

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS: CAUSAS, EFECTOS, RIESGOS ASOCIADOS Y MEDIDAS DE PREVENCIÓN

*Susana Saval Bohórquez, Fernando Lara Guerrero,
Juan Manuel Lesser Illades y Juan Manuel Nieto Calleja*

INTRODUCCIÓN

La importancia del agua subterránea, como fuente de abastecimiento para consumo humano, requiere de una protección para contrarrestar los efectos negativos originados por la contaminación de tipo antropogénico. La presencia, cada vez mayor, de compuestos ajenos a la composición natural del agua subterránea constituye una alteración en su calidad.

Por otro lado, el amplio uso de los hidrocarburos en nuestra sociedad está asociado a las actividades de exploración, explotación, refinación, distribución y comercialización, así como su empleo principalmente como combustibles para las industrias de transformación y del transporte. Estas actividades implican un intenso manejo de hidrocarburos con el inminente riesgo de que puedan ocurrir descargas en el ambiente con implicaciones de contaminación cuya magnitud y consecuencias están en función de las características del sitio afectado.

Al ocurrir un derrame de petróleo crudo o de sus combustibles destilados, inmediatamente los productos tienden a dispersarse e infiltrarse hacia el subsuelo en donde las condiciones lo permiten. En una superficie pavimentada los productos pueden viajar varios cientos de metros de manera horizontal hasta que encuentran algún acceso a una instalación subterránea, por ejemplo una alcantarilla o un registro de energía eléctrica o de teléfonos, en esos casos es prácticamente imposible controlar su migración. Si se trata de un terreno natural, los productos se infiltran de manera inmediata hacia los diferentes estratos, una parte se retiene en el material geológico, pero el mayor volumen migra de manera vertical varios metros por acción de la gravedad, y en muchos casos alcanza el agua subterránea, a partir de ese momento, la migración ocurre en dirección preferencial del flujo subterráneo. Las características propias de los combustibles, así como las del subsuelo determinan la distribución, acumulación y migración de

los hidrocarburos en cada sitio. De aquí que cada problema de contaminación conceptualmente será único.

Para evaluar el grado de contaminación de un acuífero es indispensable integrar una gran variedad de información, la cual debe ser verificada y ampliada de manera rápida y continua, en virtud de la dinámica natural de un acuífero. Si la afectación se da en una fuente de abastecimiento doméstico-urbano, el riesgo se debe enfocar fundamentalmente a la presencia de hidrocarburos peligrosos a la salud humana, por ejemplo el benceno. En el caso de acuíferos cuyo uso prioritario no sea el doméstico-urbano, la contaminación también debe ser atendida de manera inmediata, pero aquí el riesgo debe ser analizado desde otra perspectiva. Lo más importante es contar con un sustento técnico confiable que sirva como base para plantear las diferentes alternativas de solución, tanto para restituir el abastecimiento de agua, como para tomar acciones de remediación.

Existen en México varios casos de acuíferos contaminados con hidrocarburos y aunque están siendo sometidos a programas de saneamiento, las posibilidades de continuar su explotación como fuentes de abastecimiento son muy reducidas. De aquí surge la conveniencia de promover programas de prevención enfocados primordialmente a la protección de la calidad del agua subterránea, ya que su costo de implementación y seguimiento son mínimos comparados con el costo requerido para el saneamiento de los acuíferos.

En cuanto al aspecto legal y normativo de la contaminación de acuíferos, parece haber un avance en las leyes o estar en camino de lograrlo, pero los reglamentos y las normas oficiales son aún incipientes o necesitan ser actualizados. En este sentido, es mucho el trabajo que falta por hacer, pero al mismo tiempo es necesario promover un marco de referencia integral "suelo-agua subterránea", basado en una integración y coordinación al interior de la propia Secretaría del ramo.

CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS

Para hablar de las causas que conducen a la contaminación de acuíferos con hidrocarburos es necesario revisar primero las potenciales fuentes que originan un derrame. Entre las más comunes se pueden citar las siguientes: prácticas inadecuadas de manejo de crudo y sus productos, tomas clandestinas en zonas de ductos; derrames provocados por accidentes carreteros o ferroviarios; corrosión de tanques de almacenamiento de combustibles; corrosión o ruptura de ductos superficiales y subterráneos; fallas por falta de mantenimiento de instalaciones; falla de la infraestructura provocada por fenómenos naturales extremos (vientos, huracanes y sismos, entre otros); errores humanos de operación; instalaciones subterráneas abandonadas; ruptura de drenajes aceitosos; descargas accidentales o deliberadas de aguas residuales de proceso en canales y ríos; operación de insta-

laciones con uso intensivo de hidrocarburos sobre terreno natural sin losa, ni diques impermeables; ausencia de programas de reposición de infraestructura al término de su vida útil; ausencia de drenajes aceitosos; deficiencias en las actividades de perforación de pozos y en general, falta de una cultura de prevención.

La mayor parte de los casos de contaminación de acuíferos que actualmente existen son consecuencia de eventos que en su momento ocurrieron a nivel de la superficie. El corto tiempo del que se dispone para actuar antes de evitar la infiltración de los combustibles al subsuelo, así como la dificultad para controlar un derrame cuando se trata de grandes volúmenes, son aspectos que quedan fuera del alcance humano y resultan en afectaciones de magnitud incalculable en el momento preciso del accidente. Por lo general, se considera que el suelo por su capacidad amortiguadora puede retener líquidos y partículas sólidas, para evitar así que cualquier derrame llegue al agua subterránea. Sin embargo, su capacidad amortiguadora tiene un límite físico que cuando se ve rebasado permite el paso de contaminantes hacia al acuífero.

Lo anterior lleva a la inminente necesidad de conocer varios conceptos básicos antes de evaluar cualquier problema de contaminación. Éstos están íntimamente relacionados con la constitución del suelo y del subsuelo, así como con la química y fisicoquímica de los hidrocarburos y aditivos asociados. En la medida que se comprenda su interrelación, se podrá predecir con mayor certidumbre su comportamiento en el subsuelo.

LOS DIFERENTES MATERIALES DEL SUBSUELO Y TIPOS DE ACUÍFEROS

Los materiales que constituyen el subsuelo se clasifican con base en su *conductividad hidráulica* y su *permeabilidad*. Estos conceptos han sido utilizados de manera indistinta para describir la capacidad de un material para transmitir el agua subterránea. Sin embargo, no son equivalentes ya que la permeabilidad intrínseca sólo es función del medio poroso, mientras que la conductividad hidráulica incluye a las propiedades del medio y del agua contenida en éste.

La permeabilidad es la facilidad con la que un fluido puede transitar a través de los espacios vacíos que se encuentran entre los granos. Con esta base, la conductividad de los materiales geológicos se pueden dividir en dos grandes grupos: materiales permeables y materiales impermeables. Los materiales permeables son aquellos que permiten la infiltración y la circulación del agua subterránea y de contaminantes, mientras que los impermeables son los que limitan esta circulación debido a la ausencia de huecos o espacios libres a través de los cuales se puede establecer un flujo.

Los materiales permeables más comunes son los aluviones, las calizas carstificadas y los basaltos fracturados. Los aluviones corresponden a alternancias o

mezclas de arenas, gravas, arcillas y limos. Estos materiales granulares varían de finos (arcillas) a gruesos (gravas). Las arcillas corresponden a materiales granulares muy finos, donde cada grano presenta un diámetro menor a 1/256 de milímetro. Las arenas están constituidas por granos de entre 1 y 2 mm de diámetro, mientras que los limos presentan partículas de tamaño intermedio entre las arcillas y las arenas.

En las arcillas prácticamente no existen espacios libres a través de los cuales el agua o el contaminante líquido pueda circular, su conductividad hidráulica típica es de 10^{-7} cm/seg. Además, las arcillas tienen un alto contenido de materia orgánica en la cual se pueden retener una gran cantidad de agua y sustancias químicas. Se caracterizan por ser un material que puede adsorber grandes cantidades de hidrocarburos, pero no permite que fluyan hacia otros sitios. Esta propiedad hace que las arcillas constituyan una capa protectora de la contaminación de acuíferos ubicados a mayores profundidades, por eso se dice que tienen gran capacidad amortiguadora. Debido a su baja permeabilidad, estos materiales también representan el mayor obstáculo para el saneamiento de acuíferos, ya que en ellos predomina el fenómeno de la difusión el cual requiere de decenas de años para permitir el desplazamiento o salida de los contaminantes.

Las arenas son los constituyentes principales de los acuíferos de tipo granular, presentan alta conductividad hidráulica, de hasta 10^{-2} cm/seg, lo cual permite el fácil tránsito de fluidos a través de ellas, ya sea de agua o de hidrocarburos. Su reducido contenido de materia orgánica limita la retención de sustancias, de aquí su baja capacidad amortiguadora. De manera opuesta a las arcillas, la alta permeabilidad de las arenas hace que los acuíferos presenten alta vulnerabilidad, es decir, una mayor facilidad para la contaminación.

En la naturaleza es común encontrar mezclas de materiales de diferente granulometría, que en la mayoría de los casos se presentan en forma de capas horizontales alternadas. Ello lleva a la presencia de horizontes permeables intercalados con horizontes impermeables, donde se pueden formar zonas acuíferas ubicadas a diferentes profundidades. Generalmente, las zonas acuíferas que se encuentran cercanas a la superficie son las más afectadas por la presencia de contaminantes. Debido a que los hidrocarburos flotan sobre el agua, la zona más contaminada se ubica entre la superficie del terreno y el nivel del agua subterránea.

La zona a partir de la cual se encuentra el agua subterránea se identifica como zona saturada, para diferenciarla de la zona vadosa o no saturada, en donde los espacios interpartícula contienen solamente gases. En la interfase entre las zonas vadosa y saturada se encuentra una porción que se conoce como zona de capilaridad. Esta última, así como el nivel freático o estático pueden estar variando conjuntamente de posición por efecto natural, de tal forma que, durante la época de estiaje el nivel del agua estará más profundo, mientras que en la época de lluvias, el nivel del agua estará más cercano a la superficie.

Las calizas son depósitos de carbonato de calcio solubles en agua y que en ciertos sitios, presentan fracturas y conductos de disolución que permiten la libre circulación de agua y contaminantes a través de ellas. Los basaltos son rocas que comúnmente presentan abundante fracturamiento interconectado, el cual permite la fácil infiltración y circulación de agua y contaminantes en el subsuelo. Ambos dan lugar a la formación de acuíferos de alto rendimiento.

Existen además, estructuras geológicas que influyen en el control de la contaminación del suelo y del agua subterránea, éstas son las fallas y las fracturas. Ambas pueden funcionar como barreras o como conductos preferenciales del flujo subterráneo y llegan a provocar comunicación de agua y contaminantes de un horizonte acuífero superior hacia otro inferior.

CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

El petróleo es una mezcla de hidrocarburos, compuestos heterocíclicos, asfaltenos y resinas. Los hidrocarburos son los constituyentes que se encuentran en mayor proporción y están formados básicamente por átomos de carbono e hidrógeno con diversas conformaciones moleculares. Incluye compuestos que van del más sencillo que es el metano con un sólo átomo de carbono (C_1) hasta compuestos muy complejos que pueden tener hasta cerca de 100 átomos de carbono (C_{100}). Los hidrocarburos pueden ser saturados y no-saturados, los primeros se caracterizan por tener enlaces sencillos entre los átomos de carbono, mientras que los no-saturados tienen dobles ligaduras. En cualquiera de los dos grupos químicos, hay cadenas lineales rectas o ramificadas, además de estructuras moleculares cíclicas.

Para la producción de combustibles, el petróleo crudo se somete a altas temperaturas mediante el proceso de "cracking", seguido de la refinación propiamente, en la cual a diferentes intervalos de temperatura se obtienen por destilación los diversos combustibles. Cada combustible es una mezcla de gran cantidad de hidrocarburos químicamente diferentes. La gasolina contiene por lo menos 120 hidrocarburos, cuyos pesos moleculares están entre C_5 y C_{10} , y destilan entre 30 y 225°C; el diesel tiene más de 140 hidrocarburos entre C_{11} y C_{25} , que destilan entre 180 y 350°C, mientras que la kerosina, conocida también como queroseno o diáfano, presenta alrededor de 100 hidrocarburos, cuyos pesos moleculares y temperaturas de destilación son intermedios a los dos combustibles mencionados. El combustóleo, que es prácticamente el residuo de destilación, contiene los hidrocarburos de más alto peso molecular los cuales son también los más complejos.

Gasolinas, turbosina y diesel, son formulados antes de salir a la venta, en este proceso son incorporados aditivos cuya función puede ser por ejemplo: evitar

la detonación, aumentar la combustión o aumentar la potencia, entre otros. Estos aditivos, al igual que los hidrocarburos son considerados contaminantes del subsuelo. La presencia de uno u otro aditivo sirve como un indicativo de la época en la que ocurrió el derrame. Por ejemplo, la gasolina tipo Nova que desde hace varios años ya no se produce en México contenía tetraetilo de plomo, mientras que las gasolinas de nueva generación, Magna y Premium, contienen metilterbutiléter (MTBE).

Un aspecto que es necesario resaltar es que las características de cada combustible son una función directa de las características de sus componentes individuales. Esto es lo que marca la diferencia de su comportamiento en el ambiente. Lo único que sí comparten todos los combustibles es la posibilidad de flotar sobre el agua, ya que su densidad es menor a la de ésta. La literatura internacional los refiere como LNAPL's (*Light Non-Aqueous Phase Liquids*), para diferenciarlos de los DNAPL's que son más pesados que el agua (*Dense Non-Aqueous Phase Liquids*), los cuales forman una capa por debajo del agua.

El comportamiento de los hidrocarburos, así como todo lo relacionado con su transporte y destino, está dado por sus características fisicoquímicas que son: solubilidad, coeficiente de distribución octanol / agua, coeficiente de sorción, constante de la Ley de Henry y presión de vapor, las cuales a su vez están relacionadas con su peso molecular. Todas estas características están íntimamente relacionadas entre sí y junto con las características del subsuelo marcan el comportamiento individual de cada hidrocarburo. En la tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas de los hidrocarburos más comunes, están enlistados en orden creciente en cuanto a peso molecular y al mismo tiempo, en orden decreciente respecto a su solubilidad en agua.

El coeficiente de distribución octanol / agua ($K_{O/W}$) es el que indica la posición que tomará una sustancia cuando existen conjuntamente una fase orgánica y una acuosa. Esto significa que cuando existe una capa de hidrocarburos que están flotando sobre el agua, cada hidrocarburo de manera individual tomará la posición que determine el valor de su coeficiente, es decir, si se queda flotando en la capa de combustible o si se disuelve en el agua subterránea. Esta característica, tiene relación con la solubilidad, de manera que los hidrocarburos más solubles en agua, como el benceno, tienen menores cifras del $K_{O/W}$ (tabla 1).

Cada hidrocarburo tiene también cierta afinidad por el carbono orgánico del suelo, la cual se expresa a través del coeficiente de sorción (k_{oc}). Aquellos hidrocarburos que presentan valores altos de k_{oc} son los que permanecen más asociados a las partículas de suelo y al mismo tiempo son los que presentan menor solubilidad en agua. Los hidrocarburos poliaromáticos son un ejemplo de éstos (tabla 1).

En relación a la volatilidad, está directamente relacionada con la constante de la Ley de Henry y con la presión de vapor. Estas dos características son las que per-

miten detectar la presencia de hidrocarburos volátiles en el subsuelo. Los hidrocarburos más volátiles son los de menor peso molecular, especialmente benceno, tolueno, xilenos y etilbenceno, comúnmente conocidos como BTEX (tabla 1).

A partir de sus características, se puede establecer que los hidrocarburos en el subsuelo se pueden encontrar en diferentes fases: i) Como gases alojados en los espacios intersticiales del material granular especialmente en la zona vadosa, ii) adsorbidos a la materia orgánica del suelo, iii) disueltos en el agua subterránea, y iv) en forma líquida como una capa que flota sobre el agua.

Una vez que los hidrocarburos llegan al acuífero, la forma y extensión de la mancha de contaminación, depende del tipo de materiales que conforman el subsuelo y de los mecanismos de transporte: advección, dispersión y difusión, en los casos. Para aquellas sustancias cuya densidad es mayor a la del agua su movimiento estará controlado por la presencia de capas de baja permeabilidad y por la topografía del subsuelo.

RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS CON HIDROCARBUROS

En temas de contaminación de acuíferos con hidrocarburos existen tres enfoques de riesgo que son: 1) riesgo de explosión; 2) riesgo ecológico, y 3) riesgo a la salud humana. Los riesgos asociados a cada caso específico dependen del tipo de hidrocarburos y de las características del escenario afectado.

El riesgo de explosión se da principalmente cuando hay hidrocarburos volátiles que se alojan en espacios abiertos donde existe oxígeno, por ejemplo en drenajes, lumbreras y registros de teléfonos y de energía eléctrica, y donde además puede existir una chispa o un detonador. El riesgo por explosión existe cuando los hidrocarburos presentes son ligeros, los cuales son volátiles a temperatura ambiente, ejemplo de éstos son los BTEX, componentes de las gasolinas.

El riesgo ecológico considera la afectación a la integridad de especies de flora y fauna terrestres y acuáticas, debida a la presencia de hidrocarburos en suelo y cuerpos de agua superficiales. Este tipo de riesgo se puede evaluar de manera muy práctica cuando las especies tienen un valor comercial o están en peligro de extinción y el número de ellas se tiene previamente referenciado. El riesgo ecológico en un escenario superficial se da cuando hay un derrame de cualquier tipo de combustible, pero los efectos son mayores cuando se trata de hidrocarburos pesados, presentes principalmente en el crudo y el combustóleo, ya que éstos se quedan preferentemente en la superficie, en cambio, cuando los combustibles son más fluidos como la gasolina, la turbosina y el diesel, una parte se queda retenida en el suelo, mientras que otra tiende a infiltrar hasta encontrar el nivel del agua subterránea.

Los hidrocarburos pesados son no-volátiles, se quedan retenidos en el suelo, circulan distancias cortas y no alcanzan grandes profundidades, tienden a permanecer en el mismo sitio del derrame. Son prácticamente insolubles en agua, pero conforman capas flotantes en aguas subterráneas cuando el nivel estático está muy cerca de la superficie, o cuando en el mismo medio están presentes hidrocarburos ligeros o intermedios, los cuales actúan como disolventes y arrastran a los pesados. Los riesgos asociados en este caso, se refieren a la pérdida de especies de vegetales debido a que los hidrocarburos forman una película que rodea a las partículas del suelo, la cual limita la absorción de agua y de nutrientes, así como la muerte de los microorganismos asociados a las raíces de las plantas, que ocasiona también una marcada limitación de oxígeno.

En un cuerpo de agua superficial, la presencia de hidrocarburos pesados provoca la muerte de especies de fauna, la cual se da por asfixia, más que por intoxicación, ya que estos hidrocarburos forman una capa que impide el paso del oxígeno al interior del cuerpo de agua y la salida del bióxido de carbono hacia el exterior, conformando así un ambiente anaerobio.

En el caso de los acuíferos, el concepto de riesgo ecológico se refiere a la vulnerabilidad, esto es, la posibilidad de afectación de las aguas subterráneas por la presencia de hidrocarburos que alteran su calidad. Esta vulnerabilidad es una función directa de las características del subsuelo y del entorno. Los casos más críticos se refieren a la existencia de una capa de combustibles en fase libre que flotan sobre el nivel estático, y también al crecimiento de la mancha de contaminación por efecto del flujo subterráneo. Gasolina, turbosina y diesel son los principales combustibles contaminantes de aguas subterráneas, sus constituyentes más solubles en agua, como son: MTBE, benceno, tolueno, xilenos, etilbenceno y naftaleno (tabla 1), son los que avanzan con mayor facilidad y describen manchas de contaminación de gran extensión.

Los principales riesgos asociados a la salud humana derivados de la contaminación de acuíferos con hidrocarburos son la inhalación de vapores y la ingestión de aquellos hidrocarburos que están disueltos en agua, en algunos casos también se considera el contacto dérmico que se da principalmente en actividades recreativas. Este tipo de riesgo se da principalmente por el benceno, componente típico de gasolinas y turbosina, y que también se encuentra en el diesel (Saval *et al.*, 2003) el cual es carcinógeno a humanos por las vías de exposición de inhalación e ingestión. Debido a la solubilidad del benceno en agua, 1 750 mg/L (tabla 1), el arrastre por acción de la lluvia a partir de suelos contaminados constituye un importante riesgo de afectación a las aguas subterráneas. El MTBE, tiene una alta solubilidad en agua aún mayor al del benceno, de 48 000 mg/L, y aunque no se ha confirmado ser un carcinógeno a humanos su presencia en el agua es indeseable. El riesgo de que un individuo ingiera agua contaminada con hidrocarburos es mínimo cuando su apariencia y su olor son motivo de rechazo.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE ALGUNOS HIDROCARBUROS Y ADITIVOS PUROS

| Sustancia | Número de átomos de carbono | Peso molecular (g/mol) | Solubilidad en agua a 20-25°C (mg/L) | log (K _{OW}) Coeficiente de distribución octanol/agua | k _{oc} Coeficiente de sorción cm ³ /g | Constante de la Ley de Henry (adim) | Presión de vapor (a 20-25°C) (mm Hg) |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|--|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| MTBE (aditivo) | 5 | 88.1 | 48 000 | 1.3 | 12 | 0.0204 | 250 |
| Tetraetilo de plomo (aditivo) | 8 | 323 | 0.21 | 4.9 | 4 900 | 23.3 | 30 |
| Benceno | 6 | 78.1 | 1 750 | 2.1 | 59 | 0.228 | 95 |
| Tolueno | 7 | 92.1 | 526 | 2.8 | 180 | 0.272 | 28 |
| Xileno | 8 | 106.2 | 198 | 3.3 | 240 | 0.290 | 8.8 |
| Etilbenceno | 8 | 106.2 | 169 | 3.1 | 360 | 0.323 | 9.6 |
| Naftaleno | 10 | 128.2 | 31 | 3.4 | 2 000 | 0.0198 | 0.085 |
| Acenafeno | 12 | 154.2 | 4.24 | 3.9 | 7 100 | 0.00636 | 0.0023 |
| Acenafileno | 12 | 152.2 | 3.93 | 3.9 | 4 800 | 0.00467 | 0.00091 |
| Fluoreno | 13 | 166.2 | 1.98 | 4.2 | 14 000 | 0.00261 | 0.0084 |
| Fenantreno | 14 | 178.2 | 1.29 | 4.6 | 23 000 | 0.00160 | 0.00011 |
| Antraceno | 14 | 178.2 | 0.0434 | 4.6 | 30 000 | 0.00267 | 0.0000027 |
| Fluoranteno | 16 | 202.3 | 0.206 | 5.1 | 110 000 | 0.00066 | 0.000000012 |
| Pireno | 16 | 202.3 | 0.135 | 5.1 | 110 000 | 0.00045 | 0.0000025 |
| Benzo(a)antraceno | 18 | 228.3 | 0.0094 | 5.7 | 400 000 | 0.000137 | 0.000000031 |
| Criseo | 18 | 228.3 | 0.0016 | 5.7 | 400 000 | 0.00388 | 0.000000062 |
| Benzo(a)pireno | 20 | 252.3 | 0.0016 | 6.1 | 1 000 000 | 0.0000463 | 0.000000055 |
| Benzo(b)fluoranteno | 20 | 252.0 | 0.0015 | 6.2 | 1 200 000 | 0.00455 | 0.0000005 |
| Benzo(k)fluoranteno | 20 | 252.3 | 0.0008 | 6.2 | 1 200 000 | 0.000034 | 0.000000097 |
| Dibenzo(a,h)antraceno | 22 | 278.4 | 0.00249 | 6.7 | 3 800 000 | 0.00000603 | 0.0000000001 |
| Benzo(g,h,i)perileno | 22 | 276.3 | 0.00026 | 7.1 | 7 800 000 | 0.0000109 | 0.0000000001 |
| Indeno(1,2,3,c,d)perileno | 22 | 276.3 | 0.000022 | 6.7 | 3,500,000 | 0.0000656 | 0.0000000001 |

Adaptado de varias fuentes para unificar unidades

Pero cuando están en baja concentración y no son percibidos por el consumidor, el riesgo de ingestión y el daño a la salud pueden ser muy altos.

ALGUNOS ESCENARIOS QUE SE HAN ESTUDIADO

En México se han detectado varios sitios contaminados con afectación a las aguas subterráneas. Por razones de confidencialidad no es posible revelar su localización, sin embargo, se hace referencia a ellos para ejemplificar diferentes escenarios y situaciones de riesgo particulares. Todos los casos actualmente son expedientes abiertos para las autoridades ambientales y al mismo tiempo, constituyen experiencias de remediación.

Caso 1. En una zona industrial asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, ocurrieron varios derrames de gasolina y diesel. Los combustibles infiltraron hasta alcanzar el nivel de las aguas freáticas. Las arcillas, conforman una capa de 40 metros de espesor que funciona como acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). Bajo las arcillas, a 50 metros de profundidad se encuentra un acuífero de gran potencial. El flujo subterráneo en las arcillas es muy reducido, presenta una permeabilidad entre 10^{-7} y 10^{-9} m/seg. Las lluvias de temporada ocasionan una variación de la profundidad al nivel freático y con ello del espesor de la capa de hidrocarburos que se encuentran en fase libre. Aunque se ha detectado benceno en las aguas freáticas, no existe afectación en el acuífero profundo. Las arcillas funcionan como protector de las aguas subterráneas inferiores y limitan el movimiento del contaminante. En este caso, los riesgos asociados por explosión, la contaminación del acuífero profundo y el riesgo a la salud son muy bajos (figura 1).

Caso 2. En una zona urbana, cuyo subsuelo está constituido en sus aproximadamente 20 metros superiores por arenas pumíticas altamente permeables y bajo ellas materiales volcánicos y aluviones, se registró una fuga de gasolina y diesel los cuales infiltraron rápidamente al subsuelo hasta el nivel freático que se encuentra a entre 5 y 15 metros de profundidad. La zona no saturada entre la superficie y el nivel freático permite la libre circulación de volátiles, lo cual ocasiona la acumulación de éstos en instalaciones subterráneas, donde el riesgo por explosión es alto. No existe contaminación en el acuífero profundo a 40 metros de profundidad que se utiliza para consumo humano, por lo que se asume que no hay riesgo a la salud (figura 1).

Caso 3. Una zona urbano-industrial cuyo subsuelo está formado por rocas calizas que se elevan entre 10 y 20 m sobre el nivel del mar, presenta una muy alta permeabilidad a través de conductos de disolución. Las calizas están cubiertas por una capa de arcilla calcárea de alrededor de 5 metros de espesor, la cual

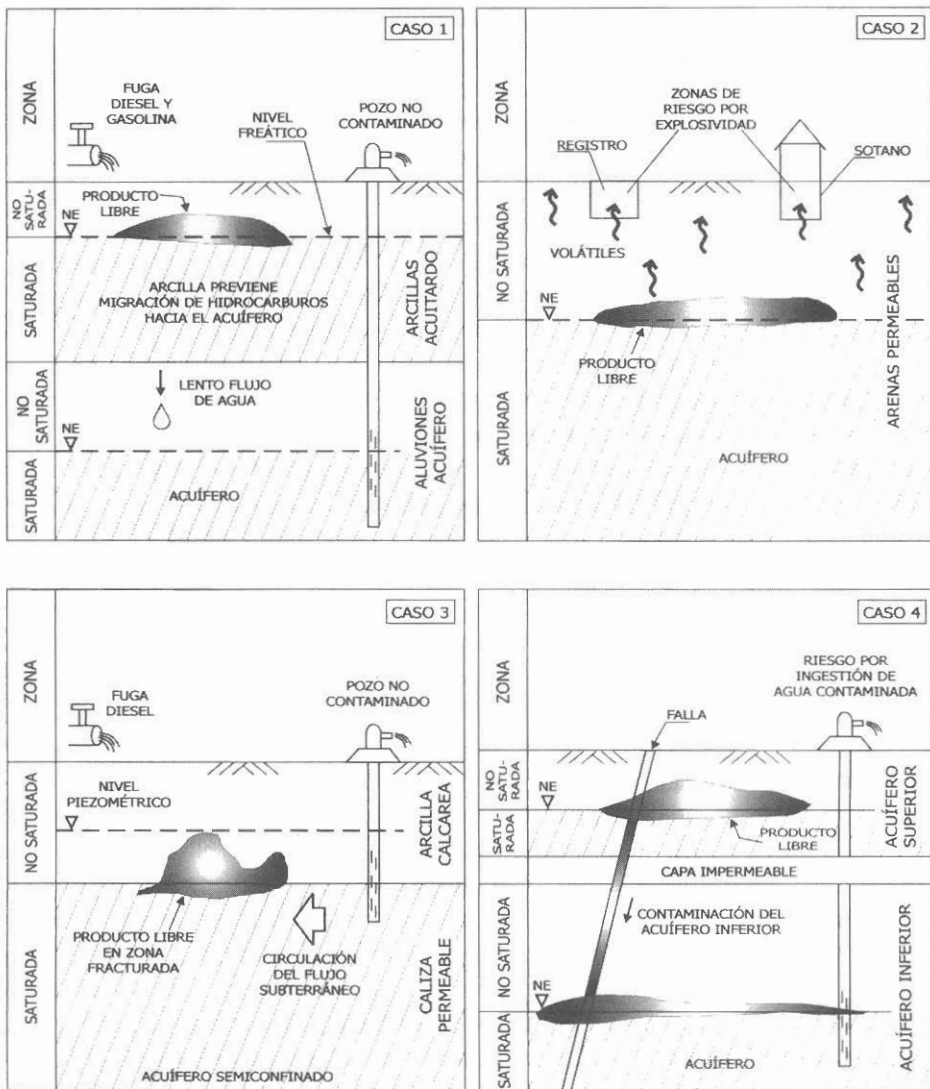


FIGURA 1. Modelos conceptuales de casos de contaminación de acuíferos.

ha funcionado como una capa de protección de la contaminación directa al acuífero calizo. En esta zona, se registró un derrame puntual de combustibles destilados, que infiltraron al subsuelo y se alojaron sobre el nivel del agua subterránea que se encuentra a alrededor de 3 m de profundidad. No se detectaron hidrocarburos adsorbidos en el suelo, pero sí se encontraron benceno y xilenos disueltos en el agua subterránea, en una zona bien delimitada la cual asegura que no ha existido migración de hidrocarburos. El riesgo por explosión es insignificante, el riesgo por ingestión es también mínimo debido a que la calidad del agua de la región es mala, pero el acuífero afectado parece corresponder al mismo de toda la región (figura 1).

Caso 4. En una zona urbano-industrial se detectaron hidrocarburos, mezclas de gasolina y diesel, en pozos de abastecimiento en un horizonte acuífero cuyo nivel estático se encuentra aproximadamente a 15 metros de profundidad. Existen además otros dos acuíferos, uno denominado intermedio a 30 metros de profundidad y otro denominado inferior a mayor profundidad. El subsuelo de la región está conformado principalmente por materiales aluviales y en menor proporción tobas y derrames lávicos, que permiten la circulación del flujo subterráneo. Existen fracturas que unen los acuíferos superior e intermedio, las cuales ocasionaron que los combustibles alojados en el acuífero superior viajaran fácilmente hacia el acuífero intermedio. En este caso, el riesgo a la salud es alto, en virtud de que el benceno está presente en los dos acuíferos que como se dijo anteriormente, son de abastecimiento (figura 1).

En cuanto a las acciones de saneamiento de los casos presentados, el hecho de haber encontrado producto en fase libre llevó inmediatamente a su extracción a través de bombeo. A pesar de que esta actividad se ha realizado durante varios años en 3 de los 4 casos mencionados, en ninguno de ellos se ha podido concluir, ya que los hidrocarburos siguen desorbiéndose de las capas de suelo y se hacen evidentes como pequeños espesores de producto libre o en forma de emulsión, la heterogeneidad del subsuelo hace difícil el poder establecer el tiempo que tomará esta desorción.

Como parte del saneamiento, se hace necesario retirar del agua subterránea todos aquellos hidrocarburos que se encuentran en forma emulsionada o disuelta, ello involucra bombeo y tratamiento antes de su reinyección al acuífero. Las opciones para el tratamiento del agua son: aeración para volatilizar los hidrocarburos más ligeros y retención de los restantes en una matriz que generalmente es carbón activado, sin embargo, lo más efectivo es la combinación de ambas, ya que un solo tipo de tratamiento no puede asegurar la reducción en la concentración de todos los hidrocarburos presentes, hasta los niveles deseados. Conviene mencionar que el tratamiento del agua subterránea y su reinyección al acuífero en pozos localizados aguas arriba, permite acelerar el movimiento del flujo subterráneo.

El costo de saneamiento de acuíferos es un tema que debe tratarse caso por caso, ya que es una función directa de varios aspectos entre los que resaltan: las características del subsuelo, las dimensiones de la mancha de contaminación, el espesor de producto libre, el volumen de agua subterránea a tratar, la concentración inicial de los contaminantes y los niveles de limpieza que pretenden ser alcanzados. Lo que si se puede generalizar es que la mayor parte del costo se refiere a la inversión en equipo, su operación y mantenimiento, ya que la labor y la disposición final del carbón activado representa solamente una mínima parte. A manera de ejemplo se puede citar que en el caso más complejo, la remediación del acuífero ha representado un costo aproximado de 50 millones de pesos, considerando dentro de este rubro la construcción de pozos de extracción como parte de la infraestructura necesaria.

Otro factor importante que es necesario resaltar se refiere al tiempo que toma una remediación, el cual incide directamente sobre el costo de la misma. Se podría establecer que en promedio se requieren por lo menos de 8 a 10 años de trabajo constante, sin interrupciones, para lograr resultados aceptables, sin embargo, de las experiencias que se han tenido en México, aún no se puede establecer el tiempo que tomará la remediación de un acuífero, ni el costo total, ya que hasta la fecha ningún caso se ha dado por concluido técnicamente, ni administrativamente. Con esto se hace evidente una muy baja factibilidad de lograr los resultados deseados, debido a las limitaciones propias del subsuelo, en especial al fenómeno de adsorción-desorción que ocurre en las capas de suelo cercanas al nivel estático, que se traduce en un aporte constante de hidrocarburos hacia el agua subterránea. Desde este punto de vista, tal vez los esfuerzos deberán enfocarse a encontrar otro tipo de soluciones.

MARCO LEGAL Y NORMATIVO

En casos de contaminación de acuíferos existen dos leyes aplicables, una es la Ley de Aguas Nacionales, (LAN, 1992) y la otra es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988; modificada en 1996). La primera considera únicamente a los residuos sólidos y las descargas de aguas residuales como posibles contaminantes de aguas subterráneas, mientras que la segunda, a los materiales y residuos peligrosos. En ninguno de estos dos instrumentos se establece clara y directamente un marco legal relacionado con la contaminación de aguas subterráneas derivada de derrames de hidrocarburos, únicamente se hace una interpretación en términos de "alteración de la calidad del agua". Respecto a lo anterior, conviene mencionar que durante el 2003, la Comisión Nacional del Agua en conjunto con el Congreso de la Unión promovieron un foro de consulta para la integración de una nueva Ley de Aguas Nacionales, la

cual se espera sea oficialmente publicada en los primeros meses del 2004. Esta nueva Ley (LAN, 2004), incorpora nuevos ordenamientos para la prevención y control de la contaminación de las aguas en general y en lo particular adopta el concepto de "Responsabilidad por Daño Ambiental", tomando como base lo establecido en la LGEEPA en 1996. De esta forma, se establece que la autoridad del agua intervendrá para que se cumpla con la reparación del daño ambiental, incluyendo aquellos daños que comprometan a ecosistemas vitales. De tal forma que las personas físicas o morales que causen la contaminación de un cuerpo de agua asumirán la responsabilidad de reparar el daño ambiental causado, mediante la eliminación de los contaminantes y la restitución de las condiciones que prevalecían antes de producirse el daño, y cuando no fuere posible, mediante el pago de una indemnización fijada en términos de la Ley. Al considerar los problemas de contaminación del agua como un delito ambiental, la Federación tendrá atribuciones para requerir la reparación del daño apoyándose en el Código Penal Federal, bajo el principio de "quien contamina, paga". Se espera que como parte de una Política Hídrica Nacional los nuevos ordenamientos señalados cubran el vacío en cuanto a la responsabilidad de la sociedad para proteger y, en su caso, se hagan responsables de reparar los daños ambientales provocados al recurso agua. No obstante, es pertinente señalar que las leyes deberán actualizarse a la par del conocimiento y del desarrollo tecnológico en la materia, a fin de asegurar su correcta aplicación y estricta observancia, particularmente en lo que se refiere a los límites permisibles de contaminantes y de restauración.

Por otra parte, el Reglamento correspondiente a la Ley de Aguas Nacionales (publicado en 1994), y el Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos que en su caso apoyaría a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (publicado en 1988), requieren de una urgente actualización, ya que de poco servirá contar con Leyes actualizadas, si no existen los elementos necesarios para su correcta aplicación.

En cuanto a los instrumentos normativos aplicables, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 hace referencia a los límites permisibles de calidad de agua para uso y consumo humano. La versión actualizada del año 2000 marca límites máximos permisibles para BTEX como sigue: benceno, 0.010 mg/L; tolueno, 0.700 mg/L; etilbenceno, 0.300 mg/L y xilenos (mezcla de isómeros), 0.500 mg/L. En relación a los hidrocarburos poliaromáticos se puede hacer referencia a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989), aunque únicamente considera dos de ellos: acenafteno y fluoranteno, en concentraciones máximas permisibles de 0.02 y 0.04 mg/L, respectivamente. Pero, ni la NOM-127-SSA1-1994 (actualización 2000), ni los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (1989) cubren el amplio espectro de hidrocarburos, además de que ninguno ha sido declarado oficialmente como el marco de referencia que regule específicamente los problemas de contaminación de acuíferos. Lo anterior deja clara la necesidad de

generar los instrumentos normativos necesarios, así como lo relativo a las técnicas de monitoreo y de análisis de laboratorio, sin perder de vista aquellas sustancias que presentan una mayor solubilidad en agua (tabla 1), una mayor incidencia (Saval *et al.*, 2003) o un riesgo a la salud y al ambiente en general.

Adicional a lo anterior, conviene señalar que parte de los vacíos legal y normativo a los que se hizo referencia anteriormente, radica en la estructura organizacional de la Secretaría del ramo, la Semarnat, en la cual la distribución de competencias no se da en función de las particularidades físicas del fenómeno de contaminación, sino en una concepción administrativa que limita la oportunidad de generar un sistema integrado “suelo-agua subterránea” y como consecuencia no permite atender los problemas de una manera integral. De aquí que se hace necesario promover una estructura integrada para tomar acciones coordinadas entre las diferentes dependencias de la propia Semarnat que están involucradas, así como una revisión detallada de la distribución de atribuciones y responsabilidades. Este planteamiento está sustentado en el hecho de que ambos elementos suelo y agua están íntimamente relacionados, por lo que si se logra controlar racionalmente todo lo que ocurre en el suelo se podrán prevenir los efectos negativos que pudieran afectar la calidad del agua subterránea.

PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Tomando como base lo anterior, el agua subterránea se debe proteger para asegurar que su consumo no presente riesgos a la salud y al medio ambiente en general, y para preservar el recurso a las generaciones futuras, situación que constituye la base de la sustentabilidad.

Prevenir la contaminación de los acuíferos es el mejor camino para reducir los riesgos a la salud asociados al consumo de agua de mala calidad. Es una acción altamente redituable en términos de la relación costo-beneficio, ya que los programas de prevención requieren en general, menos de 5% del costo utilizado para el saneamiento de acuíferos.

La prevención de la contaminación de aguas subterráneas se puede lograr básicamente a través de: i) La aplicación de programas para la protección de acuíferos, ii) la evaluación del impacto de las actividades humanas en el subsuelo y iii) la aplicación de políticas y estrategias de protección de la contaminación.

Los programas de protección del agua subterránea incluyen acciones como:

- Delimitación de áreas de protección alrededor de los pozos de abastecimiento de agua potable, restringiendo la realización de actividades potencialmente contaminantes.
- Desarrollo de planes de contingencia a fin de responder a una emergencia en el suministro de agua, generada por un evento de contaminación.

- Regulación y control en el uso de sustancias tóxicas, así como en la vigilancia de fuentes puntuales de contaminación.
- Desarrollo de un marco normativo en materia de saneamiento de acuíferos contaminados por hidrocarburos o actividades asociadas. Asimismo, la vigilancia periódica en apego a las normas permite controlar el deterioro del recurso.
- Protección de zonas de recarga las cuales deberán estar sujetas a un estricto control del uso del suelo o veda, para evitar que la construcción de obras civiles reduzca la infiltración de la precipitación al subsuelo, o que actividades potencialmente contaminantes lo contaminen.

Una evaluación del impacto del desarrollo económico en los acuíferos es una herramienta de planeación para apoyar la toma de decisiones relacionadas con la protección de fuentes de abastecimiento subterránea. Sus objetivos se pueden resumir como sigue (Biswas, 1992): 1) Identificar los efectos adversos que genera el desarrollo económico de una región en la calidad del agua subterránea; 2) identificar los problemas ambientales que requieren de un tratamiento o estudio a detalle; 3) involucrar a los usuarios en la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento de las aguas subterráneas; 4) apoyar a todos los sectores vinculados con aprovechamiento de los acuíferos para entender su relación y responsabilidad en la explotación del recurso.

Existen diversas metodologías para evaluar el impacto de las actividades antropogénicas sobre los acuíferos (Foster e Hirata, 1991), éstas varían desde la aplicación de métodos empíricos hasta modelos numéricos. Cada metodología requiere de determinada información, así como de procedimientos de análisis y su aplicación dependerá de la disponibilidad de información técnica, recursos humanos y financieros.

Las políticas y estrategias para la protección de acuíferos tienen como finalidad preservar la calidad natural de las aguas subterráneas, particularmente de aquellas destinadas al uso doméstico. Para ello se requiere de una organización con los recursos y la capacidad técnica y legal para coordinar y aplicar dichas acciones. De acuerdo con Vrba y van Wegeningh (1991) una estrategia permite:

- Establecer el valor del agua subterránea considerando los intereses y las necesidades a nivel nacional y local, así como la de los diferentes usuarios.
- Establecer el marco legal e institucional para la protección de acuíferos.
- Establecer un sistema de control y vigilancia sobre la disposición de contaminantes bajo el principio de que "el que contamina paga".
- Informar y educar al público en general sobre los programas de protección.

Debido a las características hidrogeológicas de cada región, la aplicación de un programa de protección a un nivel nacional es un ejercicio poco efectivo en términos de administración y control del recurso. Por ello, se recomienda conside-

rar otros criterios como son: el valor del agua y su vulnerabilidad en cada región de interés, así como el volumen disponible del recurso y la demanda actual y futura del agua en la región. Por lo anterior, las políticas de protección para una región deben estar estrechamente vinculadas con las características hidrogeológicas, sociales y económicas de la zona (Vrba, 1991).

BIBLIOGRAFÍA

- Biswas, A., 1992, "Environmental Impact Assessment for Groundwater Management", *International Journal of Water Resources Development*, 8 (2), pp. 113-117.
- "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua", 1989, *Diario Oficial de la Federación*, diciembre 2.
- Foster, S.S.D. y R. Hirata, 1991, *Groundwater Pollution Risk Assessment*. Pan American Health Organization, WHO, Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, Lima, Perú.
- "Ley de Aguas Nacionales", 1992, *Diario Oficial de la Federación*, 01 de diciembre de 1992.
- "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente", 1996, *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero de 1988; "Decretos de modificación", *Diario Oficial de la Federación*, 13 de diciembre de 1996; 06 de enero del 2000 y 31 de diciembre del 2001; "Reformas", *Diario Oficial de la Federación*, 25 de febrero del 2003.
- NOM-127-SSA1-1994, 2000, "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", Modificación, *Diario Oficial de la Federación*, octubre 20, pp. 1-8.
- "Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales", 1994, *Diario Oficial de la Federación*, 12 de enero de 1994.
- "Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos", 1988, *Diario Oficial de la Federación*, noviembre 25.
- Saval S., Ruíz I., García D., Guzmán A.G., Maya L. y Pérez A., 2003, "Hidrocarburos contaminantes de aguas subterráneas", en ponencia presentada en el *IV Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*, Asociación Geohidrológica Mexicana A.C., San Luis Potosí, S.L.P., septiembre.
- Vrba J., 1991, *Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection and Pollution. Criteria for and Approaches to Water Quality Management in Developing Countries*, Natural Resources Water Series, 26, United Nations, Nueva York.
- Vrba J. y H.G. van Waegeningh, 1991, *Groundwater Protection. Integrated land Use Planning and Groundwater Protection in Rural Areas*, International Hydrological Programme, UNESCO, París.