

# Gestión Sustentable del Agua Subterránea

## Conceptos y Herramientas

Serie de Notas Informativas Nota 8

## Protección de la Calidad del Agua Subterránea

### definición de estrategias y establecimiento de prioridades

2002-2005

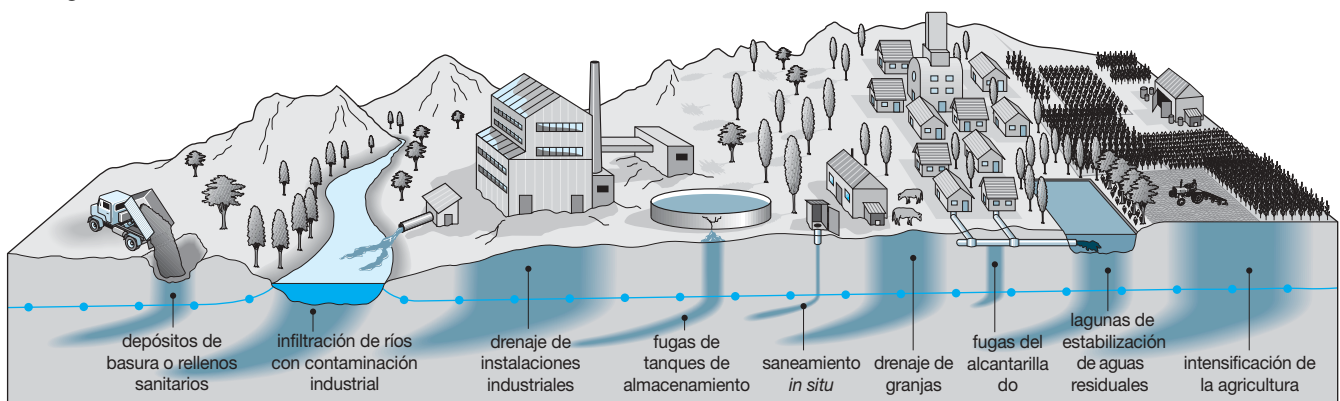
**Autores** (Grupo Base del GW•MATE)

Stephen Foster<sup>1</sup> Héctor Garduño<sup>2</sup> Karin Kemper Albert Tuinhof Marcella Nanni Charles Dumars  
 (<sup>1</sup>autor líder <sup>2</sup>autor de apoyo principal)

### ¿Por qué se debe proteger las fuentes de abastecimiento de agua subterránea?

- El agua subterránea es un recurso natural vital para el suministro confiable y económico de agua para consumo humano en los ámbitos urbano y rural. Por ello, juega un papel fundamental (aunque a menudo poco valorado) en el bienestar humano y de algunos ecosistemas acuáticos y terrestres.
- Un prerrequisito para el abastecimiento municipal de agua es que el agua bruta que entra al sistema sea de calidad alta y relativamente constante, y la fuente que mejor cumple con ello es el agua subterránea, por ser un recurso protegido. Para lograr este objetivo, recurrir a procesos de tratamiento (más allá de la desinfección preventiva) debería ser el último recurso, pues los sistemas resultan costosos y técnicamente complejos, además de que implican una gran carga operativa.
- Sin embargo, con demasiada frecuencia en el pasado los recursos de agua subterránea han sido 'abandonados a su suerte' y quienes los explotan para suministro de agua potable no han tomado acciones para proteger la calidad del agua.
- A nivel mundial, los acuíferos (formaciones geológicas que contienen recursos de agua subterránea aprovechables) experimentan una creciente amenaza de contaminación ocasionada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la explotación minera. Por lo tanto, se requieren campañas proactivas y acciones prácticas que protejan la calidad original (generalmente excelente) del agua subterránea.

**Figura 1: Usos del suelo que normalmente generan amenazas de contaminación del agua subterránea**



Estas acciones se justifican plenamente si se consideran tanto criterios amplios de sustentabilidad ambiental como criterios de beneficio económico más estrechos.

- En algunos casos, lleva muchos años o décadas que el impacto de contaminación por un compuesto persistente se manifieste en el agua subterránea que proviene de pozos profundos. Esto puede llevar a una actitud complaciente sobre la amenaza de contaminación, pero la implicación real es que, una vez que resulta obvio que la calidad del agua subterránea ha sido contaminada, generalmente es porque ya están afectados grandes volúmenes del acuífero, y las medidas de limpieza casi siempre tienen un alto costo económico y son técnicamente complicadas.

### ¿Cómo se contaminan los acuíferos?

- La contaminación de acuíferos ocurre si la carga contaminante sub-superficial generada por descargas y lixiviados antropogénicos (de actividades urbanas, industriales, agrícolas y mineras) no se controla adecuadamente y (en ciertos componentes) excede la capacidad natural de atenuación del terreno y los estratos subyacentes (Figura 1).
- Los perfiles naturales del subsuelo activamente degradan múltiples contaminantes del agua y, por mucho tiempo, han sido considerados potencialmente efectivos para realizar un depósito final ('disposal') seguro de excretas humanas y aguas residuales de origen doméstico. La autoeliminación de contaminantes durante el transporte sub-superficial en la zona no saturada del subsuelo es el resultado de su degradación biológica y de diversas reacciones químicas, pero también se debe al retraso en el transporte del contaminante (ocasionado por su sorción en la superficie de arcillas minerales y/o de materia orgánica), ya que aumenta en gran medida el tiempo disponible para que los otros procesos mencionados eliminen los contaminantes.
- Sin embargo, no todos los perfiles del subsuelo y de los estratos subyacentes son igualmente eficaces en la remoción de contaminantes. Preocupa en especial la posibilidad de contaminar los llamados acuíferos freáticos (no confinados), especialmente cuando la zona no saturada es poco profunda y los niveles del agua

**Tabla 1: Contaminadores comunes de agua subterránea y fuentes asociadas de contaminación**

FUENTE DE CONTAMINACIÓN	TIPO DE CONTAMINANTE
Actividad Agrícola	nitratos; amonio; pesticidas; microorganismos fecales
Saneariento <i>in situ</i>	nitratos; microorganismos fecales; trazas de hidrocarburos sintéticos
Gasolineras y Talleres Automotrices	benceno; otros hidrocarburos aromáticos; fenoles; algunos hidrocarburos halogenados
Déposito Final de Residuos Sólidos	amonio; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; metales pesados
Industrias Metalúrgicas	tricloroetileno; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales pesados; fenoles; cianuro
Talleres de Pinturas y Esmaltes	alcalobencenos; tetracloroetileno; otros hidrocarburos halogenados; metales; algunos hidrocarburos aromáticos
Industria Maderera	pentaclorofenol; algunos hidrocarburos aromáticos
Tintorerías	tricloroetileno, tetracloroetileno
Manufactura de Pesticidas	algunos hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico metales pesados
Déposito Final de Lodos Residuales Domésticos	nitratos; varios hidrocarburos halogenados; plomo; cinc
Curtidurías	romo; salinidad; algunos hidrocarburos halogenados; fenoles
Exploración y Extracción de Petróleo/Gas	salinidad (cloruro de sodio); hidrocarburos aromáticos
Minas de Carbón y de Metales	acidez; diversos metales pesados; hierro; sulfatos

son someros, así como el caso de acuíferos semi-confinados, si los acuitardos confinantes son relativamente delgados y permeables.

- La Tabla 1 da una idea de las actividades más comunes que pueden llegar a contaminar el agua subterránea. Es importante reconocer que estas difieren por mucho de las actividades y compuestos que más frecuentemente contaminan los cuerpos de agua superficial. Esto se debe a que la contaminación en el subsuelo depende de factores muy disímiles que controlan la movilidad y persistencia de los contaminantes, originados por la matriz del acuífero y las tasas mucho más lentas de biodegradación (como resultado de las bajas concentraciones de carbón orgánico, la reducida población de bacterias y la limitada difusión de oxígeno).
- También es importante enfatizar que ciertas prácticas industriales y agrícolas (y procesos específicos que se magnifican dentro de dichas prácticas) a menudo presentan amenazas desproporcionadamente grandes a la calidad del agua subterránea. Por ello, medidas de control de contaminación atinadas y bien enfocadas y dosificadas pueden producir grandes beneficios con costos relativamente moderados.

### ¿Cómo se puede evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea?

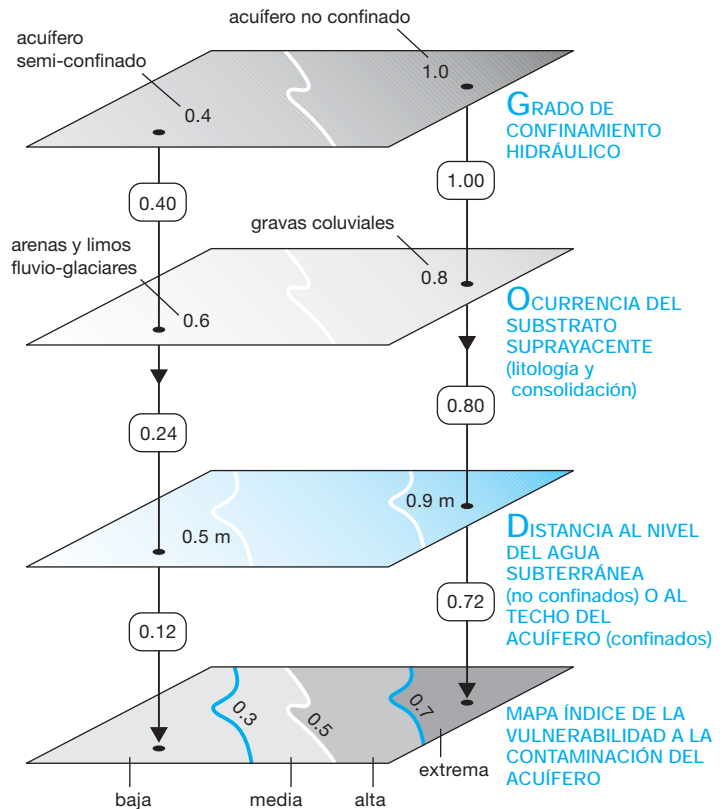
- Es necesario evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea antes de poder definir en forma más clara las acciones necesarias para proteger su calidad, y tal evaluación debe convertirse en un componente esencial de las *buenas prácticas ambientales*. La definición lógica del peligro de contaminar el agua subterránea (Tabla 2) parte del análisis de la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y la carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al ambiente sub-superficial como resultado de la actividad humana que ocurre en la superficie del suelo. Al aplicar un esquema de esta naturaleza, se puede hallar una vulnerabilidad alta, pero sin peligro de contaminación, debido a la ausencia de una carga contaminante sub-superficial importante. Más aún, la carga contaminante se puede controlar o modificar, pero la vulnerabilidad de un acuífero no, ya que en esencia es determinada por las condiciones hidrogeológicas naturales.
- La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación es, en forma práctica, lo inverso de lo que en la jerga de la gestión de calidad del agua de ríos se conoce como 'la capacidad de asimilación de contaminantes por un cuerpo receptor'. Se puede evaluar a partir de las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes. La definición de índices para cada una de estas características (Figura 2) permite construir un índice general de vulnerabilidad que se puede representar con facilidad en un mapa. La superposición de este mapa con otro con los resultados de los levantamientos en campo de la carga potencial contaminante sub-superficial facilita la evaluación del peligro de contaminar el agua subterránea.

**Tabla 2: Definición de términos comunes relacionados con la contaminación del agua subterránea**

TÉRMINO	DEFINICIÓN
Vulnerabilidad de un Acuífero a la Contaminación	sensibilidad a la contaminación, determinada por las características naturales intrínsecas de los estratos geológicos que forman los lechos confinantes suprayacentes o la zona no saturada del acuífero en cuestión
Peligro de Contaminación del Agua Subterránea	probabilidad de que el agua subterránea de un acuífero se contamine a concentraciones superiores a las marcadas en los lineamientos de la OMS para agua potable cuando una carga contaminante sub-superficial específica se genere en la superficie del terreno
Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea	amenaza a la salud humana por la contaminación de una fuente específica de suministro de agua subterránea, o amenaza a un ecosistema por la contaminación de una descarga natural específica de un acuífero

- La posibilidad de que este peligro se convierta en una amenaza real a una fuente de abastecimiento público depende, en primer lugar, de su ubicación con respecto a las fuentes de agua subterránea (y de la dirección del flujo y zona de captación) y, en segundo lugar, de la movilidad del contaminante (o contaminantes) en cuestión dentro del régimen local del flujo de agua subterránea. Normalmente se deben definir varias áreas y zonas (Figura 3), utilizando los datos hidrogeológicos sobre el régimen local del flujo de agua subterránea. Hay varios modelos analíticos y numéricos para facilitar su delineación.
- La escala a la cual se realicen las mediciones, trazados y análisis de los diversos componentes necesarios para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea variará de acuerdo con el enfoque principal del trabajo, ya sea la protección de la fuente de abastecimiento de agua o la protección del recurso acuífero.
- La evaluación del peligro de contaminar el agua subterránea debería instar a las autoridades municipales o a las agencias reguladoras ambientales a tomar acciones tanto preventivas (para evitar contaminación a futuro) como correctivas (para controlar la amenaza de contaminación que representan actividades existentes y pasadas).

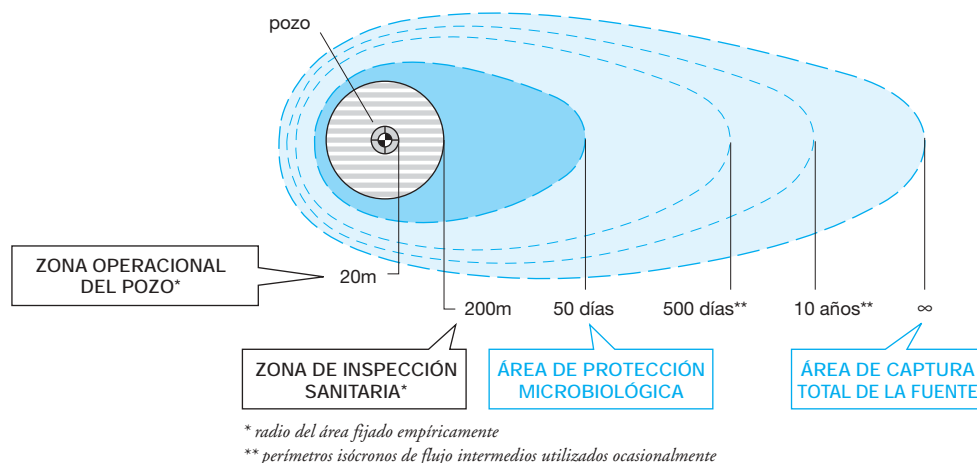
**Figura 2: Generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes**



**¿Qué implica la protección del agua subterránea contra la contaminación?**

- Para proteger los acuíferos contra la contaminación es esencial controlar las prácticas de uso del suelo, las descargas de efluentes y el depósito final de residuos; sin embargo, es necesario definir estrategias pragmáticas que permitan equilibrar diversos intereses que compiten entre sí. Así, en vez de aplicar controles universales sobre uso del suelo y descarga de efluentes, es más eficaz por el mismo costo ('cost-effective'), y menos perjudicial al desarrollo económico, utilizar la capacidad natural de atenuación de contaminantes de los estratos suprayacentes al acuífero, cuando la capacidad de control sea la que se necesita para proteger la calidad del agua subterránea.
- Es necesario establecer zonas simples y sólidamente definidas (basadas en perímetros de vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y de protección de fuentes), con matrices que muestren dónde es posible realizar qué actividades, con un riesgo aceptable para el agua subterránea. La zonificación para la protección del agua subterránea también juega un papel clave al establecer prioridades para el monitoreo de su calidad, premisas para realizar auditorías ambientales en industrias, acciones de control de contaminación dentro de un sistema agrícola y limpieza de terrenos históricamente contaminados, así como para educación pública en general. Todas estas actividades son componentes esenciales de una estrategia sustentable para la protección de la calidad del agua subterránea.
- Es necesario lograr un equilibrio razonable entre la protección de los recursos de agua subterránea (los acuíferos en conjunto) y la protección de fuentes específicas (pozos y manantiales). Aunque ambos enfoques

**Figura 3: Esquema idealizado de zonas sanitarias y perímetros de flujo de agua subterránea para proteger a un pozo en un acuífero confinado**



son complementarios, el hecho de que se enfatice uno u otro (en una zona específica) dependerá de la situación de explotación de los recursos y de las condiciones hidrogeológicas que prevalezcan.

- Si el uso para consumo humano sólo comprende una parte reducida del recurso de agua subterránea disponible, quizá no resulte eficaz por el mismo costo proteger todas las partes de un acuífero por igual. Entonces, será más apropiado establecer estrategias orientadas a las fuentes, y trabajar a escalas de 1:25.000 a 100.000, y:
  - delinear zonas de protección (de captación) para las fuentes de agua subterránea y perímetros isócronos de flujo
  - evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y las cargas de contaminantes sub-superficiales en las áreas así definidas.

Este enfoque es más propicio para acuíferos relativamente uniformes y no consolidados, explotados sólo por medio de un pequeño número de pozos municipales de suministro de agua que sean muy productivos y con regímenes estables de bombeo. No se puede aplicar tan fácilmente en acuíferos con un gran número de extracciones individuales en rápido crecimiento ya que no es práctico considerar las fuentes individuales y establecer áreas fijas.

- Las estrategias dirigidas a los acuíferos se pueden aplicar de una forma más general, ya que se orientan a lograr un cierto grado de protección para todo el recurso de agua subterránea y para todos sus usuarios. Implican el mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación en áreas más extensas (que incluyen uno o más acuíferos importantes), y requieren trabajar a escala de 1:100.000 o superior si el interés se limita a efectos de información y planificación general. Dicho mapeo vendría seguido normalmente por un inventario de la carga de contaminantes sub-superficiales a escala más detallada para cubrir, por lo menos, las áreas más vulnerables.

### ¿Quién debe promover la protección del agua subterránea contra la contaminación?

- La responsabilidad final de la protección del agua subterránea contra la contaminación debe recaer sobre la agencia apropiada del gobierno nacional o local. Pero, dada su responsabilidad para cumplir con normas de prácticas responsables de ingeniería, también las empresas de agua potable y alcantarillado tienen la obligación de realizar activamente (o al menos promover), para todas sus fuentes de suministro, evaluaciones del peligro de contaminación.
- GW-MATE produjo una guía técnica para especialistas en agua subterránea, ingenieros, científicos y profesionales en general del área ambiental, a quienes recurren las empresas de agua potable y alcantarillado



y saneamiento para que realicen la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea, así como las agencias y autoridades municipales ambientales (entre ellas, las que se ocupan del ordenamiento territorial, la descarga de efluentes y el control del depósito final de residuos) para desarrollar estrategias de protección.

- El procedimiento de evaluación propuesto es complementario de otras acciones de investigación, evaluación y gestión del agua subterránea. Está diseñado para llevarse a cabo de manera relativamente rápida y para utilizar información que ya ha sido recabada para otros propósitos o que pueda ser recabada fácilmente en campo. Si se sigue la metodología presentada, un equipo de trabajo apropiado puede completar una evaluación del peligro de contaminación de los recursos y fuentes de agua subterránea en un período de 2 a 12 meses, dependiendo del tamaño y complejidad del área que se considere.
- Los procedimientos para evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea presentados constituyen un vehículo eficaz para que grupos interesados y relevantes (entre ellos, los usuarios del agua y los potenciales contaminadores del acuífero) inicien su participación. Los mismos proporcionan una base sólida para exigir con energía a la agencia reguladora local del ambiente y recursos hídricos que se implementen las medidas necesarias de control de contaminación y protección de acuíferos. Incluso donde no existen legislación o agencias adecuadas de control de la contaminación, normalmente será posible presionar al gobierno local o a la autoridad municipal para que emita decretos que permitan tomar acciones protectoras en beneficio de la población local.

### Lecturas Adicionales

Alley, W.M., ed. 1993. *Regional Groundwater Quality*. Van Nostrand Reinhold: New York.

Clarke, R., Lawrence, A. and Foster, S. 1996. *Groundwater—a Threatened Resource*. UNEP Environment Library 15.

Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F. and Schiffler, M. 2000. *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. World Bank Technical Paper 463: Washington-D.C., USA

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. and Paris, M. 2002. *Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies*. World Bank Publication: Washington-D.C., USA

Foster, S., Lawrence, A. and Morris, B. 1997. *Groundwater in Urban Development: Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies*. World Bank Technical Paper 390: Washington-D.C., USA

Kovar, K. and Krasny, J. 1995. *Groundwater Quality: Remediation and Protection*. IAHS Publication 225: IAHS Press: Wallingford, UK.

#### Publicación

La Serie de Notas Informativas del GW•MATE ha sido publicada por el Banco Mundial, Washington D.C., EEUU. La traducción al español fue realizada por Héctor Garduño. También, está disponible en formato electrónico en la página de Internet del Banco Mundial ([www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate)) y la página de Internet de la GWP – Asociación Mundial del Agua ([www.gwpforum.org](http://www.gwpforum.org))

Los resultados, interpretaciones y conclusiones expresados en este documento son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Directorio Ejecutivo del Banco Mundial ni de los gobiernos en él representados.

#### Patrocinio económico



El GW•MATE (Groundwater Management Advisory Team – Equipo Asesor en Gestión de Aguas Subterráneas) es parte del Bank-Netherlands Water Partnership Program (BNWPP) y usa fondos de fideicomiso de los gobiernos holandés y británico.

