



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

NOTAS DE DIVULGACION
relativas a la
PROTECCION DE LA CALIDAD
de las
AGUAS SUBTERRANEAS
en los
ABASTECIMIENTOS URBANOS



El Instituto Tecnológico GeoMinero de España, ITGE, que incluye, entre otras, las atribuciones esenciales de un «Geological Survey of Spain», es un Organismo Autónomo de la Administración del Estado, adscrito al Ministerio de Industria y Energía, a través de la Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales (R.D. 1270/1988, de 28 de octubre). Al mismo tiempo, la Ley de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica lo reconoce como Organismo Público de Investigación. El ITGE fue creado en 1849.

Depósito Legal: M - 32.547 - 1989
I.S.B.N.: 84 - 7840 - 015 - X

Imprime ADOSA
Príncipe de Vergara, 210
28002 MADRID

La reproducción del contenido de esta publicación es libre, a condición de citar su procedencia, agradeciéndose el envío de un ejemplar al I.T.G.E.

Preámbulo

Esta publicación es una respuesta al interés mostrado por un gran número de Alcaldes ante el tema de la protección de la calidad de las aguas subterráneas para el abastecimiento urbano; su presentación, estructura y contenido han sido preparados con este objetivo. Así, se ha procurado mantener continuamente un nivel de exposición elemental, habida cuenta de la dificultad en traducir conceptos técnicos especializados a términos divulgadores sin caer en ambigüedades e indefiniciones que pudieran inducir a error o que hicieran un texto excesivamente farragoso y complicado.

Por ello se recomienda vivamente a las personas interesadas en un mayor conocimiento de la contaminación de las aguas subterráneas, y en general de la Hidrogeología, consulten la abundante bibliografía que existe al respecto.

Por último, destacar que es labor del Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE) aportar asesoramiento a aquellos Municipios en que, a la luz de lo esbozado en los capítulos que siguen, pudiera existir una situación problemática en la calidad de las aguas subterráneas. Los casos reales en que una contaminación puede presentarse son innumerables; cada situación es única, dadas las características de todo tipo que la determinan: en la práctica, un estudio detallado y específico es necesario en cada situación concreta, particularmente en su aspecto hidrogeológico.

Estas notas comprenden, sucesivamente:

- * Introducción
- * Contaminación de las aguas subterráneas
- * Contaminación urbana: las aguas residuales
- * Contaminación urbana: los residuos sólidos
- * Contaminación agrícola
- * Contaminación industrial
- * Protección de las aguas subterráneas
- * Reglamentación básica



Introducción

Los capítulos que constituyen estas notas pretenden exponer de una manera **muy simplificada**, los principales aspectos prácticos relativos a la eventual contaminación de las aguas subterráneas en los abastecimientos urbanos y a su protección. Si bien los temas están tratados en capítulos individuales, es aconsejable una lectura del conjunto a efectos de disponer de una visión global del mismo. Es importante tener en cuenta que únicamente se ha considerado el aspecto químico de la calidad y contaminación del agua; un enfoque más completo requeriría incluir el aspecto biológico o microbiológico, así como el radiológico.

Un acuífero es un terreno de amplias dimensiones en extensión (del orden de cientos o miles de Km²), y en profundidad (del orden de decenas o centenares, incluso miles de metros), capaz de contener agua en cantidades importantes, por lo que puede considerarse como un embalse subterráneo. Dentro del acuífero, el agua subterránea está en movimiento, generalmente muy lento aunque a veces es rápido, desde las zonas de entrada —áreas de recarga—, hacia las de salida —áreas de descarga—.

La recarga proviene de las precipitaciones atmosféricas (lluvia, nieve, ...) ya sea directamente al caer sobre el suelo e infiltrarse, o indirectamente por infiltración del agua de un río a través de su cauce, del agua de un lago, etc. La descarga natural de un acuífero ocurre por la salida del agua subterránea en manantiales, en tramos de los ríos aportando caudales que pueden ser muy importantes, y hacia el mar en algunas partes de la costa; la descarga también se produce de una forma artificial mediante la extracción del agua en pozos y sondeos.

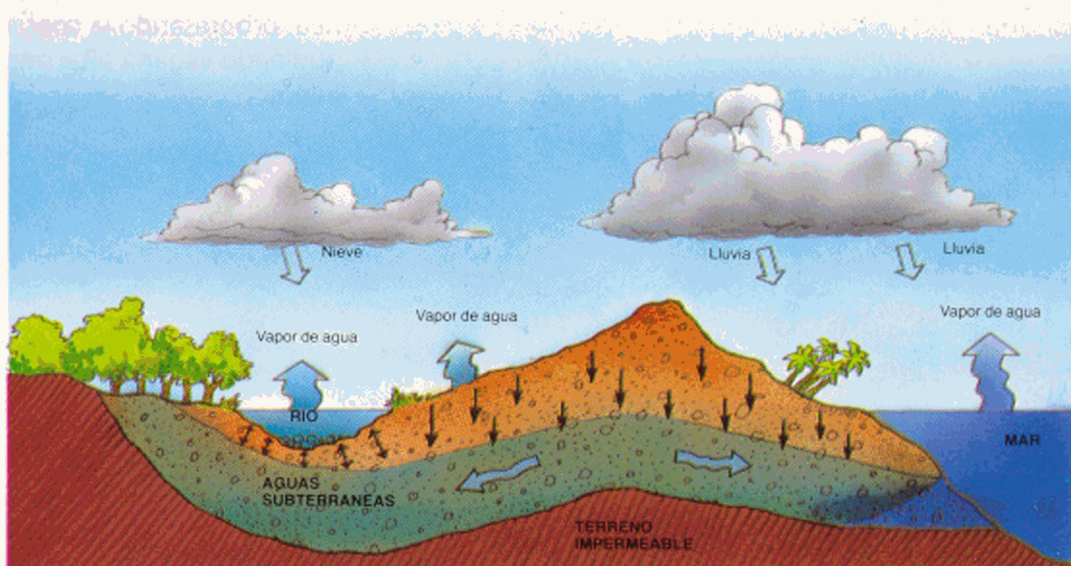
El estudio de las aguas subterráneas, y de los acuíferos, es el objeto de una ciencia: la Hidrogeología.

A muy grandes rasgos, pueden considerarse **dos tipos principales** de acuíferos según su estructura, con un comportamiento muy diferente ante la contaminación: acuíferos por porosidad y acuíferos por fisuración. Unos ejemplos pueden ilustrar esto. Imaginemos una maceta sin orificio de desagüe, rellena de tierra. Al regarla el agua se infiltra, descendiendo por gravedad recorriendo los intersticios de la tierra y llega al fondo; entonces empieza a acumularse y el espesor saturado de agua va aumentando; si continúa llegando agua a la maceta el nivel de saturación sigue subiendo hasta que aflora el agua, viéndose por encima de la tierra. Imaginando una maceta de varios Km² de extensión y de varias decenas o centenares de metros de profundidad, se tiene una imagen ideal del caso más simple de **acuífero por porosidad, o detrítico**.

Si en lugar de un material de tipo "terroso", se imagina otro más compacto, rocoso, que ha sido fragmentado, resquebrajado por los movimientos propios de la corteza terrestre, en que el agua que ha penetrado ha ido desgastando (disolviendo) la roca, aumentando el tamaño de las cavidades a lo largo de miles de años, creando oquedades de dimensiones importantes (cuevas), entonces se tiene una imagen simple de un **acuífero por fisuración**, más o menos carstificado.

Figura 1.

El agua está en un continuo movimiento de tipo cíclico; pasa del Mar a la Atmósfera y de ésta nuevamente a la Tierra.



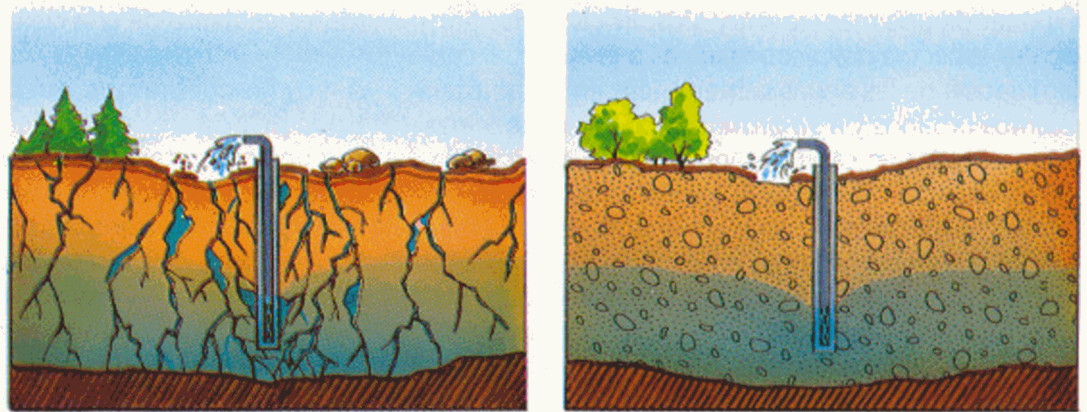


Figura 2

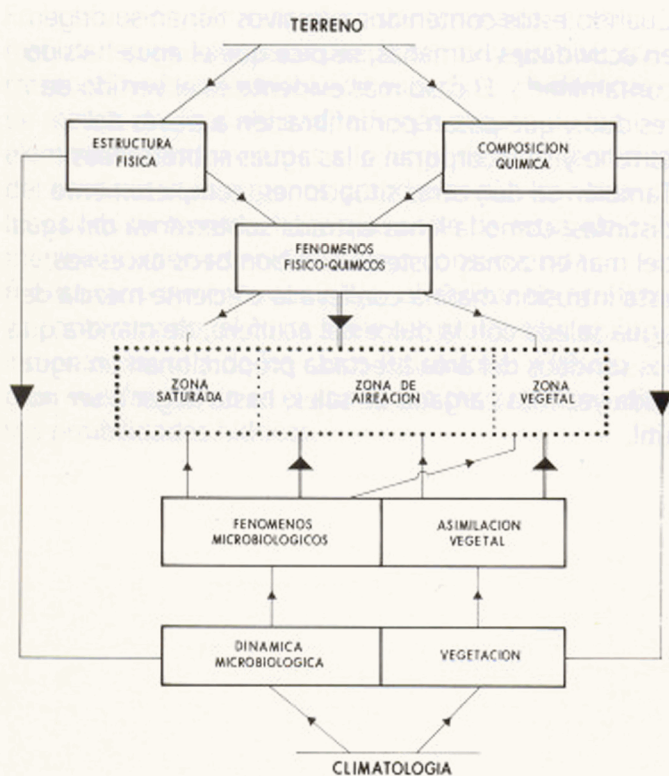
(A) sondeo en medio fisurado
(B) sondeo en medio poroso

En la realidad, mucho **más compleja**, existen acuíferos por porosidad, por fisuración y situaciones intermedias. Los materiales acuíferos afloran, están en superficie (acuífero libre) con una recarga vertical, o bien en profundidad debajo de otros impermeables (acuífero cautivo), con una recarga lateral. El grado de porosidad o de fisuración, puede ser muy grande o muy pequeño, variable dentro de un mismo acuífero entre unas zonas y otras; etc.

* * *

Ante la llegada de un **contaminante**, un acuífero se verá afectado de distinta manera según sea su naturaleza.

A grandes rasgos y de una manera esquemática, un acuífero detrítico ofrece cierta resistencia al avance de los contaminantes; en su desplazamiento por los intersticios del terreno, ocurren fenómenos que tienden a retener los contaminantes disueltos en el agua, de una manera parecida a como un filtro retiene las sustancias en suspensión. Esto no es cierto para todos los componentes que pueden ir disueltos en el agua contaminada, pero sí suele ocurrir con los peligrosos para la salud humana, en términos generales. Existe sin embargo una cuestión de cantidades: esta facultad depuradora, natural en los terrenos detríticos, puede verse desbordada o anulada por un volumen grande de contaminante sobre todo si es continuado en el tiempo. Entonces el frente de contaminación avanza, con el flujo del agua subterránea, progresando la contaminación del acuífero y pudiendo llegar a alcanzar algún punto de abastecimiento.



Elementos que determinan la capacidad depuradora del terreno.

En un acuífero fisurado, las grietas, oquedades, cavidades, ... no ofrecen tanta resistencia a los contaminantes ya que el agua subterránea no se ve obligada a recorrer estrechos caminos tortuosos en íntimo contacto con el terreno. No puede considerarse entonces un poder depurador en este tipo de acuíferos, en principio.

Al margen de la naturaleza de los acuíferos, éstos suelen estar recubiertos por un espesor de terreno variable, inferior a 1 metro (la cubierta vegetal) que constituye una primera protección natural eficaz frente a la contaminación. Al ser una zona de intensa actividad biológica por su flora y microfauna, con una gran capacidad de adaptación a situaciones nuevas, la manipulación controlada de esta zona permite aprovechar su capacidad depuradora, bajo determinadas condiciones que se verán más adelante.

Como última defensa de las aguas subterráneas frente a la contaminación queda su poder de dilución, que si bien tiene poca efectividad cuando el aporte de contaminantes es continuado, sin embargo puede disminuir progresivamente la gravedad de la situación, como ocurre por ejemplo ante un vertido accidental.



Contaminación de las Aguas Subterráneas

Una definición de la contaminación del agua consiste en considerarla como la alteración perjudicial de su calidad natural, debida a la acción humana, que la hace total o parcialmente inadecuada para la aplicación útil a la que se destinaba.

Si consideramos que la aplicación útil es el abastecimiento urbano, es decir el consumo directo del agua por el hombre, entonces el grado de alteración tolerable viene marcado por unos valores concretos, establecidos en la **Reglamentación Técnico-Sanitaria (RTS)**. El análisis químico de una muestra representativa del agua de un abastecimiento indicará, por comparación con los valores establecidos en la RTS, si el contenido en alguno de sus componentes es excesivo.

Cuando estos contenidos excesivos tienen su origen en actividades humanas, se dice que el agua ha sido contaminada. El caso más evidente es el vertido de residuos, que pasan por infiltración a través del terreno y se incorporan a las aguas subterráneas. También se dan otras situaciones, completamente distintas, como la lenta entrada subterránea del agua del mar en zonas costeras con bombeos excesivos; esta intrusión marina conlleva la creciente mezcla de agua salada con la dulce del acuífero, de manera que los sondeos del área afectada proporcionan un agua cada vez más cargada de sales, hasta llegar a ser no útil.

ALGUNOS CARACTERES DE LAS AGUAS POTABLES (Artículos 3.1, 3.2 y 3.3)

PARAMETROS	ORIENTADORES DE CALIDAD	TOLERABLES
Olor y sabor	Estarán desprovistas de olores y sabores extraños a las características propias de las aguas.	Se tolerará un ligero olor y/o sabor característico de los tratamientos empleados o de su procedencia natural
Color (en Pt-Co)	hasta 1 mg/l	hasta 20 mg/l
Turbidez (en U.N.F.)	hasta 1 U.N.F.	hasta 6 U.N.F.
PH	De 7 a 8	De 6,5 a 9,5
Cloruros (en Cl^-)	hasta 25 mg/l	hasta 350 mg/l
Sulfatos (en SO_4^{--})	hasta 25 mg/l	hasta 400 mg/l
Calcio (en Ca^{++})	hasta 100 mg/l	hasta 200 mg/l
Magnesio (en Mg^{++})	hasta 30 mg/l	hasta 50 mg/l
Aluminio (en Al^{+++})	hasta 0,05 mg/l	hasta 0,2 mg/l
Residuo Seco a 110° C	hasta 750 mg/l	hasta 1500 mg/l
Nitratos (en NO_3^-)	hasta 25 mg/l	hasta 50 mg/l
Nitritos (en NO_2^-)	AUSENCIA	hasta 0,1 mg/l
Amoniaco (en NH_4^+)	hasta 0,05 mg/l	hasta 0,5 mg/l

En la situación de un acuífero contaminado, el volumen de terreno afectado puede ser muy grande, correspondiendo a hectáreas de superficie y a decenas de metros de profundidad; además el paso de los elementos contaminantes a lo largo de los intersticios del acuífero, más o menos grandes según los variables tipos de terreno, hace que parte de estos elementos queden retenidos. Como consecuencia, resulta técnicamente complejo rehabilitar un acuífero ya contaminado; el coste suele ser prohibitivo en la inmensa mayoría de los casos estudiados; y la solución más frecuente es el abandono del acuífero y de sus posibilidades hídricas.

Por ello la manera más eficaz de mantener la calidad de las aguas subterráneas para que puedan seguir siendo utilizadas, consiste en **garantizar su protección** frente a la posible contaminación. De esta forma, la protección de un acuífero requiere considerar las situaciones potencialmente contaminadoras que tienen lugar en su superficie, las cuales generalmente van asociadas con las actividades humanas: en capítulos posteriores se da un repaso a las principales de estas actividades urbanas, agrícolas, industriales, que están en condiciones de suponer una amenaza contra la calidad de las aguas subterráneas. La transmisión de enfermedades a través del agua ha sido causa de estragos históricos (epidemias de cólera, disentería ...) que si bien, aquí y ahora, están afortunadamente superados no por ello es superflua la preocupación por este tema. Así, en nuestros días y en nuestros acuíferos, se observa: la presencia de concentraciones continuamente crecientes de nitratos, siendo muy elevadas ya en zonas localizadas con agricultura intensiva; la presencia de elementos como plomo, cobre, cromo, etc., en cantidades relativamente importantes en algunos lugares; sospechas fundadas en cuanto a la presencia de sustancias del tipo de pesticidas, herbicidas, etc.; salinización de pozos cada vez más en el interior, en zonas del litoral e insulares, ...

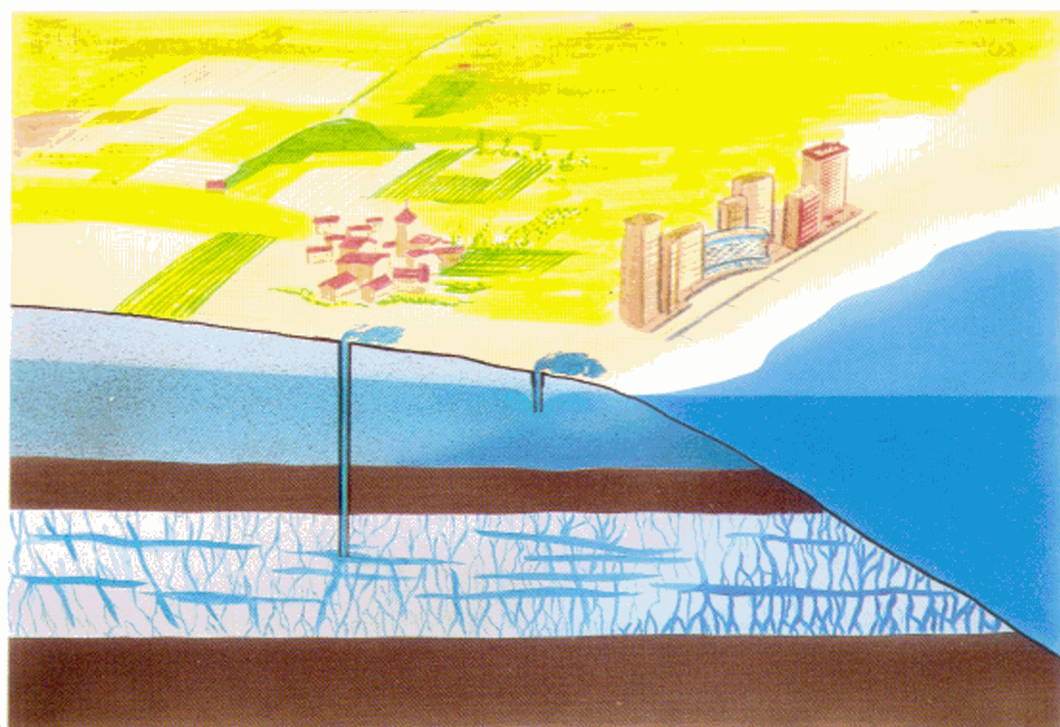
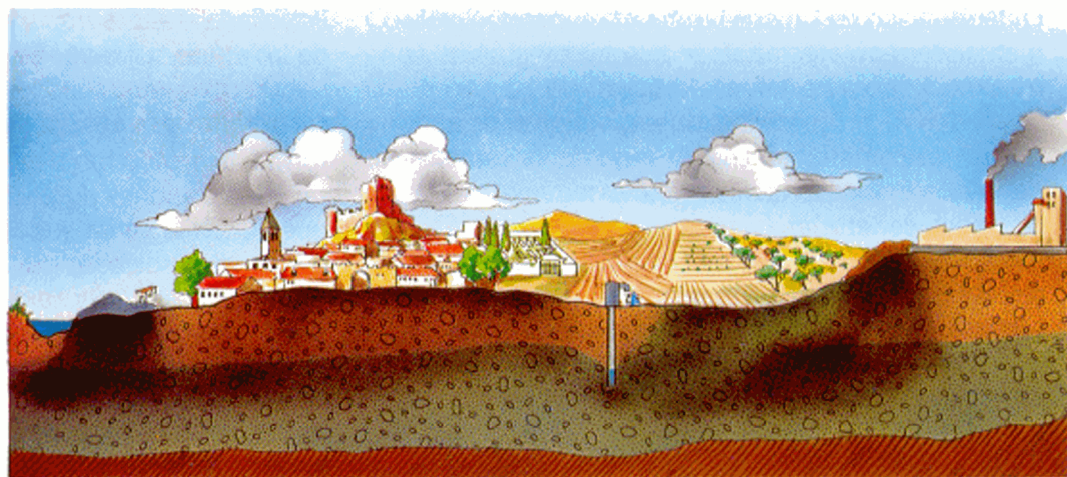


Figura 3

(INTRUSION MARINA).
La extracción excesiva de agua subterránea provoca la entrada del agua del mar y la salinización progresiva del acuífero.

Figura 4.

El hombre puede provocar la contaminación de los acuíferos, consciente o inconscientemente, de muy diversas maneras.



A continuación se destacan una serie de **características de la contaminación** de las aguas subterráneas, algunas de las cuales se desarrollarán con mayor detalle en los siguientes capítulos:

- * Las posibles fuentes de contaminación, y de agentes contaminantes, son muy numerosas, y están ampliamente distribuidas.
- * Generalmente el origen de la contaminación está asociado con el uso del terreno, variando su tipo según sea urbano, industrial o agrícola.
- * La contaminación puede estar produciéndose en sitios muy localizados y puntuales, o bien en amplias extensiones de terreno, como ocurre con el vertido de un colector de aguas residuales a una zanja o con el uso incorrecto de fertilizantes en agricultura intensiva, respectivamente.
- * Habitualmente el agua subterránea se mueve muy lentamente y responde también con gran inercia a las acciones exteriores, condición primordial a la hora de prevenir, vigilar o eliminar la contaminación de un acuífero.
- * Las características del terreno, y las del movimiento del agua subterránea a su través, proporcionan una serie de factores que tienden a atenuar la contaminación a lo largo del tiempo y del recorrido.

Salvo casos excepcionales, la contaminación del agua subterránea se descubre a través de análisis químicos realizados sobre muestras del agua en cuestión. Los resultados que indique el análisis del laboratorio van a ser supuestos para toda el agua extraída de la captación, motivo por el cual es importante tener en cuenta las siguientes **observaciones**:

- A.-Las muestras que se vayan a analizar deben de ser lo más representativas posible.
- B.- Los contaminantes que se han de buscar en el análisis, es decir las determinaciones a realizar, deben guardar relación con el tipo de posible contaminación que amenace al acuífero en cuestión.
- C.- Si en el entorno de la captación existen focos de contaminación, reales o potenciales, es conveniente —o necesario, según los casos— establecer un sistema de vigilancia alrededor de la captación.
- D.-Se realizarán análisis cada cierto tiempo.

A continuación se comenta brevemente cada una de estas observaciones:

A.-Las muestras que se vayan a analizar deben de ser lo más **representativas** posible. Los resultados que proporciona el laboratorio corresponden a la muestra que se le envió, la cual debiera ser idéntica al agua que se tomó del acuífero. A título de ejemplos, sin ser exhaustivos, se comentan algunas causas concretas que pueden distorsionar estos resultados, a lo largo del camino que recorre el agua desde el momento que es tomada en el terreno, hasta que llega al consumidor:

- * Las instalaciones del bombeo y/o de depósito deben estar protegidas adecuadamente. Por ejemplo, interesa verificar que el sistema de engrase de la bomba o del grupo motobomba no tiene pérdidas importantes que vayan al agua.
- * Debe estar garantizada la imposibilidad de entrada del contaminante en las conducciones: presión en tubería mínima, materiales de construcción adecuados, mantenimiento cuidado, etc.
- * El punto de toma de la muestra para el análisis debe ser anterior a la esterilización: la cloración del agua altera su naturaleza.

- * Si el abastecimiento se hace mezclando agua de diferentes procedencias, la muestra debe ser tomada después de realizada la mezcla, en condiciones normales de funcionamiento. Otra solución mejor consiste en tomar una muestra de cada procedencia y analizarlas por separado: así podría optimizarse la calidad del agua suministrada, según las características de cada fuente de suministro, y también detectar con mayor rapidez la procedencia de una eventual contaminación.

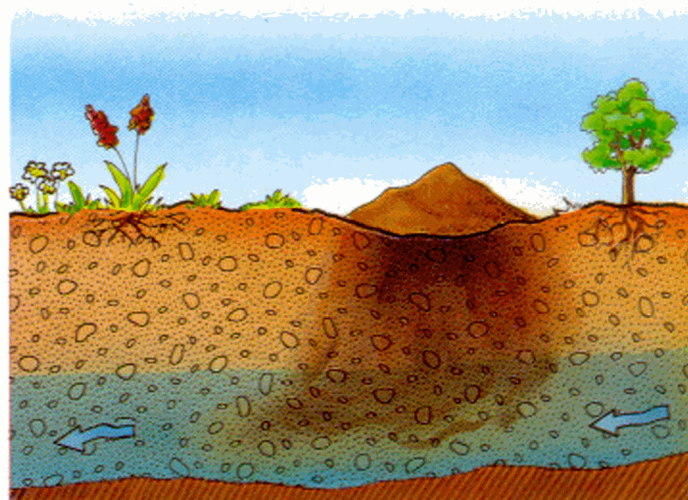
- * La naturaleza y mantenimiento de todas las instalaciones deben cumplir la normativa vigente, en particular los depósitos de almacenamiento.

- * Es preferible tomar la muestra en horas normales de funcionamiento.

Por otra parte, y como resulta evidente, el envase de la muestra debe estar perfectamente limpio para no introducir impurezas; si se ha lavado previamente, por el mismo motivo, es necesario asegurarse de que está bien aclarado. Los envases de plástico suelen ser preferibles, por la fragilidad del vidrio. En cualquier caso, se enjuagará varias veces el envase con agua del lugar que se va a muestrear, antes de tomar la muestra. Conviene llenar el envase hasta el borde y cerrarlo herméticamente enseguida, después de cerciorarse que no contiene burbujas; así se consigue que no haya prácticamente aire en contacto con el agua, lo cual es recomendable.

Figura 5.

En los terrenos detríticos ocurren fenómenos que proporcionan una depuración.



Se anotará el lugar, día y hora del muestreo y preferiblemente también la temperatura del agua en ese momento. La muestra se hará llegar lo antes posible (en intervalo de horas si es posible) al laboratorio, el cual deberá ser de competencia reconocida.

Si análisis anteriores han mostrado indicios de contaminación, es recomendable un asesoramiento previo al muestreo: a veces, por ejemplo, es necesario añadir determinadas sustancias químicas a la muestra al tomarla.

B.-Las **determinaciones** solicitadas al laboratorio, o sea el tipo de análisis a realizar sobre la muestra, debe guardar relación estrecha con el tipo de contaminación que amenace al agua. En capítulos posteriores se hacen unas consideraciones sobre los focos de contaminación más frecuentes, y los parámetros químicos que les van asociados. Por otra parte, la RTS vigente contempla una serie de componentes químicos y las correspondientes concentraciones admitidas en el agua para el consumo humano. Sería deseable realizar periódicamente un análisis químico que comprendiera todos estos parámetros; sin embargo esta medida encontraría dos dificultades importantes: seleccionar los laboratorios cualificados para ello, y el precio elevado de semejante análisis. Cada Ayuntamiento debe encontrar su solución, ponderando todos los factores, en particular la mayor o menor amenaza de contaminación existente.

C.-Si en un entorno amplio de la captación existen focos de contaminación, reales o potenciales, es conveniente—o necesario, según los casos— establecer un **sistema de vigilancia** que alerte antes de que una posible contaminación llegue al abastecimiento. Esto no supone prescindir de las medidas que se comentan en los capítulos posteriores, relativas a la protección de la calidad de las aguas subterráneas; se trata de evitar que en aquellos lugares en que existe una amenaza de contaminación grave, se tenga que recurrir en una situación extrema a cortar el suministro, o a prohibir el consumo humano del agua de la red, durante un cierto tiempo. Establecer un sistema de vigilancia, generalmente consiste en elegir entre los diversos pozos existentes en el entorno considerado, aquéllos que reúnan las características (ubicación, naturaleza, profundidad, explotación, etc.) óptimas según cada caso particular. Los resultados de los análisis de las muestras tomadas en cada uno de estos pozos o sondeos, con arreglo a un sistema a definir según las particularidades del caso, alertará con tiempo suficiente para adoptar las medidas más adecuadas con el fin de proteger al abastecimiento urbano, si la contaminación del agua se produce.

D.-La gran variedad de situaciones que son susceptibles de degradar la calidad del agua, y su posible variación con el paso del tiempo, obligan a **comprobar periódicamente** que el abastecimiento continúa cumpliendo con los requisitos mínimos establecidos, realizando nuevos análisis. La periodicidad de estos análisis dependerá, nuevamente, de las características de cada caso: situación y tipo de focos contaminantes, naturaleza del acuífero y de la captación, etc. En condiciones normales, dada la inercia de las aguas subterráneas para cambiar tanto en cantidad como en calidad, este período entre análisis puede ser del orden de varios meses. La Reglamentación Técnico-Sanitaria hace algunas precisiones al respecto.

Esta vigilancia continuada a lo largo del tiempo tiene la ventaja de indicar cómo va evolucionando con los años la calidad del agua, permitiendo adoptar las medidas oportunas en caso necesario con antelación suficiente, si la tendencia es negativa. Frecuentemente, sólo algunos de todos los parámetros químicos de un análisis presentan variaciones importantes, por lo cual pueden simplificarse los análisis rutinarios periódicos y espaciarse más los análisis completos; en ocasiones, cuando las circunstancias están perfectamente definidas, pueden espaciarse los análisis normales también, reduciendo la vigilancia a la realización de medidas simples: así, cuando el problema reside exclusivamente en la intrusión de agua marina, para conocer su evolución suele ser suficiente medir la conductividad eléctrica del agua captada, determinación muy sencilla y ávida que puede realizar cualquier persona atenta. De esta manera puede llevarse a cabo una vigilancia eficaz, con un coste económico muy pequeño.

Si bien las redes municipales de abastecimiento satisfacen las necesidades de la mayor parte de la población, existen sin embargo situaciones de **abastecimiento individual**: casas rurales aisladas, aldeas con pocos habitantes, residencias en el campo, lugares de esparcimiento alejados del casco urbano, incluso antiguas casas en pueblos y ciudades pequeñas que conservan el pozo al cual recurren de vez en cuando, o nuevas construcciones que han elegido autoabastecerse por diferentes motivos. Puesto que el uso del agua es el mismo (el consumo directo humano), las exigencias en su calidad también: las observaciones hechas anteriormente son igualmente válidas en su esencia para estas situaciones, especialmente agravadas en algunos de estos casos por el hecho de que se siguen utilizando pozos negros o fosas sépticas rudimentarias en sus proximidades, incluso en la propia casa.

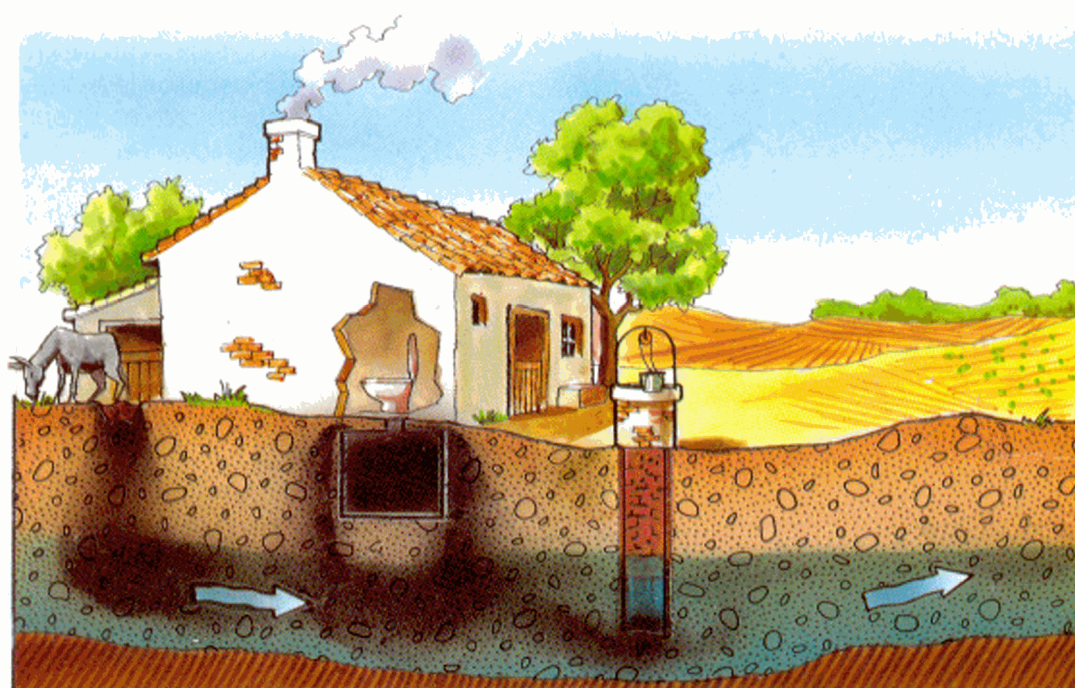


Figura 6.

Las instalaciones individuales tipo pozos negros, fosas sépticas, etc. deben estar bien realizadas para evitar contaminaciones.

Un caso particular lo constituyen las viviendas en algunos pequeños núcleos que carecen de redes de saneamiento y que reciben durante el verano una afluencia masiva de personas. Frecuentemente el abastecimiento de la casa está cubierto por una bomba instalada en años recientes, en el interior del pozo de boca ancha, con el nivel de agua subterránea a poca profundidad (pocos metros). Si bien el sistema era suficientemente seguro en años pasados dado que el volumen de agua extraída manualmente del pozo era escaso y el consiguiente retorno de aguas residuales al subsuelo todavía menor, junto con un mantenimiento obligadamente cuidado entonces de los pozos negros, en la actualidad tanto la extracción electrificada como el retorno de las aguas residuales se ven fuertemente incrementadas con el uso generalizado de los electrodomésticos y modernos hábitos higiénicos. La lenta depuración que el subsuelo proporcionaba antes se ve actualmente superada, resultando ya insuficiente: en consecuencia, una parte del agua residual es nuevamente aspirada hacia el abastecimiento, estableciéndose una especie de circuito cerrado.

Por último se menciona únicamente la necesidad de cumplir con las exigencias relativas a la calidad del agua suministrada para el **consumo por animales** que posteriormente serán sacrificados con miras a la alimentación humana. Varios contaminantes tóxicos (plomo, mercurio, etc.) pueden ser retenidos por su organismo sin llegar a alcanzar concentraciones mortales, y después son integrados en los tejidos humanos.

Análogamente, análisis realizados en experiencias de investigación en laboratorio sobre cultivos agrícolas regados con agua contaminada (plomo, cobre, cinc, etc.) muestran que estos productos contienen concentraciones apreciables de dichas sustancias tóxicas.



Contaminación Urbana: Aguas residuales (ARU)

Las personas necesitan agua para desarrollar una serie de funciones propiamente domésticas: bebida, preparación de alimentos, higiene corporal, lavado de ropa y enseres, etc. Además el agua es utilizada también en la limpieza de objetos (automóviles, herramientas, ...) y de calles; en el mantenimiento de parques y jardines; etc. En ocasiones, una parte importante del agua de la red abastece a industrias situadas en el casco urbano; este caso se considerará en el capítulo de la contaminación industrial, si bien se tendrá en cuenta en éste por los vertidos que incorpora a la red de saneamiento.

Desde su captación el agua recorre un camino a lo largo del cual, análogamente a como ocurre con la sangre en el cuerpo humano, pasa de ser un líquido de aporte, utilizable, a ser un líquido residual como consecuencia de su uso, al arrastrar sustancias de desecho. En estos usos, solamente una parte del agua es consumida en sentido propio, o sea sustraída del circuito urbano: es el caso del agua que se evapora (parte del lavado de calles; piscinas; fabricación y embotellamiento de bebidas refrescantes; ...) y del agua que se infiltra en el terreno (riego de parques y jardines; fugas en las redes de abastecimiento y de saneamiento; sistemas individuales de eliminación como fosas sépticas; etc.). La gran parte del agua de abastecimiento cumple una función de vehículo de transporte para eliminar diferentes tipos de impurezas, como ocurre por ejemplo en el caso del lavado: el agua de la red, con ayuda de determinados compuestos químicos que le son añadidos, arrastra la suciedad de la ropa, de los automóviles, o de un matadero.

Estos usos requieren un **grado elevado en la calidad** del agua: en el caso del consumo directo por ingestión en el hombre, esto es obvio; en los demás casos cuanto peor es la calidad del agua, mayor es el volumen de agua necesaria (aclarados, refrigeración, ...), mayor es la cantidad de compuestos químicos consumidos (jabón, detergentes, suavizantes, ...), y mayor suele ser el deterioro de las instalaciones (calentadores, electrodomésticos, ...). Aparte de un coste económico varias veces superior, esto supone un incremento del volumen de aguas residuales generadas y de su carga contaminante.

* La degradación de la calidad de las aguas subterráneas que puede originar el vertido de las ARU varía según **distintos factores**. El más determinante es el grado de **vulnerabilidad** que tenga el acuífero sobre el que se realiza el vertido. Obviamente, si no existen aguas subterráneas en el lugar es imposible su contaminación; igualmente si existen, pero se encuentran por debajo de una capa de terreno suficientemente impermeable que las protege; también puede ocurrir que la propia calidad de las aguas subterráneas sea mala, en cuyo caso puede resultar incluso beneficioso infiltrar las ARU en el terreno (más adelante se verá este caso). Un estudio hidrogeológico indicará la situación de cada caso particular; una primera aproximación puede obtenerse a partir de los Mapas de Vulnerabilidad publicados por este Instituto, si bien a una escala (1:50.000) habitualmente insuficiente para este objetivo.

* Seguidamente, el factor decisivo es el **volumen de vertido**: se comprende que un caudal de 100 litros por segundo de aguas negras presenta una carga contaminante superior a la proporcionada por las infiltraciones de los pozos negros de una aldea de 50 habitantes, si los demás factores son los mismos. En este sentido y como primera aproximación, cualquier reducción del volumen de vertido es deseable. Inversamente, el incremento del volumen de ARU supone un mayor poder contaminante; un caso particular es el aumento de habitantes estacionales por turismo que es necesario tener en cuenta al considerar la evacuación de estos residuos.

* El tercer factor importante que interviene es la **composición de las ARU**, constituida por las sustancias que arrastran (llamados sólidos en suspensión) y por las que llevan disueltas (sólidos disueltos). Puede considerarse que la composición de las ARU es la resultante de la composición inicial del agua de abastecimiento, a la que se añade una carga contaminante en el momento de su uso. A efectos prácticos, se considera que esta carga tiene principalmente dos tipos de componentes: las sustancias estables y las degradables, ya estén en suspensión o disueltas.

▬ **Las sustancias degradables**, que constituyen en su mayor parte la materia orgánica de las ARU, están en unas condiciones de descomposición intensa debida al alto contenido de microorganismos que presentan, derivados principalmente de las excretas. Estas bacterias se desarrollan en el medio acuoso, se alimentan de sustancias en disolución, y se reproducen rápidamente; su metabolismo proporciona en última fase unos productos prácticamente inertes que pasan al agua, y también libera unos compuestos gaseosos que suelen ocasionar los malos olores característicos de las aguas negras. Según que las ARU estén mucho o poco aireadas, con un aporte grande o pequeño de oxígeno (aire), predomina respectivamente un tipo de bacterias (aerobias) u otro (anaerobias), siendo los compuestos gaseosos resultantes prácticamente inodoros o pestilentes, respectivamente. La actividad de estas bacterias se ve estimulada por las temperaturas altas (verano).

Estos procesos, que ocurren espontáneamente en la Naturaleza, son en su esencia los mismos que se utilizan en las instalaciones de tratamiento para depurar las ARU, como se verá más adelante. Se ha definido un parámetro bioquímico para poder cuantificar esta carga orgánica: la DBO_5 o Demanda Biológica (Bioquímica) de Oxígeno, que viene a representar la cantidad de oxígeno (aire) necesaria para degradar las sustancias orgánicas que contiene el ARU, descontaminándola en este sentido. Este parámetro es delicado de determinar y requiere unas condiciones especiales al tomar la muestra y analizarla en el laboratorio, por lo que a menudo se considera la DQO o Demanda Química de Oxígeno, más fácil de determinar, y que en este tipo de aguas residuales tiene un sentido aproximadamente equivalente. Cuando la DQO se determina en el laboratorio con permanganato de potasio ($KMnO_4$), en frío, el resultado que se obtiene es la Oxidabilidad que contempla la Reglamentación Técnico-Sanitaria.

Otros parámetros relacionados con estas materias orgánicas degradables, son los compuestos de nitrógeno: amoníaco y nitritos. Por ejemplo, la urea (componente básico de la orina) se descompone fácilmente originando amoníaco (olor característico en los evacuatorios que no reciben una atención esmerada). Este amoníaco (expresado en los análisis como NH_4^+) en presencia de oxígeno (aire) se transforma fácilmente en nitrito (NO_2^-), el cual sigue transformándose en nitrato (NO_3^-), que ya es más estable. En consecuencia, concentraciones importantes de NH_4^+ y/o NO_2^- en un análisis de agua, deben alertar sobre una posible contaminación por aguas residuales humanas (si bien pueden tener otros orígenes, aunque raramente), sobre todo si van acompañadas de valores de oxidabilidad también importantes. Por este motivo la Reglamentación Técnica-Sanitaria sólo tolera unas concentraciones bajas en el contenido de NH_4^+ (0,5 miligramo por litro) y de NO_2^- (0,1 miligramo por litro).

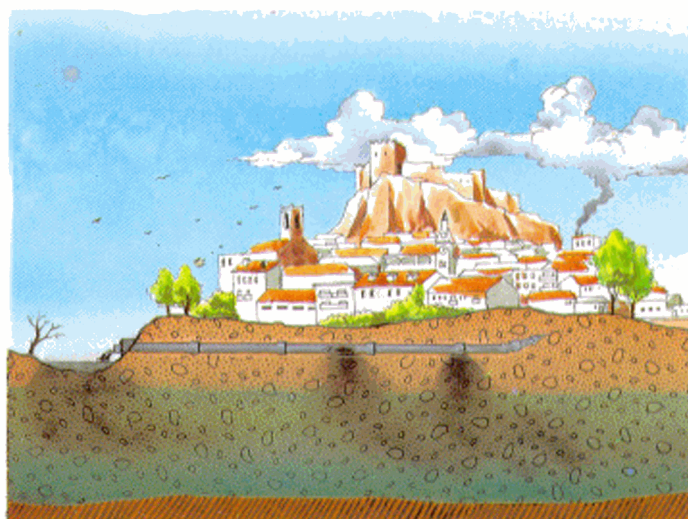
Una solución arriesgada en estos casos de contaminación orgánica, consiste en confiar exclusivamente en el poder esterilizador de los reactivos habituales: cloro, hipoclorito, etc., ya que existen indicios sobre el poder cancerígeno de los compuestos químicos (cloroaminados) que se forman al reaccionar el cloro con los derivados del nitrógeno.

- **Las sustancias estables**, que no son susceptibles de descomposición, también se presentan disueltas y en suspensión. Las primeras están constituidas sobre todo por las sales comunes, en sentido químico, disociadas en los iones correspondientes: sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{++}), magnesio (Mg^{++}), cloruros (Cl^-), sulfato (SO_4^-), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^-), nitratos (NO_3^-), principalmente; su concentración es expresada en miligramos de cada componente en 1 litro de ARU (mg/l). A efectos prácticos puede considerarse que la suma de todos ellos (el Total de Sólidos Disueltos, TSD, prácticamente equivalente al Residuo Seco, RS) aumenta en unos 400 mg/l, en el proceso de transformación de agua de abastecimiento a ARU; en otras palabras, en términos generales al atravesar un núcleo de población, el agua añade a su contenido en sales disueltas un promedio de 400 mg/l.

Los sólidos estables en suspensión comprenden arenas, vidrios, latas, etc., que arrastran las ARU; pueden ocasionar atascamientos en las conducciones, dificulta el funcionamiento de las depuradoras si no están bien diseñadas, ensuciar aparatos de medida o de control, etc.

Figura 7.

Las aguas residuales urbanas (ARU) pueden contaminar el acuífero.



Cuando la red de saneamiento recibe aguas residuales de industrias, además de las domésticas, la situación se complica según sean el volumen y la composición de estos residuos industriales. Este tema se trata con algún detalle en un capítulo posterior (Contaminación Industrial); aquí interesa indicar que cada instalación fabril es un caso particular, y que si bien la evacuación de sus aguas residuales a través del colector general puede ser una solución válida, normalmente se requerirá un tratamiento previo de estas aguas que las adecúe al vertido último. Como ejemplo, un vertido industrial con un contenido importante de metales pesados (plomo, cobre, mercurio, cadmio, ...) puede alterar completamente el funcionamiento de una estación de tratamiento convencional de ARU y anular su poder depurador, por intoxicación de las colonias bacterianas involucradas en el proceso.

Por lo indicado hasta aquí, se comprende que las ARU pueden constituir una fuente destacada de contaminación de las aguas subterráneas, al representar un volumen grande de agua con relativamente importantes concentraciones de contaminantes. Es conveniente volver a recordar que el peligro más grave, en este caso, es la contaminación microbiológica: bacterias, virus ..., origen de enfermedades infecciosas, uno de cuyos vehículos de transmisión más importante es justamente el agua.

De cualquier manera, la **naturaleza del terreno** es el factor primordial en este fenómeno, según se ha indicado anteriormente. El agua residual se infiltra en el terreno permeable, llevando consigo los sólidos disueltos hacia el acuífero. No ocurre así con los sólidos en suspensión tanto inertes como degradables, pues normalmente son retenidos por la parte superior del terreno que actúa de filtro; sin embargo, cuando existen sumideros (fracturas en superficie, dolinas, ...), en rocas con múltiples fisuras ensanchadas por disolución, por ejemplo, entonces el agua residual puede llegar a introducirse en el subsuelo directamente con todos los elementos contaminantes que lleva incorporados; lo mismo ocurre cuando erróneamente se utiliza un pozo abandonado como vía de desagüe.

- En el caso de un **acuífero de tipo fisurado**, el agua contaminada puede desplazarse rápidamente sin sufrir prácticamente modificaciones. Es el caso más alarmante, pues de existir un pozo o sondeo aguas abajo, el agua extraída puede contener concentraciones peligrosas de contaminantes.
- En el caso de un **acuífero por porosidad**, el avance de la contaminación según se ha comentado ya, se ve frenado: los microorganismos que han conseguido infiltrarse son progresivamente retenidos por el terreno; las sustancias orgánicas continúan su lenta degradación mediante transformaciones bioquímicas; intervienen de manera importante reacciones químicas entre los componentes del agua y del terreno, en íntimo contacto; etc. El resultado es que al cabo de un recorrido variable según los diferentes casos, el carácter contaminado del agua subterránea ha desaparecido prácticamente.

Este esquema de funcionamiento, muy simplificado, es más complejo en la realidad; por ejemplo, el acuífero puede tener caminos preferenciales (fallas, estratos de muy diferente transmisividad, sondeos preexistentes que pongan en comunicación acuíferos aislados a diferente profundidad, etc.) que acorten el recorrido efectivo del agua. Por otro lado, y según se ha comentado, el volumen del vertido hace también muy distintos unos casos de otros; no son infrecuentes los problemas por colmatación del suelo; etc.

* * *

Las ARU pueden considerarse desde una perspectiva completamente opuesta a la realizada hasta ahora. Interesa comentar en este lugar, siquiera sea someramente, unos **aspectos positivos** que presentan estas aguas residuales y que, lentamente, van tomando relieve empujados por la escasez de agua, estimulados por las aplicaciones que se vienen realizando desde tiempos remotos en algunos lugares, apoyándose en razonamientos científico-técnicos deducidos de observaciones prácticas.

Según ha quedado expuesto, las ARU (sin influencias industriales) presentan un caudal apreciable y son de calidad inicial obligadamente no mala, a la cual se incorporan fundamentalmente sustancias orgánicas degradables. Además de su contenido en compuestos nitrogenados, hay que reseñar también los de fósforo y potasio: todos ellos son componentes básicos de los fertilizantes sintéticos que tan profusamente se utilizan en agricultura.

Surge así la posibilidad de utilizar las ARU para riego, aprovechando su **potencial hídrico y fertilizador**, transformando un residuo contaminador en una fuente de riqueza mediante su correcta aplicación en la tierra: los que antes eran contaminantes indeseables, ahora son nutrientes beneficiosos. No se descubre aquí nada nuevo, pues esta práctica viene realizándose desde siempre: en muchos lugares cuya agronomía deriva de la época árabe, los colectores de poblaciones se prolongan en acequias de riego; la utilización del estiércol para abonado ha sido también una práctica universal hasta recientemente; etc. Posiblemente la novedad en relación con tiempos pasados resida en dos aspectos: por un lado la apremiante necesidad de resolver el problema de contaminación creado en numerosos lugares al concentrar en un único punto (la salida del colector general), el importante caudal de ARU; por otro lado, la necesidad y posibilidad de hacer una correcta aplicación de estas aguas al terreno, dando así respuesta (parcialmente) a la siempre creciente demanda de agua para riego.

Habitualmente, el vertido último del colector es realizado a un cauce de agua superficial, aportándole su carga contaminante; frecuentemente el cauce está seco, especialmente en época de estiaje; a veces incluso el vertido se realiza directamente al terreno. Ya sea directamente, o indirectamente a través de los ríos, las aguas subterráneas se ven amenazadas.

La correcta aplicación de ARU al terreno debe considerar la existencia de las aguas subterráneas; como ya se ha esbozado anteriormente, la naturaleza de los diferentes tipos de terreno proporciona un comportamiento muy dispar en los acuíferos: un estudio hidrogeológico específico indicará en cada caso cuál es la situación particular, y qué medidas deben adoptarse. Obviamente, esta correcta aplicación también debe considerar otros factores fundamentales: cadencias de riego, tipos de cultivo, precauciones sanitarias, etc. cuya descripción detallada se encuentra fuera del marco de estas notas, si bien se tocarán de pasada en el capítulo de Contaminación Agrícola.

Para el caso de las poblaciones de hasta 25.000 habitantes, se está desarrollando una modalidad conocida como "filtros verdes", descrita con detalle en las "Recomendaciones para la redacción del Informe Técnico Previo para Depuración de Aguas Residuales por Aplicación al Terreno", publicación de la Dirección General de Obras Hidráulicas (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). En esta aplicación el ARU bruta es utilizada para el riego de plantaciones de árboles, generalmente chopos; en La Mancha, por ejemplo, existen realizaciones en curso. Como se menciona en la publicación indicada, es necesario considerar la existencia de aguas subterráneas útiles al elegir el lugar de implantación del futuro filtro verde: un estudio hidrogeológico indicará en cada caso qué lugares son recomendables y qué precauciones habrán de adoptarse para proteger a los acuíferos.

Por último, en zonas con escasez de agua es interesante considerar la posibilidad de utilizar las ARU, convenientemente tratadas, para recargar acuíferos mediante grandes balsas de infiltración en el terreno, o incluso a través de pozos o sondeos. En las zonas costeras con problemas de salinización por intrusión marina, esta práctica puede ser todavía más recomendable; existen realizaciones en curso, como en Mallorca, por ejemplo. En estas zonas deficitarias, el uso con fines agrícolas de ARU suficientemente tratadas puede liberar importantes caudales de agua de mejor calidad, que actualmente se utilizan en regadío, para garantizar o mejorar el suministro urbano especialmente en épocas de gran demanda (verano), empleando los excedentes de invierno para recargar los acuíferos. Nuevamente, un estudio hidrogeológico aportará el asesoramiento necesario para empezar a abordar el tema en cada caso particular.

* * *

A continuación se hacen unos comentarios relativos al **tratamiento de las ARU** mediante depuradoras, al que se ha aludido en varias ocasiones.

Se indicó, muy de pasada, que la materia orgánica característica de estas aguas residuales y que les confiere su particular rasgo contaminante, tenía en sí misma su potencial degradador, constituido por diversos tipos de bacterias. Estos microorganismos, al disponer de un medio favorable para su desarrollo en las aguas fecales, se multiplican rápidamente conllevando la aceleración de la degradación de la materia orgánica del medio, con la que se alimentan. Este proceso se produce espontáneamente en la Naturaleza, dentro del ciclo de transformación seguido por las diversas sustancias, y que explica la desaparición de los residuos orgánicos a lo largo del tiempo.

Ocurre que el proceso indicado tiene sus propias características: puede realizarse en presencia de oxígeno (transformaciones aeróbicas) o en su ausencia (transformaciones anaeróbicas), dando lugar a productos diferentes en cada caso; se desarrolla más o menos rápidamente según la temperatura existente; se ve estimulado por determinadas sustancias y retardado, o anulado más o menos tiempo, por otras; tiene una cierta velocidad de transformación; etc. El tratamiento artificial de las ARU mediante depuradoras consiste en proporcionar a estas colonias bacterianas justamente unas condiciones de desarrollo para que realicen la degradación de la materia orgánica de una manera óptima. Dentro de esa optimización intervienen varios factores, como el económico por ejemplo: según aumenta el grado de depuración aumenta el coste correspondiente.

Como ya se ha visto, la naturaleza de las ARU en las distintas poblaciones es suficientemente parecida, a estos efectos, supuesto que no reciben aguas residuales industriales de importancia. El factor diferenciador va a ser el caudal; como éste es proporcional al número de habitantes, la magnitud de la población aparece como el parámetro más importante que va a caracterizar la planta de tratamiento. Así, los equipos de una depuradora serán distintos según se consideren para una población de 10.000, 100.000 ó 1.000.000 de habitantes.

A grandes rasgos, una depuradora completa de una cierta entidad, consta de las siguientes fases:

- **Pretratamiento:** Elimina los sólidos de mayor tamaño que lleva el agua en suspensión, y que quedan retenidos en una rejilla de desbaste (manual o automática); o depositados en un desarenador; etc. Cuando los caudales son pequeños, esta fase puede ser cubierta mediante una bomba dilaceradora.
- **Tratamiento Primario:** Consiste en una decantación de las partículas de menor tamaño; junto con el pretratamiento, separa prácticamente todos los sólidos en suspensión.

- **Tratamiento Secundario:** En esta parte tiene lugar el aporte de oxígeno (generalmente aire) que posibilita un intenso desarrollo bacteriano, cuya finalidad es la eliminación de la materia orgánica disuelta.

Sobre esta base, existen diversas líneas de tratamiento con distintos equipos: oxidación total, fangos activados, lechos bacterianos, discos rotatorios, digestión aeróbica o anaeróbica, etc. El coste de mantenimiento, sobre todo eléctrico, y la necesidad de un operario competente al frente de las instalaciones, son dos aspectos básicos a tener en cuenta. Un diseño y un mantenimiento correcto de los equipos, permiten alcanzar rendimientos superiores al 95 por ciento en la depuración de estas aguas residuales. El efluente resultante tiene un contenido en nitratos y fosfatos (fenómenos de eutrofización) que pueden obligar a realizar un Tratamiento Terciario generalmente muy costoso, o buscar soluciones alternativas (agricultura, recarga, ...).

Desde un punto de vista técnico, los distintos aspectos comentados en este Capítulo —depuración más o menos intensa; aplicación estudiada en agricultura; utilización para recarga artificial de acuíferos; etc.— representan unas posibilidades que, según las necesidades hídricas del lugar, merecen ser consideradas con todo detalle.

En cualquiera de los casos, es patente la necesidad de un estudio hidrogeológico que entre otras cosas, considere la protección necesaria para la calidad de las aguas subterráneas frente a la posible acción contaminadora de las ARU.



Contaminación Urbana: los residuos sólidos (RSU)

Los núcleos de población, en su actividad diaria, generan un volumen apreciable de residuos sólidos (basuras) de los que es necesario deshacerse.

En las últimas décadas, la problemática de estos residuos en España ha tenido una **evolución** amplia al variar su naturaleza y composición, con un incremento importante del volumen generado. Sin embargo, el rasgo probablemente más destacable es la diversidad de situaciones que se presentan al considerar el número de habitantes. Se tiene así desde las poblaciones más pequeñas, con hábitos rurales, que continúan realizando un aprovechamiento intenso de las cosas por lo que su volumen de basuras es muy pequeño y generalmente de materiales inertes, hasta el extremo opuesto en el que las grandes ciudades presentan crecientes tasas de vertido incluyendo residuos sanitarios, automóviles desechados, enseres domésticos averiados, restos de derribo, etc. Esta diversidad va a requerir un planteamiento completamente distinto, según cada caso, al abordar la problemática de los residuos sólidos urbanos (RSU). Por ello se ha pretendido, en las líneas que siguen, exponer unas consideraciones de tipo general, evitando en lo posible la complejización y la simplificación extremas.

La composición de los RSU es muy heterogénea según los sitios. Además del número de habitantes, se observa la influencia de factores como el clima, la ubicación geográfica, el nivel de vida, los hábitos culturales, etc.; incluso una misma población genera diferentes RSU según la estación del año, especialmente si está en zona turística. Para los grandes núcleos urbanos existen estadísticas, españolas y extranjeras, que indican cifras medias muy aproximadas de producción y composición de sus RSU. La existencia de zonas industriales en, o cerca de, estos grandes núcleos, va a crear una contribución incluso más compleja; esta influencia se considerará en el capítulo posterior correspondiente a la "Contaminación Industrial".

A grandes rasgos (siguiendo el mismo esquema presentado con las aguas residuales), se puede considerar que los RSU son de dos tipos: **degradables e inertes**. Al primer grupo pertenecerán todas las materias de tipo orgánico, unas que se descomponen fácilmente (residuos alimenticios, animales muertos, grasas, aceites, ...) y otras más lentamente (maderas, papeles, trapos, ...). El segundo grupo estará formado por materiales del tipo vidrios, escombros, escorias, ... que no presentan capacidad de descomposición notable. Los plásticos (botellas, envases, ...) tienen una degradabilidad variable, que suele ser baja casi siempre; los metales (latas, desechos, ...) también tienen un tiempo largo de descomposición.

Otra característica importante de los RSU es su relativa facilidad para la **combustión**, no siendo infrecuente en los basureros los brotes puntuales de pequeños incendios, especialmente en lugares secos y con altas temperaturas. En este sentido, cabe considerar por un lado las sustancias combustibles (madera, papeles, trapos, ...) y por otro las incombustibles (vidrios, escombros, ...).

El creciente coste de las materias primas y de la energía está favoreciendo el aprovechamiento de determinados componentes de los RSU según las circunstancias. Más adelante se contemplan con un cierto detalle estas posibilidades.

Figura 8.

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son a veces vertidos sobre un terreno inadecuado.



En cualquier caso los RSU requieren ser evacuados de la población y depositados en algún lugar. Para elegir ese lugar es necesario considerar la eventual existencia de aguas subterráneas, entre otros factores. Y ello porque los RSU vertidos sin las precauciones suficientes pueden contaminar estas aguas mediante los líquidos que segregan, llamados lixiviados, según se va a ver.

La **descomposición** de la fracción de la **materia orgánica** que es más fácil y rápidamente degradable (como indican los olores de las basuras domésticas cuando por cualquier motivo están cierto tiempo sin ser evacuadas) comienza al poco tiempo de llegar al basurero, donde la actividad de los diversos tipos de microorganismos existentes (bacterias, hongos, ...) encuentra condiciones estimulantes para su desarrollo: alimento abundante proporcionado justamente por esta materia de desecho degradable; humedad suficiente aportada por la propia basura o por la precipitación atmosférica (lluvia) y generada también como producto de la putrefacción; temperatura favorable mantenida en los montones de basura por el calor que se desprende en estas transformaciones naturales espontáneas; protección de los rayos solares cuya componente ultravioleta es letal para la gran mayoría de estos microorganismos; etc. Otros organismos superiores contribuyen también en esta degradación, llegando hasta los roedores (ratas de basurero); se ha comercializado incluso una variedad de lombriz que se alimenta de estos desechos. Esta putrefacción de la materia orgánica acelera a su vez la degradación de otras sustancias —como papel o trapos— con las que se encuentra entremezclada.

Como muy sucintamente se indica, en este sistema en actividad continua, complejo como todo proceso de la Naturaleza, intervienen distintos factores que son variables de unos basureros a otros; su evolución es diversa. Un clima frío y lluvioso retardará toda la dinámica esbozada: la abundancia de agua que penetra en los montones de basura enfriará el medio favoreciendo también un ambiente anaerobio (sin oxígeno); parte del agua seguirá atravesando las basuras, arrastrando sustancias en disolución y en suspensión, creando una mezcla de múltiples componentes a lo largo de su recorrido. La putrefacción produce gases, de distinta naturaleza según las condiciones reinantes: cuando las basuras tienen, debido a sus constituyentes y especialmente si están enterradas, una textura apelmazada sin facilidad de aireación (oxígeno), con suficiente materia orgánica fácilmente degradable y con un ambiente anaerobio, entonces predomina una descomposición lenta de los residuos con formación de gases del tipo metano (CH_4), sulfhídrico (SH_2), nitrógeno (N_2), etc. que proporcionan olores desagradables y la posibilidad de combustión; cuando la presencia de aire es suficiente, por los motivos que sea (remoción periódica de las basuras, mezcla esponjosa de la materia degradable con inertes, canales de ventilación, etc.), entonces el medio es aerobio y básicamente el gas formado es anhídrido carbónico (CO_2), inodoro e incombustible. Los productos de la descomposición, a su vez actúan sobre las sustancias que encuentran: por ejemplo, el CO_2 producido reacciona con el agua proporcionándole una acidez (ácido carbónico) que la vuelve más activa, aumentando su poder disolvente y su agresividad sobre las sustancias que va encontrando; la materia inerte, en contacto con el agua —particularmente si ésta tiene carácter ácido— va a ser disuelta más o menos lentamente, aumentando el contenido en sales disueltas.

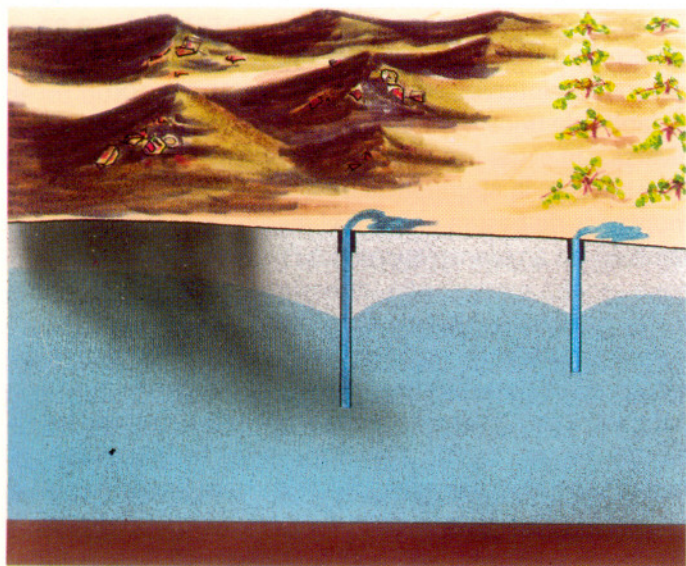


Figura 9. El agua bombeada aparece contaminada por el lixiviado de los RSU.

Este líquido que segrega el basurero, su lixiviado, ha sido analizado en laboratorios, encontrándose numerosos compuestos y en concentraciones importantes, muy variables según el tipo de RSU, los cuales a su vez dependen (según se ha comentado anteriormente) del tipo de núcleo de población. Los valores medios de concentración de los elementos analizados demuestran el poder contaminante del lixiviado. A título orientativo, se acompañan los valores del análisis químico de los componentes principales para el lixiviado de 4 vertederos españoles:

Cloruros (Cl^-)	390-627	mg/l de lixiviado
Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$)	481-1729	"
Bicarbonatos (HCO_3^-)	366-884	"
Sodio (Na^+)	53-450	"
Potasio (K^+)	4-340	"
Magnesio (Mg^{++})	72-218	"
Calcio (Ca^{++})	84-400	"
TSD (Total Sólidos		
Disueltos)	126-3970	"
Acidez (pH)	7,1-7,7	unidades.

Para otro tipo de componentes, la bibliografía extranjera ofrece los siguientes valores, obtenidos en lixiviados:

DBO_5	80-34000	mg/l de lixiviado
DQO	40-90000	
Hierro (Fe^{++})	0-2820	"
Cinc (Zn^{++})	0-370	"
Cobre (Cu^{++})	0-10	"
Plomo (Pb^{++})	0-2	"

Un vertido de origen industrial puede aportar una cantidad importante de compuestos habitualmente extraños en la Naturaleza, como residuo del proceso de fabricación; la proximidad de actividades agropecuarias concentradas (establos, almazaras, prensa de uva, ...) puede contribuir igualmente con residuos sólidos propios.

En cualquier caso, se tiene que el lixiviado llega al terreno presentándose una situación semejante a la considerada con las aguas residuales: si los materiales que constituyen el terreno lo permiten, el lixiviado va a penetrar en el subsuelo pudiendo alcanzar el manto acuífero, integrándose al flujo de las aguas subterráneas, contaminándolas.

Como ya se ha indicado, la parte más superficial del terreno tiene un poder depurador importante; por ello en la utilización de canteras abandonadas – especialmente graveras – para emplazamiento de vertederos de basuras, debe considerarse atentamente la existencia de aguas subterráneas útiles en el lugar. Si bien generalmente estas instalaciones suelen presentar unas características ventajosas para esta finalidad (accesos preparados, separación de núcleos urbanos, terreno estéril, situación paisajística discreta, etc.), las excavaciones realizadas durante la culminada explotación han reducido la capa protectora superior; a veces incluso –cuando el manto acuífero se encuentra muy próximo a la superficie– el abandono de la explotación se decidió al aflorar las aguas subterráneas: el vertido de basuras en estas condiciones supone un aporte directo de contaminantes a las aguas subterráneas.



Figura 10.

Los contaminantes recorren rápidamente distancias apreciables.

El afloramiento de las aguas subterráneas, en época húmeda, ocurre frecuentemente en los puntos del terreno más bajos, de menor cota topográfica, formándose lagunas de dimensiones variables: el aprovechamiento de estos desniveles en el terreno para realizar vertidos de basuras, en época seca, establece una fuente de contaminación directa de las aguas subterráneas. Análogamente, en suelos correspondientes a materiales carbonatados (calizas, ...) con oquedades de dimensión variable, a veces abiertas (cuevas, agujeros, grietas, etc.), la realización de vertidos provoca un aporte directo de contaminantes a las aguas subterráneas; en estos casos, además, el acuífero es especialmente vulnerable al estar constituido por rocas fracturadas, según se indicó en la Introducción: los contaminantes pueden recorrer rápidamente distancias apreciables sin sufrir cambios importantes, otros que la dilución.

En cualquier caso, los RSU deben ser evacuados de la población. Diferentes soluciones se han ido elaborando para los distintos problemas que se han ido presentando en la **gestión** de estos residuos, como son los sistemas de recogida, la definición del residuo tanto cuantitativo como cualitativo, el estudio hidrogeológico y edafológico del terreno, y eventualmente, el aprovechamiento del residuo. Existe abundante bibliografía detallada sobre cada uno de estos aspectos. En el marco de estas notas, únicamente se expone a continuación unas consideraciones sobre las actividades que mayor incidencia pueden tener sobre la calidad de las aguas subterráneas.

Una vez evacuados los residuos sólidos de la población, en la actualidad su **eliminación** sigue **diversos métodos**, eligiéndose uno u otro según las condiciones particulares de cada caso:

- Vertido controlado, con trituración previa y compactación.
- Producción de compost.
- Incineración, con o sin aprovechamiento de la energía calorífica.

-Reciclado o recuperación de materiales; transformación por diferentes procesos químicos o bioquímicos (pirólisis, oxidación, hidrogenación, hidrólisis, degradación biológica, digestión anaeróbica, etc.).

-Técnicas específicas: trituración de vehículos y posterior reutilización de la chatarra compactada; recuperación de residuos, de construcción; etc.

Evidentemente estas operaciones conllevan un coste económico más o menos elevado, siempre importante; de aquí que se haya trabajado en el sentido del aprovechamiento de una parte -la mayor posible- de estos residuos, que alivie el coste de este servicio social entre otras ventajas.

* * *

El posible **aprovechamiento de los RSU** dependerá básicamente de su composición, cuya determinación requiere un cuidado particular según las diversas técnicas que existen para ello, más o menos complejas en función de la importancia de la población. En este sentido, y a grandes rasgos, se pueden distinguir tres grandes tipos de residuos: inertes, fermentables y combustibles, atendiendo a lo expuesto anteriormente.

* El **aprovechamiento de la fracción**

fermentable se realiza transformándola en compost. Ya se ha visto someramente qué ocurre con las basuras abandonadas; el compostaje consiste en favorecer esta degradación natural de manera a obtener un material orgánico (humus), rico en sustancias minerales, que constituye un excelente regenerador y acondicionador del suelo agrícola, particularmente en zonas climáticas con problemas de aridez, y en áreas de intensa actividad agrícola. Obviamente interesa que los residuos orientados con esta finalidad no tengan una proporción alta de inertes, los cuales además deben ser de pequeño tamaño (eventual trituración) para facilitar la mezcla y la circulación de aire (transformaciones aeróbicas); la humedad debe ser suficiente y no excesiva; la necesidad de aire (oxígeno) puede requerir una remoción periódica durante la fermentación; la relación entre el carbono orgánico y el nitrógeno debe ser baja (C/N entre 10 y 25), pudiendo contribuir a ello, según los casos, la adición de fangos derivados de las depuradoras de aguas residuales urbanas así como la adición de residuos sólidos derivados de determinadas actividades industriales (extracción de aceite, procesado de uva, obtención de zumos y conservas vegetales, etc.) y también la adición de desechos forestales; etc. Actualmente existe toda una tecnología para el diseño, montaje y explotación de plantas de compost; numerosas ciudades tienen instalaciones con un éxito dispar en su funcionamiento por motivos muy diversos. La consulta a los Servicios Agrarios especializados locales es una necesidad cuando se empieza a considerar la posibilidad de instalar una planta de compostaje.

En cualquier caso, desde el punto de vista de la protección de los acuíferos, interesa considerar las características hidrogeológicas del lugar en el momento de estudiar la ubicación de estas instalaciones, al igual que en la implantación de cualquier actividad industrial; análogamente, por la posible influencia del compost sobre la calidad de las aguas subterráneas, se comentará en el capítulo relativo a la Contaminación Agrícola.

* El **aprovechamiento de la fracción combustible** se puede realizar a través de quemadores —plantas incineradoras— que generalmente requieren un aporte exterior de combustible (fuel), si bien en proporciones pequeñas cuando aquella fracción es suficiente. Esta solución se ve favorecida cuando el espacio disponible para el vertido de los RSU es escaso; también cuando existen aportes particulares adecuados: residuos industriales combustibles (aceites, plásticos, ...) o residuos agrícolas o forestales (limpieza de montes, alpechines, ...). Estas plantas pueden tener cabida para la incineración de los fangos secados que produzca el tratamiento de las aguas residuales urbanas. La mancomunidad de núcleos de población, municipios, etc. es un aspecto importante a considerar siempre, y especialmente al proyectar una planta incineradora, por las ventajas que puede aportar la economía de escala; simultáneamente con la complejidad de las instalaciones, debe crecer la atención necesaria para su correcto mantenimiento tanto económico como técnico.

* El **aprovechamiento de los inertes** puede ser importante, a través de la recuperación directa de parte de sus componentes: el reciclado de papel, cartón, envases de vidrio o metálicos férricos o no férricos, son ejemplos establecidos en numerosas poblaciones. En este caso resulta decisivo un factor tan alejado de la técnica como es la colaboración ciudadana, indispensable para posibilitar la recogida selectiva en la calle. Otro ejemplo más anecdótico viene constituido por las sorprendentes aplicaciones que reciben los neumáticos desechados: protectores en atraques de barcos, material de juego en parques infantiles y verbenas, bordillos señalizadores en caminos particulares, etc.

No obstante, entre las diferentes técnicas para deshacerse de los RSU, la más utilizada suele ser, con diferencia, el **vertedero controlado**. Consiste como su nombre indica, en un vertido de las basuras al terreno, utilizando unos métodos adecuados, especialmente la compactación previa de los residuos (que permite un aprovechamiento intenso del terreno) y su recubrimiento con capas de tierra más o menos arcillosa al final de cada jornada (para evitar transporte por viento, mosquitos, proliferación de roedores, ...). Nuevamente el tamaño del núcleo (o núcleos mancomunados) de población va a ser el factor más condicionante. En un caso de suficiente importancia, son factores a considerar los siguientes: topografía, geología e hidrogeología del emplazamiento; material próximo para recubrimiento; características de los residuos sólidos; condiciones climáticas; etc. Además de la selección del lugar, es menester estudiar su acondicionamiento, así como el vertido y tratamiento (compactación mencionada) de los RSU, su disposición en capas y posterior recubrimiento. Para los vertederos controlados de pequeña entidad suele utilizarse el método de zanja con recubrimiento diario, siendo suficiente un tractor-pala en general. En pocas palabras, es necesario un proyecto de ingeniería como introducción a una construcción cuidadosa, que se vea continuada por una utilización eficiente. Existen numerosas Empresas especializadas en el tema, así como una abundantísima bibliografía al respecto.

Actualmente se dispone de una amplia gama de posibilidades que permite una solución ajustada a cada caso real; el diseño de esta solución debe estudiar con detalle la protección de las aguas subterráneas si existen, mediante la adopción de las **precauciones hidrogeológicas** necesarias. Los criterios básicos a observar pueden resumirse en evitar:

- La ubicación del vertedero en proximidad de un acuífero.
- La infiltración del lixiviado producido en el vertedero, cuando el terreno es permeable.
- La llegada del lixiviado infiltrado al manto acuífero.

Ello requiere un estudio suficientemente detallado de la estructura y litología de las formaciones, de las propiedades edafológicas del suelo, de las características del acuífero, etc. como parte fundamental del proyecto de ingeniería relativo a la implantación de un vertedero controlado.

Desde el punto de vista legislativo, la norma más importante es la Ley 42/1975, de 19 de noviembre, sobre desechos y RSU (BOE del 21-XI-1975), (capítulo "Reglamentación Básica").

En ella se considera al ITGE como el Organismo consultor en lo que respecta a los proyectos de vertederos "... cuando las características del proyecto merezcan especial atención ante la posible contaminación de los recursos del subsuelo". Por este motivo el ITGE está elaborando los Mapas de Orientación al vertido de RSU, habiendo comenzado por aquellas zonas cuyos acuíferos presentan elevada vulnerabilidad ante la contaminación.

Estos Mapas permiten la selección a priori de aquellas mejor protegidas, donde las actividades potencialmente contaminadoras no van a afectar directamente a la calidad de las aguas subterráneas aprovechables, indicando también las zonas en las que dichas actividades deben evitarse. La precisión del Mapa depende de la escala de trabajo; es decir que la selección definitiva de un punto concreto de vertido requerirá normalmente, para tener una seguridad razonable, un estudio de detalle específico del lugar elegido.

Los Mapas ya publicados se encuentran a disposición del público interesado.



Contaminación Agrícola

La práctica agrícola comprende numerosas actividades, la mayoría de las cuales inciden sobre el suelo y, en consecuencia, tienen una influencia mayor o menor sobre las aguas subterráneas allí donde éstas poseen una entidad apreciable. En este Capítulo se contemplan someramente aquellas actividades cuya afección ha sido comprobada sobradamente, siempre desde la referencia de la protección de la calidad del agua en los sondeos para abastecimiento humano.

La contaminación se ha detectado a través de un aumento en la concentración de algunos compuestos químicos, principalmente **nitratos** y también aunque en un segundo lugar, nitritos y amoníaco, **biocidas** y elementos extraños. Este aumento, dadas las circunstancias del lugar y la forma en que viene ocurriendo, es debido a las prácticas agrícolas realizadas en el lugar. La información existente permite hablar con seguridad en el caso de los compuestos nitrogenados (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+), y permite plantear hipótesis necesarias en el caso de los biocidas (pesticidas, herbicidas, ...) y elementos extraños (As, Cu, Hg ...).

Los efectos de esta contaminación, **creciente en extensión e intensidad**, provocan la progresiva inutilización del agua subterránea para consumo humano: enfermedades gastrointestinales de gravedad todavía insuficientemente definida han sido asociadas por los investigadores a concentraciones altas de compuestos nitrogenados; la influencia nociva sobre la salud que presentan los biocidas, es obvia; el aumento de la salinidad general del agua conlleva una serie de inconvenientes ya comentados; la amenaza de contaminación microbiana se mantiene con determinados establos; etc.

La situación actual no es fruto del azar. La necesidad de incrementar el potencial agrícola y ganadero ha conducido progresivamente a la fertilización intensiva, al auge de la estabulación ganadera, a la generalización del uso de biocidas, a la creciente puesta en regadío de áreas, etc. Si bien en algunos casos la solución a estos problemas pudiera venir con la abolición del sistema que los genera (hipotético caso del uso de los biocidas), en otros el camino emprendido es claramente irreversible hoy por hoy (aporte de agua y nutrientes al terreno); la solución necesaria tiene que pasar por el estudio detallado para alcanzar una comprensión suficiente de los fenómenos que ocurren, y por la consideración pormenorizada de los diferentes factores intervinientes. Las notas que aquí se presentan pretenden ser una contribución en este sentido.



Figura 11.

Las prácticas agrícolas tienen una influencia, mayor o menor, sobre las aguas subterráneas.

En este tema, el hecho que destaca, con diferencia es el aumento del **contenido en nitratos** (NO_3^-) de las aguas subterráneas en España. Esta afirmación debe ir acompañada de muchas matizaciones: en unas zonas el aumento es rápido y en otras lento; a veces los nitratos están concentrados en la parte superior del manto acuífero, a veces se encuentran también a mayor profundidad; las concentraciones de NO_3^- han alcanzado valores de cientos de mg/l en algunas partes, y en otras se mantienen suficientemente por debajo del límite oficial tolerado en aguas para consumo humano -50 mg/l--; etc.

Sin embargo, en términos generales, puede decirse que la tendencia observada es siempre creciente: donde el contenido en NO_3^- todavía no es alarmante, ni siquiera preocupante, lo será dentro de un tiempo más o menos largo si las cosas siguen como hasta ahora.

El origen de estos nitratos proviene del **uso incorrecto de fertilizantes químicos**. Prácticamente todos estos compuestos: urea, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$; sulfato amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; nitrato amónico, $(\text{NH}_4)\text{NO}_3$; nitrato cálcico, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; carbonato amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$; etc. contienen nitrógeno más o menos directamente asimilable por las plantas, acompañado de otros elementos útiles para su crecimiento. De estos compuestos nitrogenados, el más importante en este caso es el nitrato, NO_3^- , por 2 motivos:

- 1.-La planta lo asimila directamente; en las otras formas son necesarios cambios que tienen lugar en el propio terreno a través de procesos biofísico-químicos, que culminan en la forma más oxidada, NO_3^- .
- 2.-Tiene una gran movilidad a lo largo del terreno; la retención comentada en otro lugar, componente esencial de la capacidad depuradora del propio terreno, es prácticamente inexistente para los nitratos, los cuales son transportados en disolución hasta el manto acuífero.

Se comprende que el tipo de fertilizante comercial que se utilice va a ser determinante, al considerar las pérdidas de nutrientes por percolación hacia el manto acuífero.

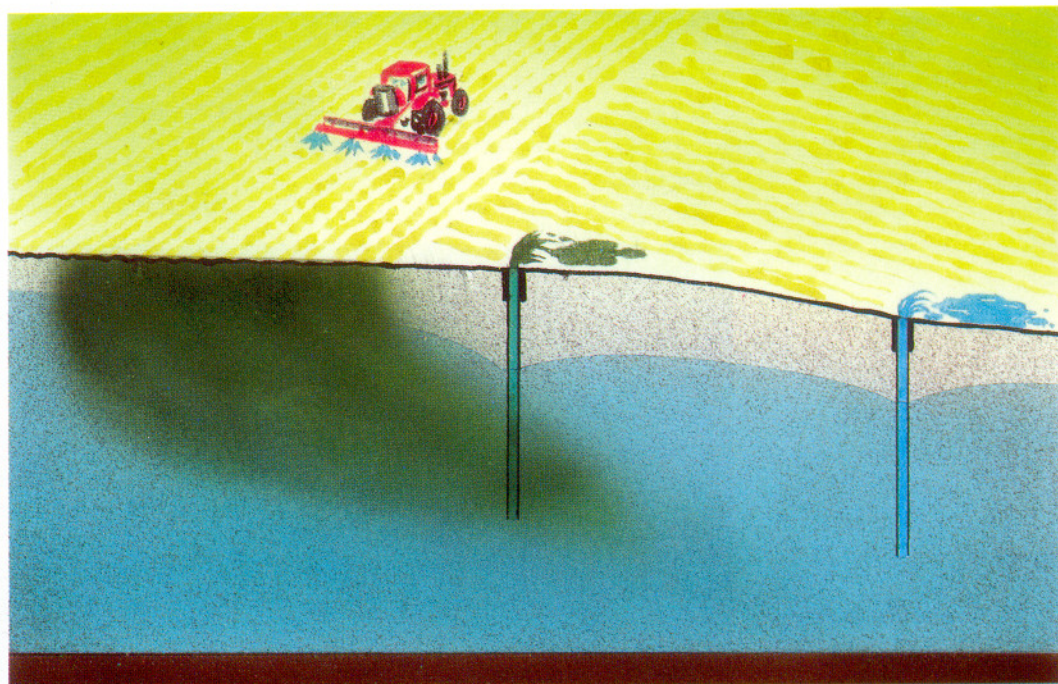


Figura 12.

La contaminación por nitratos se extiende sobre amplias zonas y en magnitud creciente.

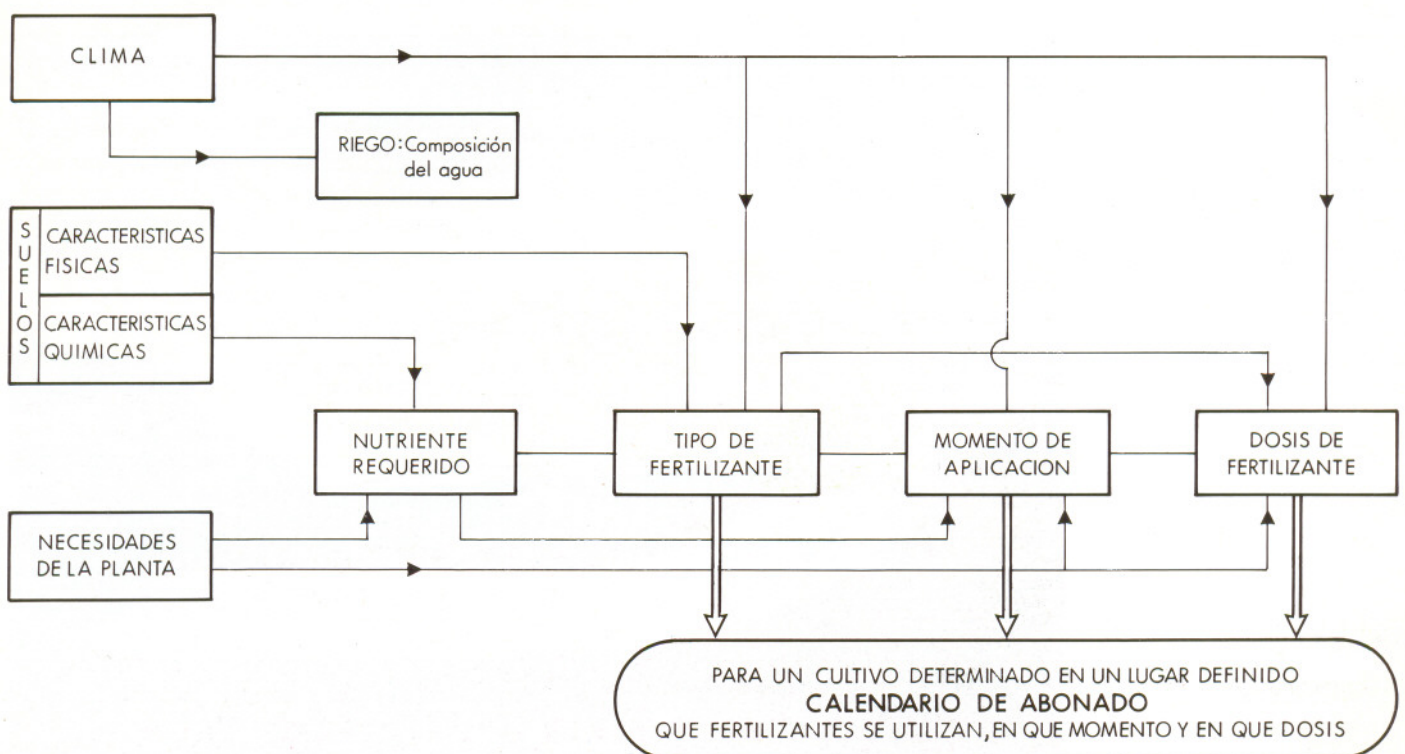
Otros factores que van a condicionar la fracción de fertilizante asimilada por la planta (ver esquema) son:

- * El clima del lugar, a través de la precipitación atmosférica, insolación, humedad, temperatura, ... El aporte artificial de agua (riego) también influye.
- * El suelo, con sus propiedades físicas (textura, permeabilidad, humedad, ...), químicas (acidez, composición, ...) y biológicas (diversidad y densidad de flora y microfauna).
- * Y, fundamentalmente, las necesidades propias de la planta para conseguir un crecimiento óptimo en su entorno.

Del estudio de estos factores se puede deducir qué nutrientes es conveniente aportar artificialmente, en qué momento de la vida de la planta, y qué cantidades en cada momento. El producto comercial a elegir, por su riqueza, composición química y por su forma de presentación —que va a incidir sobre su forma de aplicación al terreno— va a ser otro factor a considerar; esto afectará también al momento óptimo de aplicación del fertilizante seleccionado, en la forma más adecuada y en las dosis mínimas necesarias.

El momento elegido para el riego (la época del año según la climatología, la hora del día, ...), el sistema seguido (a manta, por goteo, aspersion, ...), el volumen y calidad del agua utilizada, son variables que se pueden optimizar en cada caso particular.

FACTORES A CONSIDERAR EN EL USO DE FERTILIZANTES



Cuando el riego se realiza con agua subterránea, siempre es recomendable aprovecharla lo más racionalmente posible, a efectos de conservarla en cantidad y calidad:

- * **En cantidad**, es obvio que un consumo cuidadoso de las aguas subterráneas permite su mejor aprovechamiento, sobre todo en zonas de escasa pluviometría: las aguas subterráneas se desplazan generalmente muy despacio, y a grandes rasgos la que no se consume permanece prácticamente en el terreno de un año para otro.
- * **En calidad**, el agua se degrada con el uso: al regar, una parte es absorbida por la planta y otra, variable según la técnica de riego, se evapora; el resto se infiltra hacia el manto acuífero, constituyendo el "retorno del regadío". Sin embargo, las sales disueltas del agua inicial permanecen prácticamente íntegras en el retorno por lo que al disminuir el volumen de agua —por las pérdidas indicadas (evapotranspiración)—, aumenta su salinidad. A la larga, en zonas con intensos riegos y con poco aporte de agua nueva, el resultado es una creciente salinización del agua subterránea, además de una disminución de sus reservas: menos agua y más salina.

En algunos lugares la escasez de agua puede llevar a un enfrentamiento entre distintas aplicaciones: la agricultura extrae los caudales que necesita sin entrar en consideraciones, ni de cantidad ni de calidad, sobre la influencia que tiene sobre otros usuarios. Este enfrentamiento es particularmente importante en zonas costeras del Mediterráneo, Baleares y Canarias: la extracción intensa de aguas subterráneas provoca un excesivo descenso de los niveles de agua dulce, el cual se ve automáticamente (hidrostáticamente) compensado por una entrada subterránea de agua del mar (**intrusión marina**); la consecuencia es que los pozos no se secan —como ocurre en el interior de la Península—, pero la salinidad del agua extraída aumenta resultando ésta inútil incluso para la agricultura, motivo por el que dichos pozos son abandonados. La necesidad de satisfacer las demandas de agua dulce lleva a realizar nuevos sondeos (a veces en condiciones angustiosas por la premura) un poco más hacia el interior, reproduciéndose la misma situación al cabo de cierto tiempo: el resultado es un **avance de la salinización** del agua subterránea, a veces incluso del suelo agrícola, tierra adentro.



Figura 13.

La sobreexplotación provoca la salinización del agua primero, y del suelo después.

La solución tiene que pasar por una **gestión global** del agua, que contemple las distintas aplicaciones, el potencial hídrico real, las necesidades específicas de cada uso, las posibles mejoras que puedan introducir innovaciones tecnológicas (en dotaciones de riego, en particular), la eventual reutilización de las aguas residuales derivadas de una aplicación (uso urbano) para satisfacer otras aplicaciones (uso agrícola), etc. La planificación hidrológica contemplada en la Legislación reciente, proporciona el marco adecuado para solucionar este complejo problema (Ley de Aguas y desarrollo reglamentario).

El fósforo es otro componente básico utilizado en muchos fertilizantes. Sin embargo, su comportamiento en el terreno es generalmente tal que queda retenido prácticamente en su totalidad; sería necesario un uso extremo de estos compuestos, que saturara la capacidad de fijación del terreno, para que apareciesen concentraciones importantes de fósforo en el agua subterránea. Análogamente ocurre con el potasio.

* * *

En este tema, otro hecho importante a tener en cuenta es la llegada de unas sustancias muy tóxicas a las aguas subterráneas: **los biocidas**, término genérico que comprende todos los productos utilizados en agricultura para eliminar la flora o la fauna considerada inconveniente en los terrenos de cultivo.

En su empeño por incrementar la producción agrícola el agricultor utiliza compuestos químicos que evitan la competencia de otros animales (insecticidas, rodenticidas, etc.) y de otras plantas estimadas indeseables (herbicidas, fungicidas, etc.), reservando toda la capacidad productiva del suelo —reforzada con los fertilizantes— para la cosecha elegida. Dejando de lado, por no ser éste el lugar adecuado, argumentos relativos al necesario respeto hacia el **equilibrio global** que debe regir toda manipulación (artificial) de los procesos de la Naturaleza por parte del hombre, siquiera sea para evitar las correspondientes reacciones que sobrevengan posteriormente, a continuación se considera solamente la protección de la calidad de las aguas subterráneas para el abastecimiento humano.

Los biocidas en general, y los pesticidas en particular, son sustancias **muy tóxicas** que persiguen la muerte de ciertos organismos. Su influencia negativa sobre el organismo humano es variable, dependiente de la concentración de ingestión principalmente, y en general insuficientemente conocida sobre todo en cuanto a sus efectos a largo plazo. A grandes rasgos, los insecticidas son tóxicos tanto para los seres humanos como para los animales —si bien las cantidades letales son obviamente muy distintas al comparar el peso de una persona con el de un insecto—, mientras que la mayoría de los herbicidas sólo son mortales para el hombre en concentraciones relativamente altas.

Sin embargo, hay que tener presentes dos factores adicionales, en este aspecto: la persistencia, variable, de estos productos de síntesis, y su sinergia.

* La **persistencia** proporciona una más larga actividad del producto al mantenerse estable, sin degradación, por lo que su efectividad es mayor, bastando una aplicación espaciada en el tiempo. Esta propiedad, positiva desde el punto de vista agrícola, es negativa desde el punto de vista del abastecimiento cuando el producto alcanza el manto acuífero, en especial si se trata de sustancias que se acumulan en los tejidos humanos (hígado, cerebro, etc.).

* La **sinergia**, o reforzamiento mutuo de la intensidad particular de cada producto por el hecho de actuar simultáneamente, es aún peor conocida, pero no por ello menos inquietante, dada la acción negativa de estos productos sobre los organismos vivos.

No hay que olvidar que estas sustancias son unos venenos potentes pues deben ser capaces de un efecto letal inmediato sobre los organismos a fin de evitar la rápida adaptación de éstos, particularmente en los insectos con períodos de vida muy cortos; las concentraciones a las que resultan indeseables para el hombre son **muy bajas**, a veces están próximas al límite que los aparatos de medida actuales pueden detectar. La Legislación española al respecto -Reglamentación Técnico-Sanitaria para aguas de bebida-- establece como límite máximo tolerable para los plaguicidas y productos similares (que define), las concentraciones de:

- * 0,0001 mg/l por compuesto individual.
- * 0,0005 mg/l en conjunto.

Los análisis químicos que atestiguan la presencia de estas sustancias en las captaciones, son muy escasos; sin embargo, existen.

Son muy escasos por las siguientes razones:

- * Los productos comerciales utilizados son numerosos y además son renovados rápidamente por otros más modernos a causa de razones técnicas y de mercado. El celo de las pocas Empresas (transnacionales) fabricantes de los principios activos protege el secreto comercial, estando registrados los nombres de los productos y siendo reservada su composición química.
- * Para realizar el análisis químico son necesarias técnicas especializadas (capaces de detectar concentraciones tan pequeñas) y experiencia analítica que hagan fiables los resultados: en el momento actual pocos laboratorios en España están en condiciones de realizar estas determinaciones. Por otra parte, el no conocimiento de la composición química junto con las dificultades inherentes a las técnicas de análisis químico de los compuestos orgánicos en general (especialmente a unas concentraciones tan bajas), obliga a requerir del fabricante una muestra de cada una de las sustancias que se pretendan analizar para establecer patrones de referencia en el laboratorio; a veces estos pedidos hay que hacerlos al extranjero, sede de las casas centrales comerciales. Una consecuencia directa es el precio elevado de este tipo de análisis.

A esto hay que añadir la necesidad de utilizar precauciones especiales en la toma de muestras de agua, para estos análisis.

Todos estos inconvenientes explican la escasez de datos numéricos en este apartado. Sin embargo, algunos trabajos llevados a cabo en zonas muy localizadas, con una actividad agrícola muy intensa, indican la presencia en las aguas subterráneas de estos compuestos tóxicos en concentraciones frecuentemente superiores a las toleradas. No obstante, la poca envergadura de estos trabajos impide deducir conclusión alguna.

Una particularidad de estos productos aporta una relativa seguridad frente a su enorme poder contaminador: su estructura molecular —más o menos compleja, con radicales activos y a veces con átomos de metales pesados integrados— presenta unas características muy favorables para ser retenidos por la mayor parte de los terrenos, frenándose así su progresión hacia el manto acuífero. Por otra parte, parece que los fabricantes están introduciendo modificaciones en los nuevos productos de manera, por ejemplo, a garantizar su biodegradabilidad.

En cualquier caso, al afrontar esta amenaza para la calidad de las aguas subterráneas, cabe repetir las recomendaciones hechas líneas arriba sobre **un uso más racional** de los fertilizantes: del estudio de los factores involucrados (lo más extensivo posible), deducir qué biocida es indispensable aportar al terreno, en qué momento, y en qué cantidad. A otros niveles, interesa considerar sistemáticamente la posibilidad de recurrir a otros métodos para obtener los mismos resultados, obviando el uso de los biocidas: mejoras en las prácticas de cultivo, pronta recogida de cosechas, rotación de cosechas, introducción controlada de predadores o patógenos, esterilización de insectos, etc.

La consulta a los Organismos especializados (Cámaras Agrarias, Hermandades de Labradores, etc.) se vuelve indispensable.

* * *

La **actividad ganadera** puede ser otro origen importante de contaminación para las aguas subterráneas, cuando la concentración de animales es grande: es el caso de las granjas porcinas, avícolas, etc. así como de los establos. Naturalmente, en situaciones excepcionales —por ejemplo de manto acuífero muy poco profundo, acuífero de tipo fisurado, pozo de abastecimiento individual muy próximo al vertido— las excretas de un único animal pueden provocar esta contaminación.

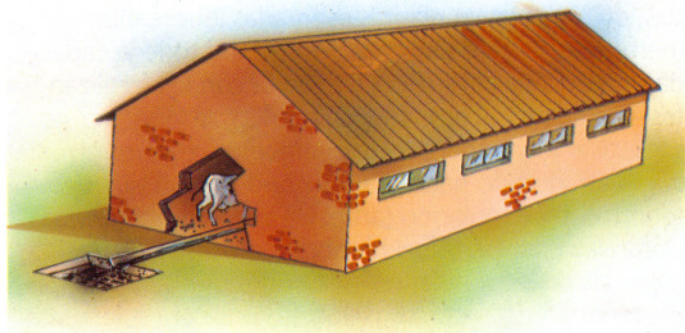


Figura 14. Los residuos de los establos pueden generar contaminaciones puntuales graves.

Los residuos generados en este tipo de instalaciones son voluminosos y concentrados. Existen **tratamientos** para su depuración que, imitando de una manera controlada los procesos que espontáneamente ocurren en la Naturaleza, transforman estos residuos malolientes y contaminantes en un líquido más o menos descontaminado, inerte, según las necesidades; esta materia resultante contiene interesantes propiedades fertilizantes, y puede ser prácticamente inodora. Un subproducto de estos tratamientos es gas combustible que puede utilizarse para calentar la instalación ganadera, o para otros usos.

La contrapartida de estas ventajas reside en la obligación de dar un mantenimiento cuidadoso a los equipos de tratamiento, además del coste inicial de las instalaciones.

En general se obvia este tratamiento y los residuos son vertidos al terreno directamente. Interesa tener en cuenta entonces las siguientes **recomendaciones**, entre otras:

- * Nunca se deben verter los residuos a un pozo, natural o artificial, porque entonces se introducen directamente al acuífero.
- * La superficie de terreno sobre la que se esparzan los residuos deberá ser suficiente para que la infiltración que se produzca no alcance al manto acuífero.
- * Las áreas de almacenamiento de residuos estarán protegidas del drenaje superficial y acondicionadas para evitar su infiltración en el subsuelo.
- * Es recomendable la aplicación de estos residuos como fertilizantes y mejoradores del suelo agrícola, aplicando las dosis convenientes —según el cultivo, suelo, clima, etc.—; las tierras de labor se voltearán tan pronto acabe la aplicación.

Es de destacar el hecho de que la contaminación que estos residuos pueden originar, en mayor medida que los urbanos, comprende dos vertientes: la química, por su contenido en compuestos indeseables en el agua, y sobre todo la biológica, por los microorganismos presentes. Así, no es indispensable que un animal ofrezca síntomas de enfermedad para que en sus excretas se encuentren gérmenes patógenos para el hombre en concentraciones peligrosas.

Ambas vertientes desaparecen prácticamente al cabo de un tiempo mediante un vertido correcto al terreno (mecanismos de autodepuración natural comentados en otro lugar), sobre todo en lugares soleados, o bien más rápida y costosamente mediante una depuradora.

* * *

En otros capítulos de estas notas se ha comentado la posibilidad, o conveniencia según los casos, de aprovechar diversos residuos mediante su **utilización en agricultura**; esta aplicación, en su esencia, es tan antigua como la propia actividad agrícola. A continuación se expone una somera recapitulación de este asunto, por su importancia práctica, enfocada desde la óptica de la protección de la calidad de las aguas subterráneas para abastecimiento.

La aplicación beneficiosa al suelo puede extenderse a aquellos residuos líquidos y sólidos de origen urbano, agrícola e industrial, que le aporten sustancias útiles; muy destacadamente, el agua. Por otra parte supone un método de eliminación controlada de residuos, evitándose de esta manera el problema de contaminación del ambiente. En algunos casos, como el de las zonas con apreciable índice de aridez, el balance puede ser muy favorable; de hecho, ya lo es en varios lugares.

Estas importantes ventajas conllevan evidentemente unos riesgos o inconvenientes que es preciso —y posible— controlar. En relación con las **aguas residuales**, destacan:

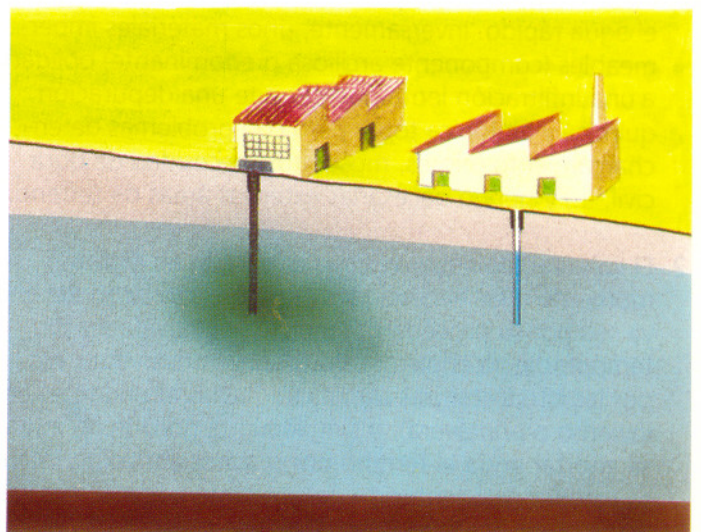


Figura 15. Nunca se deben verter los residuos a un pozo.

1.-El riesgo sanitario, el más sobresaliente; comporta dos vertientes. Por un lado, la posible transmisión de los eventuales gérmenes patógenos en las aguas residuales humanas o animales, requiere una selección de los cultivos posibles, eliminando aquellos que estén en contacto directo con el agua de riego y que sean de consumo directo (hortalizas en particular). Los cultivos industriales (algodón, lino, etc.) serían los más idóneos; también son directamente aceptables aquellos cuyos productos vayan después a ser adecuadamente procesados (remolacha azucarera, uva para obtención de alcohol, etc.). Una solución particular corresponde a los denominados "filtros verdes", donde el cultivo empleado es una plantación forestal para producción de madera, que obvia estos problemas incluso usando aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento previo; esta solución viene detalladamente descrita en la publicación de la Dirección General de Obras Hidráulicas (MOPU): "Recomendaciones para la redacción del Informe Técnico Previo para Depuración de Aguas Residuales por Aplicación al terreno (Filtro Verde)" especialmente recomendada para poblaciones de hasta 25.000 habitantes.

Por otro lado, la protección de la calidad de las aguas subterráneas exige la elección de un terreno que reúna ciertas condiciones, en especial suficiente profundidad del nivel de agua y distancia prudente al punto de abastecimiento, variables según la naturaleza del acuífero y según las características de la aplicación del residuo. Así, unos materiales muy permeables (roca muy fisurada, carstificada) permiten una infiltración rápida, con una retención débil de los sólidos en suspensión, acompañada de un tiempo de contacto agua-roca breve: las reacciones de depuración natural no alcanzan a culminarse, por lo que la llegada de contaminantes al manto acuífero es importante y su desplazamiento con el agua rápido. Inversamente, unos materiales impermeables (componente arcillosa predominante) obligan a una infiltración lenta que permite una depuración química y biológica total, pero con problemas de encharcamiento (olores, mosquitos, necesidad de obra civil, ...) y siendo necesarias extensas áreas de terreno.

2.-El volumen de aguas residuales excede en algún momento a las necesidades agrícolas a lo largo del año, ya sea por su procedencia industrial (actividades de temporada: alcoholeras, almazaras, conserveras, etc.), por las circunstancias climáticas (lluvias abundantes en invierno o primavera), o simplemente porque no interesa aportar agua al terreno por razones agrícolas. Interesa estudiar la orientación del sobrante hacia la recarga artificial del acuífero, técnica que se comenta en el capítulo de "Protección de las Aguas Subterráneas".

3.-Las aguas residuales industriales pueden aportar sustancias —metales pesados, compuestos tóxicos, etc.— en concentraciones tales que hagan a estas aguas indeseables para el desarrollo vegetal, y peligrosas para las subterráneas: un tratamiento previo es indispensable.

Frecuentemente suele ser necesario el tratamiento de las aguas residuales de cualquiera procedencia, previo a su aplicación al terreno; ocurre que el tratamiento en este caso es siempre menos costoso (por ser menos exigente) que el necesario en caso de verter las aguas a otro lugar, salvo situaciones particulares. El grado de depuración necesario a obtener en la planta de tratamiento viene determinado por los distintos factores expuestos líneas arriba, y especialmente por la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

De una forma semejante, el tratamiento debido a los **residuos sólidos** —formación de compost, acondicionamiento de los residuos sólidos industriales, aprovechamiento de los forestales o agrícolas— requiere ser estudiado cuidadosamente antes de su puesta en práctica. La ubicación, el tamaño y el tipo de la planta de compostaje debe considerar la naturaleza y volumen de los residuos, y su transporte económico, así como la selección de terrenos adecuados (protección de acuíferos), y el mercado potencial; el producto obtenido debe ser de una calidad buena que facilite su comercialización, no exenta de dificultades en un principio. El proyecto de una planta de compostaje debe considerar la conveniencia de integrar otros residuos sólidos: agrícolas (restos de cosechas, desechos ganaderos, ...) o forestales (limpieza de montes, ...), así como industriales (almazaras, tratamiento de la uva, ...). Inversamente, es interesante considerar otras alternativas posibles para estos residuos: elaboración de briquetas combustibles, recuperación de material, ...

La eventual mancomunidad de varios Municipios es una posibilidad a estudiar siempre detenidamente, por las sustanciosas ventajas que proporciona.

Como resumen final, conviene destacar el interés de considerar el conjunto de estas actividades dentro de un **planteamiento global**: una gestión integral de los residuos líquidos y sólidos, conjunta o separadamente, de una zona es la manera más eficaz de abordar la problemática que plantean. Este aspecto se comentará más adelante (Protección de las Aguas Subterráneas).

Aquí interesa subrayar la necesidad de realizar los proyectos técnicos adecuados, con el asesoramiento oportuno de los Organismos competentes respectivos, para la correcta ejecución de las medidas elegidas; y como uno de sus capítulos más básicos a considerar desde el primer momento, figura el relativo a la protección de la calidad de las aguas subterráneas, particularmente en las captaciones para abastecimiento humano, materializado en el correspondiente estudio hidrogeológico.



Contaminación Industrial

La actividad industrial puede suponer una amenaza para la calidad de las aguas subterráneas, especialmente las dedicadas al abastecimiento humano. Es difícil hablar en general del potencial contaminante, o de la carga contaminante, de las fábricas porque cada una es un caso particular: el proceso de fabricación, el volumen de producción, la situación de la planta, la antigüedad de los equipos, ... incluso el interés o conocimiento del jefe de mantenimiento por estos temas, son algunos de los numerosos factores que van a incidir sobre la capacidad de contaminación de una fábrica.

No obstante, los mecanismos de este tipo de contaminación se ajustan a un cuadro general: los desechos (aguas residuales, residuos sólidos, y a veces los humos también) constituyen el factor predominante, sin olvidar el almacenamiento y transporte de sustancias.

Las **aguas de salida** de una fábrica suelen ser el vehículo de arrastre de todos los desechos de pequeño tamaño, y de los líquidos inútiles. Su composición es enormemente variable, según los casos; incluso en una misma fábrica, la composición de una muestra tomada en su colector de salida depende del momento en que se haga: de aquí que sea necesaria una atención esmeradamente estudiada cuando se pretenda tomar una muestra representativa de las aguas residuales de una fábrica. En la bibliografía se encuentran órdenes de magnitud orientativos para distintos casos de efluentes industriales, pero que resultan de escasa utilidad al ir a la práctica concreta de unas instalaciones determinadas.

Por otro lado, la mezcla de tan diferentes y variadas sustancias dificulta la realización de su análisis químico, especialmente cuando los compuestos que se investigan son inestables y se descomponen fácilmente. Una consecuencia inmediata es que el precio del análisis de una muestra de aguas residuales industriales es elevado, además de escasear los laboratorios capaces de realizarlo.

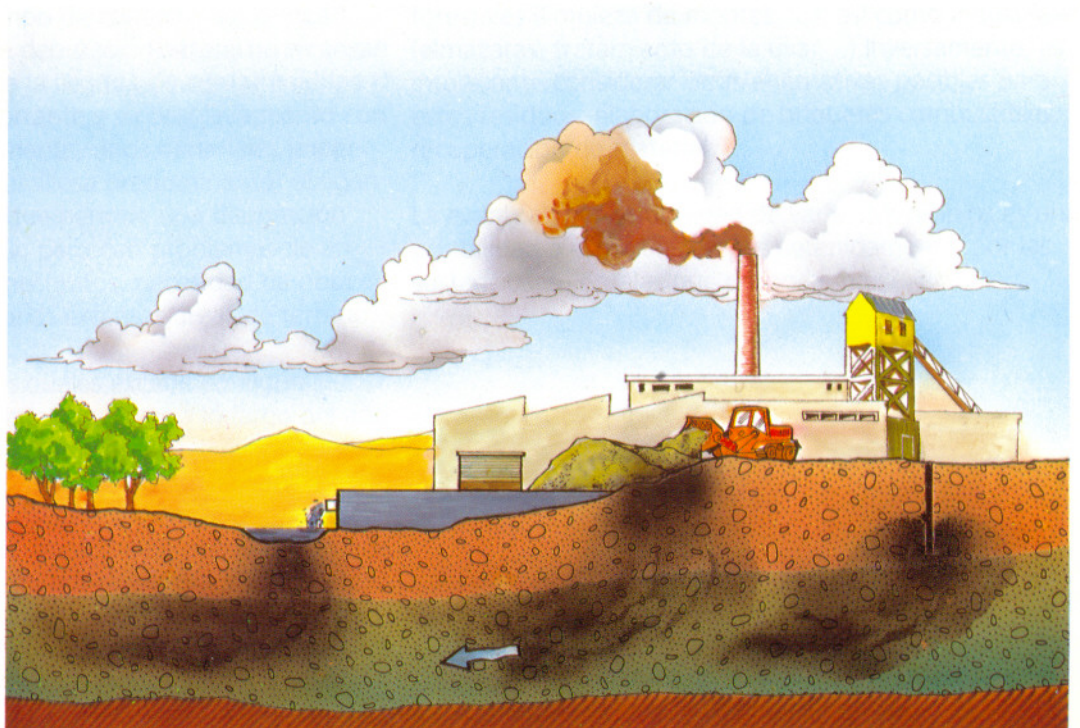


Figura 16.

La actividad industrial puede contaminar los acuíferos de muy diversas maneras.

En la práctica, se recurre con frecuencia a determinar unos parámetros químicos globalizadores, siendo los más importantes:

- * La **conductividad eléctrica**, expresada en microsiemens por centímetro (microS/cm) o micromhos por centímetro (micromho/cm); representa una forma operativa de medir la salinidad del agua. Es proporcional al Residuo Seco (RS), o al Total de Sólidos Disueltos (TSD), ya comentados.
- * Los **Sólidos en Suspensión** (SS), expresados en mg/l, representan la cantidad de materia que puede ser separada mediante una decantación, que es el tratamiento habitualmente más barato y que forma parte de cualquier depuración, en general.
- * La **Demanda Química de Oxígeno** (DQO), expresada en mg de oxígeno por litro de muestra, representa el contenido en sustancias degradables más o menos fácilmente, o materia orgánica en sentido corriente. Se comentó en el capítulo de Contaminación Urbana.
- * El **Carbono Orgánico Total** (COT), expresado en mg/l, representa el contenido en sustancias hidrocarbonadas; es de interés en vertidos de industrias de tipo químico-orgánico.
- * El **contenido en grasas o aceites**, expresado en mg/l, representa la cantidad de estas sustancias —sin especificar su naturaleza— que a veces se complementa con el contenido en aceites solubles.
- * **pH**, expresado en unidades propias entre 0 y 14, indica la acidez del agua —cuando su valor es inferior a 7—, o su alcalinidad (causticidad) - cuando su valor es superior a 7.

También puede interesar conocer el contenido del agua residual en elementos como el hierro (Fe), cobre (Cu), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cinc (Zn), etc., denominados "**metales pesados**". Su importancia estriba en su carácter tóxico incluso a bajas concentraciones; la RTS especifica las concentraciones máximas admitidas en las aguas de bebida, para los metales pesados más frecuentes. Estos elementos tóxicos afectan también a los microorganismos cuya actividad constituye el fundamento de las instalaciones que tratan la materia orgánica, como ocurre en las depuradoras (de fangos activos) de las aguas residuales urbana; así, una llegada repentina de estos contaminantes en concentración suficientemente alta a una depuradora de este tipo provoca la destrucción de estos microorganismos: la instalación pierde su capacidad depuradora. Será necesario limpiarla y volver a realizar su puesta en marcha, larga y delicada, para recuperar su funcionamiento normal.

Este es uno de los motivos por los cuales es importante que el vertido de una fábrica a los colectores urbanos se ajuste a las normas que están establecidas, y que generalmente requerirán un tratamiento previo —especialmente en este caso de metales pesados— que los separe del agua residual antes de su vertido al colector general. Este tratamiento previo, de tipo físico-químico, suele dar lugar a unos residuos sólidos que deberán ser depositados en un lugar adecuado.

El vertido indiscriminado al terreno de estas aguas residuales, o de los derivados residuos sólidos, puede causar la contaminación de las aguas subterráneas: los metales pesados —que no se destruyen nunca— se infiltran en el terreno, ya sea directamente en el caso de las aguas residuales, o a través del lixiviado que produce la lluvia o el propio rezume en el caso de los residuos sólidos. Según la capacidad de retención que presente el terreno particular considerado, estos metales quedarán retenidos a lo largo de su camino hacia el manto acuífero, o no. En este último caso, las aguas subterráneas serán contaminadas.

El **peligro** se ve agudizado en extremo si estos residuos son introducidos en un pozo, o inyectados mediante una bomba en un sondeo, como solución irresponsable o inconsciente para deshacerse de ellos: los contaminantes pasan directa e íntegramente al acuífero. Solamente la capacidad de dilución de las aguas subterráneas atenuará sus efectos.

Análogas consideraciones pueden hacerse para multitud de residuos de tipo orgánico (fabricación de biocidas, compuestos orgánicos de síntesis, residuos de industrias químicas, etc.). La cloración del agua captada, único tratamiento prácticamente general en todos los abastecimientos urbanos de España, si bien es eficaz (cuando está bien hecha) para eliminar el peligro bacteriológico, en el caso de estos compuestos orgánicos puede suponer un aumento del peligro. Investigaciones de laboratorio han probado que el cloro puede reaccionar químicamente con compuestos orgánicos sintéticos —existentes en numerosos vertidos industriales— dando lugar a nuevas sustancias que son más nocivas que las primitivas; esto puede ocurrir incluso a concentraciones muy bajas (microcontaminantes), por lo que la protección aportada por la dilución se ve fuertemente disminuida. En el caso de los metales pesados, la cloración únicamente puede empeorar las cosas, al volverse más “activos” algunos de ellos.

Una vez más, la solución más adecuada desde diferentes puntos de vista, reside en evitar la llegada de estas sustancias al manto acuífero.

* * *

Una vía para reducir el poder contaminante de las aguas residuales industriales hasta un límite suficiente, según se ha indicado anteriormente, consiste en someterlas a un **tratamiento de depuración**. Tratar un agua de composición conocida es transformar algunas de sus características físico-químicas y/o biológicas, consiguiendo así que alcancen el límite suficiente previsto.

La tecnología de la depuración del agua está bastante desarrollada como para poder abordar cualquier caso; el problema que frecuentemente se presenta es el del coste —a veces muy elevado— que supone la instalación y el mantenimiento de la planta de tratamiento. Otras veces, sin embargo, la necesaria depuración es clara y fácilmente aplicable.

Al considerar el proyecto de tratar las aguas residuales de una fábrica determinada, es muy conveniente hacer un planteamiento serio desde el principio pues el resultado final lo merece, y sobre éste van a influir directamente los factores siguientes:

1.- **Las bases de partida:** caudal y composición. Se ha indicado líneas arriba que para tratar un agua residual hay que empezar por saber qué es lo que hay que tratar; o sea, hay que conocer su composición. También se comentó la atención esmeradamente estudiada que era necesaria en la toma de muestras, paso primero para realizar después el análisis químico. Se recuerda igualmente la necesidad de elegir un laboratorio competente para realizar ese análisis que comprenderá la determinación de los parámetros oportunos, según el tipo de fábrica que se considere.

El caudal es quizás el parámetro más importante: el dimensionado de los equipos que se decidan depende de él, así como la cantidad necesaria de reactivos (aspecto importante) para el buen funcionamiento de la planta: reactivos químicos, energía eléctrica, etc.; también el volumen de residuos —generalmente sólidos— que esta planta genere vendrá influido por él.

Si la fábrica presenta cierta complejidad en su circuito de agua, es interesante estudiar los diferentes usos que el agua recibe, por separado: diversos procesos dentro de la fabricación, refrigeración, lavado, calderas, etc., ya que esto posibilitará después tratamientos parciales muy ajustados (luego más eficientes y económicos) y favorecerá la recirculación y el reuso del agua dentro del recinto fabril, aspecto cuya importancia se comentará más adelante.

O sea es deseable conocer el caudal de agua a tratar y su composición, en todo momento y en los diversos puntos críticos de la fábrica. Evidentemente un dato importante a considerar y comentar suficientemente con los responsables de la fábrica, consiste en la eventual modificación de parte de las instalaciones: sustitución de algún equipo, o incluso proceso, total o parcialmente, por estar obsoleto; previsibles ampliaciones o modificaciones en la producción; etc.

La realización de este estudio previo requiere ya un desembolso apreciable. Es sin embargo el camino para poder diseñar los equipos necesarios con el mayor ajuste posible, luego con la mayor eficiencia y economía. Es una inversión rentable.

2.-**El diseño de los equipos** para el tratamiento se hará teniendo en cuenta que su construcción y entrada en funcionamiento ocurrirá en sucesivas etapas: no es infrecuente el hecho de que una depuración no se acometa por su elevado coste, mientras que sí sería asequible un tratamiento parcial; posteriormente podría irse completando, por partes. El conocimiento en detalle de las bases de partida (caudal, composición) expuestas anteriormente permitirá un planteamiento lo más adecuado posible a la realidad de cada lugar.

Existen casos en que el poder contaminante de las aguas residuales industriales es de un tipo parecido al de las aguas residuales urbanas; entonces es muy interesante (económica y técnicamente) considerar su tratamiento conjunto. Aquí también, el conocimiento detallado de caudales y composiciones ayuda sustancialmente.

Antes de pasar a la fase de ejecución, interesa que el proyecto contemple una garantía adecuada del buen funcionamiento de las instalaciones, con una descripción suficiente de las operaciones de mantenimiento acompañadas de una evaluación de su coste. Un aspecto de gran interés práctico es que el técnico que estará en el futuro al cargo del buen funcionamiento de la(s) depuradora(s), se encuentre presente en todas estas fases: estudio, diseño, ejecución, puesta en marcha.

El asesoramiento por Organismos de la Administración puede ser oportuno.

3.-**Recirculación. Reutilización.** Siempre interesa considerar la posibilidad de estas actuaciones por su conveniencia. Aprovechar una gran parte de las aguas residuales producidas —con el tratamiento específico oportuno— para el abastecimiento de la propia fábrica supone dos importantes ventajas:

* Se reduce en su volumen —con el consiguiente ahorro económico— la cantidad de agua del abastecimiento, ya sea exterior (red de distribución, captación de un curso de agua superficial) o interior (extracción de agua subterránea), reservándola para un uso más noble. La gestión integral del agua, bien cada vez más escaso, destaca progresivamente este aspecto.

* Se reduce el caudal de agua residual última, facilitando su tratamiento anterior al vertido último.

La recirculación dentro del recinto fabril debe estudiarse para cada proceso, por razones técnicas que tienen su reflejo económico: a veces un tratamiento sencillo permite usar el agua residual de un proceso como agua de aporte para otro; incluso considerando cada proceso aisladamente, con frecuencia el agua saliente sólo se diferencia de la entrante en que tiene una concentración mayor en algunas pocas sustancias: su reducción al límite aceptable para el buen funcionamiento del proceso es suficiente para recircular el agua. Un ejemplo típico es el enfriamiento del agua de refrigeración, consiguiendo trabajar en circuito cerrado prácticamente.

Normalmente será difícil volver a utilizar en una fábrica la totalidad de sus aguas residuales; el efluente, según los casos y después de pasar por una planta de tratamiento diseñada con este fin, puede ser útil para el riego agrícola: fábricas que trabajan con productos naturales (centrales lecheras, conserveras, alcoholeras, etc.) y que habitualmente consumen caudales de agua relativamente importantes, pueden encontrar una interesante alternativa —total o parcial— para sus aguas residuales últimas a través de este riego. Análogamente conviene estudiar la viabilidad de una adaptación del sistema "filtro verde" (ver capítulo de "Contaminación Agrícola") para aguas residuales industriales suficientemente tratadas.

Las diversas posibilidades son múltiples; su común denominador, aprovechar lo que tengan de utilizable las aguas residuales. Se consigue así, entre otras ventajas, proteger el agua natural, y en particular la subterránea.

Aparte de los vertidos residuales, las instalaciones fabriles pueden contaminar los acuíferos mediante otros mecanismos que suponen a la postre una penetración de compuestos extraños hacia el manto acuífero. Si bien de menor importancia global que en el caso de los vertidos —salvo casos excepcionales— el almacenamiento y transporte de sustancias industriales merece una atención desde la óptica de la protección de las aguas subterráneas, en el momento del diseño de los equipos de una fábrica y de su implantación, así como a lo largo de su mantenimiento.

El **almacenamiento de líquidos** requiere medidas para evitar fugas en los depósitos, especialmente si están enterrados, escondidos a la vista; igual ocurre con su transporte por tuberías. El derrame de un líquido insalubre, nocivo o peligroso, ocasionado por un accidente en su **transporte** por carretera o ferrocarril, debe relacionarse inmediatamente con la proximidad de eventuales sondeos de abastecimiento, para tomar las oportunas medidas efectivas en cada caso.

Los grandes **depósitos de sólidos** en la industria, ya sean residuos o materia prima, tienen un comportamiento semejante al de los vertederos de basuras (ver el capítulo "Residuos sólidos urbanos") con el agravante de que el lixiviado ahora puede ser mucho más peligroso. Noticias aparecidas en los periódicos en los últimos años dan cuenta de algunos casos relevantes en Europa y Estados Unidos: las emanaciones gaseosas y la contaminación subterránea derivadas del enterramiento incorrecto de residuos sólidos industriales 30 años antes, han obligado a evacuar algún poblado que se asentó sobre ellos, o que se encontraba muy próximo.

Cuando no se toman las medidas oportunas, incluso los humos emitidos por diversas fábricas —aparentemente tan extraños y alejados de los acuíferos— contribuyen en algunos casos a la degradación de la calidad de las aguas subterráneas: las precipitaciones atmosféricas arrastran y disuelven las partículas en suspensión y gran parte de los gases que constituyen dichos humos; las partículas más pesadas se depositan en el entorno de la fábrica (cementerías, por ejemplo). Las sustancias disueltas o en suspensión acompañan al agua al caer a la tierra, y a lo largo de su infiltración camino del manto acuífero. Los óxidos de nitrógeno, carbono y particularmente azufre, confieren al agua un carácter ácido (lluvias ácidas) el cual, además de los daños que provoca a la flora y fauna, aumenta el poder de disolución del agua a lo largo de su percolación o el terreno, con lo que su contenido en sólidos disueltos (TSD) se ve incrementado.

Como conclusión, en respuesta a la incidencia que puede tener la actividad industrial sobre la calidad de las aguas subterráneas, se insiste sobre la oportunidad de realizar un estudio hidrogeológico, y ello de una manera sistemática, además de tomar las medidas preventivas de tipo general: fugas, accidentes, roturas, etc., y de cumplir con la Legislación vigente.

Obviamente, interesa que dicho estudio se realice desde los primeros momentos en la concepción de la instalación fabril; entonces pueden integrarse las medidas necesarias más cómoda y económicamente, dentro del diseño general.

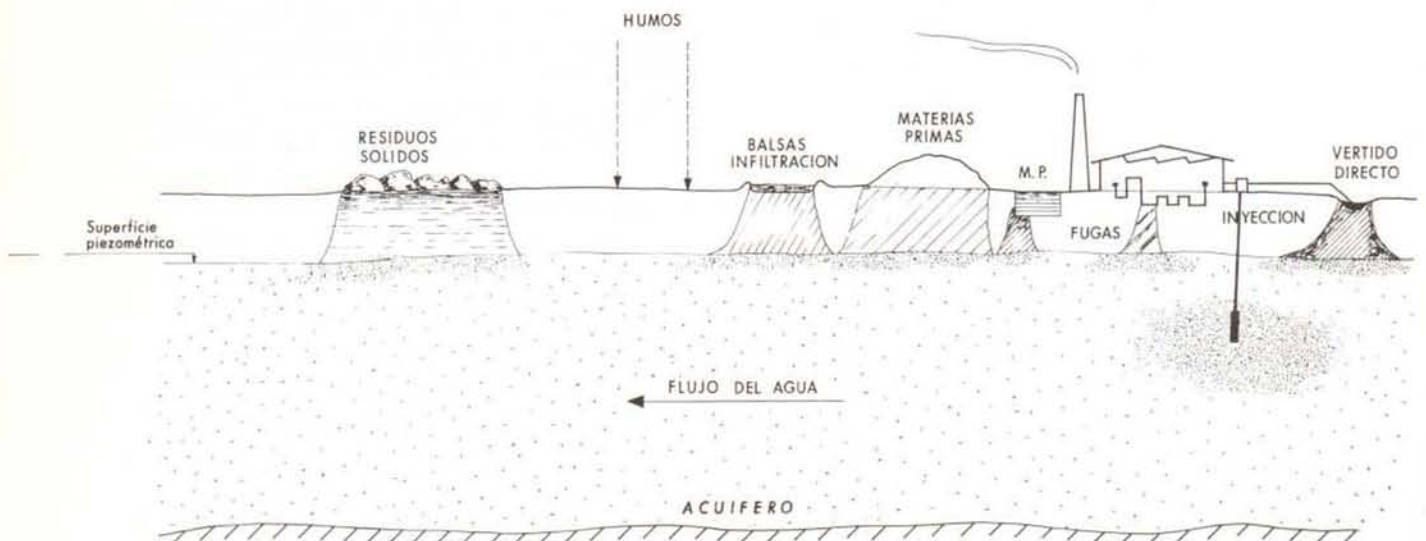


Figura 17. Posible incidencia de las actividades industriales sobre la calidad de las aguas subterráneas.

Cuando la fábrica ya está en funcionamiento, también interesa llevar a cabo el estudio, toda vez que se esté realizando —o se prevea realizar— algún vertido al terreno. La vigente Ley de Aguas así lo exige cuando existan aguas subterráneas susceptibles de ser contaminadas.

La única manera operativa de luchar contra la contaminación de las aguas subterráneas, garantizando su uso —en particular el abastecimiento a núcleos urbanos— reside en evitar dicha contaminación, adoptando las medidas preventivas oportunas.



Protección de las Aguas Subterráneas

La protección de la calidad de las aguas subterráneas para abastecimiento humano adopta muy diversas formas, según las circunstancias del caso concreto, tal y como se ha ido presentando resumidamente en los capítulos anteriores, y se recoge seguidamente.

Partiendo de lo más inmediato en el tiempo y en el espacio, se indican medidas a tomar en cuanto a la protección del sondeo de abastecimiento y de su entorno. A continuación, se exponen unas consideraciones relativas a la protección, o recuperación, del agua subterránea con calidad en degradación. Por último, se comentan las recomendaciones más destacables para proteger los acuíferos de los potenciales focos contaminadores.

La **protección del sondeo** de abastecimiento comprende dos temas diferentes:

1.-**Protección en la propia obra.** En primer lugar están las precauciones elementales que eviten la entrada de sustancias de cualquier tipo por la boca del sondeo, el cuello del pozo, el engrase del grupo motobomba, etc. La protección habitual que se realiza mediante recinto cerrado (caseta), cabezal del sondeo, cementación de los primeros metros de la obra, etc. debe ser efectiva y comprobada en lo posible con regularidad.

Una cementación más profunda de las paredes del entubado, correctamente ejecutada y que comprenda algunas decenas de metros en principio, garantiza la no captación inmediata de aguas someras predominantemente; esto debe hacerse siempre, ya que estas aguas son susceptibles de una mayor contaminación. En los sondeos que estén ya en explotación, y en aquéllos que se realicen en el futuro con mayor motivo, la **cementación** debe ser definida en un capítulo específico del proyecto hidrogeológico correspondiente: no es infrecuente que una perforación atraviese distintos acuíferos con agua de muy diferente calidad, teniendo que cementar el tramo correspondiente a aquéllos que aporten un agua de mala calidad.

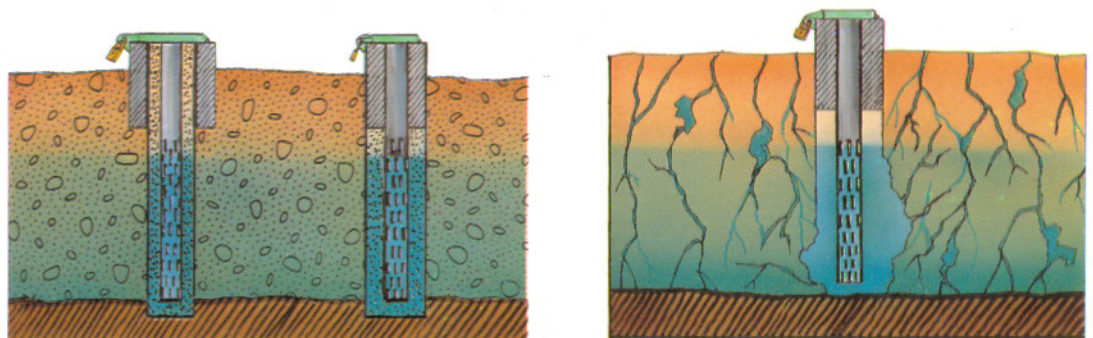
En ocasiones esta mala calidad se presenta progresivamente con la profundidad: se cementará entonces el fondo de la perforación, situando la bomba a una profundidad adecuada. Un caso particular reside en los sondeos próximos al mar, o a un cauce que se pueda considerar con agua no deseable: el estudio hidrogeológico debe prever las características del sondeo para garantizar la calidad del agua extraída. Frecuentemente esto tiene que venir considerado dentro del consumo global del agua en la zona, tema que se comenta más adelante.

En resumen, la ubicación y características del sondeo deben ser consecuencia de un estudio hidrogeológico competente, y la ejecución de la obra -realizada por profesionales experimentados- consecuente con dicho estudio. En los sondeos con calidad mediocre ya en explotación, puede interesar su reacondicionamiento, si así lo aconseja un estudio técnico específico.

2.-**Protección del entorno de la captación.** La velocidad de circulación natural del agua subterránea aumenta en las proximidades del sondeo, durante la extracción; para un hipotético contaminante que se infiltrara cerca del sondeo (piénsese en el escape inadvertido de una cisterna con aguas residuales industriales tóxicas), el tiempo de retención en el subsuelo es menor, a veces muy breve, así como las posibilidades de dilución y en general de autodepuración: el entorno de la captación requiere una protección cuidada. Esto se realiza con la implantación de un eficaz "perímetro de protección del sondeo para abastecimiento", que garantice los dos aspectos: cantidad y calidad del agua extraída, pues ambos son interdependientes frecuentemente.

Fig 18.

Los sondeos siempre deben estar protegidos, sobre todo al abandonarlos.



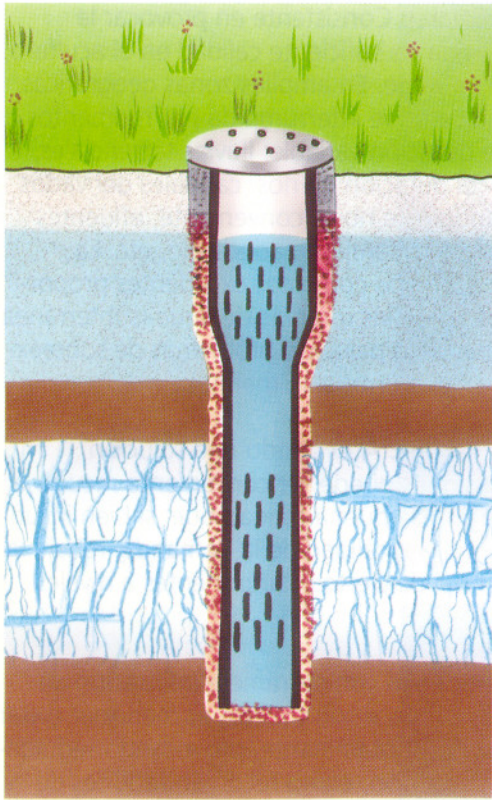


Figura 19. Los sondeos de abastecimiento tendrán una impermeabilización vertical (cementación) adecuada.

* **El perímetro de protección de cantidad** se basa, además de en las necesidades del abastecimiento en sí, en criterios hidrodinámicos que consideran las características hidrogeológicas del acuífero, sus posibilidades hídricas, la influencia de
—o sobre— otros bombeos, las particularidades de estos bombeos, etc.

* **El perímetro de protección de la calidad**, además de los criterios anteriores considera los posibles contaminantes que una actividad determinada puede introducir en el subsuelo, su previsible evolución durante la percolación, así como el tiempo que tardarían en llegar hasta el sondeo. Se definen entonces unas zonas alrededor del sondeo, de extensión distinta para cada caso, con unas limitaciones para las actividades que se sitúen en cada zona, que a grandes rasgos consisten en lo siguiente:

- Zona inmediata al sondeo: no se permite ninguna actividad.
- Zona próxima: Las actividades se distribuyen en prohibidas, reglamentadas o autorizadas.

- Zona lejana: Análoga a la anterior, con criterios menos exigentes.
- Zona remota: Comprende el resto del terreno, con eventual influencia sobre el sondeo (área de alimentación).

Cuando alguna actividad no adecuada ya está instalada, se indica el posible riesgo de contaminación existente, así como los índices a través de los cuales se puede detectar.

La **vigilancia sistemática** del agua extraída, mediante el seguimiento de los resultados de los análisis químicos, puede indicar un empeoramiento de su calidad. Las actuaciones a adoptar vendrán determinadas por las características de esta degradación y por la naturaleza de la causa que está en su origen. Se comentan a continuación **algunas alternativas** disponibles, según los casos:

* **Reprofundización del sondeo:** A menudo los contaminantes --particularmente nitratos-- se encuentran en mayor proporción en la parte superior del manto acuífero. Como solución transitoria, mientras se adoptan las medidas que corrijan la contaminación en su origen, puede interesar situar el grupo motobomba a mayor profundidad para captar niveles de agua de composición aceptable; la cementación de las paredes del sondeo en la profundidad suficiente, contribuye a una menor o nula influencia de las aguas subterráneas superiores, que se pretende evitar. El estudio hidrogeológico de futuros sondeos para abastecimiento urbano debe considerar estas eventuales medidas de protección, sobre todo cuando se trate de zonas vulnerables con actividades contaminantes en superficie.

* **Reasignación de usos:** Puede ocurrir que un sondeo esté proporcionando agua (de una calidad muy buena) para regadío, mientras que la correspondiente al abastecimiento urbano presenta concentraciones excesivas en algún(os) elemento(s): el cultivo agrícola no se vería dañado por estas concentraciones --incluso a veces supondría una mejora (nitratos, calcio, potasio, etc.)-- con una permuta de los usos de ambos sondeos, y el abastecimiento daría solución a su problema. Naturalmente, un estudio técnico tendría que garantizar estas circunstancias.

Cuando la (re)distribución del agua está por ejecutar (transvases, explotaciones nuevas de acuíferos, etc.), los planes hidráulicos consideran para su gestión integral la calidad del agua como uno de los parámetros básicos que determinan su uso presente y futuro, reservando la de mejor calidad en la medida de lo posible para el consumo humano, particularmente en las zonas donde los recursos son escasos.

Cabe en este lugar recordar el doble interés en estudiar una posible reutilización de aguas residuales, especialmente para regadío: al aprovechamiento beneficioso de unos compuestos anteriormente causantes de contaminación, se añade el ahorro de un caudal de agua importante —a menudo de buena calidad— sustituido por las aguas residuales. También hay que recordar la exigencia de un estudio técnico que garantice el buen funcionamiento e inocuidad del sistema.

El planteamiento relativo al aprovechamiento de residuos, por su doble interés, conviene hacerlo extensivo también a los residuos sólidos, según se comentó en su lugar: compost, vidrio, chatarra, papel, etc.

- * **Reubicación del sondeo de abastecimiento:** Como última solución está la realización de un nuevo sondeo en un lugar más conveniente. El abandono de la captación primitiva para consumo humano no conlleva que este agua no pueda ser utilizada con fines agrícolas o industriales: la financiación del nuevo sondeo puede verse aliviada sustancialmente por un consumidor interesado por el primitivo.

Esta es la solución inevitable en frecuentes casos de salinización progresiva por intrusión del agua de mar en abastecimientos costeros; el nuevo sondeo deberá ser ubicado atentamente con el fin de evitar que se repita la salinización, provocando un mayor avance de la intrusión: la definición de un perímetro de protección en calidad y cantidad puede ser una eficaz medida; la recarga artificial puede ayudar a mantener el nivel del manto acuífero; o bien una nueva distribución de las captaciones o de su explotación, que sea respetuosa con las características y posibilidades del acuífero; etc. menudo el problema de la sobreexplotación reside en una demanda de agua superior a los recursos locales: una gestión integral de los recursos hídricos, con la participación de la Administración al nivel necesario, se presenta entonces como el camino recomendable en principio.

- * **La recarga artificial:** Consistente en provocar la infiltración de agua de suficiente calidad en el acuífero, es una técnica en auge. En amplias zonas geográficas, la escasez de agua se ve interrumpida por momentos de abundancia de duración variable: lluvias torrenciales, crecidas de corta duración en ríos, caudales derivados para riego cuando éste no es conveniente, efluentes susceptibles de un tratamiento adecuado, etc. La recarga de los acuíferos con estos excedentes proporciona un aumento de las reservas de agua (subterránea) disponible, evitando o paliando problemas de sobreexplotación entre otros (intrusión marina).

- * **Mezcla de calidades:** Aun siendo una solución relativa, en ocasiones puede ser conveniente recurrir a un caudal de agua de buena calidad que, si bien insuficiente para cubrir la totalidad de la demanda, rebaje la concentración final de ciertos componentes a niveles aceptables.

- * **En caso de accidente** con derrame e infiltración de sustancias, sobre todo si son tóxicas, es menester evitar la propagación del contaminante, provocando seguidamente su neutralización; como recomendaciones de índole general, hay que parar las extracciones en el entorno del lugar lo antes posible y avisar urgentemente a las Autoridades competentes. Siguiendo las particularidades del lugar y del caso se estudiará un plan de extracción adecuado del líquido en cuestión a través de bombeos próximos, o mediante sondeos poco profundos de rápida ejecución; en ocasiones será preferible la inyección de reactivos químicos que neutralicen en grado suficiente el proder contaminante del vertido; etc.

Sin embargo y según se ha indicado repetidamente, es mejor **prevenir** que curar, especialmente en relación con la calidad de las aguas subterráneas. Se presentan a continuación unas consideraciones de índole general cuyo objetivo es la protección de la calidad de las aguas subterráneas, en sentido amplio, al margen del posible sondeo que las capte para cubrir las necesidades de un núcleo de población; en otras palabras, la **protección del acuífero** en sí.

- A.-Estas actuaciones preventivas deben ir orientadas en primer lugar a **evitar la llegada** del contaminante al acuífero.

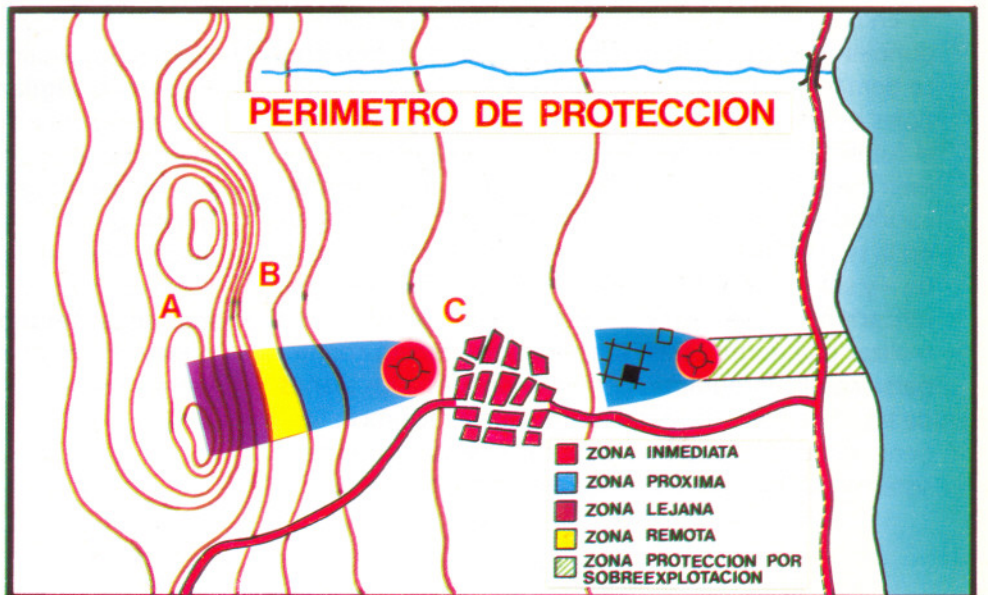
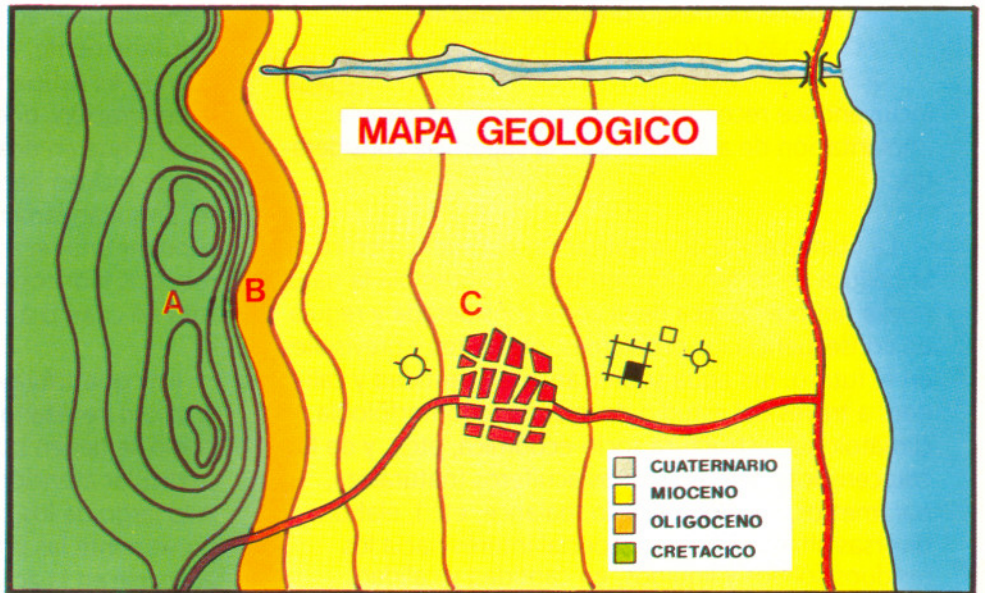
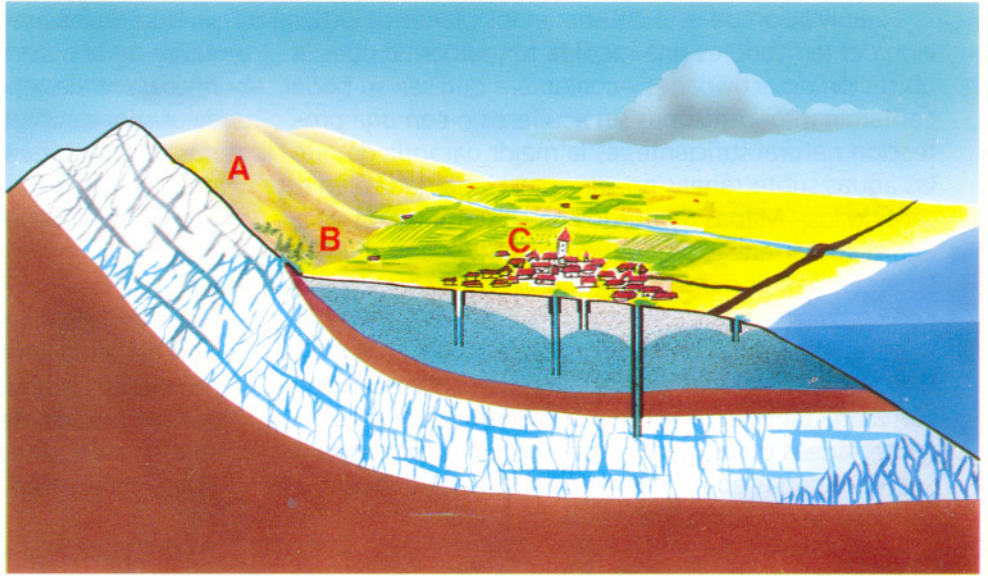


Figura 20.

Perímetro de protección de sondeos para abastecimiento (Esquema simplificado).

La aplicación de este criterio en los planes de ordenación del territorio es una medida fundamental pues la ubicación de actividades —cualquiera que sea su poder contaminante— en zonas sin acuíferos o con una protección natural suficiente, es la mejor garantía de que las aguas subterráneas no van a ser degradadas. En este sentido los "Mapas de riesgos de contaminación de las aguas subterráneas por vertidos sobre el terreno" (ITGE) suponen una primera diferenciación de los terrenos en cada provincia; realizados a escala 1:50.000, permiten la selección a priori de aquellas áreas mejor protegidas, donde las actividades potencialmente contaminantes no van a afectar directamente a la calidad de las aguas subterráneas útiles, dando también una orientación sobre las zonas en las que esas actividades deben evitarse, delimitando 3 zonas en el Mapa:

- a. Zonas de riesgo previsible bajo.
- b. Zonas de riesgo previsible variable.
- c. Zonas de riesgo previsible alto.

incluyéndose recomendaciones específicas para la implantación de actividades en la superficie considerada.

La planificación de la utilización del suelo, dentro de la política de ordenación territorial, contempla la naturaleza hidrogeológica de la zona considerada y regula en consecuencia los problemas, presentes y previsibles en el futuro, del agua subterránea en cantidad y calidad: a través del estudio de la zona (geomorfología, climatología, estructura socio-económica, etc.), y de las características de los distintos acuíferos (naturaleza, parámetros, funcionamiento, balance, etc.), elabora diversas alternativas con especial interés hacia los residuos sólidos y líquidos, en cantidad y calidad.

En conjunción con este análisis se realiza el correspondiente a la **planificación de los recursos hídricos**. La demanda creciente de agua para satisfacer las múltiples necesidades actuales y las que se proyectan en el futuro, presenta unas exigencias en cuanto al volumen y a la calidad requerida que obligan a una planificación de todos los recursos hídricos posibles (incluyendo la reutilización del agua) que considera la influencia de —y sobre— todos los factores involucrados. Esta planificación se materializa en un programa de acciones a realizar que, entre otras características, deberá conjugarse con los programas correspondientes a los planes de las zonas vecinas, dada su influencia recíproca. Se tiene así la planificación a distintos niveles: a nivel de sistema acuífero, de comarca, de región, de cuenca, etc.

Uno de los aspectos de la complejidad del tema reside en la definición concreta de los objetivos (económicos, sociales, medioambientales, ...) al comprender valoraciones objetivas y subjetivas. La utilización de todo un aparato matemático específico (técnicas de análisis de sistemas para la selección entre posibles alternativas) permite agilizar los estudios para optimizar los resultados.

B.-En un segundo lugar, cuando es inevitable la infiltración del agua contaminadora, la protección de la calidad de las aguas subterráneas implica **reducir la concentración** del contaminante, o su actividad inde-seable, a unos valores aceptables antes de que alcance el manto acuífero.

La solución prácticamente universal reside en tratar suficientemente esos vertidos, en instalaciones adecuadamente diseñadas, construidas y mantenidas. Complementariamente, el poder depurador del terreno — cuando es suficiente— proporciona una última parte en la depuración, que puede ser económicamente sustanciosa y que en ocasiones (filtros verdes, por ejemplo) puede incluso hacer innecesaria la planta de tratamiento. Simultáneamente, esta aplicación al terreno puede suponer una recarga adicional en zonas de escasos recursos hídricos, además de las ventajas para la agricultura en cuanto a fertilización.

Hay que subrayar la obligatoriedad de los estudios técnicos necesarios que determinen el dónde, cuándo y cómo se tienen que realizar estas prácticas, con una particular atención hacia la componente hidrogeológica. A lo largo de los capítulos anteriores se han expuesto brevemente las principales medidas técnicas que suelen aplicarse en la actualidad en los campos urbano, agrícola, industrial.

C.-Por último, resaltar la importancia que reviste la función de **vigilancia**, en la protección de la calidad de las aguas subterráneas. A través de la correcta toma de muestras de agua representativas en puntos estratégicos, se garantiza que la calidad del agua es aceptable, puesto que los resultados de los análisis químicos así lo atestiguan. Además, la continuidad de esta vigilancia proporciona una sucesión de datos (numéricos) que indican las **tendencias** que sigue la calidad del agua, pudiendo adoptar las medidas oportunas a tiempo, generalmente.

A título de ejemplo, el ITGE tiene en funcionamiento desde hace años una red de vigilancia de la calidad de las aguas subterráneas, que cubren prácticamente toda la geografía española con unos 1.500 puntos de observación; en paralelo, la situación en las zonas próximas al mar se vigila mediante la red específica de intrusión, con un número de puntos de vigilancia del mismo orden de magnitud.



Reglamentación Básica

La Legislación española comprende varias normas que son otros tantos pilares para la protección de la calidad de las aguas subterráneas.

- * En primer y destacado lugar, la Ley de **Aguas** (29/1985 de 2 de agosto, en BOE de jueves 8 de agosto 1985) y su Reglamento (Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, en BOE de miércoles 30 de abril 1986; y Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, en BOE de miércoles 31 de agosto 1988), contienen numerosos artículos para evitar la contaminación de los recursos acuíferos. Son destacables, entre otros, los relativos al Título V de la Ley (artículo 94, en particular) y su correspondiente desarrollo reglamentario.
- * La Ley **Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos** (20/1986, de 14 de mayo, en BOE de martes 20 de mayo 1986) y su Reglamento (Real Decreto 833/1988 de 20 de julio, en BOE de sábado 30 de julio 1988) aporta requisitos suplementarios para este tipo de residuos.
- * El Real Decreto Legislativo de **Evaluación de Impacto Ambiental** (1302/1986 de 28 de junio, en BOE de lunes 30 de junio 1986) y su Reglamento (Real Decreto 1131/1988 de 30 de septiembre, en BOE de miércoles 5 de octubre 1988) precisa el tipo de proyecto necesario para las actividades descritas en su anexo.

Otras Normas de aplicación son:

- El Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, según Decreto 2414/1961 de 30 de noviembre.
- El Reglamento de Policía Sanitaria y Mortuoria, en Decreto de 20 de julio 1974, particularmente artículos 50 y 51.
- La Ley de Minas (22/1973 de 11 de julio) y su Reglamento (Decreto 2857/1978 de 25 de agosto).
- La Ley sobre Desechos y Residuos Sólidos Urbanos, 42/1975 de 19 de noviembre.
- Las Normas tecnológicas de edificación, según Orden de 6 de marzo de 1973 (BOE 17 de marzo 1973) y Orden de 9 de enero 1974.

Por otra parte, la "**Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo público**", según Real Decreto 1423/1982, de 18 de junio (BOE de 29 de junio 1982), recoge las principales características que debe reunir este tipo de agua, cualquiera que sea su procedencia, además de otras observaciones de interés para los responsables municipales.



Responsable de ésta publicación

Pedro Nieto López-Guerrero

Dirección de Aguas Subterráneas y Geología Ambiental

Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Ríos Rosas, 23 - 28003 - MADRID

