

HIDROLOGIA SUBTERRANEA: PARTICULARIDADES Y PROBLEMÁTICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. NECESIDAD DE UNA GESTION CONJUNTA

Juan MARTINEZ RUBIO
Coordinador Área de Planificación y Gestión Hídrica.
TRAGSATEC. Grupo TRAGSA

1.- INTRODUCCION

La unicidad del ciclo hidrológico, en sus fases atmosférica, superficial y subterránea, es un concepto teórico ya universalmente aceptado por la comunidad científica, y que va calando poco a poco en la sociedad civil. Sin embargo, y frente a la anterior afirmación, quienes trabajamos en el entorno de la investigación, explotación y gestión de las aguas, somos testigos en numerosas ocasiones de las contradicciones entre esta aceptación empírica del hecho del ciclo hidrológico, y su reflejo en los planes gestores que desarrollan las administraciones hidráulicas.

Así, veinte años después de la aprobación de una Ley de Aguas que integró "administrativamente" las aguas subterráneas en la gestión estatal de los recursos hídricos, se puede afirmar que en nuestra política hidráulica sigue sin asumirse la necesidad de esa gestión conjunta y coordinada de las aguas en sus fases superficial y subterránea. España es, según diversos autores, uno de los países del mundo con mayor número de grandes presas por habitante, y sin embargo contrasta el hecho de ser el país de la Unión Europea con menor dependencia de las aguas subterráneas para el abastecimiento. Por otra parte, aproximadamente la mitad de la producción nacional y puestos de trabajo que se generan en torno a la agricultura de regadío, corresponden a áreas irrigadas con aguas subterráneas, que consumen sin embargo solo una quinta parte del volumen total de agua demandado por los regadíos españoles (LLAMAS, et al 2001). Y, frente a los datos anteriores, la planificación hidrológica de nuestro país dedica sus esfuerzos a ampliar las infraestructuras de almacenamiento y trasvase de aguas superficiales, relegando a las aguas subterráneas a un papel secundario, básicamente a resolver provisionalmente situaciones de sequía.

Para profundizar en ese necesario concepto de la gestión conjunta, revisaremos a lo largo de esta comunicación los principales aspectos relativos a la investigación, captación y gestión de las aguas subterráneas, prestando especial atención a las implicaciones positivas y negativas que su explotación puede traer sobre las actividades económicas, medio ambiente y, en general en la gestión del territorio.

Para entender el potencial de los recursos hídricos subterráneos, siempre considerados en el conjunto del ciclo hidrológico, se ha considerado de utilidad realizar un ejercicio de revisión de los usos del agua que captamos a través de pozos u sondeos, o de descargas naturales. Enlazando con los usos se recordarán las cifras tan debatidas en estos últimos años, marcadas por la actualidad de discusiones de la política hidráulica nacional (Planes Hidrológicos de Cuenca, Plan Hidrológico Nacional, etc), que sitúan la dependencia de España respecto a las aguas subterráneas. Y esto en el marco de una Unión Europea, con la que tenemos marcadas diferencias, no siempre reflejadas en una política hidráulica común, por lo que la transposición a nuestra legislación genera bastantes situaciones conflictivas.

Tras hablar de potenciales, de las capacidades de los recursos subterráneos de resolver demandas, de constituirse como recursos estratégicos, de ser soporte de valiosos espacios naturales, ... también hay que revisar los problemas que su explotación o que, en general, la actividad humana puede provocar.

2.- USOS Y PARTICULARIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Como datos de escala iniciamos este apartado con unas cifras de utilización de aguas subterráneas a nivel mundial del orden de 600-700 km³/año. En España el MIMAM (Libro Blanco, 1998) ha estimado que se extraen anualmente unos 5500 Mm³. Siguiendo el orden de "prioridades" en el uso del agua que define la legislación vigente, se señalan a continuación la incidencia, ventajas y desventajas del abastecimiento con aguas subterráneas para el consumo urbano, la agricultura y la industria.

2.1.- LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y EL ABASTECIMIENTO URBANO

Como ya se ha indicado la vida de la especie humana se ha desarrollado en torno al agua. Y esta realidad se hace patente si observamos que los establecimientos humanos siempre se han realizado en puntos con disponibilidad de este recurso.

Aunque las aguas de escorrentía superficial han sido desde el principio el suministro más habitual, se conocen también casos de abastecimientos "de origen subterráneo", especialmente manantiales y fuentes, desde las más antiguas civilizaciones.

Actualmente en una gran parte de los países, tanto de los desarrollados como de los incluidos en el denominado "Tercer Mundo", domina la procedencia subterránea de las aguas consumidas para abastecimiento. Así, se estima que actualmente del orden de al menos 1500 millones de habitantes de nuestro planeta dependen de las aguas subterráneas para su abastecimiento. Son ejemplos de esta dependencia casos tan conocidos como el de la zona oriental de China, donde el suministro de agua potable de unos 160 millones de habitantes depende en exclusiva del acuífero situado bajo la meseta de Huang-Huai-Hai. También algunas de las mayores concentraciones de población de este siglo, como son los casos de Yakarta, Lima o Ciudad de México, dependen de las aguas subterráneas para su abastecimiento. Tomado de *Sampat (2000)*, se adjunta un cuadro-resumen muy ilustrativo de la importancia de las aguas subterráneas en el abastecimiento de las distintas áreas continentales.

Región	Abastecimiento con a. subterráneas (%)	Población abastecida (millones habitantes)
Asia-Pacífico	32	1000-1200
Europa	75	200-500
América Latina	29	150
Estados Unidos	51	135
Australia	15	3
África	ND	ND
Mundo		1500-2000

Tomado de P.Sampat, 2000 (fuentes PNUMA, OCDE, FAO, EPA de EEUU, EPA de Australia)

En las regiones áridas y semiáridas se entiende fácilmente que las aguas subterráneas sean la procedencia mayoritaria del abastecimiento para consumo humano, al no haber o ser insuficiente la disponibilidad, en el espacio y en el tiempo, de almacenamientos o corrientes superficiales.

Sin embargo es llamativo que, en países con abundante disposición de aguas superficiales como los de la Europa occidental, los porcentajes de abastecimientos con aguas subterráneas son del orden del 99% en Dinamarca, 88% en Italia, 76% en Bélgica, 73% en Alemania y Luxemburgo, 68% en Francia, etc.

Ya entrando en el caso de nuestro país, las cifras más actualizadas hablan de un porcentaje de abastecimiento con aguas subterráneas en torno al 17%, con matices importantes para un país en que subsiste una cierta ruralidad: del abastecimiento desde pozos y sondeos dependen el 22% de los municipios de más de 20000 habitantes, y en torno al 70% de los de inferior población. Y eso sin entrar en detalles sobre el papel estratégico que las aguas subterráneas han jugado en nuestro país en las etapas de sequía, tan recientes en nuestro recuerdo.

La explicación de esta realidad podemos encontrarla al analizar las principales ventajas del abastecimiento desde los acuíferos frente al de las aguas superficiales, que se resumen a continuación:

- Regularidad y seguridad de los caudales: En general la explotación de los almacenamientos subterráneos ofrece mayor facilidad de regulación de los caudales necesarios, siendo menos sensible a los cambios estacionales, situaciones meteorológicas anómalas (sequías, inundaciones), etc.

De esta forma, es también más fácil absorber variaciones puntuales o estacionales de la demanda.

Este punto está ligado, evidentemente, al conocimiento del balance del acuífero que se explote.

- Calidad del agua: Las aguas de procedencia subterránea tienen, en general mejor calidad como agua de consumo que las superficiales. De hecho la mayor parte de las aguas embotelladas proceden de manantiales o captaciones subterráneas. Esto es debido a que, en principio, los acuíferos están menos afectados por las cargas contaminantes ligadas a los núcleos urbanos-industriales.

- Proximidad geográfica respecto a la demanda y competitividad económica: Gran parte de las aglomeraciones urbanas se ubican sobre o próximas a formaciones geológicas acuíferas. Esto simplifica y abarata el abastecimiento, al no ser necesarias grandes infraestructuras de regulación y transporte. La rapidez de puesta en explotación también supone una clara ventaja económica y estratégica del abastecimiento con aguas subterráneas.

La importancia de las aguas subterráneas en el abastecimiento urbano de los países "desarrollados" queda de manifiesto en la abundante normativa existente en materia de protección de su calidad y planificación de su explotación. Así, son muy frecuentes las observaciones y directrices que aparecen en el documento de la Directiva de la U.E. 2000/60/CE, que hacen referencia específica a la importancia de la protección de la calidad de las aguas subterráneas, y a su carácter estratégico respecto al abastecimiento humano. También los documentos que abordan en nuestro país la planificación hidrológica contemplan actuaciones en dos vías: la identificación y caracterización de los

acuíferos estratégicos para el abastecimiento, y el establecimiento de la normativa y sistemas de protección de los mismos.

2.2.- LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y LA AGRICULTURA

Si es un dato de dominio público el que la actividad agraria a escala global consume aproximadamente un 70% del agua manejada por el hombre, mucho menos conocidas son los porcentajes que en las distintas zonas del mundo se asignan a los regadíos con aguas de procedencia subterránea. Y esto es debido a que, al margen de que desde las más primitivas civilizaciones ha existido una actividad agraria en el entorno de las surgencias y afloramientos de aguas subterráneas, e incluso de captaciones técnicamente más complejas (minas, kanats, galerías de infiltración, etc), la verdadera expansión de los regadíos con aguas subterráneas ha tenido lugar a partir de los años 50, gracias a los desarrollos tecnológicos en perforación y más aún en los sistemas de bombeo.

Sampat (2000) presenta como ejemplos los casos de dos de los países con más superficie irrigada del mundo, India y los Estados Unidos. Así, en la India se ha pasado de unos 3000 sondeos en 1960 a unos 6 millones en 1990: En un periodo similar (1950-1985) duplicó la superficie regada con aguas superficiales, y multiplicó por 113 (!) los regadíos con aguas subterráneas. En el caso de los Estados Unidos, es un dato suficientemente expresivo el de que un 43% de sus zonas regables dependan de las aguas subterráneas.

La importancia en cifras de las aguas subterráneas en los regadíos de nuestro país es un referente continuo en los documentos tanto de planificación hidrológica del MIMAM, como de planificación agraria del MAPA. Y es que del total de volumen de agua que bombeamos de nuestros acuíferos, al menos el 70% tiene como destino la agricultura de regadío. Además, recientes publicaciones (Corominas 1999, Llamas et al 2000) han realizado estudios (centrados sobre todo en Andalucía) sobre el rendimiento económico de los regadíos con aguas subterráneas, frente a los "tradicionales" de aguas superficiales. Sus resultados, si bien no han podido ser contrastados a nivel nacional, aventuran interesantes afirmaciones como la que se cita textualmente (Llamas 2000):

"Según los datos recogidos por el PAS (Proyecto Aguas Subterráneas, Fundación Marcelino Botín) para distintas zonas de España, los regadíos con aguas subterráneas son más productivos y eficientes que los regadíos con aguas superficiales. No se dispone de datos para todo el territorio nacional, pero de los datos disponibles se puede deducir que en estos regadíos con aguas subterráneas (1 millón de hectáreas con 4 ó 5 km³/año de bombeo) se produce más riqueza y puestos de trabajo que en todos los regadíos con aguas superficiales (2,4 millones de hectáreas y 20 km³/año) derivadas de ríos y embalses. Con aproximadamente un 30% de la superficie regada, el volumen utilizado con aguas subterráneas es inferior al 20% del total. ..."

Con todas las matizaciones que puedan realizarse sobre afirmaciones de este tipo sí parece un hecho indudable, al menos en ciertas áreas de nuestro país, que el regante con aguas subterráneas es más eficiente que el regante con aguas superficiales. La distinta repercusión de los costes del agua, directos (energético de bombeo, amortización de obras de captación, etc) en el caso de las aguas subterráneas, frente a esquemas más tradicionales, en que el agricultor ha "heredado" una infraestructura de almacenamiento y distribución de agua, es la más obvia, que no la única, explicación de esas diferencias que, por supuesto, no son generalizables.

En cualquier caso, de forma genérica las ventajas del riego desde los acuíferos frente al procedente de cursos o almacenamientos superficiales pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- Distribución geográfica: Mientras que el agua superficial se presenta en espacios bien definidos (ríos, lagos, embalses) que ocupan áreas de escasa extensión relativa, los acuíferos pueden presentarse bajo extensas regiones. Esto supone una mayor flexibilidad respecto a la localización de las captaciones respecto al área a regar, evitándose grandes infraestructuras de transporte y distribución.

- Almacenamiento: Los volúmenes de agua almacenados en los acuíferos son, en general, muy superiores a los que pueden regularse en la superficie. Esto supone una mayor regularidad de los caudales disponibles, al ser los acuíferos menos sensibles a las variaciones estacionales o interanuales de las entradas.

De estas ventajas deriva la mayor facilidad para realizar un desarrollo escalonado de la actividad agrícola, tanto en extensión como en el tiempo, al no depender de las grandes y costosas infraestructuras de obras de regulación, transporte y distribución, necesarias en los regadíos de aguas superficiales.

Evidentemente no todo son ventajas en la explotación de las aguas subterráneas para el regadío, que puede derivar en problemas de a veces compleja solución. Tal es el caso de problemas como la contaminación difusa por fertilizantes y productos fitosanitarios, los descensos del nivel piezométrico con el consiguiente encarecimiento del bombeo, etc.

A lo largo de esta comunicación se repasarán estos y otros problemas ligados unas veces al desconocimiento o desinformación sobre la dinámica de la hidrología subterránea, o la inadecuada gestión de los recursos disponibles.

2.3.- LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y LA INDUSTRIA

Dado que es habitual que el abastecimiento industrial de agua esté integrado en la red de abastecimiento urbano, es difícil cuantificar el orden de magnitud del consumo que esta actividad supone.

Sin embargo, la tendencia actual de desligar determinadas actividades industriales de las zonas residenciales, hace que sea cada vez más frecuente que estas industrias se abastezcan de aguas subterráneas, como alternativa menos costosa. Con esta autonomía de abastecimiento se evitan además los problemas derivados de la dependencia de la red general (averías, restricciones), que puedan afectar a sus procesos de producción.

De nuevo incluimos datos de escala: a nivel mundial se estima que un 5% del agua subterránea se consume en procesos industriales, aunque otros autores (Sampat, 2000) indican cifras muy superiores, del orden del 19% y con tendencia al crecimiento. En cualquier caso resulta realmente difícil contrastar estas cifras dadas las dificultades de discriminar los usos consuntivos de los no consuntivos, y por la propia resistencia del sector a proporcionar datos reales. En España el MIMAM estima en un 3% la incidencia de los consumos industriales de las aguas subterráneas.

3.- PROBLEMATICA DERIVADA DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Si bien este punto va a ser tratado con mayor amplitud en otras sesiones de estas Jornadas,, adelantamos aquí brevemente los principales problemas.

Elaborar una relación sistemática de los problemas que pueden derivarse de la explotación de las aguas no es sencillo, al solaparse estos frecuentemente. Sin embargo, basándonos en la sintomática y en la escala del problema, podríamos clasificarlos en dos grandes grupos:

- **Sobreexplotación:** Aunque se discutirá este concepto, en principio algunos de los síntomas más evidentes de la sobreexplotación de un acuífero son, entre otros, los descensos acumulados (no recuperados) del nivel piezométrico, la subsidencia de los terrenos, o la alteración del régimen hídrico de los humedales.

El fenómeno de sobreexplotación se puede presentar a escala regional, en un sistema acuífero concreto, o a escala más puntual por efecto de fuertes extracciones locales.

- **Contaminación:** Dentro de este apartado incluimos procesos de muy distinta génesis, pero que se manifiestan en definitiva en una variación sustancial, y en principio negativa, de la composición química de las aguas subterráneas.

Nuevamente el problema puede presentarse a distintas escalas, y tener orígenes antrópicos (contaminación agrícola, industrial), o naturales-inducidos (intrusión marina, movilización y mezcla de aguas del subsuelo de distinta composición).

Y ya en este apartado empieza a quedar en evidencia la dificultad de "encasillar" los problemas: en la intrusión marina, por ejemplo, se solapan los efectos de la contaminación con los de una sobreexplotación puntual.

Pero quedarían otros problemas más puntuales, aunque también relativamente importantes: los relacionados con las propias obras de captación. El incorrecto diseño, la mala ejecución de las obras, los procesos de incrustación/corrosión, ... proporcionan unos síntomas que frecuentemente dan lugar a interpretaciones incorrectas de los problemas que aparecen en la explotación.

3.1.- SOBREEXPLOTACION DE ACUIFEROS: DEFINICION Y DISCUSION DEL CONCEPTO. SINTOMATICA.

La concienciación progresiva de la vulnerabilidad de los recursos hídricos globales ha llevado cierto retraso en lo referente a las aguas subterráneas. Las causas han estado posiblemente en el desconocimiento bastante generalizado del comportamiento del agua en el subsuelo. No hay que olvidar que aún hoy continúan apareciendo en la prensa de países "civilizados", referencias a "ríos y embalses subterráneos de inagotables recursos".

Pero es evidente que poco a poco, y en ello han tenido mucho que ver los problemas que se han ido presentando, las administraciones de los estados, han ido tomando conciencia de que los recursos subterráneos son limitados y vulnerables, y han empezado a intervenir en su explotación.

Respecto a los problemas de sobreexplotación de acuíferos, en esta comunicación se harán frecuentes referencias a varias de las comunicaciones presentadas en el XXIII Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Hidrogeología (A.I.H.), celebrado en España en 1991, que se centró en exclusiva en el tema de la sobreexplotación. La conciencia y la importancia socio-económica de los problemas derivados de la sobreexplotación en prácticamente todo el mundo, quedó de manifiesto en la intensa participación en este Congreso.

Puesto que estamos hablando de problemática, nos centraremos en la sintomatología

negativa de la sobreexplotación.

Los efectos no deseados más comunes que pueden presentarse son:

- Disminución o agotamiento de reservas.
- Empeoramiento de la calidad del agua.
- Afecciones a derechos y/o caudales de aguas ya aprovechados por terceros.
- Impactos medioambientales y ecológicos.
- Subsistencia del terreno.

Antes de entrar a desarrollar estos puntos ya es evidente que los criterios de diagnosis de sobreexplotación pueden ser cuanti y cualitativos, pero también económico-sociales y medio-ambientales.

3.1.1.- EFECTOS CUANTITATIVOS DE LA SOBREEXPLORACIÓN.

Uno de los objetivos esenciales de la investigación hidrogeológica es la definición de los recursos de cada acuífero o sistema de acuíferos.

Esta valoración, basada en diversos criterios (información geológica, inventario de sondeos y puntos de agua, definición de entradas, límites, etc), pasaba por el establecimiento de una hipótesis del balance hídrico. De esta forma podrían estimarse los recursos del acuífero y, en definitiva, su potencial de explotación.

De una forma simplista, dentro de los recursos totales de un sistema acuífero, se ha distinguido entre los recursos renovables, y los no renovables. Los primeros corresponderían a aquel volumen de agua que el sistema tiene capacidad de regular, de forma natural, en el plazo de un ciclo hidrológico. El resto, los no renovables, corresponderían a las también denominadas "reservas".

Ciñéndonos a este esquema, se hablará de sobreexplotación de un acuífero, desde el punto de vista cuantitativo, cuando las extracciones superen sus recursos renovables. Y su síntoma físico más evidente será el descenso, no recuperado, del nivel piezométrico.

Los efectos negativos del descenso del nivel piezométrico hay que buscarlos esencialmente en su incidencia en los costes de explotación de las aguas subterráneas, tanto por la necesidad de reprofundizar o sustituir las captaciones, como en el incremento del coste energético del bombeo. Y estos costes tendrán una incidencia en el desarrollo socio-económico de la zona afectada.

Sin embargo, a un esquema tan simplista como el anterior conviene hacer algunos comentarios:

- En primer lugar, así como en la evaluación de los balances de los sistemas de almacenamiento de agua superficiales (embalses), podría tomarse sin demasiado margen de error un ciclo hidrológico como unidad, en el caso del almacenamiento subterráneo (acuíferos) hay que plantearse su estudio en períodos plurianuales. Esto es debido a la mayor "inercia" de los acuíferos, marcada por sus propias características hidrodinámicas.

- Por otra parte, debe evitarse el tradicional error de separar las aguas subterráneas de las superficiales, pues sus interrelaciones están perfectamente demostradas.

- A la hora de analizar si un descenso de los niveles puede ser diagnosticado como

"sobreexplotación", hay que tener en cuenta que la explotación de cualquier sistema se produce en el ámbito de un "equilibrio dinámico", el denominado también "régimen transitorio". Cualquier alteración de alguno de los factores que suponga una ruptura de este equilibrio tendrá una manifestación, y una tendencia a buscar un nuevo punto de equilibrio. Sin embargo si la causa de alteración subsiste, no podrá alcanzarse el equilibrio, y se mantendrá la manifestación detectada.

Por poner un ejemplo, la detección de un continuado descenso del nivel piezométrico de un acuífero podrá corresponder a:

- a) Un incremento continuado del número de captaciones, o del volumen total bombeado. En este caso el descenso de nivel podría indicar simplemente que la variación de ese parámetro sigue obligando al sistema a buscar nuevas situaciones de equilibrio dinámico.
- b) A pesar de que no hay modificaciones en los parámetros de explotación, el sistema no tiene capacidad de mantener un punto de equilibrio. En este caso sí puede hablarse de sobreexplotación.

La dificultad, pues, de definir si un acuífero está siendo o no explotado por encima de su capacidad de autorregularse, está en la complejidad de cuantificar su balance, evaluar su capacidad de autorregulación y, en muchos casos, de conocer la realidad del grado y evolución de la explotación real a que está siendo sometido.

Por esto, aunque indudablemente la sobreexplotación es un problema real, su diagnóstico precoz no siempre es fácil. La importancia de su impacto económico y social en las zonas afectadas es, sin embargo, muy grave. De ahí que cada día exista más conciencia sobre la "rentabilidad" a medio-largo plazo de los estudios hidrogeológicos orientados a definir los recursos y su explotabilidad, así como el establecimiento de redes de control que permitan modelizar el comportamiento del acuífero, y conducir racionalmente su explotación.

Sí existe un aspecto que preocupa de forma especial a los responsables de la planificación hidrológica de nuestro país, tal y como queda de manifiesto en documentos de la relevancia del Libro Blanco del Agua, o del propio Plan Hidrológico Nacional, es el de las afecciones de la explotación de nuestros acuíferos a los caudales de descarga a los cursos superficiales. Efectivamente, las aguas subterráneas constituyen el aporte básico de muchos de los grandes ríos de nuestro planeta, siendo ejemplos clásicos los del Mississippi, el Níger y el Yangtze. También en nuestro país están perfectamente identificados los tramos en que muchos de nuestros ríos reciben caudales adicionales desde los acuíferos infrayacentes. Los descensos piezométricos en esos sectores, causados por el bombeo de las aguas de los acuíferos, pueden afectar al volumen de las descargas, llegando incluso a invertir el sentido de la conexión río-acuífero, convirtiéndose el río en donante de agua. Esta afección, que dicho de una forma simplista, podría ser temporal, temporal-estable o progresiva, afectaría al régimen hidrológico del cauce superficial, y en consecuencia a los usuarios aguas abajo del mismo. Y también podría tener implicaciones ambientales al afectar al tan controvertido "caudal ecológico" del río.

Curiosamente, en algunos casos se ha comprobado que esa afección, cuando tiene un régimen temporal, puede tener un efecto positivo al incrementar la capacidad de recarga del acuífero en periodos de caudales altos de los ríos. Este es el caso de algunas regiones tropicales de Asia, en que los acuíferos absorben gran parte del volumen de agua circulante en el periodo de lluvias monzónicas, laminando el efecto de las avenidas.

3.1.2.- EFECTOS CUALITATIVOS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN.

Otras manifestaciones negativas de la sobreexplotación de un acuífero pueden ser aquellas que supongan una modificación no deseable de las características físico-químicas del agua.

El caso más evidente es el de la explotación de acuíferos costeros, o de aquellos en cierta conexión con otros acuíferos de distinta composición química. Aunque se explicará más extensamente al hablar de la intrusión marina, el desplazamiento de las cuñas salinas responde a alteraciones introducidas en su sistema de equilibrio.

En definitiva, cualquier explotación que implique a sistemas acuíferos en que coexistan masas de agua de distintas características físico-químicas, podrá dar lugar a una degradación de la calidad del agua captada, por un efecto de "contaminación inducida". Este hecho podrá afectar negativamente a los usuarios (agricultura, abastecimiento, etc).

Nuevamente queda evidenciada la importancia de los estudios y el control preventivo.

3.1.3.- EFECTOS SOCIO-ECONÓMICOS.

En los anteriores puntos ya se ha manifestado que los efectos, cuanti y cualitativos, de la sobreexplotación sobre la actividad económica y social ligada al uso del agua, son muy directos. Resumiendo, algunos de los efectos negativos más claros pueden ser:

- Impacto económico por incremento de costes energéticos de bombeo, necesidad de nuevas inversiones en sondeos de sustitución o reprofundizaciones, readaptación de instalaciones, etc.
 - Necesidad de tratamientos intermedios en el caso de "contaminación" de las aguas.
 - Sustitución de fuente de aprovisionamiento en el caso de agotamiento o deterioro del suministro original, que a veces precisan de fuertes inversiones en grandes obras de infraestructuras superficiales (embalses, trasvases, conducciones).
 - Efectos de subsidencia: daños a infraestructuras y edificaciones.
 - Conflictividad social por impacto sobre aprovechamientos o concesiones precedentes.
 - Deterioro de las características de los suelos (salinizaciones, impermeabilizaciones, etc).
- ...

3.1.4.- EFECTOS MEDIO-AMBIENTALES.

No podemos terminar este apartado sin una breve mención a los efectos que sobre el entorno natural puede tener la explotación de las aguas subterráneas.

Respecto a impacto ambiental, se hablará de sobreexplotación de un acuífero cuando el grado de explotación tenga efectos negativos sobre el medio natural.

El caso más conocido es el de las afecciones a humedales. Estos ecotonos, de equilibrio sumamente sensible a las intervenciones que se realicen sobre el régimen hídrico, presentan una gran riqueza biológica y una alta valoración paisajística. Lejos quedan ya los tiempos en que las zonas "encharcadas" se consideraban como zonas improductivas e insalubres, realizándose importantes inversiones en su drenaje y desecación.

Las afecciones a los humedales, por efecto de la explotación de los acuíferos con ellos relacionados, tienen también una doble vertiente cuanti y cualitativa. En aquellos humedales asociados a "rebosaderos" naturales de los acuíferos, la depresión del nivel piezométrico les priva de alimentación. Además, la explotación induce un incremento de la velocidad de infiltración. Las incidencias cualitativas se refieren a los cambios en la composición química del agua que, en el caso de los humedales, afectan rápidamente a sus comunidades biológicas.

Dada la importancia y actualidad de los aspectos medioambientales, y en especial los relativos a las afecciones a los humedales, se ha realizará un apartado especial, al final de esta comunicación.

3.1.5.- OTROS EFECTOS.

Otros de los efectos negativos relacionados con el abatimiento del nivel piezométrico, son los que afectan a las propias características mecánicas de las formaciones que pasan del medio saturado al no saturado.

La compactación, con la consiguiente pérdida de capacidad de almacenamiento y transporte del agua infiltrada, es el efecto más evidente. Al disminuir la capacidad drenante del suelo aumentan además los riesgos de escorrentías incontroladas, y de la propia salinización de los suelos en zonas con actividad agrícola.

Si el efecto es muy pronunciado puede llegarse a la pérdida de estabilidad de las formaciones, produciéndose hundimientos –colapsos- diferenciales. Esta subsidencia, de la que existen casos tan llamativos como el de la ciudad de Méjico con más de diez metros de hundimiento desde el siglo pasado, el Valle de San Joaquín y otras zonas costeras de California, puede causar importantes daños a infraestructuras (carreteras, conducciones de agua), edificaciones, estabilidad del litoral, etc. Un caso recientemente estudiado es el de Bangkok, con un hundimiento generalizado del nivel del suelo del orden de 10 cm/año, por efecto del bombeo de los acuíferos profundos (en torno al millón de metros cúbicos al día).

3.2.- SISTEMAS DE DETECCIÓN Y CONTROL DE LA SOBREEXPLOTACIÓN.

Como se ha indicado es difícil precisar "a priori" la explotabilidad de un acuífero. La dificultad en el conocimiento de los condicionantes geo-hidrogeológicos, los límites de la cada unidad acuífera y sus interrelaciones con otras unidades, ... hacen que el balance hídrico calculado deba considerarse tan solo como una hipótesis de trabajo.

Problemas semejantes surgen al estudiar un acuífero ya supuestamente sobreexplotado. En este caso otra dificultad añadida suele ser el desconocimiento real de las extracciones.

En definitiva la detección de problemas de sobreexplotación tendrá que basarse en el análisis de los síntomas y su seguimiento. Por ejemplo, el descenso piezométrico continuado es en teoría el criterio más directo para evaluar la sobreexplotación. La obtención y comparación de series de evolución piezométrica, anuales y plurianuales, de una serie de sondeos permitirá obtener una primera "imagen" del problema.

Del mismo modo, la representación cartográfica de sucesivos mapas de isopiezas será la herramienta básica para la localización de los focos de sobreexplotación, y en consecuencia definir las zonas en las que se deberá actuar.

El problema suele estar en la propia fiabilidad de los datos, tomados a menudo en sondeos de muy distintas características, o con instalaciones de bombeo en funcionamiento, o simplemente en distintos periodos.

De aquí la recomendación de instalar redes de control piezométrico (y de calidad de agua) en aquellas unidades acuíferas en que se presuponga que puedan producirse problemas en su explotación. El tema de diseño y seguimiento de las redes de control se tratará en apartados posteriores, concretamente al hablar de control de calidad del agua.

3.3.- CORRECCIÓN DE LOS EFECTOS DE SOBREEXPLOTACIÓN.

El primer paso para corregir una situación de desequilibrio es, evidentemente, la identificación del factor causante. En principio en los casos de sobreexplotación es el exceso de extracciones, general o focalizado, el causante del desequilibrio.

Así pues, considerando al acuífero como un sistema dinámico, para corregir un desequilibrio de efectos indeseables, debe actuarse sobre una o más de sus variables. Esquemáticamente podemos considerar que las principales variables que intervienen en el balance de un acuífero se agrupan en entradas y salidas al sistema. Entre las entradas tendremos la fracción que se infiltra de las precipitaciones, la alimentación desde otras unidades acuíferas contiguas, la recarga desde cursos o almacenamientos superficiales, y los retornos de los riegos. Y como salidas el flujo, natural o inducido, hacia otros acuíferos, la descarga hacia la red superficial y, por supuesto, las extracciones provocadas por el hombre.

Puesto que aquí nos referimos a los desequilibrios causados por la explotación de los acuíferos, queda claro que las actuaciones de control de la sobreexplotación tendrán que pasar por la limitación de las extracciones, y/o por la estimulación o refuerzo artificial de las entradas.

3.3.1.- LIMITACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN.

Puesto que en la gran mayoría de los casos las extracciones de agua subterránea van ligadas a una necesidad (abastecimiento) o actividad económica (agricultura, industria, uso recreativo), es evidente que cualquier limitación impuesta tendrá, en principio, muy mala acogida.

En los casos extremos en que no quede otra opción que la limitación parcial o total de las extracciones, deberá actuarse de esa manera. Sin embargo en la mayoría de los casos podría bastar una aplicación de la racionalización del consumo del agua para paliar suficientemente el problema.

A continuación presentamos, basándonos en RAMOS et al (1991), un esquema sobre las líneas de actuación para la corrección de los efectos de sobreexplotación. Las actuaciones podrán clasificarse en dos grandes grupos de gestión: gestión técnica, y gestión administrativa.

a) Gestión técnica.

1.- Actuaciones para corrección cuantitativa:

- * Optimización del uso conjunto.
- * Ajuste de las demandas.
- * Aumento de la eficiencia de los sistemas de satisfacción de demandas (control de pérdidas de las redes de distribución, mejora de sistemas de riego, etc.

- * Incremento de los recursos superficiales regulados.
- * Aprovechamiento de recursos no utilizados (reutilización de aguas residuales, recarga artificial).
- * Reordenación de extracciones.
- etc

2.- Actuaciones para corrección cualitativa:

- * Reordenación de extracciones, evitando incidir en sectores "contaminados".
- * Acciones físicas o hidráulicas contra la intrusión marina.
- * Importación y mezcla de aguas para mejorar la calidad.
- ...

b) Gestión administrativa.

1.- Establecimiento de prioridades socio-económicas en conexión con modelos de análisis globales de coste-beneficio.

2.- Creación de un marco jurídico, adecuado a los objetivos que se persiguen, con objeto de poder actuar en los siguientes aspectos:

- * Aplicación de las medidas técnicas antes citadas.
- * Reducción de los consumos mediante adecuación de las dotaciones a la demanda real, estimulando el ahorro mediante incentivación, campañas de educación, etc.
- * Regulación y control de los sistemas de concesiones y derechos sobre el agua.
- * Intervención en la distribución de cultivos.
- * Creación de sistemas de control y penalización.
- * Reordenación de extracciones, evitando incidir en sectores "contaminados".
- * Acciones físicas o hidráulicas contra la intrusión marina.

3.3.2.- INCREMENTO DE LOS RECURSOS. RECARGA ARTIFICIAL.

Algunas de las formas de incrementar los recursos del acuífero sobreexplotado ya han sido señaladas en el anterior punto. En general, cualquier actuación de la que resulte un incremento de los recursos hídricos totales, superficiales y subterráneos, permitirá limitar el alcance de la sobreexplotación.

Así por ejemplo, un aumento de la capacidad de regulación de los recursos superficiales podrá incidir en una mayor tasa de infiltración/alimentación a los acuíferos.

Más difíciles, aunque se ha investigado bastante al respecto, son las técnicas de estimulación de lluvia.

Pero sin duda la actuación más conocida y directamente aplicable a la corrección de la sobreexplotación es la recarga artificial.

Según CUSTODIO et al, 1983 "la recarga artificial podría definirse como el conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua".

Los principales objetivos de la recarga, también citando a CUSTODIO, son:

- 1.- Restaurar un acuífero excesivamente explotado, quizás prolongando su vida útil hasta que se disponga de otro modo de abastecimiento.
- 2.- Mantener los recursos y regularizarlos, en especial de cara a los estiajes.
- 3.- Almacenar agua local o importada.
- 4.- Depurar el agua que se recarga por estancia prolongada en el acuífero.
- 5.- Combatir la intrusión marina y la contaminación creando barreras hidráulicas apropiadas.
- 6.- Utilizar el acuífero como conducto de distribución de nuevas aguas, cuando ya existe una red apropiada de pozos.
- 7.- Evacuar ciertas aguas residuales, principalmente aguas de refrigeración.
- 8.- Diluir las aguas existentes en el acuífero y ayudar a mantener un apropiado balance de sales, principalmente en zonas agrícolas.
- 9.- Reducir la subsidencia por exceso de bombeo (no restituye los niveles iniciales, sólo se detiene o frena).
- 10.- Mezclar aguas de diferentes calidades.

El lector interesado podrá encontrar más detalles sobre estos puntos, ilustrados con ejemplos reales, en la obra de CUSTODIO y LLAMAS citada en la bibliografía. A continuación haremos un apartado para describir los principales dispositivos de recarga.

3.3.3.- DISPOSITIVOS DE RECARGA ARTIFICIAL.

Dejando a un lado las técnicas de recarga inducida ya mencionadas anteriormente, basadas en crear situaciones favorables a la infiltración natural, entraremos en las de recarga artificial.

Antes de entrar en la descripción de los distintos dispositivos, queremos incidir en que antes de proyectar cualquier obra de recarga habrá que tener resueltos una serie de aspectos como:

- Que las unidades geológicas que se quieren recargar son adecuadas para ello. Es decir, si existe una porosidad libre, susceptible de ser recargada. De otra forma el efecto de una recarga solo tendrá sentido para desplazar masas de agua de distinta composición.
- Que está razonablemente garantizado el suministro o concesión de agua, existiendo además infraestructuras hidráulicas adecuadas.
- Que el agua con la que se va a recargar cumple unos mínimos de calidad física y química.
- Que hay disponibilidad de terrenos a un precio razonable, disponiéndose de las preceptivas autorizaciones de los propietarios de donde se van a construir las instalaciones, y las de tránsito de las conducciones.
- Que no existan limitaciones de tipo cultural o medioambiental. Sobre este punto se recuerda que en determinadas ámbitos territoriales la recarga artificial se considera legalmente como un vertido, con las connotaciones que ello supone.

Los dispositivos de recarga más usuales son los siguientes:

1.- Zanjas y surcos: Es uno de los métodos más sencillos, y consiste en hacer circular el agua de recarga por unos surcos o zanjas de escasa profundidad (generalmente realizados con la propia maquinaria agrícola). Estos surcos se disponen como ramificaciones de los canales principales, y procurando que la velocidad de circulación sea suficiente para impedir la decantación de los limos.

La principal desventaja del sistema es que ocupa una gran superficie en relación con el área

efectiva de recarga.

2.- Balsas: Son posiblemente los dispositivos más usuales. Generalmente constan de varias balsas excavadas, conectadas entre sí, que se rellenan de agua para que se infiltre. La extensión y morfología de las balsas es muy variada, recomendándose profundidades en torno a 1.2 m. Según algunos autores con esta columna de agua se consigue un equilibrio óptimo de la carga, sin llegar a producir efectos de compactación.

En general los sistemas de balsas se alimentan de una corriente superficial bien mediante bombeo, o por un azud de derivación. El agua suele hacerse pasar por filtros desarenadores para después entrar en el sistema de balsas. Aforando los caudales de entrada y salida podrá estimarse la recarga efectiva.

Los dispositivos de recarga artificial con balsas son relativamente baratos, y bastante sencillos de construir y mantener. El mantenimiento se reduce esencialmente al desalojo periódico de las fracciones finas decantadas en las balsas, y a la limpieza de los filtros desarenadores.

Además éstos ocupan superficies bastante limitadas, consiguiéndose valores de infiltración entre 0.25 y 2 m/día.

Si no hay pozos o sondeos en la zona de recarga, es conveniente perforar una red piezométrica. Estos sondeos permitirán controlar la eficacia de la recarga, al tiempo que facilitarán la expulsión del aire de la zona no saturada.

3.- Otros dispositivos de recarga en superficie: Además de los dispositivos anteriores existen otros de utilización menos extendida. Así por ejemplo, en acuíferos detríticos libres de alta permeabilidad y espesor considerable puede efectuarse la recarga mediante fosas excavadas de varios metros de profundidad.

Otro sistema consiste en acondicionar el cauce de una corriente superficial de forma que se facilite la infiltración. Esta técnica, empleada sobre todo en regiones áridas o semiáridas, consigue incrementar la recarga desde el propio río mediante el ensanche, aplanado y a veces excavación del lecho del mismo. La construcción de pequeñas represas o diques que obliguen al río a zigzaguear también ayudarán a aumentar la superficie y tiempo de contacto del agua con el aluvial a recargar.

En zonas afectadas periódicamente por fenómenos de escorrentías incontroladas (avenidas), se planifican también obras que conjuguen la protección contra daños, con el incremento de la infiltración. Así, se contruyen en estas áreas una serie de pequeñas presas de retención de acarrees, y aguas abajo otras que favorezcan la extensión de la lámina de agua.

4.- Dispositivos de recarga en profundidad. Sondeos: La recarga artificial de acuíferos a través de sondeos empezó a aplicarse con bastante posterioridad a los sistemas de superficie. Esto ha sido debido a la mayor complejidad y coste de construcción y mantenimiento, sobre todo en lo que se refiere a los necesarios sistemas de filtrado del agua a inyectar. Sin embargo en la actualidad es un método insustituible para la recarga de acuíferos profundos, sistemas multicapa, etc. Además, cuenta con la ventaja añadida de suponer una ocupación de terreno muy reducida, en comparación con los sistemas de recarga superficiales.

Una descripción detallada de las variantes de diseño, tipos de construcción y trabajos de mantenimiento, entendemos que se apartaría de los objetivos de este libro. Por esto, trataremos de sintetizar la información en los siguientes puntos.

La capacidad de recarga a través de un sondeo depende de factores hidrogeológicos, y de factores constructivos. Respecto a los hidrogeológicos podemos citar la permeabilidad de las formaciones a recargar, sus potenciales hidráulicos, la calidad del agua que se inyecta (composición química, sólidos en suspensión), etc. En cuanto a los factores constructivos destacaremos los diámetros de perforación/entubación, el tipo y características de la rejilla, la presión de inyección,... y por supuesto los dispositivos complementarios para filtrado de las aguas a inyectar.

Desarrollando los aspectos indicados en el punto anterior, entraremos en primer lugar en la descripción de los tipos de sondeos se utilizan para la recarga.

Aunque siempre es deseable que los sondeos que se utilicen para recarga hayan sido construidos expresamente para ello, es bastante frecuente que se aprovechen sondeos preexistentes. Dado que estos sondeos suelen ser de explotación, su eficacia para recargar será bastante limitada, al estar diseñados sus filtros para un sentido de flujo contrario al de la recarga.

En los sondeos diseñados expresamente para recargar, la elección del tipo de rejillas y engravillado deberá realizarse pensando en el sentido de flujo. Sin embargo en muchos de los sondeos se utiliza el bombeo para limpiezas periódicas de los filtros, o simplemente se alterna la recarga con el bombeo (sondeos de doble uso). En estos casos la inyección puede realizarse a través de la propia bomba, o de una tubería complementaria.

Volviendo a los principales limitantes del rendimiento de un sondeo de recarga, indicaremos las soluciones técnicas que pueden aplicarse.

Respecto a la "capacidad drenante" del terreno correspondiente, y en definitiva a la transmisividad de las formaciones, es importante que el sondeo sea sometido a unas operaciones de limpieza y desarrollo eficaces. La eficacia dependerá también de la minimización de las pérdidas de carga en el tránsito a través de las rejillas y engravillado del sondeo: cuanto más adecuado sea el diseño y dimensionamiento de filtros y grava, mayor será la eficiencia del sondeo.

El problema más frecuente, que limita la eficacia de los sondeos para recarga y obliga a unas labores de tratamiento previo del agua y a programas de mantenimiento de la obra, es la acumulación de fracciones finas. Este efecto tiende a cerrar las rejillas y filtros, e incluso la propia porosidad del acuífero. Los sistemas de descolmatación empleados son varios, siendo el más habitual el bombeo energético. En definitiva se trata de un problema similar al de la invasión de los lodos durante la perforación, pero que se repite periódicamente.

La inyección de agua en los sondeos de recarga puede realizarse por gravedad o a presión. Los sistemas de recarga a presión, aunque son más eficaces, sólo pueden realizarse en sondeos correctamente construidos, y con el emboquille bien cementado.

En general se recomienda que los sondeos de recarga, especialmente en acuíferos detríticos, tengan diámetro suficiente para poder colocar un buen filtro de grava, además de para instalar una bomba de suficiente potencia para las operaciones de descolmatación. Es esencial que estén bien desarrollados. Además la longitud de la rejilla deberá abarcar el máximo del acuífero a recargar, para reducir en lo posible la velocidad de entrada del agua, y evitar la penetración de las fracciones colmatantes.

La recarga a presión puede realizarse a partir de cierta profundidad, o incluso en un nivel o niveles determinados, empleando para ello sistemas de obturadores estancos (packers) Este tipo de dispositivos son especialmente útiles en el caso de barreras contra la intrusión, o contra

niveles contaminantes.

Otro caso de recarga artificial en sondeos, pero que en cierto modo podría considerarse como recarga inducida, es la recarga entre acuíferos a través del propio sondeo. Así por ejemplo, en un sistema acuífero de tipo multicapa un sondeo puede poner en comunicación puntual varios niveles acuíferos de distintas cargas hidráulicas y características físico-químicas. A través del sondeo se establecerán una serie de flujos, buscando una nueva situación de equilibrio de presiones/caudales. Conocidas las características individuales de cada acuífero, y eso puede realizarse en sondeos adecuadamente contruidos mediante un dispositivo de doble packer, podrá intervenir en el proceso de recarga.

Un ejemplo simplificado de esto sería su aplicación en un sector en que se explotara un acuífero libre, existiendo bajo él un acuífero confinado. Mediante una red de sondeos profundos, contruidos de forma que quedaran suficientemente aislados los dos acuíferos por el exterior de la entubación, se podría realizar una recarga periódica (controlada mediante obturadores) a través de los sondeos, aprovechando la presión del acuífero confinado.

Por supuesto, además de los dispositivos de recarga mencionados existen otros más específicos, así como combinaciones de sistemas superficiales y profundos.

Por último queremos añadir algunos comentarios sobre el agua con la que se realiza la recarga. Además de los problemas ya mencionados de la colmatación por presencia de finos en suspensión, o arrastrados por las aguas de recarga, que podrán afectar no sólo a las instalaciones sino al propio acuífero, también hay que tener en cuenta otros factores, que resumimos a continuación:

- La composición química del agua deberá cumplir unos requisitos mínimos de calidad, especialmente cuando el acuífero que se recarga está ligado a abastecimientos de agua de boca.

- Se deberán tener en cuenta los posibles procesos de colmatación por precipitación química (carbonato cálcico, hidróxidos de hierro y manganeso, etc). La mezcla de aguas de distinta composición química, entre las inyectadas y las del acuífero, podrá favorecer estos procesos.

- También podrán producirse fenómenos de colmatación por crecimientos algales o bacterianos, especialmente cuando las aguas de recarga contengan algas, o se produzcan estos crecimientos en las balsas.

Como conclusiones al apartado de recarga artificial queremos insistir en que se trata de prácticas sumamente eficaces cuando se aplican con profesionalidad. Dentro de la valoración técnica de un proyecto de recarga deberá incluirse un estudio de su viabilidad económica, así como un programa de mantenimiento.

3.3.5.- EL USO CONJUNTO

Se entiende por uso conjunto el aprovechamiento complementario de las aguas subterráneas y superficiales, aprovechando sus diferentes características y circunstancias,. Nos encontramos así con una filosofía de gestión que puede resolver gran parte de los desequilibrios en la disponibilidad de los recursos hídricos en el espacio y en el tiempo.

En definitiva, el uso conjunto va más allá de la alteración artificial del ciclo del agua mediante actuaciones de recarga artificial, que tantas veces implica importantes problemas de tipo económico, técnico, legal y político. Entra así otro concepto, el del uso alternado, cuya aparente simplicidad

conceptual esconde la necesidad de un análisis exhaustivo de todos los condicionantes: demanda, variabilidad hidrológica y de calidad, criterios económicos, aspectos legales, implicaciones ambientales, etc.

Las actuaciones de uso alternado deben formar parte de una planificación hidrológica territorial a largo plazo, y su aplicación es especialmente apropiada para la amortiguación de los periodos de sequía. El ejemplo más conocido de la aplicación de esta filosofía de gestión es el de Salt River Project, en Arizona, pero también en nuestro país tenemos otros ejemplos como el del sistema río Mijares-Plana de Castellón (SAHUQUILLO 2000). En esta zona un tercio de la superficie regada lo es alternativamente con aguas superficiales y subterráneas, dependiendo de la disponibilidad de ésta en el río o embalses. Otro tercio corresponde a riegos tradicionales con aguas superficiales y el resto corresponde a los usos industriales y de abastecimiento, de procedencia exclusivamente subterránea. Con la aplicación de una gestión alternativa se está consiguiendo un importante aumento de la disponibilidad del agua, e incluso se está reduciendo la contaminación por nitratos y controlándose la intrusión marina.

3.4.- CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

3.4.1.- CONCEPTOS Y GENERALIDADES

Tóth (2000) realizó una interesante síntesis sobre el papel de las aguas como agente geológico, en que se revisan las interacciones entre aguas subterráneas y medio ambiente. Para entender los procesos de contaminación de las aguas subterráneas provocados por la interacción del hombre, sin duda es un ejercicio interesante recordar brevemente las relaciones del agua con su entorno geológico. El agua, al circular por el subsuelo, lo hace siguiendo las leyes físicas buscando alcanzar un estado de equilibrio con el medio geológico, y en ese tránsito se producen interacciones clasificables, según su naturaleza, en químicas, físicas y cinéticas. Al conjunto de las manifestaciones de estas interacciones se les viene denominando efectos ambientales "in situ" del agua subterránea.

La anterior introducción ya nos aproxima a la idea de la extrema dificultad de discriminar en muchos casos la incidencia de los procesos naturales y de los antrópicos, en los que vamos a denominar efectos contaminantes en las aguas subterráneas. En general se habla de contaminación de un medio aéreo o acuoso cuando en éste aparecen concentraciones anómalas de uno o varios de sus constituyentes originales, o de constituyentes alóctonos. Esta definición genérica ya nos indica que la contaminación puede tener un origen natural, además del antrópico.

En este apartado nos centraremos en los aspectos negativos de la contaminación de las aguas subterráneas, entendida como aquella variación de las características físico-químicas que supone un perjuicio o limitación para el uso a que estaban destinadas.

Los problemas asociados a la contaminación del agua en su fase superficial han sido desde hace mucho tiempo detectados y estudiados. No podemos decir lo mismo de las aguas subterráneas, sobre las que ha pesado la ignorancia generalizada. Como en tantos otros problemas asociados al "desarrollo" de la Humanidad, desgraciadamente ha sido la aparición de los síntomas negativos lo que ha llevado a cobrar conciencia al respecto.

El porqué del retraso en la concienciación del problema ha tenido mucho que ver seguramente con una característica distintiva respecto a las aguas superficiales: mientras que en éstas la aparición de los síntomas es prácticamente inmediata al hecho contaminante, en las aguas

subterráneas el tiempo de penetración y tránsito suele ser mucho mayor, por lo que es más difícil establecer la relación causa/efecto. Por ilustrar el anterior comentario, recordemos que la tasa media de renovación en las aguas subterráneas se ha estimado en unos 1400 años, frente a una media de 20 días en los cursos superficiales (Sampat, 2000).

Por este motivo, tradicionalmente se ha considerado que las aguas subterráneas eran mucho menos vulnerables a la contaminación que las superficiales, sobreestimándose posiblemente la capacidad "purificante" de las formaciones del subsuelo. Así, se estudiaba y actuaba sobre la contaminación de las aguas superficiales, sin apenas tener en cuenta las actuaciones que inyectaban o favorecían la infiltración de contaminantes en los acuíferos. Y cuando se detectaban los síntomas de la contaminación ya era muy difícil actuar.

Desde hace no muchos años se ha ido cobrando conciencia de que el agua, también en su fase subterránea, es un recurso limitado y vulnerable. No hay que olvidar que en amplias zonas de la Tierra el abastecimiento humano de agua procede mayoritariamente de los acuíferos, y que en muchos casos los problemas de calidad amenazan seriamente el futuro socio-económico de muchas comunidades.

En los siguientes apartados nos referiremos a la prevención, detección, diagnóstico y actuaciones contra la contaminación de las aguas subterráneas.

3.4.2.- TIPOS Y ORIGENES DE LA CONTAMINACIÓN

Los tipos de contaminación suelen clasificarse por sus causas y sus efectos. Respecto al origen, ya indicamos antes que pueden dividirse en naturales y antrópicas. Como causas naturales se incluirían aquellas relacionadas con causas geológicas, biológicas, meteorológicas, etc.

Si bien en esta comunicación nos vamos a centrar en las alteraciones de origen antrópico, antes vamos a hacer una breve revisión de los problemas de contaminación natural, especialmente a los casos en que sí hay un factor humano implicado. Es decir, si normalmente asociamos la contaminación de las aguas a la introducción por el hombre de elementos extraños o concentraciones anómalas de determinados elementos químicos, tampoco debemos olvidar que la simple interferencia en el régimen natural del ciclo hidrológico puede implicar la movilización o mezcla de masas de agua de distintas naturalezas. Este es el caso, que trataremos ampliamente de la intrusión marina, pero también de otros casos mucho menos conocidos pero con fuertes implicaciones en las áreas afectadas, incluso a nivel de generar graves problemas de salud.

La historia de la crisis de salud generada por envenenamiento crónico por arsénico en la zona de Bangladesh-Bengala Oriental a mediados de los 90 ha sido hasta la fecha el caso más grave identificado, al amenazar a un área poblada por cerca de un centenar de millones de habitantes. El problema se inició al tratar precisamente de resolver una crisis de abastecimiento de agua potable a unas áreas en que los cursos superficiales estaban fuertemente contaminados por la actividad humana. Así, ante el riesgo de episodios epidémicos, la OMS y otras agencias de ayuda internacional realizaron una intensa campaña de perforación de sondeos para garantizar el abastecimiento de agua potable. En poco más de una década esta "solución" se convirtió en origen de una grave crisis de salud, ante la aparición progresiva, en una gran parte de estos sondeos, de elevadas concentraciones de arsénico. Aunque los mecanismos de liberación del arsénico (que ahora sí han detectado como constituyente en las formaciones geológicas presentes en los acuíferos de la zona) están aún en discusión, sí está claro que este puede ser un caso clasificable como de contaminación natural por inducción antrópica.

Es posible que a muchos lectores de nuestro país les tiente la idea de pensar que se trata de

un caso del "tercer mundo" (a pesar de tener un origen de "intervención humanitaria"), pero problemas muy similares aunque a escalas muy limitadas, y también con el arsénico, llevan apareciendo en nuestro país. Sin ir más lejos, en estos momentos aún no se ha resuelto la crisis identificada en el verano del 2000 que afectó a varias poblaciones de Castilla y León, en cuyos sondeos de abastecimiento se detectaron concentraciones de arsénico superiores a las aceptables para consumo humano.

Centrándonos en los casos de contaminación que tienen más directamente su origen en la intervención del hombre en el ciclo del agua, y siguiendo aproximadamente la clasificación recogida por CUSTODIO y LLAMAS (1983), atendiendo a su composición los contaminantes pueden ser:

- minerales (cloruros, sulfatos, sodio, calcio, etc)
- hidrocarburos (gasolina, gasoil, aceites minerales, etc)
- orgánicos degradables
- orgánicos poco o nada degradables
- biológicos (bacterias, virus, etc)
- radiactivos (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{147}Pm , etc)
- gaseosos

Pero la más empleada es la clasificación en base a las causas en sí de la contaminación, destacando las siguientes:

1.- Actividades domésticas: Tradicionalmente relacionada con la utilización de pozos negros y fosas sépticas, pero también debidas a vertidos indiscriminados, o fugas de los sistemas de alcantarillado. Además se han incrementado los vertidos de detergentes de uso doméstico.

Este tipo de contaminación suele estar bastante focalizada, aunque en zonas de gran densidad de habitantes, o en aglomeraciones urbanas, puede generalizarse.

Sus efectos son particularmente negativos para los abastecimientos de agua potable, al presentar casi siempre contaminantes orgánicos.

2.- Actividades agrícolas: El efecto contaminante más conocido es el relacionado con la aplicación de fertilizantes, tanto de origen orgánico (estiércol, gallinaza, etc), como por los cada día más extendidos abonos artificiales (nitratos, fosfatos, etc). El riego con aguas residuales también provoca efectos contaminantes similares.

Este tipo de contaminación, de carácter difuso, está presente en la mayor parte de las zonas de larga tradición agrícola, especialmente en las de cultivos intensivos. Sus efectos, sobre todo a largo plazo, son bastante complejos y su corrección sumamente difícil.

Pero no es éste el único tipo de contaminación de origen agrícola, aunque sí el más generalizado y estudiado. La infiltración de los compuestos químicos fitosanitarios utilizados para el tratamiento de plagas (insecticidas, fungicidas), puede llegar a ser un problema bastante grave, sobre todo teniendo en cuenta la alta toxicidad de los mismos. Este tipo de contaminación, mucho más difícil de detectar, supone un potencial riesgo para la salud en las zonas afectadas.

Como contaminación de origen agrícola podemos incluir también las acumulaciones de sales en zonas de insuficiente drenaje, o con dotaciones de riego excesivas. También podrán contaminarse los acuíferos a través de los retornos del riego, cuando el agua procede de aguas superficiales de mala

calidad.

3.- Actividades ganaderas: Los vertidos de las granjas son en muchas ocasiones, como es el caso de los purines, focos de contaminación intensa.

4.- Contaminación desde aguas superficiales: Aquí se incluyen los casos de contaminación de acuíferos por recarga, natural o artificial, desde almacenamientos o cursos superficiales contaminados.

5.- Salinización: El caso más frecuente es el de la salinización por intrusión marina, del que haremos un apartado especial. Pero también puede estar causado por la mezcla con aguas de otros niveles de aguas más salinas, por efecto de la explotación, o por infiltración desde la superficie de determinados residuos industriales.

6.- Contaminación por actividades mineras: La contaminación de acuíferos por actividades mineras puede estar causada por la entrada de aguas a través de la propia infraestructura de la mina (galerías, perforaciones), o por el propio laboreo (lavaderos de mineral). También puede ser importante la contaminación desde las escombreras, sobre todo en aquellas ricas en óxidos, sales, ..., fácilmente movilizables por la lluvia.

En las zonas de explotación de hidrocarburos son muy frecuentes los problemas de contaminación de los acuíferos por los escapes a través de las conducciones y de las propias perforaciones.

7.- Contaminación industrial: Dentro de este grupo se incluyen una gran variedad de tipos contaminantes, en función de la propia naturaleza de la actividad industrial. Industrias petroquímicas, metalúrgicas, cerámicas, agroalimentarias, ... producen una gran cantidad y variedad de residuos en fase líquida y sólida, que frecuentemente tienen un efecto contaminante tanto en el medio no saturado como en el saturado.

8.- Contaminación urbana: Aquí quedarían incluidos orígenes de contaminación tan variados como los escapes de las redes de evacuación de aguas residuales, los vertederos urbanos, las fugas de depósitos de hidrocarburos, etc.

Estos problemas están presentes, en mayor o menor medida, en la práctica totalidad de las aglomeraciones urbanas, por lo que es esencial controlar permanentemente la potabilidad química y bacteriológica de las captaciones de aguas subterráneas en las poblaciones y su entorno.

9.- Contaminación radiactiva: Las actividades mineras e industriales (plantas de enriquecimiento, centrales nucleares) relacionadas con el manejo de minerales radiactivos y sus derivados, son focos potenciales de contaminación radiactiva de las aguas subterráneas, de alta peligrosidad y extrema dificultad de corrección.

El almacenamiento o inyección de los residuos radiactivos en el subsuelo es uno de los problemas más concretos y frecuentes de este tipo de contaminación.

10.- Contaminación por inyección directa en sondeos: Con relativa frecuencia se han utilizado sondeos profundos para la eliminación o almacenamiento de residuos, especialmente los tóxicos. Aparte de los inmediatamente mencionados residuos radiactivos, se han inyectado aguas urbanas

residuales, residuos líquidos industriales, salmueras, etc.

La gravedad de bastantes de estos vertidos, de profunda penetración en los acuíferos, refleja la ignorancia y/o irresponsabilidad de las industrias u organismos que las han realizado o permitido.

Otra clasificación general de fuentes contaminantes, aplicable a las aguas subterráneas, es la elaborada por la *Oficina de Normas Tecnológicas de Estados Unidos (OTA)*, que las clasifica en las siguientes categorías:

- Categoría I: Fuentes proyectadas para descargar sustancias.
- Categoría II: Fuentes proyectadas para almacenar, tratar y/o eliminar sustancias. Vertidos no planificados.
- Categoría III: Elementos de transporte o transmisión.
- Categoría IV: Fuentes que descargan sustancias como consecuencia de otras actividades planificadas.
- Categoría V: Fuentes que proporcionan vías o inducen descargas al alterar el flujo.
- Categoría VI: Fuentes naturales cuyas descargas se crean y/o se aumentan por actividades humanas.

3.4.4.- LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN

Ya hemos señalado en varias ocasiones las causas de la tardía toma de conciencia sobre la "fragilidad" de los recursos hídricos subterráneos frente a los procesos contaminantes, especialmente las dificultades de establecer las relaciones causa-efecto en los mismos.

Sin embargo, actualmente está generalizado el sentimiento de que las aguas subterráneas constituyen un recurso vital -y a veces único- para la vida y el desarrollo socio-económico, pero que es sumamente vulnerable a la contaminación. Del mismo modo, se conoce la dificultad técnica y elevado coste de recuperar la calidad de las aguas contaminadas.

Dado que posteriormente haremos un apartado especial para hablar de la salinización de acuíferos, especialmente los fenómenos de intrusión marina, aquí nos referiremos a la contaminación de origen antrópico.

Las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas tienen una doble vertiente: la prevención y la corrección.

La prevención contemplará aquellas medidas que tengan por objeto evitar que se produzca la contaminación. Así, se incluyen aquí:

- * Estudios de vulnerabilidad de acuíferos: Definición de las conexiones con aguas superficiales, infiltración, conexiones laterales, esquemas de flujos, capacidad autodepurante, etc.
- * Ordenamiento legal de los usos del suelo, en función de su vulnerabilidad: establecimiento de perímetros de protección, normativa de vertidos, de construcción y abandono de sondeos, etc.
- * Inventario, localización y caracterización de los posibles focos contaminantes: Fugas de

conducciones sanitarias, escapes industriales, vertederos, etc.

- * Estudio del nivel de contaminaciones de tipo difuso (compuestos nitrogenados, pesticidas).
- * Redes de vigilancia y control: Establecimiento y control de redes de vigilancia de calidad de aguas.
- * Obras: Cementaciones de sondeos, sellado de vertederos, depuración de aguas residuales, etc.
- * Campañas informativas de concienciación sobre la vulnerabilidad de los acuíferos y sus efectos.

Más complejo es el capítulo de corrección, que se refiere a las medidas que intentaran recuperar la calidad de las aguas subterráneas, hasta hacerlas de nuevo aptas para el uso a que estuvieran destinadas. Entre estas medidas correctoras, que lógicamente se solapan con las preventivas, destacamos las siguientes:

- * Identificación del origen de la contaminación: Detección de focos contaminantes, estudios de contaminaciones difusas, etc.
- * Evaluación del alcance del problema.
- * Eliminación o control de la causa de la contaminación.
- * Trabajos de descontaminación.

Nos encontramos de nuevo con el problema del desfase temporal, que en tantas ocasiones existe en el dominio de las aguas subterráneas, entre la detección de los síntomas de contaminación y sus causas. Además, los mecanismos de "autodefensa" del medio hidrogeológico (oxidación-reducción, dilución, microbiodegradación) pueden enmascarar el contaminante original, dificultando su identificación.

De cualquier forma, la regeneración cualitativa de acuíferos es en general bastante compleja, lenta y costosa. En el caso de contaminantes degradables, la descontaminación se realizará en el tiempo, con los mecanismos naturales ya indicados. Estos procesos naturales podrán estimularse mediante técnicas especiales (lavado y dilución por recarga artificial, inyección de determinados gases, bombeo y oxigenación, etc).

Más complejos son los casos de contaminantes estables, que sólo podrán eliminarse parcialmente mediante dilución, natural o provocada, o por bombeo. Un típico ejemplo de esto son los escapes de hidrocarburos que suelen eliminarse por bombeo localizado.

Otras técnicas pasan por la instalación de barreras físicas o dinámicas para contener la zona contaminada, la inyección de productos que induzcan condiciones de limitación de movilidad o solubilidad de contaminantes, el bombeo, tratamiento y reinyección del agua una vez depurada, la excavación y eliminación de los terrenos contaminados, etc.

La importancia actual de los problemas de contaminación de suelos y acuíferos está propiciando el desarrollo de la tecnología de descontaminación. La preocupación queda patente también en los numerosos congresos y jornadas técnicas monográficas que se están realizando en estos últimos años.

3.5.- SALINIZACION DE ACUIFEROS E INTRUSION MARINA

3.5.1.- DEFINICIÓN DE CONCEPTOS. ORÍGENES.

Dentro del capítulo de la problemática de la degradación cualitativa de las aguas subterráneas parece esencial hacer un apartado especial dedicado al tema de las complejas relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras.

Históricamente las zonas litorales han sido zonas preferentes de establecimiento de comunidades humanas, atraídas por las actividades de pesca, comercio y agricultura. La demanda de agua ha sido creciente, solucionándose en muchos casos con recursos subterráneos. En las últimas décadas las necesidades se han disparado por el desarrollo de actividades industriales, pero sobre todo por la explotación turística del litoral.

Así, la situación actual en bastantes sectores del litoral es de explotaciones intensas y discontinuas, ligadas sobre todo a las grandes aglomeraciones urbanas, que han roto en muchos casos el equilibrio dinámico de las masas de agua dulce y salada en el subsuelo. A los fenómenos de progresión hacia el interior de la cuña de agua salada se les conoce genéricamente por intrusión marina.

Pero antes de entrar a describir la dinámica de este problema, queremos hacer la diferenciación entre dos conceptos frecuentemente confundidos: la intrusión marina y la salinización de acuíferos.

Bajo la denominación de salinización de acuíferos se engloban todos aquellos procesos, entre los que se incluiría evidentemente la intrusión marina, que conlleven un incremento del contenido en sales disueltas en las aguas que limite o impida la continuidad de su uso. Por poner un ejemplo, la mezcla de un 2% de agua marina contaminaría el agua dulce de un acuífero de forma apreciable, con un 4% la degradación ya sería suficiente para desaconsejar o limitar su uso, y a partir del 6% es prácticamente inútil para los usos habituales.

La salinidad se expresa normalmente como contenido en sales totales, aunque es bastante frecuente utilizar medidas más sencillas de realizar como la conductividad eléctrica, o el contenido en ión Cl⁻ (ión más soluble).

CUSTODIO (1994) sintetiza las principales causas de la salinización en los siguientes puntos:

- Penetración de agua marina moderna.
- Existencia de agua marina antigua no expulsada por flujo muy lento o falta de gradiente hidráulico en formaciones poco permeables.
- Aspersión marina en franjas ventosas próximas al litoral.
- Concentración del agua de lluvia por evaporación en la superficie del terreno o en la parte superior del suelo, cuando el clima es árido.
- Evaporación del agua subterránea en zonas de descarga encharcadizas (humedales), sometidas a intensa evaporación.
- Disolución de sales evaporíticas existentes en las formaciones acuíferas, que más comunmente son yesos y las sales asociadas.
- Desplazamiento de aguas subterráneas salinas existentes en ciertas formaciones profundas, bien sea de forma natural o inducida por la explotación de agua subterránea.
- Infiltración de excedentes de riego, en clima árido o cuando se utilizan aguas con elevada salinidad.

- Procesos de contaminación que producen salinidad como:
 - * aguas de drenaje y agotamiento de minas, en especial de sal y potasa
 - * aguas de lavado de escombreras salinas
 - * fugas de sistemas de refrigeración con agua salina
 - * fugas de procesos que usan aguas salinas
 - * efluentes de plantas de ablandamiento y desmineralización por intercambio iónico, y del rechazo de plantas desalinizadoras, o intensa evaporación del agua en industrias
 - * deshelado de carreteras con sal

Volviendo de nuevo al caso concreto de la salinización de acuíferos por intrusión marina, en los siguientes apartados nos centraremos en la sintomática, problemas asociados, sistemas de detección y posibilidades de corrección.

No entraremos, en cambio, en los complejos desarrollos matemáticos para calcular la penetración y morfología de la cuña salina, que el interesado podrá encontrar en varias de las publicaciones específicas que se mencionan en la bibliografía de esta comunicación.

3.5.2.- INTRUSION MARINA: MODELOS.

La existencia de un fenómeno de intrusión salina en un acuífero costero se manifiesta, como ya se ha indicado, en el incremento de la salinidad en las captaciones. Y esta modificación de las características químicas del agua causará una serie de problemas en relación con el uso a que estaban destinadas (abastecimiento, riego, industria).

Pero vamos a entrar, evitando los desarrollos matemáticos, en la génesis y evolución de este fenómeno. Si en un sector del litoral existe una formación acuífera saturada con agua "dulce", se establecerá una situación de equilibrio físico-químico con el agua "salada" del mar, que lógicamente también penetra parcialmente en el acuífero.

Los valores de los parámetros de los dos fluidos, agua dulce y agua salina, que definen el equilibrio son:

PARÁMETROS FISICO-QUIMICOS	PESO ESPECIFICO	VISCOSIDAD	SALINIDAD
AGUA DULCE	Se considera de 1.000 g/cm ³		Valor medio del Cl ⁻ entre 0,3 y 3 ppm
AGUA SALADA	Entre 1.200 y 1.030 g/cm ³	Para igual temperatura, el agua del mar tiene una viscosidad del 30% superior a la dulce.	Agua del mar (Mediterráneo) 34-35 gr/l. En salmueras hasta 300 gr/l

Las relaciones entre los parámetros indicados, y el esquema de flujos-descargas en el litoral, definirán la penetración de la cuña salina hacia el interior.

Para calcular la posición-penetración de la cuña salina se han ido desarrollando varios modelos

de cálculo. Los primeros modelos, como el de Ghyben-Herzberg, simplificaban el problema al considerar las masas de agua dulce y salada como totalmente inmiscibles, con una interfase neta y plana. Posteriormente el modelo de Gubert añadía las correcciones debidas a las variaciones del flujo horizontal a medida que nos acercamos a la costa. La presencia de la cuña salina provoca un estrechamiento y en consecuencia un incremento de la velocidad del flujo, con aparición de componentes verticales.

Los modelos anteriores consideraban la interfase como una superficie de espesor despreciable, es decir, sin considerar zona de mezcla. Sin embargo, como se ha indicado, los efectos de difusión y dispersión hidrodinámica condicionan que en la mayoría de los casos sí exista una zona de mezcla de cierto espesor que complicará los cálculos de la intrusión.

Este hecho quedaba contemplado en los modelos más recientes, como los de Lusczynski, Glover y Todd, en cuyo detalle no vamos a entrar.

Basándose en estos modelos existen otros desarrollos que permiten calcular la profundidad y penetración de la cuña salada, tanto para acuíferos libres como confinados.

También hay que tener en cuenta los efectos de las mareas, especialmente en litorales con gran amplitud de la misma. Esta influencia decrece de forma exponencial al alejarnos de la costa.

Dejando a un lado las valoraciones sobre la precisión de los distintos modos de cálculo para definir la interfase, vamos a centrarnos en el carácter dinámico del equilibrio físico-químico entre las dos masas de agua, dulce y salada.

Resulta relativamente sencillo el cálculo de las relaciones en función de los diferenciales de densidad/presión; sin embargo las variaciones del flujo, naturales o/y antrópicas, complican el cálculo. Ejemplos de esto serían las variaciones en el régimen de la red fluvial, bombeos, inundaciones de agua salada en tormentas, etc. De este modo se complica el esquema de la cuña homogénea de intrusión marina, con variaciones espacio/temporales muy tenues. El ejemplo más claro es el de bombeos a través de pozos y sondeos, que tenderán a provocar un desequilibrio puntual en la interfase, que se manifestará como un domo en la misma.

A continuación señalaremos las principales técnicas de detección y evaluación de los procesos de intrusión marina.

3.5.3.- SISTEMAS DE DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DE SALINIZACIÓN DE ACUIFEROS.

En la mayor parte de los casos la aparición de los primeros síntomas de problemas de salinización de los acuíferos, generalmente detectados en los sondeos, es el factor desencadenante de las actuaciones en análisis y corrección de los fenómenos de intrusión marina.

El objetivo esencial perseguido en un estudio de intrusión será definir la penetración de la cuña salina, así como la profundidad y morfología de su superficie o interfase.

Entre las técnicas de estudio aplicables al análisis de la intrusión podemos distinguir entre métodos directos e indirectos. Entre los primeros se incluirían los basados en la analítica directa de las aguas en sondeos, mientras que los segundos serían aquellos en que se deducen los cambios a partir de datos indirectos, especialmente de medidas geofísicas.

En cuanto a la analítica de las aguas de los sondeos, los estudios podrán realizarse a partir de datos hidroquímicos, o análisis de isótopos y radioisótopos. Según el I.T.G.E. (1988) los aspectos hidroquímicos esenciales relacionados con la intrusión son los siguientes:

- En los procesos de intrusión marina se producen en la zona de contacto una zona de mezcla o interfase en la que tiene lugar una serie de reacciones que determinan su composición hidroquímica. Además, la propia zona de interfase no es homogénea, debido a los procesos de dilución-dispersión que en ella tienen lugar.

- En esencia, los cambios químicos que se producen en la interfase se traducen en un incremento de la mineralización por el aporte de sales. Esta modificación genera además variaciones en la fuerza iónica del agua. Los principales elementos que sufren un incremento son los cloruros, sulfatos, sodio y magnesio. De ellos es el ión cloruro el más sintomático de la intrusión.

Los sulfatos pueden verse alterados por procesos de reducción en ambientes con elevado contenido en materia orgánica, y afectar también a otros iones, como el calcio, debido a la precipitación de carbonatos, incrementándose la relación Mg/Ca.

Los cambios de base modifican las concentraciones de alcalinos y alcalino-térreos. El estudio de estas variaciones permite determinar los movimientos del agua, y las mezclas habidas en la interfase.

- Además de los cambios hidroquímicos también se producen fenómenos que afectan al propio "continente", es decir, a las formaciones geológicas que constituyen el acuífero. Entre estos efectos cabe destacar fenómenos químicos como los intercambios iónicos, y fenómenos físicos que alteran las características texturales de las formaciones como la defloculación de arcillas.

En cuanto a los métodos isotópicos, su principal aplicación está en que permiten identificar el origen de la salinización. Como ya se indicó, la salinización de los acuíferos puede tener orígenes distintos del de la intrusión. El desarrollo de técnicas de estudio basadas en el análisis, tanto de los isótopos naturales (deuterio, ^{18}O , etc), como de los radioisótopos (tritio, ^{13}C y ^{34}S , esencialmente), han permitido importantes avances en la investigación de salinización de acuíferos.

Un apartado especial merecen las técnicas geofísicas aplicables al estudio de la intrusión marina. En esencia estas técnicas tratan de identificar la posición de la interfase mediante la detección de variaciones en el comportamiento físico de las formaciones geológicas "invadidas" por aguas de distinta composición.

La técnica más tradicionalmente empleada ha sido la prospección geoelectrica y especialmente los S.E.V. (sondeos eléctricos verticales). De más reciente aplicación están otros métodos, utilizados también en la investigación hidrogeológica, como los sondeos electromagnéticos (tanto en el dominio de frecuencias como en el de tiempos), los sondeos de polarización inducida, resonancia magnético-nuclear, etc.

La testificación geofísica en sondeos también es una técnica de muy interesante aplicación en los estudios de intrusión marina.

3.5.4.- CORRECCIÓN Y LUCHA CONTRA LA INTRUSIÓN MARINA.

Como hemos visto hasta ahora, los desplazamientos de la cuña salina hacia el continente se provocan al modificar sustancialmente el equilibrio natural mantenido por los flujos de descarga del acuífero hacia el mar. La causa esencial de estas modificaciones suele estar en los bombeos directos de las aguas del acuífero, interceptando parte de estos flujos de descarga.

Por esto, cualquier actuación correctora de los procesos de intrusión tendrá que orientarse hacia la búsqueda de una situación de equilibrio aceptable para el uso del acuífero, evitando su invasión por aguas salinas. En este grupo incluiríamos aquellas medidas orientadas a la explotación racional y controlada del acuífero, como la redistribución temporal y espacial de las extracciones, y la recarga artificial.

Con la redistribución espacial de las extracciones se buscará evitar la formación de domos salinos en las zonas de fuerte concentración de extracciones, mientras que con la distribución temporal se facilitará al sistema el mantenimiento de su equilibrio natural.

Con los dispositivos de recarga artificial, podría contrarrestarse parcial o totalmente el efecto de las extracciones, limitando la intrusión o incluso corrigiéndola.

Otro grupo de medidas serían las obras destinadas al control físico y/o hidráulico de la intrusión, como las barreras físicas, y las barreras hidráulicas, que pueden ser de bombeo o de inyección.

Las barreras físicas consisten en obras destinadas a impermeabilizar el acuífero, impidiendo su salinización. En acuíferos de escaso espesor esto suele realizarse mediante zanjas rellenas de material impermeable (arcillas, cemento). Más complejo y costoso es el intento de crear barreras físicas en acuíferos más profundos, con inyección de productos sellantes a través de sondeos.

Las barreras hidráulicas pueden ser de bombeo o de inyección. Las primeras pretenderán interceptar la cuña salina, evitando su progradación hacia el interior, mediante el bombeo en una línea de pozos construidos en la franja litoral. Las barreras de inyección son una variante de la recarga artificial, consistente en reforzar la presión de la columna de agua dulce en la franja costera mediante dispositivos de recarga (zanjas, sondeos, etc).

El primer grupo es el más eficaz, sobre todo en sectores de cierta extensión y con problemas importantes, donde el elevado coste y la limitada efectividad de los dispositivos físicos e hidráulicos, difícilmente podrían resolver la situación.

En cualquier caso queda claro que las principales medidas de lucha contra los efectos no deseables de la intrusión marina son la prevención y el control. El conocimiento hidrogeológico y modelización de flujos y balances, el control de las extracciones y el establecimiento de una red de vigilancia, son las medidas básicas para evitar este problema. No hay que olvidar que una vez invadido el acuífero por el agua salada, su recuperación es muy lenta y costosa, como ya indicamos al hablar de la contaminación en general. Además los problemas provocados tienen un elevado coste económico y social, al afectar a sectores tan diversos como el abastecimiento humano, la agricultura, el turismo, o la industria.

3.6.- REDES DE CONTROL DE LOS ACUIFEROS.

3.6.1.- OBJETIVOS DE LAS REDES DE CONTROL.

A lo largo de esta comunicación hemos repasado los principales problemas que pueden afectar a las aguas subterráneas, especialmente los relacionados con las actividades humanas. Estos problemas podemos agruparlos en cuantitativos, cuando afectan a la disponibilidad del recurso, y cualitativos, cuando suponen una limitación de su uso por el deterioro de sus características físico-químicas.

En todos los casos, especialmente en los que afectan a la calidad (contaminación, intrusión marina,...), se hace patente la dificultad de corregir los problemas, y retornar al acuífero a sus condiciones originales. De hecho, en la mayor parte de los casos es prácticamente imposible, por dificultades técnicas o costes muy elevados, alcanzar una solución.

Las causas de la situación actual, con multitud de casos en nuestro planeta de acuíferos deteriorados hasta el punto de ser prácticamente irrecuperables, hay que buscarlas en el desconocimiento del contexto hidrogeológico, en un exceso de confianza en la capacidad "autorregeneradora" de la Naturaleza e, indudablemente, en la irresponsabilidad de los propios usuarios.

La dificultad añadida del desfase temporal causa-efecto en fenómenos como la contaminación o la sobreexplotación, explica también la demora en la detección, diagnóstico y toma de medidas correctoras.

En esta situación, la prevención se manifiesta como el eje de actuación en que deben integrarse responsablemente usuarios y administradores, para conservar un recurso cada vez máspreciado.

Y dentro de este campo, el establecimiento y control de redes de vigilancia de la evolución cuanti y cualitativa de los acuíferos es, sin duda, la herramienta más práctica.

3.6.2.- DISEÑO Y OPERACIÓN DE LAS REDES DE CONTROL

Una vez indicados los objetivos esenciales de las redes de control de las aguas subterráneas, vamos a repasar los criterios con que deben diseñarse y manejarse. Dividiremos estos criterios en los siguientes grupos:

- * Criterios de diseño de la red
- * Criterios de elección y/o construcción de los sondeos
- * Criterios de operación de la red

* Criterios de diseño de la red: Las redes deberán adecuarse en lo posible al problema concreto que pretenden vigilar. De ahí que deba seleccionarse una malla de densidad adecuada a la escala del sector afectado. Por ejemplo, no es lo mismo controlar la intrusión marina en un gran sector del litoral, que vigilar posibles escapes de los tanques de una gasolinera.

Evidentemente, la definición de la red deberá basarse en un estudio hidrogeológico adecuado, con definición de la geometría, estructura, características hidrogeológicas y sistemas de

flujo del acuífero, así como estimaciones de su balance y relaciones con otros acuíferos. De otra forma difícilmente podrá diseñarse una red cuyos datos ofrezcan fiabilidad a la hora de interpretarlos. Por ejemplo, en el caso de un escape contaminante puntual, la red de vigilancia deberá situarse en el sentido de los flujos subterráneos desde ese punto, por lo que será preciso conocerlos previamente.

* Criterios de elección y/o construcción de los sondeos de la red: En principio siempre que sea posible las redes de control deberán estar compuestas por sondeos específicamente contruidos para ella. Sin embargo frecuentemente los limitantes económicos llevarán a la necesidad de integrar la red con todos o parte de los puntos de control pertenecientes a la infraestructura ya existente.

En este caso habrá que cuidar la selección, de forma que se consiga una red de la máxima homogeneidad posible, eligiendo sondeos de los que se disponga de datos fiables (construcción, columna litológica, etc), y que sean representativos, por sus características y situación, de la problemática concreta del acuífero.

Si existe la posibilidad de construir una red de sondeos específica, deberá cuidarse el diseño y control de ejecución de los mismos. Además de elegir las profundidades y diámetros adecuados, posición de las rejillas, ... deberá prestarse especial atención a los aspectos del acondicionamiento mismo de los sondeos.

Así, en una red de calidad de aguas es especialmente importante el aislamiento del emboquille, con sellado adecuado mediante arcillas o cementaciones. También deberá utilizarse el tipo de tubería más adecuado, según las características físico-químicas del agua, para evitar que éstas se vean alteradas por fenómenos de corrosión, disolución, etc. Es decir, el material de revestimiento deberá mantener su integridad estructural, evitando la liberación de componentes que puedan alterar la interpretación de la red.

Por poner algunos ejemplos, en las redes de calidad el empleo de tuberías de acero galvanizado podrá alterar los contenidos en hierro, manganeso, zinc y cadmio. Incluso el PVC, material muy empleado para las redes de calidad por su gran resistencia e inalterabilidad, puede verse afectado por procesos de lixiviado o absorción en presencia de aguas con contenidos en cetonas, aldehidos y disolventes clorados de bajo peso molecular.

* Criterios de operación de la red: Quedan por último los criterios a tener en cuenta para la propia operación de la red, y aquí incluimos tanto la forma y periodicidad de la toma de datos, como las metodologías de interpretación.

En las redes más sencillas, las de control exclusivamente piezométrico, hay varias formas y sistemas de medida. La primera distinción habría que realizarla en función de si las medidas se realizan con sistemas "externos", es decir mediante visitas periódicas, o con instalaciones fijas. En el primero de los casos la medida se realiza con sondas eléctricas, y su precisión se verá limitada por la calidad del equipo y la profesionalidad del operario. Además lógicamente no será posible la medida sincrónica de todos los puntos de la red, lo que en muchos casos podrá provocar distorsiones en la interpretación.

Actualmente se tiende a dotar a las redes de control piezométrico de dispositivos de medida automatizada, siendo el tipo de sensor más empleado el piezo-resistivo. Estos sistemas incorporan generalmente un sistema de memoria sólida para almacenamiento de datos, siendo programable la frecuencia de la medida.

Más complejas son las redes de calidad, especialmente cuando se contempla analíticas completa. Los sondeos de las redes de calidad deben diseñarse de forma que sea posible tomar las muestras de agua suficientes, y en la forma más adecuada, de forma que sean representativas del acuífero que se controla.

No vamos a entrar aquí en más detalles sobre la forma de tomar las muestras, los parámetros a analizar "in situ", las precauciones para el transporte, técnicas analíticas,... que el lector interesado podrá encontrar en algunos de los manuales y publicaciones relacionados en la Bibliografía.

Sí vamos a mencionar en cambio las posibilidades que ofrecen actualmente las redes de control automatizado aplicadas a calidad de aguas. Efectivamente, como acabamos de explicar al hablar del control piezométrico, la tendencia actual es la construcción de redes automáticas, de gran fiabilidad y bajo coste de mantenimiento. El desarrollo de sensores específicos, y la disponibilidad de equipos de microinformática, nos permiten disponer de sondas multiparamétricas, conectadas a estaciones de control y almacenamiento de datos. Actualmente existen equipos capaces de gestionar medidas de varios parámetros (nivel, pH, conductividad, temperatura, ...), y los avances tecnológicos son continuos. Por ejemplo, actualmente es posible conectar las estaciones de control con una unidad centralizada, vía radio, telefonía GSM, radar, etc, de forma que puedan transmitirse tanto datos como instrucciones de comando y programación.

La selección de los parámetros para los análisis depende, como ya se ha indicado, del objetivo del seguimiento y del tipo de red. Por ejemplo, en redes locales se suelen realizar las siguientes determinaciones:

- Entorno de vertidos de residuos sólidos urbanos (RSU): pH, metales pesados (Fe, Ni, Pb,...), carbón orgánico, fenoles, detergentes, iones (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^{2+} , Mg^{2+} , ...), y conductividad a diferentes profundidades.
- En casos de contaminación por hidrocarburos, determinación organoléptica, extracción con tetraclorometano para la determinación de los diferentes hidrocarburos por cromatografía de gases.
- Contaminación por fertilizantes: control de NO_3^- , PO_4^{3-} , K^+ , Cl^- .
- Intrusión marina: conductividad a diferentes profundidades.

En cuanto a la interpretación de los datos de la red, no debe limitarse a una representación directa de los mismos en los tipos mapas de isovalores. Es esencial la intervención de técnicos cualificados, capaces de detectar y filtrar datos anómalos, y de integrar la información dentro del contexto hidrogeológico y del resto de información disponible (extracciones, vertidos, etc).

Actualmente existen desarrollos de software específicos para el tratamiento de esta información, que simplifican la labor de los técnicos, mejorando además su capacidad de manejar bases de datos complejas.

3.7.- PLANIFICACION DE EXPLOTACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Como compendio y complemento de esta comunicación queremos repasar algunos de los principales conceptos que el gestor o usuario de las aguas subterráneas debe mantener siempre presentes.

En primer lugar, es esencial la concepción integral de las distintas fases del agua dentro de su ciclo natural, y en el caso de las aguas subterráneas especialmente su interconexión con la fase superficial. En definitiva, el recurso es único y por tanto cualquier modificación que introduzcamos en una de las fases tarde o temprano se manifestará en las otras.

Además, queremos insistir sobre la vulnerabilidad de las aguas, en su fase subterránea, y especialmente a las acciones que conlleven una modificación negativa de su calidad. Como ya hemos visto, en amplias zonas de nuestro planeta el abastecimiento de agua de boca procede de las aguas subterráneas, siendo en muchas ocasiones el único recurso. La contaminación de los acuíferos es un grave problema, y su corrección en la mayoría de los casos es costosa, y técnicamente compleja o inviable.

El reconocimiento de las aguas subterráneas como un recurso limitado, vulnerable y estratégico, está ahora presente en la mayoría de las legislaciones de los países de cierto desarrollo, aunque en algunos sectores ha llegado tarde. Afortunadamente se va extendiendo la conciencia de que se debe realizar una explotación de los acuíferos racional y respetuosa con el recurso y el medio ambiente.

Así por ejemplo, en el ámbito de la Unión Europea, la preocupación por las aguas subterráneas ha quedado patente por su incorporación al "5º Programa sobre política y acción en relación con el medio ambiente y el desarrollo sostenible", así como en la "Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible".

Pero ha sido en la "Reunión Interministerial de La Haya de 1991" donde se redactó el primer documento específico sobre la problemática de las aguas subterráneas, estableciéndose las directrices básicas de los planes de actuación. En este documento quedaba de manifiesto el reconocimiento de las aguas subterráneas como un recurso natural de gran valor ecológico y económico que debía ser protegido y gestionado de modo sostenible.

Entre los acuerdos y directrices acordados destacan los siguientes:

- Establecer un programa de acción en aguas subterráneas a niveles nacional y comunitario, con el horizonte del año 2000.
- Conseguir un programa de protección y uso sostenible de este recurso.
- Evitar el progresivo deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos contaminados.
- Aplicar la mejor tecnología disponible y las mejores prácticas medioambientales.
- Desarrollar la participación de los usuarios en los planes gestores.

Posteriormente en nuevas resoluciones el Consejo de la U.E. exigió un programa de actuaciones en materia de aguas subterráneas (resolución del 25/02/1992), y una revisión de la Directiva 80/68/CEE relativa a la protección de las aguas subterráneas causada por determinadas sustancias peligrosas (resolución del 20/02/1996).

Avanzando sobre los objetivos marcados en La Haya, la *Directiva 2000/60/CE* (Parlamento

européo, 2000), se constituye como el documento de referencia en materia de política de aguas, para las próximas décadas. Sin ánimo de realizar un análisis exhaustivo de dicha Directiva, sí queremos destacar algunos de los principios básicos en torno a los que se articulan sus propuestas de acción. Así, queda claro, a lo largo de la Directiva, que existe una preocupación insistente sobre la protección de la calidad de las aguas subterráneas, tanto como recurso estratégico para el abastecimiento, como por los aspectos medioambientales.

Exige por ello a los estados miembros una profundización en el conocimiento de las características de las formaciones geológicas que constituyen los acuíferos, de la situación actual tanto de explotación como de alteración (contaminación) de sus características físico-químicas. Y del diagnóstico pasa al establecimiento de unos objetivos generales y específicos: protección especial de acuíferos ligados a abastecimiento humano, fijación de objetivos medioambientales para garantizar el buen estado de las aguas, planificación conjunta de la explotación y protección de las aguas superficiales y subterráneas, etc.

Respecto a las aguas subterráneas citamos parcialmente los Objetivos medioambientales que establece en su Artículo 4:

- *Los Estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas, ...*
- *Los Estados miembros habrán de proteger, mejorar y regenerar todas las masas de aguas subterráneas y garantizar un equilibrio entre la extracción y la alimentación de dichas aguas con objeto de alcanzar un buen estado de las aguas subterráneas ...*
- *Los Estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para invertir toda tendencia significativa y sostenida al aumento de concentración de cualquier contaminante debida a las repercusiones de la actividad humana, con el fin de reducir progresivamente la contaminación de las aguas subterráneas...*

La Directiva desarrolla un completo Programa de medidas que deberán adoptar los Estados miembros, cuya revisión detallada entendemos que no es objetivo de esta comunicación. Establece también unas líneas estratégicas para combatir la contaminación de las aguas, y específicamente para la prevención y el control de la contaminación de las aguas subterráneas (Artículo 17). Respecto a esta estrategia concreta, en los Anexos de la Directiva (DOCE 22/12/2000, pp.29-30) se establecen los criterios para:

- Caracterización inicial de todas las masas de agua subterránea para poder evaluar su utilización y la medida en que dichas aguas podrían dejar de ajustarse a los objetivos marcados en la Directiva. Básicamente implicaría la delimitación y conocimiento de las características hidrogeológicas de los acuíferos, el análisis de las presiones a que están sometidas (fuentes de contaminación puntuales y difusas, extracciones, recarga). Adicionalmente, en los casos de que existan ecosistemas superficiales ligados a descargas de aguas subterráneas, se requerirían estudios complementarios.
- Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en que en la primera fase se hayan detectado riesgos específicos. Implicarán estudios hidrogeológicos mucho más detallados, hasta alcanzar un conocimiento preciso de sus parámetros hidrogeológicos, balances, características hidrogeoquímicas, conexiones y relaciones con otras masas de aguas subterráneas y superficiales, etc.
- Examen de la incidencia de la actividad humana en las aguas subterráneas. con inventario de captaciones, evaluación de extracciones, control de calidad, localización y control de puntos de recarga artificial, etc
- Examen de la incidencia de los cambios en los niveles de las aguas subterráneas. y sus repercusiones en las aguas superficiales y ecosistemas terrestres asociados, la regulación

hidrológica (protección contra inundaciones y drenaje de tierras), y el propio desarrollo humano.

- Examen de la incidencia de la contaminación en la calidad de las aguas subterráneas. Referidos a la identificación y caracterización de aquellas masas de agua subterránea con niveles de contaminación tan altos que resulte inviable o desproporcionadamente costosa la aplicación de las medidas generales de la Directiva.

Paralelamente a la elaboración de estos documentos, y en torno a similares principios, se han ido desarrollando en algunos de los países de la Unión Europea legislaciones y normativas específicas.

En nuestro país, destacamos la importancia que tuvo la presentación del "*Libro blanco de las aguas subterráneas*" (1994). Este documento contemplaba el estado actual y problemática específica de los recursos hídricos subterráneos en España, y establecía el plan director de actuaciones en esta materia, distribuido en los siguientes programas:

- Programa 1: Actualización del inventario de recursos naturales de aguas subterráneas.
- Programa 2: Diseño y establecimiento de una red oficial de control de piezometría y calidad.
- Programa 3: Censo de aprovechamientos.
- Programa 4: Estudio de acuíferos con problemas de sobre-explotación o salinización.
- Programa 5: Normas para otorgamiento de nuevas explotaciones. Asignación de recursos.
- Programa 6: Directrices para la ordenación de los vertidos potencialmente contaminantes.
- Programa 7: Perímetros de protección para captaciones de agua potable.
- Programa 8: Protección de zonas húmedas y otros espacios naturales relacionados con las aguas subterráneas.
- Programa 9: Emplazamiento de residuos sólidos urbanos.
- Programa 10: Prevención y corrección de la contaminación por actividades industriales.
- Programa 11: Control y corrección de la contaminación producida por nitratos.
- Programa 12: Control y corrección de la contaminación producida por pesticidas.
- Programa 13: Infraestructuras para captación en periodos de sequía.
- Programa 14: Abastecimientos a núcleos urbanos.
- Programa 15: Recarga artificial de acuíferos.
- Programa 16: Integración de las unidades hidrogeológicas en los sistemas de explotación.

Aunque con un considerable retraso en fechas e inversiones, algunos de estos programas están en ejecución, y en cualquier caso, su filosofía y objetivos han ido madurando en documentos posteriores de planificación como el *Libro Blanco del Agua en España* (MIMAM, 1998), la *Ley 46/99 de modificación de la Ley de Aguas* (MIMAM, 1999), y el propio *Anteproyecto de Ley del Plan Hidrológico Nacional* (MIMAM, 2000)

En esta comunicación hemos ido dando indicaciones de cómo puede controlarse la evolución cuali y cuantitativa de los acuíferos, de los sistemas de detección de los problemas, de las medidas correctoras y de los planes preventivos. Hemos visto que efectivamente la prevención, basada en el conocimiento del contexto hidrogeológico, en el control de la explotación y apoyada por las redes de vigilancia, es la base de la gestión racional de un recurso que es renovable pero vulnerable.

Sólo nos quedaría el interrogante de quién o quienes deben responsabilizarse de esta gestión. En una idealización la respuesta sería que los propios usuarios deberían ser los responsables. La realidad es, sin embargo, que la complejidad del conocimiento de los acuíferos y sus equilibrios dinámicos hace necesaria la intervención de técnicos especialistas y gestores de la Administración que determinen las condiciones de explotabilidad de las aguas subterráneas en cada zona, vigilando su cumplimiento e introduciendo las correcciones que sean necesarias.

Esta labor la han realizado en casi todos los países organismos oficiales de las administraciones centrales, regionales y locales. Las tendencias actuales, mucho más racionales, procuran promocionar la constitución de comunidades de usuarios para que participen activamente en los planes gestores.

Dicho de otra forma, parece evidente que el futuro próximo debe estar en un "intervencionismo activo" de la Administración en la gestión de los recursos hídricos, basado en la potenciación de programas de optimización de aprovechamiento del recurso (programas de ahorro del agua, asesoramiento en cultivos, modernización de regadíos, etc), en los que se implicarían los propios usuarios.

Llamas et al (2000) destacan el papel fundamental que debe jugar la información y educación, tanto a nivel de administradores como de administrados, en el uso sostenible de las aguas subterráneas. Como se ha indicado, la Hidrogeología es una ciencia relativamente nueva, y no forma parte de la cultura general. Solo el desconocimiento generalizado sobre la fase subterránea del ciclo del agua explica la negligencia histórica de la administración del agua, y el uso irresponsable de la misma. La aparición de afecciones, más o menos graves, que han afectado a la salud, o en general a la calidad de vida del hombre, ha dado lugar en las últimas décadas a tomar conciencia de la necesidad de proteger este recurso. Y más reciente aún es la concienciación de los valores medioambientales ligados a las descargas de las aguas subterráneas a los ríos, o la existencia de espacios naturales cuya existencia y ecología está íntimamente ligada a los acuíferos.

Es por ello esencial poner a disposición de los usuarios la información necesaria para que se sientan partícipes y comprometidos en las decisiones de la administración responsable de la gestión de las aguas. Pero alcanzar el objetivo de poner la información al alcance del usuario no es una tarea fácil, al menos en nuestro país, por una serie de factores como es la propia dispersión de los datos (hidrológicos, hidrogeológicos, meteorológicos, etc) entre los distintos organismos de nuestras administraciones central y autonómicas. Afortunadamente poco a poco se va imponiendo el criterio de compartir información y hacerla fácilmente accesible, empleando para ello las facilidades que los medios de comunicación actuales, y en especial Internet, suponen. Así por ejemplo, destacamos las actuaciones que está actualmente desarrollando el IGME de puesta en red de cartografía geológica, bases de datos hidrogeológicos, etc, o la apuesta de muchas confederaciones hidrográficas por incluir en sus páginas web información hidrológica de interés para el usuario. En esta misma línea está el proyecto que está desarrollando el Ministerio de Agricultura de crear una red de estaciones agroclimáticas, telecontroladas vía GSM, cuya información puesta en red permitirá en un futuro próximo orientar a los agricultores a gestionar adecuadamente sus regadíos.

Pero el valor de la información está relativizado a la capacidad de asimilación por parte del usuario, con lo que es esencial invertir un esfuerzo importante en el capítulo de formación. La divulgación y formación de los aspectos relativos al uso de las aguas subterráneas debe dirigirse a toda la sociedad implicada, desde los gestores de la administración del agua, hasta los usuarios, pasando por programas educativos de niños y jóvenes. Ejemplos de estas iniciativas los tenemos ya en otros países.

Solo desde la madurez de toda la sociedad podrán abordarse de forma solidaria y participativa la gestión sostenible de las aguas subterráneas.

3.8.- LAS AGUAS SUBTERRANEAS Y EL MEDIO AMBIENTE. INTRODUCCION

Como ya se ha indicado, la intervención del hombre en las aguas subterráneas puede dar lugar a dos tipos de implicaciones, las relativas a la disponibilidad cuantitativa y las relativas a la calidad. Entre las primeras se encontrarían las modificaciones en los flujos, relaciones con cauces superficiales, afecciones a manantiales, descensos de niveles, Y entre las segundas incluiríamos aquellas variaciones indeseables de la composición química del agua, relacionadas esencialmente con la explotación y con los vertidos.

En este apartado nos referiremos a algunos de los problemas que más directamente pueden afectar al medio físico, entendido como el soporte de comunidades biológicas. En cualquier caso, no hay que perder de vista el hecho de que la especie humana también ha formado y forma parte, indudablemente, de la realidad de los "equilibrios" ecológicos y su evolución. De hecho, el lugar que ocupa actualmente el hombre en el medio físico está bastante relacionado con su capacidad de explotar los recursos hídricos. Baste como ejemplo el hecho de la supervivencia, e incluso importante desarrollo, de civilizaciones gracias a su capacidad de extraer agua del subsuelo, en áreas de escasez o ausencia de recursos hídricos superficiales. O la indudable incidencia en el desarrollo de la agricultura de la explotación de las aguas subterráneas, especialmente desde la aplicación de las turbinas a los sistemas de bombeo (bombas centrífugas).

3.8.1.- AFECCIONES MEDIOAMBIENTALES A ESPACIOS NATURALES DE ALTO VALOR ECOLOGICO: EL CASO DE LOS HUMEDALES.

Sin duda alguna, los problemas medioambientales más conocidos en relación con la explotación de las aguas subterráneas, son las afecciones a unos ecosistemas concretos: los humedales.

Bajo el término genérico de humedales quedarían englobados espacios físicos varios como las zonas marismeñas, marjales, zonas inundadas relacionadas con surgencias naturales, etc. Todos estos espacios tienen en común que su régimen hídrico está condicionado en mayor o menor medida por las interrelaciones entre las fases superficial y subterránea de las aguas.

Hasta tiempos relativamente recientes la mayor parte de estos espacios eran descritos con calificativos tales como insalubres, improductivos y peligrosos. De hecho durante muchos años se han practicado sobre los humedales políticas de "saneamiento", especialmente mediante obras de drenaje. La ignorancia sobre su alto valor ecológico, la explotación incontrolada de los recursos hídricos y la especulación urbanística, han sido las principales causas de la desaparición total o parcial de muchas de estas zonas, o de su degradación.

Sin entrar en detalles ajenos al contenido de esta comunicación sí queremos insistir en la consideración, reconocida en la actualidad en la mayor parte del Mundo, de los humedales como espacios caracterizados por su biodiversidad, pero también altamente vulnerables a cualquier modificación en el régimen hídrico natural.

Prueba de ello es la continua mención a los problemas de estos espacios naturales relacionados con la explotación y/o contaminación de las aguas subterráneas, en los congresos y jornadas técnicas. Por poner un ejemplo, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (A.I.H.) mantuvo una reunión especial en 1992, en Checoslovaquia, donde uno de los objetivos de actuación clave quedó enunciado así: *"Mejorar el conocimiento de la sensibilidad de los ecosistemas a los*

cambios en la calidad y en la disponibilidad de aguas subterránea. Promover métodos de gestión para asegurar el aprovechamiento sostenible del agua subterránea en armonía con los ecosistemas acuáticos que dependen del agua subterránea".

La International Union for Conservation of Nature (IUCN) presentó en 1992 una clasificación de humedales (ver Cuadro nº 1).

Evidentemente, no en todos los tipos de humedales incluidos en la anterior clasificación tiene porqué existir una influencia de las aguas subterráneas, como es el caso de los humedales marinos o de estuarios. Sí es más frecuente la dependencia en los humedales continentales, naturales o artificiales, tanto de agua dulce como salada.

Centrándonos en los humedales continentales, vamos a repasar algunos de los conceptos que definen su régimen hidrológico, para después analizar la influencia que puede tener la explotación de los acuíferos a ellos interconectados y, en consecuencia, los impactos ecológicos derivados.

Los factores que determinan las condiciones de estabilidad hidrológica de los humedales pueden agruparse en climatológicos (precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración, etc), fisiográficos (topografía), hidrológico-superficiales (red hidrológica), biológicos (vegetación), geológicos (formaciones geológicas), edáficos (desarrollo y tipo de suelos), y evidentemente los factores hidrológico-subterráneos.

Si la identificación de los seis primeros como factores condicionantes del régimen natural de estos espacios naturales fue prontamente reconocida, en cambio el factor hidrogeológico no ha empezado a ser realmente analizado hasta hace escasos años. Esto ha sido debido sin duda a la dificultad real de conocer la dinámica de las aguas subterráneas, frente a la relativa facilidad de detectar e interpretar la influencia en el régimen hídrico de los humedales de las variaciones en otros factores como los climáticos, hídricos, etc.

LLAMAS (1993) hace un ilustrativo repaso de las conexiones esenciales de los humedales con el régimen hídrico, así como una revisión de la bibliografía más reciente sobre la desaparición/ degradación de estos espacios en distintas partes del mundo.

Así por ejemplo, algunos casos de humedales claramente sensibles a las variaciones del régimen hídrico superficial-subterráneo son aquellos situados sobre llanuras de inundación, en riberas de ríos, lagos o en estuarios. Son también frecuentes los humedales asociados a cuencas endorreicas, donde se produce la acumulación de la escorrentía superficial y/o la descarga del flujo subterráneo. Y, por supuesto, los que aparecen en las zonas de intersección o aproximación de las superficies topográfica y piezométrica (laderas, zonas de rezume, etc).

En definitiva, en casi todos los casos los humedales se generan en áreas en que las superficies topográfica y piezométrica se intersectan o están muy próximas. Así, un descenso de la superficie piezométrica, natural o inducido artificialmente, provocará con toda probabilidad un cambio en el régimen hídrico del sector afectado. De esta forma, humedales asociados a descargas naturales de flujo subterráneo, es decir, "rebosaderos" del acuífero, podrán convertirse en zonas de recarga, o "sumideros".

Los cambios del régimen hídrico de los humedales condicionarán directamente su compleja y sensible trama ecológica, y en definitiva la propia supervivencia de las comunidades biológicas en ellos asentadas.

Por poner algunos ejemplos, en Europa según HOLLIS y JONES (1991), los pocos humedales que aún existen y que no se encuentran degradados, entrarían en la categoría de "amenazados". En Estados Unidos otros investigadores cifran en más del 50% las desapariciones de humedales en el último siglo, destacando casos como el del estado de California con pérdidas superiores al 90%. En España CASADO y MONTES han estimado que actualmente han desaparecido cerca del 70% de los humedales existentes a principios de siglo.

Sin embargo, la desaparición de los humedales no se debe exclusivamente a la actividad antrópica. También existen procesos naturales, como las variaciones del nivel del mar, cambios climáticos, procesos erosivos y sedimentarios, ... que pueden provocar su desaparición. De hecho, a escala geológica, los humedales están considerados como paisajes efímeros.

Pero cada vez son más los casos de humedales afectados directa o indirectamente por el hombre, especialmente por las actividades agrícolas e industriales.

Respecto a las actividades industriales las afecciones suelen ser locales, y con incidencia especialmente en la calidad química de las aguas. Como ya se ha indicado, los humedales albergan comunidades biológicas sumamente sensibles a las variaciones de calidad de sus aguas, de forma que los vertidos industriales pueden provocar un rápido deterioro y destrucción de sus delicados equilibrios. La consideración durante tantas décadas de las zonas "encharcadas" como áreas de escaso o nulo valor productivo, ha favorecido la realización de vertidos urbanos e industriales de todo tipo, incluso de contaminantes de alta toxicidad. Esto ha llevado al deterioro, muchas veces irreversible o de alto coste de recuperación de los humedales contaminados, puesto que los contaminantes se han difundido hacia la zona saturada y acuíferos conectados.

En muchos casos, si la permanencia del foco contaminante ha coincidido con un cambio del régimen hídrico del sistema, pasando de descarga a recarga, por descenso de la superficie piezométrica, los humedales se han convertido en focos preferenciales de contaminación de los acuíferos.

Pero indudablemente ha sido el desarrollo de la actividad agrícola la principal causa de las agresiones contra estos espacios naturales, con actuaciones directas e indirectas sobre los mismos. Por una parte se ha actuado directamente sobre los humedales con políticas de desecación y transformación a terrenos cultivables, con obras de drenaje, bombeos para deprimir la superficie piezométrica, etc. Posteriormente, y especialmente desde la revolución en la agricultura del regadío asociada a la introducción de las bombas centrífugas y los modernos sistemas de riego, se ha producido un fuerte incremento del consumo de aguas subterráneas para el regadío.

Este hecho se ha hecho notar especialmente en las regiones de climas áridos o semiáridos, o con escasa disponibilidad de aguas superficiales, en que las aguas subterráneas se han presentado como alternativa al desarrollo agrícola. Es en estas zonas donde se provocan las depresiones de las superficies piezométricas que pueden llevar a la desecación de los humedales.

En ocasiones la actividad agrícola también puede tener efectos en el deterioro cualitativo de los humedales. Este es el caso de los retornos de los regadíos, incluso de los de aguas superficiales, cargados de pesticidas y fertilizantes orgánicos o minerales, que pueden llegar a los humedales.

Por último, queremos reseñar que en la mayor parte de los debates internacionales sobre los efectos de los "desequilibrios" naturales causados por la explotación de las aguas subterráneas, el tema de las afecciones a humedales se trata en contadas ocasiones. Para LLAMAS (1993) esto puede deberse a que la destrucción masiva de humedales por efecto de la explotación de las aguas subterráneas tuvo lugar antes de la concienciación sobre la singularidad y valor ecológico de estos

espacios. Además, en Estados Unidos, la proporción de humedales situados en zonas áridas o semiáridas es pequeña en comparación con las que existen en sus zonas frías, templadas o tropicales.

3.8.2.- OTRAS AFECCIONES MEDIOAMBIENTALES.

Como curiosidad incluiremos en este apartado otras afecciones indirectas al medio ambiente relacionadas con la explotación de las aguas subterráneas. Así por ejemplo, dentro de las actuales preocupaciones por respetar el hábitat y la supervivencia de determinadas especies de la avifauna está el caso de las aves esteparias como la avutarda (*Otis tarda*) y el sisón (*Otis tetrax*). Estas aves encontraban su hábitat en las amplias zonas semiáridas del sur de Europa, como la meseta castellana. La progresiva transformación en regadío con aguas subterráneas ha modificado parte de de estas zonas, reduciendo su antiguo hábitat.

Otro aspecto es el de la preocupación creciente por la conservación de los paisajes, que en las zonas de intensa explotación de aguas subterráneas se ven modificados por la proliferación de líneas eléctricas y centros de transformación de servicio a los grupos de bombeo.

También como casos anecdóticos hay que señalar que en ocasiones se han producido efectos en enclaves concretos de interés histórico o social como manantiales y fuentes, por efecto de la explotación de los acuíferos a ellos conectados.

Y por último mencionamos los daños asociados a los efectos de la subsidencia de los terrenos por sobreexplotación de los acuíferos, a espacios naturales (cuevas) o bienes de interés histórico-artístico (monumentos).

3.8.3.- ACTUACIONES CORRECTORAS Y PREVENCIÓN DE LAS AFECCIONES MEDIOAMBIENTALES.

En los apartados anteriores se han repasado los principales impactos ambientales ligados directa o indirectamente a la explotación de las aguas subterráneas, en especial los que afectan a los humedales.

En este apartado no nos referiremos a las posibilidades de recuperación de antiguos humedales, desecados actualmente, pues en la mayor parte de los casos es irrealizable técnica y/o económicamente. Tampoco trataremos el tema de la regeneración de aquellos humedales altamente contaminados, pues generalmente o son irrecuperables o sólo se conseguirán humedales artificiales, ajenos ecológicamente a los originales.

Nos vamos a centrar entonces en el tercer grupo de humedales, los que algunos autores denominan de forma pesimista los "amenazados".

Las actuaciones que pueden realizarse con vistas a la protección de estos valiosos espacios naturales tendrán que pasar por:

- Inventario y caracterización de los humedales.
- Ordenación de los usos del agua y del suelo/subsuelo en el entorno de los humedales.

Lógicamente estas actuaciones deberán realizarse en el marco de la Planificación Hidrológica concreta de cada país. Como ejemplo vamos a indicar el tratamiento que a la protección de los humedales otorga la actual legislación española. Evitaremos en lo posible citar artículos y documentos concretos de dicha legislación. Remitimos al lector interesado en mayor información al artículo de LOPEZ CAMACHO (1994), del que se ha extractado gran parte de la información.

Actualmente existen en España dos leyes que hacen referencia concreta a los aspectos relacionados con la delimitación y protección de los humedales: la *Ley de Aguas de 1985*, y la *Ley 4/1989 de Conservación de Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre*. Además, estos aspectos quedan también reflejados en el Libro Blanco del Agua, en los Planes Hidrológicos de Cuencas, y en el anteproyecto de Ley del Plan Hidrológico Nacional.

Así, en los Planes Hidrológicos de Cuencas se contemplan los siguientes aspectos:

- Inventario, delimitación y caracterización de las zonas húmedas, en especial aquellas conectadas con acuíferos (según el inventario realizado por la Dirección General de Obras Hidráulicas, de los 400 Km² catalogados como zonas húmedas, casi 300 Km² corresponden a humedales conectados con acuíferos).
- Catalogación de las zonas húmedas en función de su importancia e interés ecológico, paisajístico y cultural, con objeto de establecer las que deban incluirse en la categoría de zonas de protección especial.
- Definición de los perímetros de protección de las zonas húmedas de protección especial.
- Estudio del balance hídrico de estas zonas y asignación de recursos, tanto superficiales como subterráneos, para su conservación.
- Definición de los objetivos de calidad para las aguas alimentadoras de las zonas húmedas de protección especial en función de las necesidades de los ecosistemas asociados.
- Establecimiento de actuaciones para alcanzar estos objetivos.

Complementariamente a las actuaciones para la consecución de los anteriores objetivos, deberán realizarse campañas de información sobre el gran valor de estos espacios naturales, y su vulnerabilidad.

En el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 1998) se señala que en España, a diferencia de otros países de la U.E., existe una definición legal de los humedales, reconocida en la Ley de Aguas y en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico. Destaca la importancia y variabilidad del patrimonio español de humedales, estimando que existen en torno a 1500 de estos espacios, que actualmente ocupan en torno a las 114.100 ha. Sin embargo, y a pesar del esfuerzo de los últimos años, indica que el nivel de protección es aún muy bajo, como refleja el dato de que se estima que la superficie actual de humedales representa tan solo un 30-40% del existente hace unos 50 años. Además solo una pequeña fracción de los humedales "supervivientes" cuentan con alguna figura de protección.

Se marca como objetivo la elaboración de un Plan Estratégico Nacional para la Conservación de Humedales, en el marco de la Estrategia Nacional de Diversidad Biológica. Indica también la necesidad de completar el Inventario Nacional de Humedales, abordando el problema de su delimitación y estableciendo indicadores para el seguimiento y evaluación de su estado de

conservación.

La preocupación a nivel comunitario por la protección de estos espacios también queda patente en la Directiva 2000/60/CE, como queda en evidencia en el enunciado del primero de sus objetivos:

“El objeto de la presente Directiva es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que prevenga todo deterioro adicional y proteja y mejore el estado de los ecosistemas acuáticos y, con respecto a sus necesidades de agua, de los ecosistemas terrestres y humedales directamente dependientes de los ecosistemas acuáticos”.

4.- SÍNTESIS FINAL

Tras el repaso realizado de las “fortalezas y debilidades ” del manejo de las aguas subterráneas, vamos a tratar de sintetizar sus implicaciones a nivel del estado español.

Partimos para ello de las siguientes observaciones:

- Es un hecho innegable, en nuestro país y en muchas áreas del mundo, que la captación y explotación de los recursos hídricos subterráneos ha posibilitado un desarrollo socio-económico, que con la sola dependencia de las aguas superficiales y de la meteorología no se habrían alcanzado. Amplias zonas del litoral mediterráneo, pero también del interior de nuestro país, son ejemplos claros de un desarrollo del sector agrario de regadío, que coincide en muchas ocasiones con una concentración excepcional del sector turístico, gran consumidor estacional de agua.
- Por otra parte, es evidente que la actividad humana, y de forma particular, aquellas que implican el manejo del medio natural (agricultura, ganadería, silvicultura, etc) impactan sobre amplias zonas, introduciendo modificaciones de gran envergadura y extensión, que alteran el soporte de los ecosistemas.
- Uniendo las anteriores observaciones, nos encontramos que a lo largo esencialmente de la segunda mitad del siglo XX, la captación de las aguas subterráneas, apoyada por una política agraria desarrollista, ha generado interferencias en el ciclo del agua, tanto a nivel de su disponibilidad en el espacio y en el tiempo (afecciones a descargas naturales y al caudal de base de los cursos superficiales, descensos piezométricos, etc), como a la calidad del recurso (salinización inducida, intrusión, contaminación difusa, etc). Pero también ha determinado profundos cambios en el uso del territorio, con actuaciones de deforestación (sobre todo de monte bajo), desecación de zonas encharcables, etc, para su incorporación a explotaciones de regadío con aguas subterráneas.
- Por otro lado, en defensa de la explotación de las aguas subterráneas, también hay numerosos argumentos que justifican que su uso racional y controlado es una alternativa perfectamente válida. Así, hay suficientes datos que demuestran que, en nuestro país, la rentabilidad/productividad de las dotaciones de riego con aguas subterráneas son sensiblemente superiores a las obtenidas en los regadíos tradicionales con aguas superficiales. Evidentemente las cifras presentadas por algunos estudios son matizables, y dependen en gran medida de factores como las características territoriales y climatológicas, así como de la propia “cultura” de unos y otros regantes.

Hidrología Subterránea: particularidades y problemática de las aguas subterráneas. Necesidad de una gestión conjunta.

- Como conclusión final señalar la necesidad de que la planificación hidrológica se plantee desde una filosofía de uso conjunto, aplicando siempre que sea posible el uso alternativo, reforzado donde las circunstancias lo permitan por actuaciones de recarga artificial.

Madrid, octubre de 2006

BIBLIOGRAFIA

- ARGÜELLES, A. (1994). "El agua como recurso natural. Disponibilidades y usos". II Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid.
- ARROJO, P. (2000) "Valoración de las aguas subterráneas en el marco económico general de la gestión de aguas en España". Colección Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.
- CASTILLO, H. (1994). "Análisis de la demanda de nuevos regadíos en España. Horizonte año 2012". Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX, MOPTMA.
- BIFANI, P. (1996) "Transformaciones del paisaje asociadas a la agricultura de regadío". Actas de Agua y Paisaje. Ed. MultiMedia Ambiental
- COLLIN, J.J. y ROQUE, F. (1989). "Control limnigráfico del fenómeno de sobreexplotación de los acuíferos". Congreso nacional Sobreexplotación de Acuíferos. Almería.
- COROMINAS, J. (1999) "Papel de las aguas subterráneas en los regadíos". Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en el Libro Blanco del Agua en España. A.I.H. Grupo Español.
- CRUCES DE ABIA, J. (2001) "Evaluación de recursos y el Libro Blanco. Metodología utilizada en cuanto a las Aguas Subterráneas". Publicaciones Grupo Español A.I.H.
- CRUCES DE ABIA, J. (2000) "La Mancha Húmeda, explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana". Colección Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.
- CUSTODIO, E.(1994). "Experiencias de salinización de acuíferos: consideraciones generales deducidas de la situación en España". Congreso Nacional sobre Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares, Madrid. España.
- CUSTODIO, E. (1989). "Consideraciones sobre la sobreexplotación de acuíferos en España". Congreso Sobreexplotación de acuíferos, Almería.
- CUSTODIO, E. (2000) "The complex concept of overexploited aquifer". Colección Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1983). "Hidrología Subterránea, 2ª ed.". Ed. Omega S.A. Barcelona.
- DAVIS, S.N. y DE WIEST, R.(1971). "Hidrogeología". Ed. ARIEL S.A. Barcelona.
- D.O.C.E. (2000) "Directiva 2000/60/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas." DOCE del 22-12-2000.
- DURAN, J.J. (1995). "Las aguas subterráneas y el medio ambiente". Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. Análisis y propuestas sobre el Libro Blanco. MOPTMA/MINER/Club del Agua Subterránea. Madrid.
- FERNÁNDEZ, A.(1994). "Experiencias de contaminación puntual de las aguas subterráneas". Congreso Nacional sobre Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares, Madrid. España.
- FOSTER, S. (2000) "Sustainable groundwater exploitation for Agriculture; current issues and recent initiatives in the developing world". Colección Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.
- FINK, M. (1991). "Overexploitation and permissible exploitation of groundwaters". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- GRANDA, A. (1993). "Tecnología geofísica aplicada. Estudio del Medio Ambiente". TECNOAMBIENTE. Madrid.
- GONZALEZ BERNALDEZ, F. (1996) "Paisajes freatófíticos". Actas de Agua y Paisaje. Ed. MultiMedia Ambiental
- I.T.G.E. (1992). "Las aguas subterráneas y los plaguicidas". Colección Informes Aguas

Subterráneas ITGE. Madrid.

- I.T.G.E. (1988). "Aspectos metodológicos en el estudio de la intrusión marina". ITGE. Madrid.
- I.T.G.E. (1992). "Las aguas subterráneas y los plaguicidas". Colección Informes Aguas Subterráneas ITGE. Madrid.
- La MOREAUX, P.E. (1991). "Environnemental effects to overexploitation in a karst terrane". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- LLAMAS, M.R. (1989). "Consideraciones sobre la relación entre sobreexplotación de acuíferos e impactos ecológicos". Congreso Sobreexplotación de Acuíferos, Almería.
- LLAMAS, M.R. (1993). "Explotación de aguas subterráneas y conservación de ecosistemas". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.
- LLAMAS, M.R. et al (2000) "El uso sostenible de las aguas subterráneas". Colección Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.
- LLAMAS, M.R. et al (2001) "Aguas subterráneas: retos y oportunidades". Fundación Marcelino Botín. Ed.MUNDI-PRENSA.
- LLOYD, J.W. (1991). "Protective and corrective measures with respect to the over-exploitation of groundwater". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- LOPEZ ASIO, C.(1995). "Problemas actuales y potenciales. Calidad, contaminación y protección de acuíferos". Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. Análisis y propuestas sobre el Libro Blanco. MOPTMA/MINER/Club del Agua Subterránea. Madrid.
- LOPEZ-CAMACHO, B.(1994). "Implicaciones ambientales de la contaminación de las aguas subterráneas: impacto sobre el hombre y los ecosistemas". Congreso Nacional sobre Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares, Madrid. España.
- LOPEZ GETA, J.A. et al (1992). "Consideraciones previas y criterios para el establecimiento de las normas de explotación de unidades hidrogeológicas". V Simposio de Hidrogeología. Alicante. España.
- LOPEZ GETA, J.A. y MURILLO, J.M. (1993). "Recarga de acuíferos y reutilización de recursos hídricos". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.
- LOPEZ GETA, J.A. (1995). "Acuíferos y usos del agua subterránea". Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. Análisis y propuestas sobre el Libro Blanco. MOPTMA/MINER/Club del Agua Subterránea. Madrid.
- MARTINEZ GIL, F.J. (1996) "El valor integral del agua y su gestión". Actas de Agua y Paisaje. Ed. MultiMedia Ambiental.
- MARTINEZ RUBIO, J. y RUANO, P. (1998) "Aguas subterráneas. Captación y aprovechamiento". Ed, PROGENSA.
- MARGAT, J. (1991). "La sobreexplotación de acuíferos. Su caracterización a nivel hidrogeológico e hidrogeoquímico". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- MIMAM (1998) "Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España". Secretaría de Estado de Aguas y Costas.
- MIMAM (1998) "Libro Blanco del Agua en España. Documento de Síntesis". Secretaría de Estado de Aguas y Costas.
- MIMAM (1999) "Ley 46/99, de 13 de diciembre. de modificación de la Ley 29/85, de 2 de agosto, de Aguas". Secretaría de Estado de Aguas y Costas.
- MINER/M.O.P.T.M.A. (1994) "Libro blanco de las aguas subterráneas". Serie Monografías MINER/MOPTMA. Madrid.
- MUZIKAR, R. y ROGEL, J.M.(1994) "Técnica y metodología del seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas para su control y detección de la contaminación". Congreso Nacional sobre Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares, Madrid.

España.

- NAVARRO, A. (1989). "La sobreexplotación de las aguas subterráneas. Un concepto frecuentemente malinterpretado". Congreso Sobreexplotación de Acuíferos. Almería.
- NAVARRO, A. (1993) "Sobreexplotación de acuíferos". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.
- PENDAS, F. (1993) "Acuíferos costeros e intrusión marina". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.
- PRAT FORNELLS, N. (1996) "Conservación del paisaje ligado a los ecosistemas acuáticos". Actas de Agua y Paisaje. Ed. MultiMedia Ambiental
- PULIDO BOSCH, A. (1999) "La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización". Actas del Curso "Las tierras mediterráneas en la frontera de la desertificación: el mayor riesgo ambiental para el siglo XXI". Publicaciones UIMP.
- RAMOS, F. et al (1991) "Una revisión de aspectos relacionados con la sobreexplotación de acuíferos". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- REY, J.M. et al (1989) "Aspectos ecológicos y socioculturales de la explotación de aguas subterráneas al sur del Duero". Congreso Sobreexplotación de Acuíferos. Almería.
- SAMPAT, P. (2000) "La crisis de las aguas subterráneas. La contaminación de las mayores reservas de agua dulce del planeta" Public. World Watch Institute.
- SANCHEZ, A. (1991) "Economic criteria for the characterization of overexploited aquifers". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- SÁNCHEZ, A. (1995) "Problemas actuales y potenciales. Recursos y explotación". Jornadas sobre las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. Análisis y propuestas sobre el Libro Blanco. MOPTMA/MINER/Club del Agua Subterránea. Madrid.
- SANCHIS, E.J. (1991) "Relación de la concentración de nitratos de acuíferos de la provincia de Valencia con su explotación". XXIII Congreso Internacional de la A.I.H.. Sobreexplotación de acuíferos. Islas Canarias. España.
- SAHUQUILLO, A. (1993) "Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.
- SAHUQUILLO, A. (1994) "Protección, detección y control de la contaminación de acuíferos". Congreso Nacional sobre Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares, Madrid. España.
- SAHUQUILLO, A. (1994) "Aspectos económicos de la utilización conjunta de aguas subterráneas y superficiales". Seminario de planificación, perforación, testificación y regeneración de sondeos hidrogeológicos, IRYDA-CENTER.
- SAHUQUILLO, A. (1999) "La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas" Boletín Geológico y Minero nº 110. Publicaciones ITGE.
- SAHUQUILLO, A. (2000) "La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en las sequías" Revista Real Academia de Ciencias, Vol. 94 nº 2.
- SHIKLOMANOV, I. (1997) "Comprehensive assessment of the freshwater resources of de world". Informe E/CN 17/1997/9. Publ. O.M.M.
- TOTH, J. (2000) "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones". Boletín Geológico y Minero, volumen 111. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- VARELA, M. (1993) "Calidad y contaminación de las aguas subterráneas". Jornadas sobre las aguas subterráneas: Importancia y perspectivas. ITGE/Real Academia de Ciencias. Madrid.

