

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación acuífera: ¿ayuda o impedimento para la promoción de la protección de las aguas freáticas?

Stephen Foster • Ricardo Hirata • Bartolomeo Andreo

Palabras claves: Vulnerabilidad a la contaminación acuífera • Protección de las aguas freáticas • Control de la contaminación

El concepto de vulnerabilidad: una perspectiva histórica

El término ‘vulnerabilidad a la contaminación acuífera’ fue acuñado por primera vez por Margat (1968) y posteriormente la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA, por sus siglas en inglés) dio una definición práctica más un conjunto de herramientas prácticas a mediados de la década de 1980 por medio del DRASTIC (Aller et al. 1987) y de la OMS y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) por medio de GOD (Foster 1987; Foster e Hirata 1988). El concepto trató de representar la sensibilidad de un acuífero a ser impactado negativamente en un punto determinado por una presión (o carga) contaminante impuesta desde la superficie terrestre. Es posible que:

- Sea de alta vulnerabilidad pero sin riesgo de contaminación debido a la ausencia de una carga contaminante.
- Se controle la carga contaminante de acuerdo con la vulnerabilidad a la contaminación acuífera.

Recibido: 6 de febrero de 2013 / Aceptado: 4 de julio de 2013

Publicado en línea: 26 de julio de 2013

* Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Stephen Foster es presidente de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), 2004–2008

S. Foster (✉)

c/o International Association of Hydrogeologists (IAH), Apdo. postal 4130
Goring, Reading, RG8 6BJ, RU

Correo electrónico: iahfoster@aol.com

R. Hirata

Universidade de São Paulo–Groundwater Research Center
(CEPAS), São Paulo, Brasil

Correo electrónico: hirata@usp.br

B. Andreo

Universidad de Málaga–Centro de Hidrogeología (CEHIUMA),
Málaga, España

Correo electrónico: andreo@uma.es

De manera análoga a términos como ‘sobreexplotación de las aguas freáticas’, ‘sostenibilidad de los recursos’, y ‘aguas freáticas no renovables’, el término ‘vulnerabilidad a la contaminación acuífera’ (aunque esté justificado científicamente) no puede ser definido rigurosamente dado que:

- Todos los acuíferos tienen cierto nivel de vulnerabilidad a la contaminación por contaminantes muy móviles y persistentes (tales como, salmueras y, en muchos casos, nitrato).
- La vulnerabilidad en realidad es específica al tipo de contaminantes y al escenario de contaminación.

A pesar de que el concepto de vulnerabilidad a la contaminación acuífera ha demostrado ser un ‘puente de comunicación’ útil entre las necesidades de protección de la calidad de las aguas freáticas (entre los subsectores de hidrogeólogos y el manejo ambiental y del uso del terreno), y ha permitido que la administración pública se aproveche de la capacidad natural para atenuar los contaminantes de los estratos suprayacentes a un cuerpo de aguas freáticas al graduar la aplicación de las limitaciones en el uso de la tierra y de las medidas para el control de la contaminación según sea necesario.

Durante los años 1990, la valoración y el mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera fueron cada vez más aceptados como una herramienta para la caracterización hidrogeológica de los sistemas de aguas freáticas después de ser adoptados por el Consejo de Investigación Nacional de EE.UU. (NRC; US-NRC 1993) y la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) (Vrba y Zaporozec 1994). Si bien la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (UE) de 2000 y la Directiva de las Aguas Freáticas de 2006 no mencionan específicamente el término vulnerabilidad a la contaminación acuífera, este queda implícito en el proceso de la caracterización del acuífero y la valoración del riesgo alegado. De hecho, se convirtió en un aspecto central de la Directiva Marco del Agua de la UE-Estrategia de Implementación Común (CE-Dirección General para el Ambiente 2008), lo cual constituye un avance importante en la incorporación de los temas hidrogeológicos en la administración ambiental de una gran cantidad de países.

Durante la implementación de la Directiva Marco del Agua de la UE, se decidió que debían analizarse más detalladamente las metodologías de mapeo de la vulnerabilidad en los terrenos de piedra caliza cársica en vista de las características especiales (que a menudo incluyen zonas con una vulnerabilidad a la contaminación extremadamente altas), y porque constituyen más

del 30% de la masa terrestre de la UE.

‘Vulnerabilidad’: ¿indicador esencial o simplificación excesiva y peligrosa?

El término vulnerabilidad a la contaminación acuífera tiene el propósito de representar el nivel variable de la protección natural permitida por la capacidad para atenuar los contaminantes de la zona insaturada o de los lechos semi-confinadores sobre un acuífero, como resultado de los procesos físico-químicos (filtración, biodegradación, hidrólisis, adsorción, neutralización, volatilización y dispersión), todos los cuales varían según su textura, estructura, contenido de arcilla, materia orgánica, pH, redox y equilibrios de carbonatos.

En la práctica, la producción de mapas de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera (en cualquier escala) inevitablemente conllevará mucha simplificación de las condiciones geológicas naturalmente complejas y de los procesos hidrológicos. En este contexto, varios temas (básicamente técnicos) han presentado dificultades, entre ellas:

- La clasificación de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera para algunas formaciones, dada la marcada estratificación de su litología y propiedades hidrogeológicas.
- Incorporación de la función de los suelos y de los horizontes meteorizados, en términos de la modificación de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera tomando en cuenta la posibilidad del flujo preferencial.
- Análisis de la pérdida de riachuelos en afloramientos acuíferos tomando en cuenta el drenaje de la superficie de las áreas aloctónas (especialmente, pero no exclusivamente, en terrenos cársticos).
- El efecto de los cambios hechos por el hombre en el medio natural (es decir, remoción de tierra y roca, disminución o recuperación de la capa freática, etcétera).

Estos factores han contribuido a la proliferación de las metodologías para la valoración de la vulnerabilidad acuífera, y se corre el riesgo de que los administradores ambientales cuestionen la credibilidad profesional de los hidrogeólogos, debido a la falta de consenso en la aplicación de la metodología.

Además, algunas veces se ha dado la impresión de que todas las presiones contaminantes pueden ser manejadas por medio de la atenuación natural, lo cual obviamente es erróneo debido a que algunos contaminantes más persistentes no experimentan atenuaciones importantes en la mayoría de los estados del subsuelo. De esta manera, el enfoque de vulnerabilidad deber armonizarse aún mejor con las ‘estrategias para la prevención y limitación de los contaminantes’, en las que la descarga de algunos químicos de alta movilidad, toxicidad y riesgo de contaminación (como son diversos solventes industriales y

algunos productos farmacéuticos) se previene o restringe con la atenuación natural solo en el caso del manejo de los contaminantes degradables.

Consideraciones claves para mejorar la aplicación práctica

Prioritariamente entre ellas está que el propósito de los mapas de vulnerabilidad a la contaminación es servir como un instrumento de diagnóstico para identificar donde se necesita más la investigación hidrogeológica detallada y las medidas prioritarias de protección ante una amenaza de contaminación de las aguas freáticas. De esta forma están listas para utilizarse en:

- La evaluación sistemática de los riesgos de contaminación a una masa de aguas subterráneas.
- Las valoraciones de impacto ambiental para un grupo determinado de las potenciales instalaciones contaminantes

Claramente sería preferible encargar una valoración hidrogeológica detallada de cada desarrollo que pudiera constituir una amenaza a la calidad del agua freática, pero no es rentable ni factible económicamente dada la multiplicidad de la amplia gama de amenazas existentes. De esta manera, se necesita un instrumento de diagnóstico y los mapas de vulnerabilidad a la contaminación acuífera tienen el propósito de dar una primera indicación de los posibles riesgos a la contaminación del agua freática, con el fin de permitir que los reguladores, planificadores y desarrolladores emitan juicios más informados referente a (a) los nuevos desarrollos propuestos y (b) la necesidad vinculada a llevar a cabo investigaciones hidrogeológicas detalladas y contar con disposiciones especiales para controlar la amenaza a contaminación del agua freática que ellos representan.

El uso actual del término ‘vulnerabilidad’ es demasiado amplio para brindar una plataforma sólida para comunicar las preocupaciones hidrogeológicas sobre el riesgo de contaminación del agua freática, dado que en la literatura científica aún existe una falta de consistencia y claridad acerca de los términos tan usados: vulnerabilidad ‘extrema’, ‘alta’, ‘baja’ y ‘negligente’. Si bien la ‘vulnerabilidad a un contaminante universal en un escenario típico de contaminación’ no tiene validez científica, la valoración y el mapeo de la ‘vulnerabilidad específica’ a un contaminante y a un proceso de contaminación específicos a menudo serán complejos o imprácticos.

Una vulnerabilidad relacionada solamente con el proceso del transporte y la atenuación de contaminantes verticales es un concepto mucho más útil para aplicarlo en el manejo ambiental y del uso del terreno y puede legitimarse científicamente al emplear las definiciones apropiadas para las distintas clases de vulnerabilidad (Cuadro 1). Tal definición inequívoca de las categorías de vulnerabilidad es más útil que usarla como un término relativo (como se hace con frecuencia). Además, y lo que es más importante, esta definición es significativa para los no

Cuadro 1. Esquema de la definición práctica según las clases de vulnerabilidad a la contaminación acuífera (desarrollado por Foster et al. 2007)

Clase de vulnerabilidad	Definición práctica	Tipos de contaminante con probabilidades de penetración	Medidas de protección exigidas ^{a,b}
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua con un rápido efecto en muchos escenarios de contaminación	Criptosporidios, bacterias y virus fecales, metales pesados, combustibles de hidrocarburo, una amplia gama de compuestos orgánicos sintéticos, líquidos y nutrientes salinos	Suposición de que se prohibirán todas las actividades potencialmente contaminantes o solo serán permitidas a una baja intensidad con contención excepcional y cara, monitoreo e inspección detalladas
Alta	Vulnerable a diversos contaminantes (a menos que se haya una fuerte absorción o rápida degradación) en muchos escenarios de contaminación	Algunos virus fecales, combustibles de hidrocarburo, una amplia gama de compuestos orgánicos sintéticos, líquidos y nutrientes salinos	Suposición de que se prohibirán muchas de las actividades potencialmente contaminantes o estarán sometidas a controles detallados y a un gasto adicional considerable en términos de diseño, inspección y monitoreo
Baja	Solo vulnerable a los contaminantes conservadores a largo plazo, principalmente cuando se descarga amplia y rápidamente en el suelo.	Nitrato, líquidos altamente salinos y riesgo de penetración de compuestos orgánicos clorados no acuosos de alta densidad ^c y algunos productos farmacéuticos ^c	Suposición de que se permitirán la mayoría de las actividades de desarrollo y solo estarán sometidas a las condiciones normales de diseño, excepto por aquellas que involucran lagunas sin forro o drenaje con sumideros ciegos y/o el manejo de químicos peligrosos para el agua subterránea ^c
Casi inexistente	Confinado fuertemente sin filtración vertical al agua freática.	Posibilidad de penetración de los compuestos orgánicos halogenados no acuosos de alta densidad ^c	Suposición de que se permitirán la mayoría de las actividades de desarrollo y solo estarán sujetas a las condiciones normales de diseño

^a Con respecto a las instalaciones industriales, extracción, almacenamiento y transporte de hidrocarburos, las actividades mineras y los complejos residenciales, la armonización de la tierra para uso agrícola con la vulnerabilidad de las aguas subterráneas debe abordarse desde varios puntos utilizando las 'mejores prácticas de agricultura', prohibiendo el uso de ciertos pesticidas y con mejores incentivos para la custodia del territorio.

^b Las acciones y medidas requeridas con respecto a las actividades potencialmente contaminantes existentes están extensamente alineadas con aquellas indicadas para los nuevos desarrollos, pero los controles suplementarios para reducir el riesgo a la contaminación del agua freática deberán ser introducidos paulatinamente por medio de negociaciones.

^c Los tipos de contaminantes que son tanto tóxicos como excepcionalmente móviles y persistentes en los sistemas de agua freática, que deberían someterse universalmente a una 'estrategia de prevención' en términos de descargas a tierra.

hidrogeólogos, ya que puede interpretarse en términos prácticos por medio de la referencia cruzada en un nivel específico del riesgo de contaminación del agua freática para varias clases de contaminantes y para las medidas de protección que debe activar. En sintonía con este enfoque, solamente es realista definir cuatro categorías de vulnerabilidad, dado que no se ganará nada al tener muchas más 'sombras' de vulnerabilidad si no pueden vincularse específicamente con decisiones relativas al manejo del uso de la tierra y ambiental.

Además, los autores opinan que:

- Es una falacia creer que cuanto más compleja es una metodología de vulnerabilidad más cercana a la realidad estarán las valoraciones y los mapas de vulnerabilidad a la contaminación generados.
- Las categorías de vulnerabilidad sin una definición práctica y clara son más peligrosas que útiles.
- Cuanto más complejo es el proceso de valoración de la vulnerabilidad, mayor la probabilidad de obscurecer lo obvio y hacer que lo sutil sea imposible de distinguir.
- Por supuesto, una mayor comprensión hidrogeológica conllevará una mejor aplicación de las metodologías de

vulnerabilidad a la contaminación. Sin embargo, estos métodos deberán evaluarse en cuanto a su habilidad para incorporar (tan simple y efectivamente como sea posible) los principales parámetros que controlan el acceso hidráulico y la protección natural del acuífero y no en términos de cuantos parámetros incorporan.

El propósito de los mapas de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera es usarlos interactivamente con los estudios de carga contaminante del subsuelo para determinar el riesgo de contaminación del agua freática. Debe enfatizarse que (en la mayoría de las situaciones de campo) la precisión de las facetas de la investigación de carga contaminante es más crítica para la valoración del riesgo a la contaminación que la vulnerabilidad acuífera, especialmente en situaciones de baja vulnerabilidad a la contaminación y siempre es necesario hacer esfuerzos especiales en este sentido (Foster et al. 2007) Esta es una consecuencia de:

- La evaluación de la carga potencialmente contaminante que a menudo es más precisa que la de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera.

- El manejo de los contaminantes tóxicos, móviles y persistentes a menudo se asocia con cargas hidráulicas considerables (en lagunas de descarga y sistemas de inyección) y es responsable de muchos casos de contaminación acuífera (a pesar de la clasificación de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera).

Sistemas de aguas freáticas cársticas: ¿un caso especial?

Los acuíferos cársticos tienen características hidrogeológicas especiales que los distinguen de los acuíferos fisurados y porosos. Algunas de ellas son la presencia de características epicársticas, incluidas las dolinas donde descienden las corrientes superficiales, la presencia de conductos subterráneos donde ocurre el flujo rápido de agua freática y la ocurrencia de fuentes naturales muy grandes (Fig. 1). El tipo de recarga del acuífero, el régimen del flujo y el almacenamiento limitado involucrados resultan en la probabilidad de que el transporte de contaminantes será muy rápido solamente con una atenuación limitada. (Zwahlen 2004).

Andreo et al. 2006, 2009). También tomaban en cuenta la capacidad de atenuación de los estratos superiores (O), pero incluyen por separado la recarga de la concentración de flujos (o preferencial) (C) y el régimen de precipitación (P), que se consideraban muy altamente significativos para refinar el diagnóstico de la vulnerabilidad de la contaminación a los acuíferos cársticos. Las formaciones cársticas usualmente se caracterizan por una baja capacidad natural de atenuación contaminante; por ejemplo, en algunos casos la infiltración de las corrientes descendentes (drenaje de los terrenos distantes) puede diluir considerablemente la contaminación difusa del uso del terreno local, en tanto que en otros casos, estas corrientes pueden ser las responsables de introducir la contaminación al agua freática que, de otra forma, no estaría contaminada.

Además y como característica única de los acuíferos cársticos, es muy importante resaltar que las zonas de vulnerabilidad extrema a la contaminación acuífera ubicadas a grandes distancias de los nacedores pueden conectarse más directamente por medio del flujo de aguas subterráneas horizontales a estos nacedores que las partes adyacentes de los macizos de piedra caliza influenciados por formas exocársticas (Marín et al. 2010). Además, durante los principales eventos de recarga (que causan un rápido ascenso de

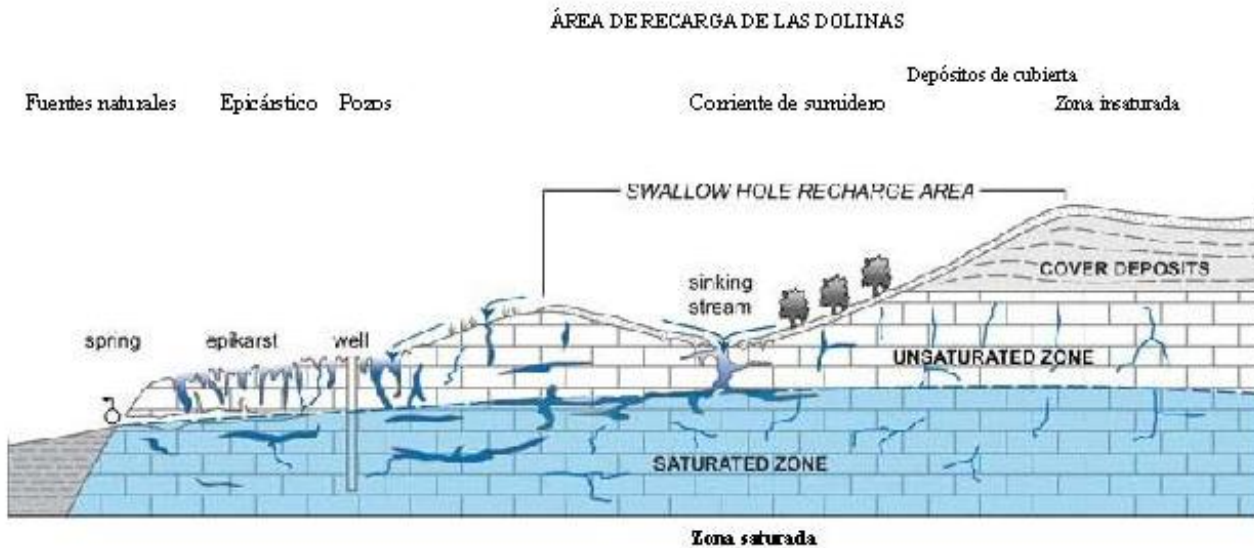


Fig. 1 Régimen del flujo del agua freática y vulnerabilidad a la contaminación relacionada de un acuífero de piedra caliza cárstico típico (modificado de Andreo et al. 2009)

Las metodologías clásicas de vulnerabilidad a la contaminación acuífera (por ejemplo, DRASTIC y GOD, por sus siglas en inglés) tendían a colocar todos los terrenos de piedra caliza cársticos sin hacer diferencia alguna en la clase de vulnerabilidad ‘extrema’ y no tomaban en cuenta la descripción del desarrollo cárstico. El primer método específicamente diseñado para los acuíferos cársticos fue EPIK (por sus siglas en inglés) (Doerfliger y Zwahlen 1997). Posteriormente, se desarrollaron otros dentro de la Acción Europea COST 620 (Zwahlen 2004), como los denominados métodos de vulnerabilidad tipo COP (por ejemplo,

los mantos freáticos) las cuencas de piedra caliza cársticas pueden exhibir cambios radicales en su régimen y conectividad del flujo del agua freática que desaparecen nuevamente durante la recesión de los mantos freáticos. Es vital que se tomen en cuenta esos factores al momento de delinear las zonas de protección del agua freática y una forma de incorporarlas en el mapeo es incluir un grado del factor de ‘carstificación de la zona saturada’ (K) dada la frecuentemente rápida conectividad entre las fuentes cársticas importantes y las rutas de recarga preferenciales principales, tales como las grandes dolinas (Andreo et al. 2009).

Sin embargo, debe quedar claro que este tipo de mapas es una herramienta de apoyo técnico para la protección de nacidos cársticos específicos (muy distinto del mapa de vulnerabilidad a la contaminación acuífera). En este contexto, asimismo, los intentos para validar vulnerabilidad a la contaminación usando pruebas de trazadores usualmente están restringidos por el número limitado de los puntos de inyección y muestreo, con la consecuencia de que no puede deducirse la distribución espacial de la vulnerabilidad a la contaminación acuífera. No obstante, un conjunto apropiado de pruebas de trazadores constituye, aún así, una herramienta esencial para delinear las zonas de protección de la fuente del agua freática en los terrenos cársticos.

Observaciones finales

Se considera que el mapeo de vulnerabilidad a la contaminación acuífera ha demostrado ser una herramienta de comunicación poderosa entre los hidrogeólogos y quienes trabajan en la planificación de recursos hídricos y del uso de tierras; sin embargo, nunca debemos perder de vista dos realidades.

En primer lugar, todas las valoraciones de vulnerabilidad representan una ‘mejor síntesis profesional’ de la información disponible que inevitablemente incorporan un nivel significativo pero variable de incertidumbre y pueden no estar listas para la calibración independiente. Esto se debe a la oportunidad limitada y/o al costo elevado de hacer muestreos en la recarga cuando llega a los mantos freáticos y el frecuente desfase antes de que la calidad de esta recarga se vea afectado por el inicio de una presión de contaminación en la superficie del terreno. El uso integral de los trazadores artificiales o naturales también ofrece cierto potencial con respecto a la validación, pero los trazadores del agua freática comúnmente desplegados tienen limitaciones en este sentido, debido a que están diseñados para valorar el ‘desfase de la recarga’ (tiempo de residencia del agua freática) y no la capacidad de atenuación de los contaminantes.

En segundo lugar, todos los mapas de vulnerabilidad a la contaminación acuífera están diseñados como una herramienta de diagnóstico de aquellos sitios en que se necesite más la investigación hidrogeológica detallada, y en donde es probable que se necesiten medidas de protección prioritarias para enfrentar una posible amenaza a la contaminación del agua freática. En este sentido, deberían considerarse como el ‘primer paso’ y no como la ‘última palabra’; son una ayuda pero no hay que hacer confusiones. Por este motivo, siempre deberán mantenerse tan simples como sea posible y solo tan complejos como sea absolutamente necesario.

Referencias

Aller L, Bennett J, Leer J, Petty J, Hacket G (1987) DRASTIC: un sistema estandarizado para evaluar el potencial de

contaminación del agua freática usando parámetros hidrogeológicos. US-EPA, Ada, OK

Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, Vías JM, Neukum C, Sinreich M, Jiménez P, Brechenmacher J, Carrasco F, Hötzl H, Perles MJ, Zwahlen F (2006) Protección del agua freática cárstica: aplicación de un enfoque paneuropeo a la vulnerabilidad, riesgos y mapeo de riesgos en Sierra de Lívar (sur de España). *Sci Total Environ* 357:54–73

Andreo B, Ravbar N, Vías JM (2009) Mapeo de vulnerabilidad de las fuentes en acuíferos carbonatados (cársticos) por ampliación del método COP: aplicación en los sitios piloto. *Hydrogeol J* 17:749–758

Doerfliger N, Zwahlen F (1997) EPIK: nuevo método para delinear las áreas de protección en los ambientes cársticos. Simposio internacional de la CE, Agua cárstica e impactos ambientales, Antalya, Turquía, Balkema, Róterdam, Países Bajos. págs. 117–123

Dirección General de Medio Ambiente de la CE (2008) Protección del agua freática en Europa: la nueva Directiva para el Agua Freática –consolidación del marco regulador de la UE, Comisión Europea, Luxemburgo

Foster S (1987) Conceptos fundamentales de la vulnerabilidad acuífera, el riesgo de contaminación y la estrategia de protección. *TNO Proc Inf* 38:69–86

Foster S, Hirata R (1988) Valoración del riesgo de contaminación del agua freática: una metodología usando los datos disponibles. OMS-OPS-CEPIS, Lima

Foster S, Hirata R, D’Elia M, Paris M (2007) Protección de la calidad del agua freática: una guía para las compañías proveedoras del servicio, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial W-MATE, Washington, DC

Margat J (1968) Vulnérabilité des nappes d’eau souterraine a la pollution: bases de la cartographie [Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación: mapeo de las bases de datos]. BRGM Publicación 68-SGL 198, BRGM, Orleans, Francia

Marín AI, Andreo B, Mudarra M (2010) Importancia de evaluar las características cársticas en la vulnerabilidad a la contaminación y valoración de la protección del agua freática de los acuíferos de carbonato: el estudio de caso de Alta Cadena (sur de España). *Z Geomorphol* 54:179–194

US-NRC (1993) Valoración de la vulnerabilidad del agua freática: potencial de contaminación en condiciones de incertidumbre. US Academy Press, Washington, DC

Vrba J, Zaporozec A (1994) Guía para el mapeo de la vulnerabilidad del agua freática. IAH Int Contrib Hydrogeol 16, Heise, Hannover, Alemania, págs. 3–8

Zwahlen F (2004) Vulnerabilidad y mapeo de riesgos para la protección de los acuíferos de carbonato (cársticos). Informe final de la Acción COST 620 de la CE, CE, Luxemburgo

The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?

Stephen Foster · Ricardo Hirata · Bartolome Andreo

Keywords Aquifer pollution vulnerability · Groundwater protection · Pollution control

The vulnerability concept: a historical perspective

The term ‘aquifer pollution vulnerability’ was first coined by Margat (1968), and subsequently given a working definition plus a practical tool-box in the mid-1980s by the US Environmental Protection Agency (EPA) through DRASTIC (Aller et al. 1987) and by WHO and the Pan American Health Organization (PAHO) through GOD (Foster 1987; Foster and Hirata 1988). The concept attempted to represent the sensitivity of an aquifer to being adversely affected at any given point by an imposed contaminant pressure (or load) from the land surface. It being possible to:

- Have high vulnerability but no pollution hazard given the absence of a contaminant load
- Control contaminant load according to aquifer pollution vulnerability.

In a similar way to terms like ‘groundwater over-exploitation’, ‘resource sustainability’ and ‘non-renewable groundwater’, the term ‘aquifer pollution vulnerability’ (although scientifically-founded) is not capable of rigorous definition because:

- All aquifers are to some degree vulnerable to pollution by highly-mobile and persistent contaminants (such as brines and, in many cases, nitrate)
- Vulnerability is in reality specific to contaminant type and pollution scenario.

Nevertheless the aquifer pollution vulnerability concept has proved a useful ‘communication bridge’ about groundwater quality protection needs (between hydrogeologists and the environmental and land-use management sub-sectors), and has enabled the natural contaminant-attenuation capacity of strata overlying a groundwater body to be taken advantage of by the public administration through graduating the application of land-use constraints and pollution control measures accordingly.

During the 1990s, aquifer pollution vulnerability assessment and mapping become increasingly accepted as a tool for hydrogeological characterisation of groundwater systems following adoption by the US National Research Council (NRC; US-NRC 1993) and the International Association of Hydrogeologists (IAH) (Vrba and Zaporozec 1994). And while the European Union (EU) Water Framework Directive of 2000 and Groundwater Directive of 2006 do not specifically mention the term aquifer pollution vulnerability, it is implicit in the process of aquifer characterisation and risk assessment advocated. Indeed, it became a central facet of the EU Water Framework Directive–Common Implementation Strategy (EC-Directorate General for the Environment 2008)—an important advance in the incorporation of hydrogeological considerations into the environmental administration of a large number of countries.

During the implementation of the EU Water Framework Directive it was decided that further detailed consideration needed to be given to vulnerability mapping methodologies for karstic limestone terrains, in view of their special characteristics (which often include zones of extremely high pollution vulnerability) and because they form more than 30 % of the EU land mass.

Received: 6 February 2013 / Accepted: 4 July 2013
Published online: 26 July 2013

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Stephen Foster is Past President of the International Association of Hydrogeologists (IAH), 2004–2008

S. Foster (✉)
c/o International Association of Hydrogeologists (IAH), PO Box 4130
Goring, Reading, RG8 6BJ, UK
e-mail: iahfoster@aol.com

R. Hirata
Universidade de São Paulo–Groundwater Research Center
(CEPAS), São Paulo, Brazil
Email: rhirata@usp.br

B. Andreo
University of Malaga–Centre for Hydrogeology (CEHIUMA),
Malaga, Spain
Email: andreo@uma.es

'Vulnerability': essential indicator or dangerous over-simplification?

The term aquifer pollution vulnerability is intended to represent the varying level of natural protection afforded by the contaminant attenuation capacity of the unsaturated zone or semi-confining beds above an aquifer, as a result of physicochemical processes (filtration, biodegradation, hydrolysis, adsorption, neutralisation, volatilisation and dispersion)—all of which vary with their texture, structure, clay content, organic matter, pH, redox and carbonate equilibria.

In practice, the production of aquifer pollution vulnerability maps (at whatever scale) will inevitably involve much simplification of naturally complex geological conditions and hydrological processes. In this context, various (essentially technical) issues have presented difficulties including:

- The aquifer pollution vulnerability classification for some formations, given marked stratification of their lithology and hydrogeological properties
- Incorporation of the role of soils and weathered horizons in terms of modifying aquifer pollution vulnerability, taking into account the possibility of preferential flow
- Consideration of losing streams on aquifer outcrops, taking account of surface drainage from allochthonous areas (especially, but not exclusively, in karstic terrain)
- The effect of man-made changes on the natural medium (e.g. soil and rock removal, water-table lowering or rebound, etc.).

These factors have contributed to the proliferation of aquifer vulnerability assessment methodologies—running the risk that the professional credibility of hydrogeologists may be questioned by environmental managers because of failure to find consensus on the application of the methodology.

Moreover, an impression has sometimes been given that all contaminant pressures can be managed by natural attenuation, which is obviously erroneous since certain more persistent contaminants do not experience significant attenuation under most subsurface conditions. Thus the vulnerability approach needs to be much better harmonised with 'pollutant prevent and limit strategies', in which the discharge of certain chemicals of high mobility, toxicity and pollution hazard (such as various industrial solvents and some pharmaceutical products) is prevented or constrained, utilising natural attenuation only for the management of degradable contaminants.

Key considerations for improving practical application

Foremost amongst these is that pollution vulnerability maps are intended as a screening tool to identify where detailed hydrogeological investigation and priority protection measures are most needed in the face of a groundwater pollution threat. In this way they find ready application in both:

- The systematic evaluation of pollution risks to a designated groundwater body
- Environmental impact assessments for a given group of potentially polluting installations.

Clearly it would be preferable to commission a detailed hydrogeological assessment of every development that might threaten groundwater quality, but given the multiplicity of such threats that widely exist, this is not economically feasible or cost-effective. Thus, a reliable screening tool is needed, and aquifer pollution vulnerability maps aim to give a first indication of potential groundwater pollution hazard so as to allow regulators, planners and developers to make more informed judgements on (a) proposed new developments and (b) the related need for detailed hydrogeological investigations and special provisions to control the groundwater pollution threat they pose.

Current use of the term 'vulnerability' is too loose to provide a solid platform for communicating hydrogeological concerns about groundwater pollution hazard, since in the scientific literature there remains lack of consistency and clarity about the widely used terms: 'extreme', 'high', 'low' and 'negligible' vulnerability. Whilst 'vulnerability to a universal contaminant in a typical pollution scenario' is not scientifically valid, assessing and mapping 'specific vulnerability' to a given specific pollutant and polluting process will often be unwieldy or impractical.

A vulnerability related only to the process of vertical pollutant transport and attenuation is a much more useful concept for application in environmental and land-use management, and can be scientifically legitimised by using appropriate definitions for the different vulnerability classes (Table 1). Such an unequivocal definition of vulnerability categories is more helpful than using it as a relative term (as is quite widely done). Moreover, and most importantly, this definition is meaningful to non-hydrogeologists, since it is capable of being interpreted in practical terms through cross-reference to a specific level of groundwater pollution hazard for various classes of contaminant and to the protection measures that it should trigger. And following this approach, it is only realistic to define four vulnerability categories, since nothing will be gained by having many more 'shades' of vulnerability if they cannot be specifically linked to different land-use and environmental management decisions.

Furthermore, the authors are of the opinion that:

- It is a fallacy to believe that the more complex a vulnerability methodology is, the more close to reality the pollution vulnerability assessments and maps it generates will be
- Vulnerability categories without clear practical definition are more dangerous than useful
- The more complex the vulnerability assessment procedure is, the more likely it is to obscure the obvious and make the subtle indistinguishable.

Of course, better hydrogeologic understanding will bring better application of pollution vulnerability methodologies. However, these methods should be evaluated in terms of

Table 1 Scheme of practical definition for classes of aquifer pollution vulnerability (developed from Foster et al. 2007)

Vulnerability class	Practical definition	Contaminant types likely to penetrate	Protection measures required ^{a, b}
Extreme	Vulnerable to most water pollutants with rapid impact in many pollution scenarios	Cryptosporidia, fecal bacteria and viruses, heavy metals, hydrocarbon fuels, extensive range of synthetic organic compounds, saline liquids and nutrients	Presumption that all potentially polluting activities will be prohibited or only permitted at low intensity with exceptional and expensive containment, detailed monitoring and inspection
High	Vulnerable to various pollutants (unless strongly absorbed or readily degraded) in many pollution scenarios	Some fecal viruses, hydrocarbon fuels, extensive range of synthetic organic compounds, saline liquids and nutrients	Presumption that many potentially polluting activities will be prohibited or subject to detailed controls and considerable additional expense in terms of design, inspection and monitoring
Low	Only vulnerable to conservative pollutants in the long term, mainly when widely and regularly discharged to ground	Nitrate, highly saline liquids, and risk of penetration of dense non-aqueous phase chlorinated organic compounds ^c , and certain pharmaceutical products ^c	Presumption that most development activities will be permitted and only subject to normal design conditions, except those that involve unlined lagoons or soak away drainage and/or handling groundwater-hazardous chemicals ^c
Negligible	Strongly confined with no vertical groundwater leakage	Chance of penetration of dense non-aqueous phase halogenated organic compounds ^c	Presumption that all development activities will be allowed and only subject to normal design conditions

^a In respect of industrial installations, hydrocarbon extraction, storage and transport, mining activities and residential housing development—the harmonisation of agricultural land use with groundwater vulnerability has to be tackled variously by ‘best agricultural practice’, banning use of given pesticides, and improved land stewardship incentives

^b The actions and measures required in respect of existing potentially polluting activities are broadly aligned with those indicated for new developments, but supplementary controls to reduce groundwater pollution hazard will have to be introduced progressively by negotiation

^c Types of contaminant that are both highly toxic and exceptionally mobile and persistent in groundwater systems, which should thus be subjected universally to a ‘prevent strategy’ in terms of ground discharge

their ability to incorporate (as simply and sensitively as possible) the main parameters controlling aquifer hydraulic accessibility and natural protection, and not in terms of how many parameters it incorporates.

Aquifer pollution vulnerability maps are intended to be used interactively with surveys of subsurface contaminant load to determine groundwater pollution hazard. It must be stressed that (in most field situations) the accuracy of facets of the contaminant load survey is more critical to pollution risk assessment than aquifer vulnerability, especially in settings of low pollution vulnerability, and an especial effort is always needed in this regard (Foster et al. 2007). This is a consequence of:

- The evaluation of potential contaminant load usually being more precise than that of aquifer pollution vulnerability.
- The handling of toxic, mobile and persistent contaminants is often associated with considerable hydraulic loads (in

effluent lagoons and injection systems) and is responsible for many cases of aquifer contamination (regardless of the aquifer pollution vulnerability classification).

Karstic groundwater systems: a special case?

Karst aquifers have special hydrogeological characteristics which distinguish them from fissured and porous aquifers such as the existence of epikarst features, including swallow holes into which surface streams sink, the presence of underground conduits in which rapid groundwater flow occurs and the occurrence of very large springs (Fig. 1). The type of aquifer recharge, flow regime and limited storage involved result in the likelihood that pollutant transport will be very rapid with only limited attenuation (Zwahlen 2004).

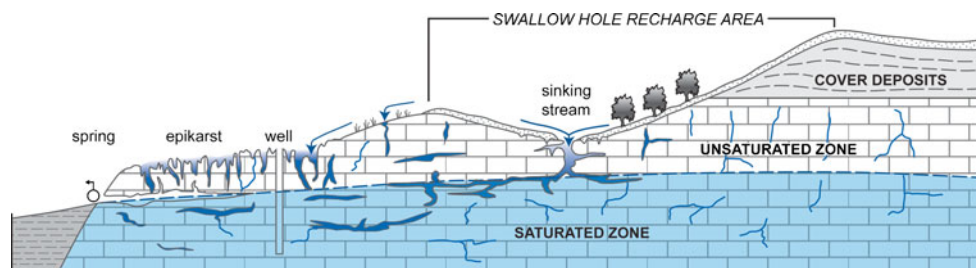


Fig. 1 Schematic groundwater flow regime and related pollution vulnerability of a typical karstic limestone aquifer (modified from Andreo et al. 2009)

Classical aquifer pollution vulnerability methodologies (like DRASTIC and GOD) tended to place all karstic limestone terrain undifferentiated in the ‘extreme’ vulnerability class—and did not take the detail of karst development into account. The first method specifically for karst aquifers was EPIK (Doerfliger and Zwahlen 1997). Following that, others were developed within European COST Action 620 (Zwahlen 2004) such as the so-called COP-type vulnerability methods (e.g. Andreo et al. 2006, 2009). These also consider the attenuation capacity of overlying layers (O), but separately include the recharge (or preferential) flow concentration (C) and the precipitation regime (P), which were considered highly significant for refining the diagnosis of karst aquifer pollution vulnerability. Karstic formations are usually characterised by low natural pollutant-attenuation capacity, for example in some cases the infiltration of sinking streams (draining distant land) can dilute diffuse contamination from local land use considerably, whilst in other cases these streams can be responsible for introducing pollution to otherwise uncontaminated groundwater.

Additionally and uniquely for karst aquifers, it is very important to note that zones of extreme aquifer pollution vulnerability located at large distances from springheads can be more directly connected by horizontal groundwater flow to these springheads than adjacent parts of the limestone massif influenced by exokarstic forms (Marín et al. 2010). Furthermore, during major recharge events (causing rapidly rising water tables) karstic limestone watersheds can exhibit radical changes in their groundwater flow regime and connectivity, which disappear again during water-table recession. It is critical that such factors are taken into account in the delineation of groundwater protection zones, and one way of incorporating them in mapping is to include a grade of ‘saturated-zone karstification’ (K) factor, given the often rapid connectivity between important karst springs and major preferential recharge routes such as large swallow-holes (Andreo et al. 2009). However, it should be made clear that this type of map is a technical support tool for the protection of specific karst springheads (as distinct from an aquifer pollution vulnerability map). In this context also, attempts to validate pollution vulnerability using tracer tests are usually constrained by the limited number of injection and sampling points, with the consequence that the spatial distribution of aquifer pollution vulnerability cannot be deduced—but an appropriate tracer-testing suite is, nevertheless, an essential tool for the delineation of groundwater source protection zones in karstic terrain.

Concluding remarks

Aquifer pollution vulnerability mapping is considered to have proved a powerful tool for communication between hydrogeologists and those working in water-resource and land-use planning; however, we should never lose sight of two realities.

Firstly, all vulnerability assessments represent a ‘best professional synthesis’ of available information—inevitably incorporating a significant but variable level of uncertainty and not being readily capable of independent calibration.

This is because of the limited opportunity and/or elevated cost of sampling recharge as it arrives at the water table and the often large time lag before the quality of this recharge is affected by the initiation of a pollution pressure at the land surface. The comprehensive use of artificial or natural tracers also offers some potential in respect of validation, but commonly deployed groundwater tracers have limitations in this respect because they are designed to assess ‘recharge time-lag’ (groundwater residence time) and not contaminant-attenuation capacity.

Secondly, all aquifer pollution vulnerability maps are intended to be a screening tool to identify where detailed hydrogeological investigation is most needed, and where priority protection measures are likely to be required to cope with a potential groundwater-pollution threat. In this sense, they should be considered as the ‘first step’ and not the ‘last word’—helping but not confusing. As such, they should also always be as simple as possible, and only as complex as absolutely necessary.

References

- Aller L, Bennett J, Leer J, Petty J, Hackett G (1987) DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US-EPA, Ada, OK
- Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, Vias JM, Neukum C, Sinreich M, Jiménez P, Brechenmacher J, Carrasco F, Hötzl H, Perles MJ, Zwahlen F (2006) Karst groundwater protection: application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in Sierra de Líbar (southern Spain). *Sci Total Environ* 357:54–73
- Andreo B, Ravbar N, Vias JM (2009) Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeol J* 17:749–758
- Doerfliger N, Zwahlen F (1997) EPIK: new method for outlining of protection areas in karstic environments. EC International Symposium, Karst Water and Environment Impacts, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 117–123
- EC-Directorate General for the Environment (2008) Groundwater protection in Europe: the new Groundwater Directive—consolidating the EU regulatory framework. European Commission, Luxembourg
- Foster S (1987) Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *TNO Proc Inf* 38:69–86
- Foster S, Hirata R (1988) Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS, Lima
- Foster S, Hirata R, D’Elia M, Paris M (2007) Groundwater quality protection: a guide for water-service companies, municipal authorities, and environment agencies. World Bank GW-MATE, Washington, DC
- Margat J (1968) Vulnérabilité des nappes d’eau souterraine à la pollution : bases de la cartographie [Vulnerability of groundwater to pollution: database mapping]. BRGM Publication 68-SGL 198, BRGM, Orleans, France
- Marín AI, Andreo B, Mudarra M (2010) Importance of evaluating karst features in contamination vulnerability and groundwater protection assessment of carbonate aquifers: the case study of Alta Cadena (southern Spain). *Z Geomorphol* 54:179–194
- US-NRC (1993) Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. US Academy Press, Washington, DC
- Vrba J, Zaporozec A (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH Int Contrib Hydrogeol 16, Heise, Hannover, Germany, pp 3–8
- Zwahlen F (2004) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. EC COST action 620 final report, EC, Luxembourg