

# **VERTEDEROS E IMPACTO SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Silvino Castaño Castaño

Instituto Geológico y Minero de España. Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

## **RESUMEN**

Los vertidos de residuos potencialmente contaminantes en el terreno pueden afectar, directa o indirectamente, a las aguas subterráneas. Esta posible contaminación puede ser menos intensa que la que se produce en otros componentes del ciclo hidrológico, debido a la existencia de mecanismos naturales de retardo, atenuación y depuración. Sin embargo, suele ser más persistente, difícil de detectar, al no ser visible, y de recuperar por la lentitud de autodepuración de las aguas subterráneas, así como más costosa. Por ello, en la lucha contra la contaminación de las aguas subterráneas debe tener un papel esencial la prevención de los procesos contaminantes y la protección de los recursos subterráneos.

## **INTRODUCCIÓN**

Los vertederos, por definición, están destinados a minimizar los efectos adversos de los desechos de las actividades humanas. Sin embargo, los líquidos vertidos directamente con los residuos o aquellos generados al ponerse en contacto el agua procedente de la lluvia, de la escorrentía superficial o la subterránea con los materiales sólidos (los llamados lixiviados) son compuestos potencialmente contaminantes, para los cursos fluviales y las aguas subterráneas y, por tanto, para el hombre y los ecosistemas.

En la actualidad, los vertederos deben cumplir una normativa estricta en cuanto a su diseño, control y gestión. Los situados en un contexto geológico adecuado, diseñados para recoger y tratar los lixiviados y que controlen las entradas y salidas desde o hacia el medio hídrico, deben tener un potencial limitado para contaminar las aguas.

Sin embargo, hasta hace relativamente poco tiempo, no se realizaban esas medidas de control. Los vertidos se llevaban a cabo directamente en la superficie del terreno o en la zona situada inmediatamente bajo la superficie, aprovechando excavaciones realizadas para tal fin o para otras actividades.

En estos casos, las aguas subterráneas son, en gran número de ocasiones, el destino final de los posibles contaminantes (aunque estos vertederos se hayan ocultado a la vista o se hayan sellado en superficie), por infiltración de los lixiviados a través de la zona no

saturada, como parte del proceso de recarga, por su acumulación directa en zonas de terreno saturadas o a partir de corrientes superficiales que transcurren en las proximidades del vertedero.

En su flujo a través de las zonas no saturada y saturada, la composición del agua va modificándose por un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan a los compuestos que transporta, entre los que se pueden encontrar sustancias contaminantes. Esa lenta migración del agua y la transformación de su composición pueden favorecer el retardo y la atenuación de la contaminación, pero las dificultades del control de la misma y de la recuperación de la calidad de las aguas subterráneas originan una enorme complejidad en la protección de los recursos subterráneos.

Por otra parte, la inercia que muestran las aguas subterráneas en la respuesta a los procesos que las afectan provoca que, cuando se detecta la contaminación de un acuífero, muchas veces sea ya un proceso irreversible por la lentitud de la autodepuración, propia de las aguas subterráneas.

## **LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Debido a las características propias de su molécula, las aguas contienen siempre, en su estado natural, compuestos disueltos. En las aguas subterráneas el origen y cantidad de los mismos dependen, entre otros muchos factores, de la composición del suelo y de la roca por los que circula el agua, del tiempo de contacto del agua con la roca, de la permeabilidad y el potencial de la solución de la misma, de las condiciones climáticas y del volumen de recarga.

En ciertas condiciones climáticas, hidrológicas y geológicas, las aguas subterráneas pueden contener algunos iones o compuestos en una concentración tal que no sea aceptable para su consumo humano o un determinado uso.

Esa calidad natural deficiente en cuanto a la utilización por el hombre no significa que al agua se la considere como contaminada. Habitualmente se entiende por contaminación a la introducción por el hombre de sustancias que pueden causar problemas a la salud humana, daños a los recursos naturales y a los sistemas ecológicos.

Así, se pueden considerar contaminadas a las aguas subterráneas cuando las actividades humanas alteran la calidad natural haciéndola total o parcialmente inadecuada para la aplicación a la que se destinaba o pretendía destinar. Esta definición cualitativa puede ser ambigua, ya que, en ocasiones, la validez de las aguas para un uso depende de

muchas circunstancias (inexistencia de otros recursos, resistencia individual a las sustancias contaminantes, etc.) por lo que es necesario delimitar claramente cuándo un agua se puede considerar como contaminada. Normalmente se toma como límite de la contaminación los valores que marcan las normas de calidad que definen la idoneidad de un agua para el uso a que se vaya a destinar, con lo que dicho límite variará en función del Organismo que emita esos valores.

## **ORÍGENES DE LOS RESIDUOS Y MODOS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DESDE VERTEDEROS**

En los vertederos se reúnen sustancias muy diversas que de forma natural se encontrarían dispersas y que por su concentración en ellos o por su composición son perjudiciales para el hombre, su actividad económica o el medio ambiente. El origen de las sustancias de los vertederos se debe, fundamentalmente a:

- **Actividades urbana y doméstica.**- Estas actividades generan residuos sólidos y líquidos y pueden inducir otro tipo de contaminación. El lixiviado líquido que se origina contiene gran cantidad de elementos químicos (elementos comunes en las aguas pero en grandes concentraciones, metales pesados, compuestos orgánicos), bacterias, virus, aunque la composición es muy variable. La reutilización, separación y reciclado de diferentes componentes de los residuos domésticos intentan reducir el volumen de sustancias depositadas en vertederos, así como controlar los tipos de lixiviados.

- **Actividades industrial, energética y minera.**

Las formas en las que una sustancia contaminante procedente de residuos en vertederos puede introducirse y propagarse en un acuífero son muy variadas y normalmente complejas. Dependen, entre otros factores, de las características físicas y químicas de los residuos, la topografía circundante al vertedero, el clima, la geología del entorno, las características hidráulicas de las zonas saturada y no saturada, y del tiempo de tránsito a las zonas de salida del acuífero (pozos, manantiales, ríos, zonas húmedas).

Tiene importancia también si el vertido se efectúa en la superficie del terreno, en la zona no saturada o en una zona que se satura temporalmente. La zona no saturada, debido a sus características hidráulicas, suele constituir un retardo para los procesos de contaminación. Así, en general, cuanto mayor potencia tenga la zona no saturada, mayor es el tiempo retardo para la afección al agua subterránea, y mayor la depuración natural.

Si el terreno donde están situados los residuos se satura, la mayor conductividad hidráulica favorecerá el transporte de los contaminantes por el acuífero.

## **CONTAMINANTES MÁS HABITUALES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Los problemas más frecuentes de contaminación del agua subterránea por vertederos son los relacionados con metales pesados, compuestos orgánicos, compuestos nitrogenados, bacterias y virus. El conjunto de contaminantes se suelen agrupar en:

**a) Contaminantes químicos.-** Constituyen la mayor parte de los contaminantes de las aguas subterráneas, constituyendo una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos, con orígenes y comportamientos muy diversos. Se pueden agrupar en:

- **Contaminantes minerales.-** Son aquellas sustancias solubles que forman parte habitualmente de la composición del agua (cloruros, sulfatos, nitratos, sodio, potasio, calcio, magnesio) que se encuentran en cantidades excesivas por las actividades humanas. Los principales problemas que originan son el dar sabor al agua, ciertos efectos fisiológicos e inconvenientes domésticos. En caso de que formen precipitados, pueden ocasionar una notable reducción de la permeabilidad del medio natural o de conducciones..

- **Metales pesados y elementos traza.-** Se incluyen elementos que suelen aparecer como trazas en las aguas subterráneas, pero que pueden ser indicios de contaminación cuando sus concentraciones son anormalmente altas. Entre los mismos se pueden citar Al, Cu, Zn, Pb, Se, As, Cr, Hg, Fe y Mn. Se utilizan en múltiples sectores industriales, como compuestos de combustibles, y se utilizan en aparatos domésticos y en servicios urbanos. En todos estos casos, la recogida selectiva y su tratamiento o depósito especiales pueden minimizar sus potenciales efectos de contaminación.

**b) Contaminantes biológicos.-** Son las bacterias patógenas, los parásitos y los virus. Estos organismos son fuentes de muchas enfermedades. Aunque la contaminación biológica se origina sobre todo a partir de fosas sépticas, redes de alcantarillado, pozos negros y aguas residuales aplicadas al suelo, también puede proceder de vertederos no controlados. Sus efectos suelen estar muy amortiguados por los mecanismos de autodepuración de los acuíferos, especialmente en la zona no saturada.

En las aguas subterráneas, los agentes principales de transmisión de enfermedades que pueden aparecer son *Salmonella sp.*, *Shigelia sp.*, *Escherichía coli*, *Vibrio cholerae*, virus de hepatitis A, Adenovirus, etc.

c) **Contaminantes radiactivos.**- Pueden proceder por almacenamiento inadecuado, y también de fugas desde puntos en los que se utilizan esos elementos, vertidos accidentales de las aguas con las que se ponen en contacto o de materiales que los utilizan. Muchos de ellos se comportan como sustancias minerales ordinarias y se mueven a la misma velocidad que el agua, otros pueden ser retenidos temporalmente en el terreno, reduciendo su recorrido medio antes de que se desintegren, dependiendo su movimiento en el terreno de su coeficiente de distribución.

### **FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACIÓN Y ATENUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN**

Los contaminantes, al igual que cualquier soluto transportado por el flujo subterráneo, están sometidos a procesos químicos, biológicos y radiactivos que tienden a modificar su concentración, muchas veces consiguiendo una disminución de la misma o una modificación de su composición, originando otros productos diferentes, nocivos o no.

Dentro de los procesos que propagan o atenúan la contaminación se deben considerar también los derivados de las características del medio por el que son transportados los compuestos.

Así, la mayor parte de las aguas subterráneas se mueven desde una zona de recarga (por la que entran al acuífero) hasta la zona de descarga de acuerdo con la ley de Darcy, según la cual la velocidad del agua es directamente proporcional a la conductividad hidráulica (que depende de la permeabilidad del acuífero y de las propiedades del fluido circulante) y del gradiente hidráulico (relacionado con la energía del agua). La permeabilidad depende del volumen de poros de suelo o roca ocupado por el agua, siendo máxima cuando todos los poros están saturados.

Las sustancias disueltas, sean o no contaminantes, cuando se incorporan al sistema de flujo del agua subterránea tienden a moverse en la dirección general del flujo y, si no existieran interacciones con el terreno, a una velocidad igual a la velocidad media del agua subterránea. A este proceso se le denomina **advección**.

Sin embargo, debido a las tortuosidades que recorre el agua entre los poros, los solutos tienden a separarse de la trayectoria ideal del agua y a moverse a diferente velocidad, en lo que se conoce como **dispersión** mecánica o hidráulica (longitudinal o transversal).

Por otra parte, los solutos tienden a igualar su concentración en cualquier parte del sistema, y se mueven desde las zonas de mayor concentración a las que la tienen menor,

mediante el proceso de **difusión**. Ésta provoca también una dispersión que, unida a la dispersión mecánica, origina el proceso de **dispersión hidrodinámica**.

Los procesos combinados de dispersión y difusión, además de la dilución de las sustancias disueltas, originan un penacho o pluma de contaminación, cuya forma, extensión, velocidad de propagación, etc. dependen tanto de las características del medio como de la sustancia que se propaga y del foco emisor.

Durante su transporte a lo largo del flujo subterráneo, las sustancias contaminantes están sometidas a un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que tienden a disminuir sus efectos.

Entre los **procesos físicos** tienen importancia los siguientes:

- **Dispersión.**- Provoca la dilución de los contaminantes. La capacidad de dispersión de un medio depende entre otros factores, de su grado de heterogeneidad y de la velocidad del agua subterránea, y es inversamente proporcional a la porosidad.

- **Filtración.**- Influye favorablemente en la disminución del contenido de determinados coloides y partículas de mayor tamaño. Es más efectiva en los materiales ricos en arcillas y menos en gravas, rocas fisuradas y karst.

- **Circulación de gases.**- Cuando existe gas en el medio, especialmente oxígeno, se favorece la descomposición aerobia, mientras que la limitación en esa circulación puede provocar condiciones anaerobias.

Entre los **procesos químicos** se pueden mencionar:

- **Precipitación-disolución.**- Cuando el agua que se infiltra en el terreno entra en contacto con los minerales presentes en el mismo se producen fenómenos de disolución mineral, que continúan hasta que se alcancen en el agua las concentraciones del equilibrio de saturación o hasta el agotamiento de los minerales. Si las condiciones de equilibrio cambian, el agua puede encontrarse sobresaturada en determinados elementos, que precipitan para alcanzar ese nuevo equilibrio. Las reacciones de precipitación-disolución son comunes para el calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos. Algunos constituyentes traza como arsénico, boro, cadmio, cianuro, hierro, plomo, mercurio, etc. presentan una gran capacidad de precipitación.

- **Adsorción-desorción.**- El cambio iónico puede retener, usualmente de modo temporal, cationes y, en menor medida, aniones en la superficie de las arcillas y

materiales coloidales. La cantidad de cationes metálicos adsorbidos aumentan de acuerdo con el pH. Los elementos adsorbidos pueden volver a la solución cuando un agua con menor concentración en ellos entra en contacto con el material adsorbente. Este proceso es uno de los más efectivos en la atenuación de la contaminación.

- **Oxidación-reducción.**- Muchos contaminantes pueden existir en distintos estados de oxidación, estando ligada su movilidad a dicho estado. En terrenos no saturados y en zonas de recarga de acuífero las condiciones son oxidantes, o parcialmente reductoras, mientras que en la zona saturada suelen predominar las reductoras, especialmente si existe materia orgánica.

- **Neutralización (Reacciones ácido-base).**- La solubilidad y movilidad de la mayoría de los contaminantes aumenta con la disminución del pH.

Finalmente, entre los **procesos bioquímicos** se pueden citar:

- **Degradación biológica y asimilación.**- Muchas sustancias químicas pueden ser extraídas del agua y fijadas biológicamente o modificadas en su estructura por actividad de los organismos vivos.

- **Síntesis celular.**- Muchos de los elementos que son requerido para el crecimiento de los organismos pueden ser retirados del medio, provocándose entonces retardos en su migración.

## **MÉTODOS DE CONTENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN**

En general, las aguas subterráneas se encuentran mejor protegidas frente a la contaminación que las aguas superficiales, siempre que los contaminantes no las afecten directamente. Sin embargo, una vez que los contaminantes se incorporan al flujo subterráneo resulta difícil y costoso tanto el detectar su presencia como conocer su desplazamiento, siendo la contaminación en ocasiones un proceso prácticamente irreversible.

Para evitar esto último se pueden tomar medidas para evitar, controlar o disminuir la entrada de contaminantes en los acuíferos, pero si la contaminación se hace efectiva es necesario utilizar determinadas técnicas para corregirla.

### **Métodos de prevención y protección**

La mejor manera de evitar los problemas causados por la presencia de contaminantes es impedir su entrada, es decir, aplicar métodos preventivos. En ocasiones esto no es

posible, pero si se conoce la posibilidad de contaminación se pueden aplicar sistemas para atenuar su peligrosidad, bien mediante el tratamiento natural o artificial de los elementos contaminantes o con la reducción de la cantidad de contaminación con la optimización en el uso de los productos que la originan (reciclado, reutilización, etc.). En estos casos, también es necesario el establecimiento de redes o sistemas de control de las aguas subterráneas que permitan alertar de una posible contaminación antes de que afecte a las salidas naturales o artificiales de las mismas.

Los métodos preventivos tienen entonces como finalidad evitar que el contaminante llegue a las aguas subterráneas, reducir la peligrosidad del mismo o limitar la cantidad de contaminante que llega al acuífero.

En este apartado se pueden incluir las impermeabilizaciones de las zonas de vertidos sólidos, el control efectivo de vertidos sólidos, el establecimiento de normativas para residuos y almacenamiento de residuos, etc.

Sin embargo, el método preventivo más eficaz es la ordenación del territorio mediante la realización de un conjunto de estudios para poder recomendar los puntos o áreas más adecuados y menos peligrosos para la puesta en práctica de actividades potencialmente contaminantes.

Esa ordenación puede contemplar dos objetivos diferentes:

- Protección integral de los recursos hídricos subterráneos de un acuífero o conjunto de acuíferos, por su importancia económica, social o medioambiental. En este sentido el aspecto más utilizado es la vulnerabilidad de los acuíferos en función de las condiciones naturales (recarga, zona no saturada, acuífero, topografía), o con respecto a uno o varios contaminantes (naturaleza, reacciones).

- Protección de un sector de acuífero con vistas a evitar la contaminación de puntos de surgencia naturales o artificiales. Son los denominados perímetros de protección, que para su establecimiento tienen en cuenta el poder depurador o filtrador del suelo, las afecciones de bombeos, el tiempo de tránsito de los contaminantes, el límite de la cuenca receptora o área de alimentación, etc.

### **Métodos de recuperación**

Las medidas de recuperación deben llevarse a cabo cuando la contaminación llega al acuífero o puede hacerlo de forma probable.

Previamente es necesaria la caracterización de la contaminación, tanto en lo que se refiere al tipo de sustancias como a su extensión espacial y temporal. Igualmente se deben determinar los riesgos para la salud y el medio ambiente y las medidas de descontaminación necesarias. Para ello se utilizan métodos directos (recogida de muestras de suelo y agua en los que se miden los parámetros de interés) y métodos indirectos (medidas de parámetros relacionados con el de interés, y son, sobre todo, geofísicos).

En cuanto a las técnicas de saneamiento de la contaminación son numerosas, a veces específicas, y se actualizan y prueban de forma permanente. De todos modos, deben tener en cuenta el medio que se va a tratar (agua o suelo), los contaminantes presentes y la viabilidad técnica de su aplicación.

Se pueden separar en dos grandes grupos:

**a) Sistemas pasivos (o de aislamiento).** - Tratan de minimizar la movilización de los contaminantes una vez conocidos los mecanismos de migración, de modo que se establece una serie de sistemas que permitan su control. La tecnología más habitual es la de aislamiento mediante barreras de contención o pantallas y posterior captación de agua a través de pozos o zanjas drenantes para su tratamiento. Algunas pantallas se realizan con materiales seleccionados para que reaccionen con los contaminantes.

**b) Sistemas activos (o de eliminación).**- Estos sistemas requieren consumo energético y llevan consigo la eliminación de los contaminantes. Entre otros se pueden citar:

- Bombeo y tratamiento de las aguas subterráneas.- Se trata de la realización de un conjunto de sondeos para bombear el agua contaminada, estableciendo una salida controlada, y tratarla posteriormente. Es recomendable si se usan pantallas.

- Ventilación de suelos.- Se extraen los compuestos orgánicos volátiles retenidos en espacios intergranulares de la zona no saturada pasando una corriente de aire a través del suelo y recogidos en pozos de extracción.

- Biodegradación.- Se utilizan microorganismos naturales para descomponer o degradar sustancias peligrosas y transformarlas en otras menos tóxicas o inocuas.

- Lavado del suelo.- Se trata de utilizar líquidos (generalmente agua combinada a veces con aditivos químicos) para concentrar los contaminantes que posean una gran afinidad de adsorción en el suelo. Puede utilizarse para aguas subterráneas mediante la inyección

del agua y el aditivo en un pozo y recogida del líquido lavado en otro pozo o para tierras contaminadas removidas.

- Excavación y tratamiento exterior. - Consiste en la excavación y transporte de los materiales contaminados hasta unas instalaciones de almacenamiento. Presenta la ventaja de eliminar físicamente el suelo contaminado, pero los inconvenientes de la posibilidad de dispersión de la contaminación durante el transporte y de la mayor concentración de las sustancias contaminantes en el lugar del almacenamiento.