, y las repercusiones de las extracciones en la calidad.

Igualmente, en el caso de Europa, estos controles se hacen casi imprescindibles para el seguimiento de los indicadores del estado cuantitativo y cualitativo de las masas de agua, como imponen las Directivas 2000/60/CE y 2006/118/CE, y para poder planificar las actuaciones necesarias para alcanzar su buen estado, en el año 2015, en función de los niveles de riesgo por intrusión marina: riesgo seguro, riesgo en estudio y riesgo nulo.

Debemos añadir que los *Sistemas de Ayuda a la Decisión* son muy valiosos para la gestión integral de estos recursos hídricos costeros (en los que está en grave riesgo el desarrollo socioeconómico y medioambiental), al posibilitar la evaluación multi-criterio, comparando diferentes escenarios para la explotación y asignación de recursos hídricos.

Bibliografía

- TIAC'88. 1988. Vol. I: *Estado del arte a nivel nacional e internacional*. 378 pp. Vol. II: *Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental*. 350 pp. Vol. III: *La intrusión en España*. 659 pp. Esc. Técn. Sup. Ing. de Minas e IGME.
- TIAC'03. 2003. *Tecnología de la intrusión en acuíferos costeros: Países mediterráneos*.
- TIAC'07. 2007. Vol. I: *Los acuíferos costeros: retos y soluciones*. 1.114 pp. IGME.