

## ANEXO F

### EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

	Pág.
<b>1 EL CICLO DEL AGUA .....</b>	<b>1</b>
<b>2 LAS AGUAS SUPERFICIALES .....</b>	<b>1</b>
2.1 LAS AGUAS SUPERFICIALES EN EL MEDIO NATURAL .....	1
2.2 RIESGOS DE CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES .....	2
<b>3 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>2</b>
3.1 TIPOS DE NAPAS SUBTERRÁNEAS.....	2
3.1.1 <i>Las napas libres de las formaciones sedimentarias superficiales ("Acuíferos Libres")</i> .....	2
3.1.2 <i>Las napas confinadas ("Acuíferos confinados")</i> .....	2
3.2 LA DINÁMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	2
3.3 TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	2
3.4 VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE UN ACUÍFERO SUBTERRÁNEO.....	2
<b>4 CONCLUSIONES.....</b>	<b>2</b>
<b>5 REFERENCIAS .....</b>	<b>2</b>

## ANEXO F

### EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Desde el punto de vista del análisis de riesgos de contaminación de los recursos hídricos naturales, interesa conocer tanto la condición en que éstos se presentan como los mecanismos de transporte comprometidos en la propagación de los contaminantes hacia potenciales receptores. En el presente Anexo se analizan estos temas.

#### 1 EL CICLO DEL AGUA

Al condensarse el agua de la atmósfera se producen las precipitaciones, en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve, granizo). Estas aguas precipitan en una unidad hídrica básica que es la hoya hidrográfica, dentro de la cual se puede realizar un balance hídrico que comprende principalmente los elementos siguientes:

- P Total de agua precipitada
- EVT Cantidad de agua que vuelve a la atmósfera por evapotranspiración
- E Escorrentía superficial
- I Agua infiltrada al subsuelo, que puede ser retenida en el suelo vegetal o percolar a los niveles inferiores, eventualmente aumentando la reserva de aguas subterráneas de los acuíferos.

$$P = EVT + E + I$$

Dentro del ciclo hidrológico, definido como la secuencia de fenómenos a través de los cuales el agua se desplaza entre el medio terrestre y la atmósfera, ésta puede ser contaminada por las actividades antrópicas en diversas circunstancias y en su fracción superficial o subterránea.

#### 2 LAS AGUAS SUPERFICIALES

##### 2.1 Las Aguas Superficiales en el Medio Natural

Las aguas superficiales escurren o se acumulan sobre la superficie del suelo, se presentan siempre que hay precipitación pero en la red hídrica pueden estar presentes por períodos prolongados después que éstas han cesado debido a la alimentación producida por las aguas subterráneas, los deshielos u otros mecanismos de regulación.

La fracción de las aguas que llegan a la superficie del suelo que produce escorrentía está condicionada por diversos factores, tales como: condiciones climáticas locales,

morfología, tipo de suelo, importancia y características de la cobertura vegetal, características del subsuelo, etc.

En su devenir sobre la superficie del suelo las aguas actúan como un agente modelador de la corteza terrestre debido a la erosión y al transporte y deposición de sedimentos. Además, condicionan la cobertura vegetal y, de una forma más general, la vida en la Tierra.

La repartición de las aguas superficiales se estudia en la unidad que constituye la hoya hidrográfica, entendida ésta como la superficie delimitada por las divisorias de aguas hacia un mismo curso principal. El caudal máximo de aguas recibido en una unidad hídrica relaciona la superficie de ésta con la precipitación específica.

## **2.2 Riesgos de Contaminación de las Aguas Superficiales**

En la hoya hidrográfica las aguas son susceptibles de contaminarse en las circunstancias siguientes:

- Descarga de efluentes directamente a los cursos de aguas superficiales, lagos, etc.
- Recarga con aguas provenientes de flujos subterráneos contaminados
- Contaminación difusa desde sectores agrícolas (abonos, insecticidas, etc.)
- Derrames circunstanciales a los cuerpos de agua
- Transporte de contaminantes directamente por las lluvias por lixiviación o arrastre
- Otros.

Los mecanismos de transporte son fundamentalmente la lixiviación (disolución de contaminantes en las aguas transportados en estado líquido) o el arrastre (transporte de sólidos) que depende de las características de las aguas (energía, pH, pureza, temperatura, etc.) y del contaminante mismo (solubilidad, estado, volumen de las partículas, etc.).

Se debe considerar que las aguas naturales tienen una composición química particular de acuerdo a las condiciones del medio (clima, geología), así como una capacidad tampón para mantener una composición más o menos constante. El conocimiento de estas características básicas permite evaluar la posible alteración producto de un contaminante determinado. En el caso particular del pH, éste varía entre 6,5 y 8,5 en las aguas de los ríos.

Las sustancias disueltas pueden adsorberse (ser atraídas y retenidas en la superficie de otro cuerpo) sobre los componentes de los suelos y sobre las partículas sólidas en suspensión y ser luego liberadas, proceso que contribuye en el establecimiento de la concentración en metales pesados en las aguas. Además, los minerales arcillosos en suspensión son sustancias adsorbentes que sirven también como medio de transporte y reservorio de contaminantes.

### **3 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Como se dijo anteriormente, la parte de las aguas de las precipitaciones que se infiltra al subsuelo puede constituir napas subterráneas que constituyen una reserva de aguas dulces de gran valor contenidas en los poros de los sedimentos o las fracturas de las rocas.

La condición básica para el flujo y acumulación de las aguas en el subsuelo es la existencia de materiales permeables, de este modo la constitución de acuíferos subterráneos requiere de una permeabilidad que permita una velocidad de flujo adecuada para la captación del recurso. En este sentido, es importante dejar establecido que existen materiales de alta porosidad que poseen una muy baja permeabilidad, que pueden ser considerados como materiales prácticamente impermeables. Es el caso de los materiales arcillosos o limo-arcillosos que absorben una cantidad importante de agua pero que no constituyen en ningún caso napas subterráneas.

#### **3.1 Tipos de Napas Subterráneas**

Considerando las condiciones espaciales de repartición de los diferentes materiales del subsuelo se pueden distinguir diversos tipos de napas subterráneas. Se destacan principalmente los 2 tipos que se detallan a continuación.

##### **3.1.1 *Las napas libres de las formaciones sedimentarias superficiales (“Acuíferos Libres”)***

Se constituyen en materiales porosos y permeables depositados en importantes unidades geológicas que no se encuentran recubiertas por capas impermeables. Estas napas pueden contener varias decenas de litros de agua por metro cúbico y la productividad de los pozos de explotación es muy elevada. El ejemplo característico es el de las napas existentes en los depósitos fluvio-aluviales de las grandes cuencas hidrográficas (por ejemplo: río Aconcagua). En la Figura F-1 que sigue (página siguiente) al final del texto se esquematiza la situación de una napa libre.

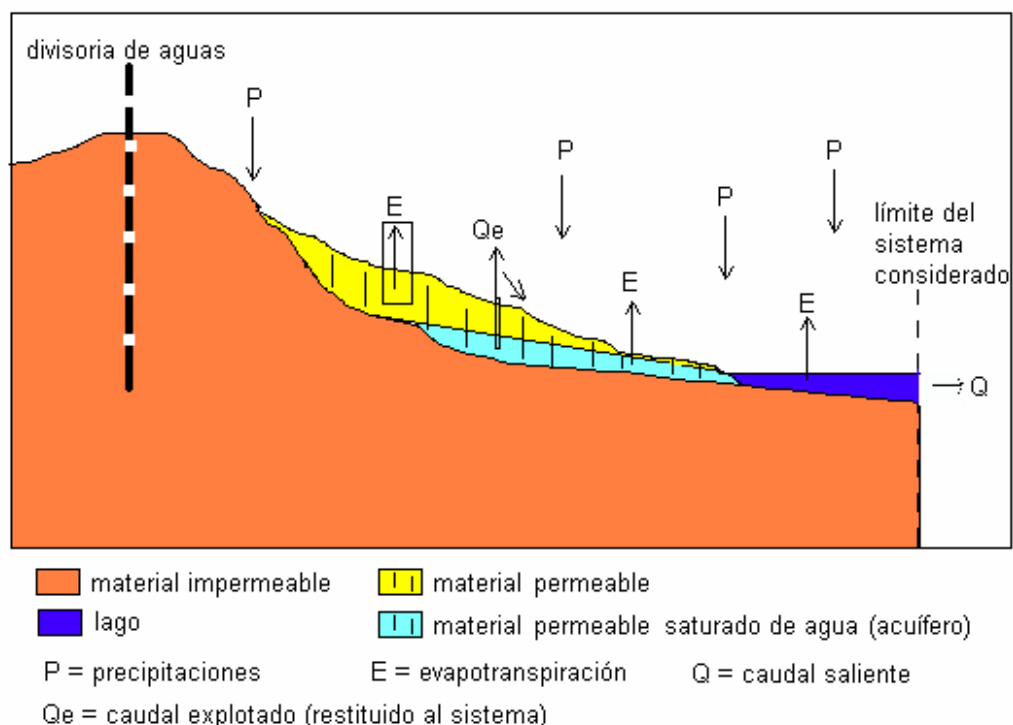


Figura F-1: Representación esquemática de una napa libre

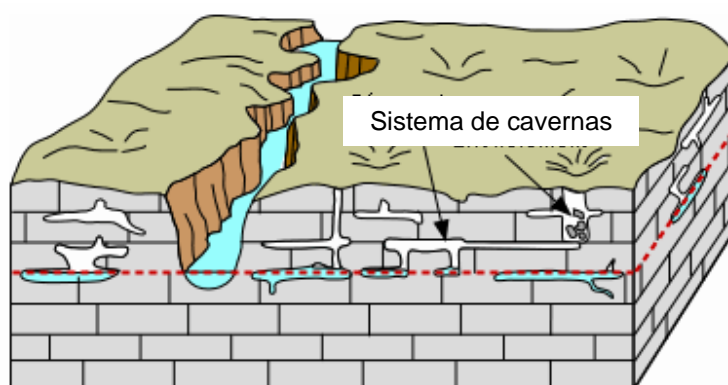


Figura F-2: Aguas subterráneas en un sistema cárstico en donde las aguas se desplazan por fisuras y fracturas y se acumulan en vacíos generados por disolución del material calcáreo

Algunas napas libres pueden encontrarse contenidas en plataformas calcáreas en las cuales los vacíos derivan de la disolución de la roca a partir de las aguas que circulan por las fracturas (ver Figura F-2).

La alimentación de las napas libres se produce directamente desde la superficie del terreno y el nivel estático corresponde al nivel de aguas del acuífero.

### **3.1.2 Las napas confinadas (“Acuíferos confinados”)**

Este tipo de napa se caracteriza por el hecho que los materiales permeables que la contienen se encuentran recubiertos por estratos impermeables que impide una recarga vertical directamente por las aguas precipitadas. La recarga de estas napas se produce en un punto alejado en donde existen condiciones de infiltración diferentes por afloramiento de los materiales permeables o por interconexiones subterráneas.

## **3.2 La Dinámica de las Aguas Subterráneas**

En el subsuelo se presentan importantes fenómenos naturales de flujo y fluctuación de niveles de las napas subterráneas. Las aguas infiltradas circulan a través de los materiales litológicos permeables hasta alcanzar la napa y aumentar así el volumen de la reserva, lo que se manifiesta en un aumento del nivel de aguas del reservorio (nivel estático). La fluctuación de los niveles es mayor lejos de las zonas de descarga de las napas (vertientes, ríos, lagos, etc.).

Los aspectos dinámicos de las aguas subterráneas tienen una enorme importancia en el momento de considerar la propagación de contaminantes ya que su conocimiento permite determinar principalmente los elementos siguientes:

- la dirección de propagación de la pluma contaminante
- la velocidad de propagación
- la interacción del contaminante específico con el material mineral del acuífero (poder depurador)

En las Figuras F-3 y F-4 (página siguiente) se representan algunos casos que ilustran la importancia de estas caracterizaciones. Se comprende que el análisis de las consecuencias de una contaminación de las aguas subterráneas requiere de un conocimiento específico del sistema subterráneo afectado. Esto, en general, no se conoce *a priori* y si la situación de emergencia es de importancia una evaluación inmediata es indispensable.

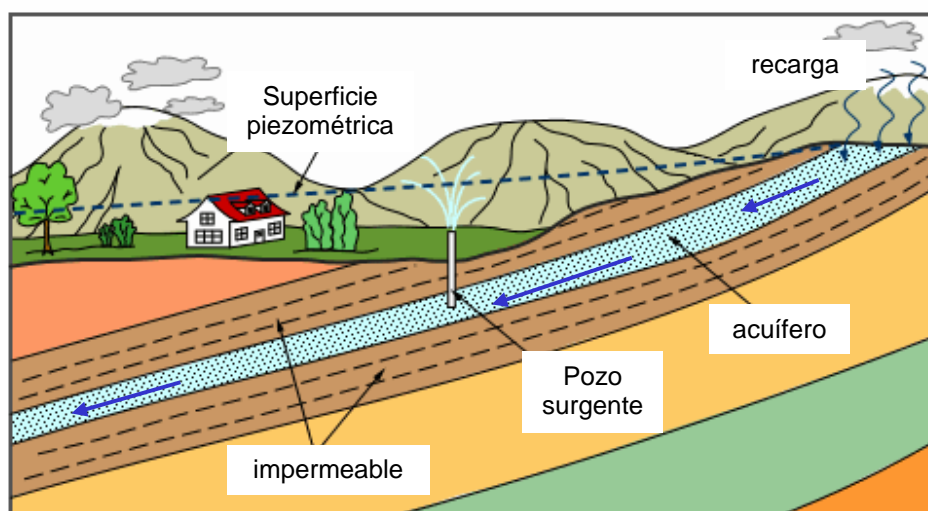


Figura F-3: Caso de un acuífero confinado (las flechas azules representan la dirección de flujo de las aguas subterráneas)

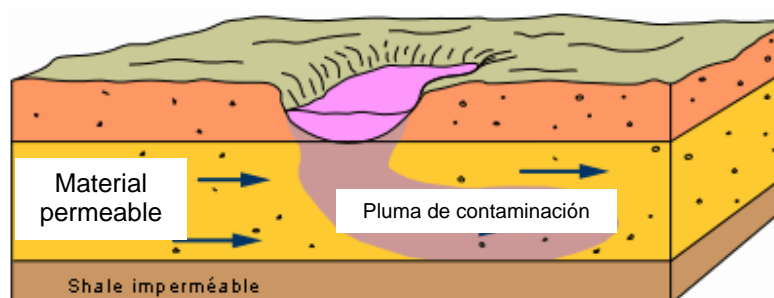


Figura F-4: Napa confinada en donde el estrato impermeable superficial ha sido localmente removido (por ejemplo cuando se excavan fosas para depositar residuos o efluentes contaminados)

En efecto, frente a un contaminante específico la protección natural de que puede disponer un reservorio subterráneo puede ser suficiente para descartar su contaminación, con lo que ésta se limita a la contaminación del suelo. Sin embargo, si no es así, es necesario conocer las características generales del reservorio y muy particularmente su profundidad, permeabilidad, dirección de flujo, características de los materiales subyacentes, etc.

### **3.3 Transporte de Contaminantes en las Aguas Subterráneas**

En un acuífero el agua se comporta como un vector de diferentes sustancias que ella contiene, pero también como una sustancia reactiva con relación a las primeras. Las condiciones de transporte de un contaminante hacia un acuífero subterráneo dependen de varios factores:

- Las características propias del contaminante: solubilidad, dimensión y peso catión, etc.
- Las características del agente de transporte del contaminante: pH, carga mineral, temperatura, etc.
- Las características del medio físico a través del cual el agua contaminada se desplaza: reactividad del material mineral con los contaminantes transportados en la fase líquida.
- Protección natural: cobertura vegetal, barrera geológica, etc.
- Poder depurador de las capas superiores: composición petrográfica, porosidad, espesor, etc.
- Velocidad de escurrimiento de las aguas en el subsuelo: sedimentación, reacciones químicas, etc.

Ese debe tener presente que, en cuanto a la fase sólida del acuífero, si ella juega un papel importante en tanto que matriz a través de la cual el agua circula, no es inerte y juega igualmente un papel a la vez mecánico, en cuanto a la dispersión de las sustancias, que químico si se consideran las reacciones que pueden producirse.

Se puede esquematizar el sistema subterráneo con un corte esquemático del subsuelo como el que se entrega en la Figura F-5 (página siguiente).

La migración de un microcontaminante (contaminantes presentes al estado de trazas) depende de las propiedades químicas del contaminante considerado, de las de la solución y de los mecanismos de intercambio entre las fases sólida y líquida. El hecho de encontrarse al estado de trazas hace que los microcontaminantes son muy sensibles a las condiciones del medio que los rodea, que influyen su comportamiento. Uno de



los mecanismos de interacción más relevantes es la adsorción en la superficie de los elementos sólidos.

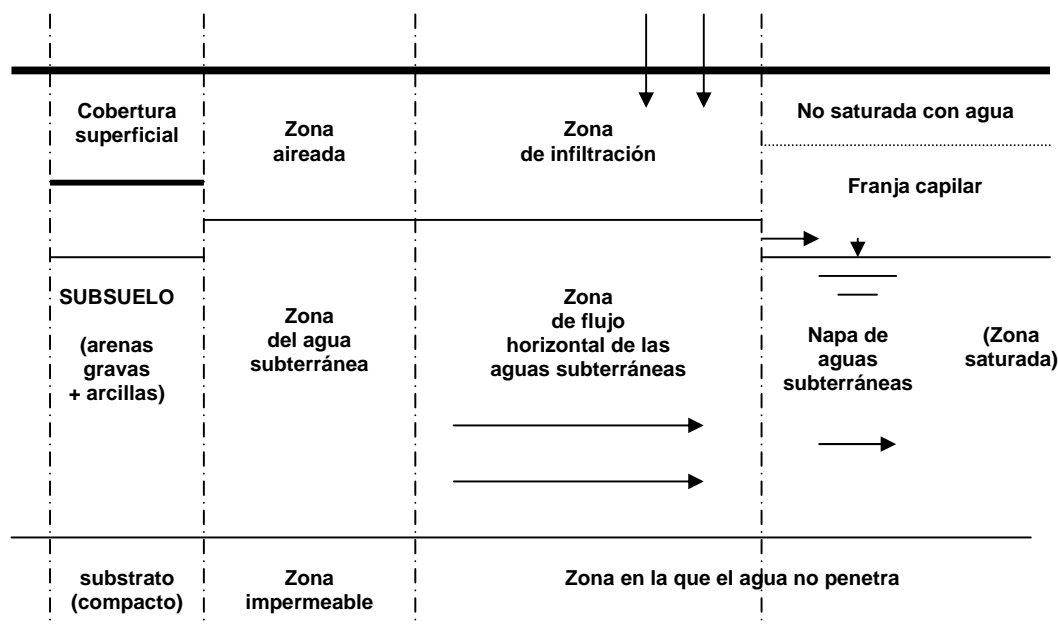


Figura 5: Corte esquemático de un acuífero poroso (adaptado de L. Zilliox)

Para calcular el transporte de un contaminante<sup>1</sup> es necesario conocer los valores de parámetros tales como:

- porosidad total ( $E$ ): volumen disponible entre los granos (determina el contenido del reservorio)
- porosidad cinemática ( $E_c$ ): volumen de los vacíos en los que el agua puede circular sobre el volumen total ( $V_v/V_t$ ),
- permeabilidad ( $K$ )
- velocidad media de los poros ( $u=v/E_c$ )
- coeficiente de dispersión ( $D_e$ ): depende de la velocidad media de poros y de la dispersividad ( $\alpha$ ) del medio. La dispersividad determina la propagación del contaminante en el reservorio.

<sup>1</sup> *Chimie des milieux aquatiques; Sigg, Laura et al., Masson, Paris, 1.992*

### 3.4 Vulnerabilidad a la Contaminación de un Acuífero Subterráneo

Existen varios métodos para determinar la vulnerabilidad de un acuífero subterráneo y se entregan a continuación las referencias fundamentales disponibles. La Dirección General de Aguas, por su parte, está elaborando un Manual de Referencia que se encuentra en borrador (ver página [www.dga.cl](http://www.dga.cl)) y que se titula “Manual para la aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos en la Norma de Emisión a Aguas Subterráneas Decreto Supremo N°46 de 2002”. Este manual es una referencia, por lo que la metodología a aplicar puede ser justificada caso por caso de acuerdo a las condiciones específicas.

La suposición en la cual se basa la vulnerabilidad, es que el medio físico puede proporcionar cierto grado de protección contra impactos naturales y humanos, con respecto a contaminantes introducidos en el medio subterráneo. De esta forma el término ha evolucionado a través del tiempo, pasando a incluir factores como los siguientes:

- grado de protección contra contaminantes por la capa sobreyacente al acuífero,
- potencial de purificación del agua contaminada en el acuífero,
- condiciones de flujo subterráneo,
- condiciones climáticas,
- riesgo de contaminación por el tipo de uso y ocupación del suelo.

Así, actualmente se pueden encontrar diferentes conceptos de vulnerabilidad que incluyen diversos factores. Algunas de estas definiciones son las siguientes:

1. Albinet, Margat (1970), definen la vulnerabilidad como la posibilidad de introducción y propagación de contaminantes, bajo condiciones naturales, desde la superficie del terreno hasta el acuífero, y mapeamiento de vulnerabilidad como la representación en mapas de los diversos grados de vulnerabilidad, en función de las condiciones hidrogeológicas del acuífero.
2. El Committee on Techniques for Assessing Groundwater Vulnerability of the National Research Council (1993), define el término vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación como la tendencia a la probabilidad que contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de aguas subterráneas, después de su introducción en algún lugar de la superficie.
3. Vrba y Zaporocec (1994), definen los conceptos de vulnerabilidad específica, donde se considera los efectos de un determinado contaminante a la actividad antrópica y, vulnerabilidad intrínseca como aquella que no tiene en consideración ningún factor específico.

4. Custodio (1994), define que un cierto elemento o sistema es vulnerable ante cierta acción cuando dicha acción puede causar en ellos un perjuicio, daño, deterioro o degradación. La vulnerabilidad sería una medida cualitativa o cuantitativa en general expresada mediante un índice sin dimensiones de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio. Es, por tanto, algo que depende del objeto que puede ser vulnerado, pero también del tipo de acción realizada. En este caso, se hablará de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.
5. Dirección General de Aguas (2003), define la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero en relación a la velocidad con la que un contaminante puede migrar hasta la zona saturada del acuífero. Una mayor rapidez de migración de la contaminación a través de la zona no saturada del acuífero será entendida como mayor vulnerabilidad de éste.

El Manual de Referencia de la DGA opta, para determinar la vulnerabilidad de un acuífero, por el método desarrollado por el Instituto de Geociencias y Recursos Nacionales (BGR) en conjunto con los Servicios Geológicos Federales de Alemania, debido al número razonable de parámetros que utiliza y la facilidad para obtenerlos. El método combina mediante puntajes cuatro factores que determinan o influyen en la rapidez con que una determinada sustancia llega a la zona saturada del acuífero, suponiendo una infiltración desde la superficie o cercano a ella. Estos factores son:

1. La presencia de suelo orgánico u ocupado por organismos vegetales,
2. La recarga natural al acuífero dada por la precipitación efectiva y la recarga artificial dada por la infiltración misma,
3. La litología, es decir el tipo de sedimentos o roca presentes en la zona no saturada, y
4. El espesor de la zona no saturada del acuífero.

A cada uno de estos factores se les asocia un puntaje que es ponderado, la suma de todos ellos da como resultado un valor que se traduce en vulnerabilidad. El procedimiento es explicado detalladamente en el texto del Manual que se puede obtener de la página de la DGA en la Internet.

La aplicación del concepto de vulnerabilidad del acuífero se aplica específicamente para el caso de la infiltración de efluentes de acuerdo a lo establecido en el D.S. 46/02 MINSEGPRES. Sin embargo, los conceptos utilizados permiten también realizar una evaluación preliminar de las condiciones potenciales de afección de un acuífero subterráneo en condiciones de un derrame accidental.

#### **4 CONCLUSIONES**

La evaluación de las emergencias ambientales, considerando los recursos hídricos, se basa en un conocimiento de las condiciones específicas del medio natural en el entorno del sitio mismo del suceso. En este sentido, los nuevos proyectos que se han desarrollado en el cuadro de la Ley de Bases del Medio Ambiente (Nº19.300) y su Reglamento proporcionan las informaciones básicas necesarias contenidas en la Línea de Base de los documentos ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Además, las emergencias están contenidas en un capítulo especial, con la especificación de las medidas de control y mitigación de emergencias.

La situación es distinta en condiciones de proyectos que existen y que no ingresaron al SEIA, ya que la mayor parte de las veces en que se producen emergencias no existe un conocimiento de las condiciones del medio y se requiere evaluar rápidamente las medidas que deben ser implementadas para evitar o disminuir la contaminación de los recursos hídricos.

Con el fin de insertar estos eventos en un contexto general, es útil considerar en los Servicios públicos la necesidad de disponer de bases de informaciones de rápido y fácil acceso que puedan proporcionar los elementos fundamentales para la evaluación de las repercusiones ambientales de los mismos. Las bases de datos estructuradas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un instrumento de gran ayuda que permite ir integrando paulatinamente informaciones que pueden ser fácilmente correlacionadas con otras variables, dando lugar a verdaderos Atlas Medioambientales. De éstos se podrán extraer Mapas Sectoriales y Cartas de Riesgos de Contaminación al servicio de una gestión global que integre las emergencias que son el objeto de este estudio.

## **5 REFERENCIAS**

Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement; Sigg, L. et al.; 1992

Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine; Lallemand-Barrès, A. et Roux, J.-C.; 1989

La gestion environnementale des grands bassins fluviaux; Revue de Géographie de Lyon, V.67, N°4, 1992

Manual para la Aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos en la norma de emisión a aguas subterráneas D.S. N°46 de 2002 (DGA, 2003, Borrador)