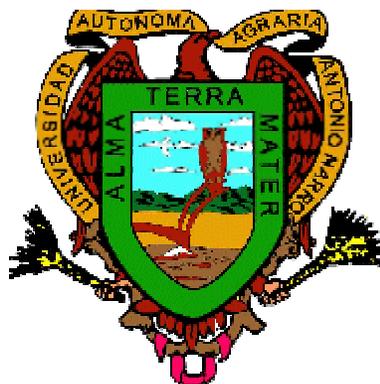


UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

**DIVISION DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

Por:

ABELMAR LÓPEZ MÉNDEZ

MONOGRAFÍA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México Octubre del 2004.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN

MONOGRAFÍA

REALIZADA POR:
ABELMAR LÓPEZ MÉNDEZ

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADO POR:

Dr. JAVIER DE JESÚS CORTÉS BRACHO
ASESOR PRINCIPAL

M.C. LUIS SAMANIEGO MORENO
ASESOR

ING. ARTURO MONROY NIETO
ASESOR

M.C. LUIS EDMUNDO RAMÍREZ RAMOS
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México Octubre del 2004.

AGRADECIMIENTO

A dios y a la Virgen María por haberme dado la vida por la ayuda espiritual que medio cuando lo necesite, en los momentos mas difíciles para alcanzar mis metas y formarme como profesionista.

A la UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO” por la oportunidad para seguir preparándome como persona y profesionista, instruyéndome en el difícil camino de mi vida y ese camino largo del que no se tiene regreso y que ahora es un reto y mi propio destino.

Mis mas sinceros agradecimientos al Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho por el tiempo dedicado, sin interés por ver culminar este trabajo, con sus conocimientos aplicados en el mismo.

Al MC. Luis Samaniego Moreno por su apoyo brindado en la realización de este trabajo y así lograr un sueño y un peldaño mas en la vida.

Al Ingeniero Arturo Monroy Nieto por su apoyo brindado en la realización de este trabajo.

A mis compañeros y amigos Francisco Vargas, Lucero Escamilla, Gabriel Ortega, Carlos A. Salas, Marcos Jiménez, Celiser A. López, Agustín Barrera, Brodelin Díaz, José Luis, Edgar Hernández, Pascual Luevanos, Julio Alejandro Valdez, Bersaín Cárdenas López, Javier Moreno Jiménez, Roger Díaz y todos aquellos amigos que de alguna manera me brindaron su amistad y apoyo incondicional en cada momento difícil de la vida mil gracias.

A todas aquellas personas que de alguna manera u otra aportaron algo en la realización de este trabajo también mil gracias.

DEDICATORIA

A mi padre NARCISO LOPEZ DIAZ (+) por su apoyo incondicional, en mi formación como ser humano, por su empeño, consejos y alentarme a seguir adelante en todo aquello que se emprenda, por ser el mejor de los padres y amigo dedico esta monografía en su memoria.

A mi madre por su apoyo incondicional en las buenas y en las malas y por la confianza que siempre me ha brindado en todo aquello que realizo por sus consejos para ser mejor ser humano, por darme la vida por tus retos y caricias por ser mi guía y mi aliento y por ser la mejor madre dedico esta monografía.

A MIS HERMANOS, Orbey A, Nery Madain, Nancy Herlinda y Erbin Narciso López Méndez con respeto y con amor quienes fueron motivo de mi superación, por luchar para ser el mejor y el ejemplo del camino del bien.

A MIS ABUELOS, Dorotea Díaz Gordillo y Abel López Zúñiga Por sus consejos, cariño y apoyo que han mostrado incondicionalmente desde mi niñez.

A MIS TIOS, Rufina, Carolina, José Cresencio, Jaqueline, por su apoyo incondicional por que siempre me apoyaron de alguna manera en lo económico y en lo moral cuando mas lo necesite para seguir adelante y culminar mis estudios y formarme como profesionista.

Al Dr. Odontólogo Ramiro Montes de Oca y su Esposa por su apoyo incondicional, sus consejos y por recordarme siempre las palabras de mi padre y de sus ilusiones y sueños que tenia en que sus hijos terminaran una carrera profesional mil gracias por todo su apoyo.

A MI PADRE

Gracias papá porque me enseñaste a ser hombre. Me enseñaste que ante todos los problemas y adversidades teniéndolo todo para perder, al darse por vencido nunca es la solución.

Me enseñaste que el ser humilde es para darle cara a una persona que acaba de humillarte y no devolverle el insulto, si no perdonarlo y dejarle las puertas abiertas.

Me enseñaste que en esta vida triunfa el que trasciende, fracase o no, aquel que logra avanzar poco a poco, pero sin aportar nada a los demás es un derrotado.

Estuviste presente y estarás presente cuando mas te necesité en los momentos de felicidad para alentarme en todos los momentos de tristeza para consolarme y aconsejarme, y a veces, me indicaste que yo solo debo resolver mis problemas.

Me legaste una personalidad de servicio y entrega, pues dejaste tus diversiones por darme incluso hasta lo que no tenias.

Me enseñaste a tener sangre fría en los momentos de crisis y cautela y honor en los momentos grandes. Me respetaste mi individualidad y más aún, me enseñaste a no cometer tus errores invitándome a seguir tu camino de aciertos. Pero más que todo, me enseñaste a ser un hombre fiel, dedicado, responsable y justo. Que suerte tuve de tener un padre como tú y un amigo el mejor de todos.

INDICE DE CONTENIDO

	Pag
ÍNDICE GENERAL	vi
INDICE DE CUADROS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	7
3.1 Método DRASTIC.	7
3.2 Método GOD	20
3.3 Método SINTACS.	25
3.4 Método EPIK.	27
3.5 Método EKv.	30
3.6 Método DhT' (Relación de potenciales hidráulicos)	33
3.7 Método índice de vulnerabilidad AVI	40
4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS	41

4.1	Índice de vulnerabilidad como caracterización de los estudios de impactos ambientales	41
4.2	El uso de métodos para la vulnerabilidad de capa acuífera	42
4.3	La contaminación de riesgo de las fuentes de abastecimiento de agua.	43
4.4	La protección de aguas subterráneas	44
5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS	46
6.	PROGRAMAS DE MONITOREO	48
6.1	Monitoreo de aguas subterráneas	49
6.2	Programa de monitoreo	50
6.3	Estrategias de monitoreo	55
6.4	Métodos de monitoreo	58
6.5	Monitoreo de calidad de aguas	62
6.6	Monitoreo de los niveles freáticos y de precipitación	62
6.7	Dispositivos y tecnología para la medición de nivel de agua de pozos	63
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
8.	BIBLIOGRAFÍA	66

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pag
3.1	Valor del factor profundidad del agua (D)	10
3.2	Valor para el factor recarga neta (R)	11
3.3	Valor para el factor medio acuífero (A)	12
3.4	Valor para el factor medio del suelo (S)	13
3.5	Valor para el factor de topografía (T)	14
3.6	Valor del factor impacto de la zona no saturada (I)	15
3.7	Valor de conductividad hidráulica (C)	16
3.8	Valores relativos para los parámetros E,P,I y K	29
3.9	Valor del índice según el espesor de la zona subsaturada.	31
3.10	Valor del índice según la permeabilidad vertical	31
3.11	Diagrama de vulnerabilidad - acuíferos libres	32
3.12	Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en relación al potencial hidráulico respecto al del libre asociado	39
3.13	Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en relación a la transmisividad vertical del acuitardo sobrepuesto	39

INDICE FIGURAS

Figura		Pag
3.1	Descripción esquemática donde indican las diferentes capas que considera la metodología DRASTIC.	19
3.2	Descripción esquemática de la determinación de las variables del método GOD.	22
3.3	Caracterización de la vulnerabilidad GOD	24
3.4	Pesos relativos de los parámetros SINTACS	26
3.5	Potenciales hidráulicos naturales acuífero libre y semiconfinado.	34
3.6	Contaminación por bombeo - acuífero semiconfinado.	35
3.7	Flujo a través del acuitardo - potenciales hidráulicos naturales.	36
3.8	Flujo a través del acuitardo - potenciales hidráulicos artificiales.	37
3.9	Flujo a través del acuitardo por variación de la transmisividad vertical.	38

RESUMEN

En años recientes muchos países han experimentado problemas de contaminación en el agua subterránea lo que ha encaminado a plantear metodologías que identifican el mecanismo de transporte de los contaminantes hasta los mantos acuíferos. Dentro de estas metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se han plantado métodos tales como: DRASTIC, SINTACS, GOD, EPIK, EKV, DhT, AVI. Los métodos son similares siendo la cantidad de variables la diferencia entre ellos.

La finalidad del presente trabajo es: La descripción de los métodos para su mejor entendimiento. Así como mostrar el uso que se le da a cada método en la determinación del riesgo de contaminación y protección del agua subterránea. Se presentan también ventajas y desventajas entre un método y otro.

Por último se plantea una programación de monitoreo de aguas subterráneas para determinar los programas, estrategias, métodos, calidad del agua, niveles freáticos y de precipitación, dispositivos y tecnologías para la medición de niveles de agua en pozos para su estudio.

1. INTRODUCCIÓN

En años recientes muchos países han experimentado problemas de contaminación del agua subterránea, con una amplia variedad que va desde fuentes puntuales hasta dispersas. La evaluación de la contaminación se ha expresado a través de tres conceptos: vulnerabilidad, sensibilidad y riesgo. Estos tres factores han mostrado prácticamente igual peso en las determinaciones de una clasificación final, usada para dirigir las actividades de monitoreo del agua subterránea (Foster e Hirata, 1988; Rading, 1994).

Entendiéndose por sensibilidad de acuíferos como la relativa facilidad con que un contaminante (por ejemplo un plaguicida) aplicado sobre o cerca de la superficie, puede migrar hasta el acuífero de interés (Rangel, 2001). La sensibilidad así entendida, depende de los materiales geológicos en cuestión, no de las prácticas agronómicas o las características de los plaguicidas (USEPA, 1993).

Por su parte, la vulnerabilidad del agua subterránea es la relativa facilidad con la cual un contaminante puede migrar al acuífero bajo un grupo de condiciones dadas de prácticas de manejo agrícola, características de plaguicidas y condiciones de sensibilidad del acuífero. Sin que sea necesaria una correlación entre la sensibilidad y la vulnerabilidad (USEPA, 1993).

Las evaluaciones de vulnerabilidad del agua subterránea han sido utilizadas cada vez más a partir de los años noventa como una herramienta para planear y manejar los recursos acuíferos en diferentes partes del mundo.

A los mapas de vulnerabilidad se le puede agregar la determinación del riesgo de contaminación que sirve al menos para identificar los acuíferos, o partes de acuíferos, más vulnerables y determinar las actividades causantes del máximo riesgo de contaminación en estas áreas. La determinación sirve para llamar la atención sobre estas actividades y establecer prioridades en la investigación y el monitoreo de campo. Pero siempre se debe tener en mente que se enfocan más al criterio general que sobre las condiciones específicas de sitios individuales.

En este sentido se debe considerar que existe un grado de especificidad del contaminante (vulnerabilidad específica vs intrínseca), la cual variará considerablemente dadas las condiciones climatológicas (escasa lluvia, alta evaporación), así como los patrones de entrada del contaminante y las escalas espacial y temporal de la evaluación. No obstante, siempre se debe tener en cuenta que la caracterización de la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación y a la carga contaminante al subsuelo, requieren de un buen nivel de conocimiento del ambiente hidrogeológico.

2. ANTECEDENTES.

Los índices de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea engloban aspectos hidrogeológicos tales como: condiciones de explotación de los acuíferos, profundidad del nivel piezométrico, conductividad hidráulica, estratificación, recarga y otros factores (Cortés, 1999). Alrededor del mundo se han propuesto diferentes modelos para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Estos son modelos matemáticos y hacen uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar los mapas de vulnerabilidad y de esta forma, tomar en cuenta la amenaza. Estimar el riesgo de contaminación se refiere a su sensibilidad de los acuíferos a los efectos negativos producidos por una carga contaminante. En la práctica, es lo contrario de la capacidad de una masa de agua receptora de asimilar un contaminante, utilizando por ejemplo la terminología de ordenación de calidad del agua de un río, con la diferencia de que los acuíferos tienen estratos superpuestos que constituyen una protección suplementaria.

Igualmente, se debe tener la precaución de que es posible que, a largo plazo, el acuífero sea vulnerable a contaminantes móviles y persistentes.

Por lo tanto la vulnerabilidad del acuífero dependerá de:

- a) La permeabilidad de la zona saturada a la penetración del contaminante.
- b) La capacidad de atenuación de los sustratos que se encuentran sobre la zona saturada, como resultado de la retención física de las sustancias contaminantes y de la reacción química que puedan provocar.

Margat (1968) introduce el término “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, se han sucedido numerosas definiciones, calificaciones y metodologías sobre el mismo, en muchos casos orientadas a su representación cartográfica.

Hasta la fecha, sin embargo, no se ha logrado consenso sobre el alcance del término y en este sentido, existen dos grandes corrientes.

Una está representada por aquellos investigadores que consideran a la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente al medio (tipo de acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, etc.), sin tener en cuenta la incidencia de las sustancias contaminantes (vulnerabilidad intrínseca) y en la otra orientación, se agrupan los que sí le otorgan, además del comportamiento del medio, trascendencia al tipo y carga del contaminante (vulnerabilidad específica).

También existen divergencias respecto a la utilidad de las representaciones cartográficas y la vulnerabilidad debe mantenerse en un marco cualitativo o pasar a otro cuantitativo.

Una breve referencia a las definiciones, a los componentes y a los métodos más difundidos para caracterizar a la vulnerabilidad del agua subterránea respecto a la contaminación se presenta a continuación.

Vrba y Zaporozec (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”. De la definición se desprende que los autores incluyen en la misma tanto al sistema subterráneo como a los contaminantes y dentro de estos a los artificiales y a los naturales.

Foster e Hirata (1991) dicen que la “vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”. En este caso al citar a una carga contaminante impuesta, los autores parecen referirse solamente a una contaminación de origen artificial.

Custodio (1995) señala: “la vulnerabilidad a la contaminación expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales”. Vuelven a aparecer aquí procesos naturales y/o artificiales, como potenciales generadores de la alteración.

EPA (1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Esta definición

incorpora, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las prácticas de cultivo (vulnerabilidad específica).

En general, se considera que un contaminante presenta un mayor riesgo de contaminar un acuífero (en función del gradiente hidráulico existente) cuanto mayor sea su concentración, movilidad y persistencia en el medio. Los factores que cuantifican la vulnerabilidad específica engloban (a diferencia de lo que ocurría en el caso de la vulnerabilidad natural, donde los factores son generalmente muy poco modificables) a los aspectos más dinámicos y variables que pueden darse en un sistema acuífero, como el tiempo de tránsito a través de la zona no saturada, las características concretas de cada contaminante, el tiempo de permanencia en un acuífero o el uso del territorio.

La vulnerabilidad específica puede medirse respecto a un solo factor o respecto a determinados grupos de ellos (que en este caso suelen tener comportamientos muy similares).

3. METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Existen muy variadas metodologías para determinar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Esencialmente coinciden en la determinación de la vulnerabilidad debido a las características intrínsecas del medio, por lo que algunas metodologías la denominan vulnerabilidad intrínseca. Algunos otros métodos como el de Factores de Atenuación están íntimamente relacionados con el tipo de contaminante y resultan más complejos. A continuación se describen algunos de los métodos más conocidos.

3.1. Método DRASTIC.

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller *et al.* en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés.

Estos factores son:

- Profundidad del agua subterránea (D)
- Tasa de recarga (R)
- Tipo de acuífero (A)
- Tipo de suelo (S)
- Topografía (T)
- Impacto en la zona no saturada (I)
- Conductividad hidráulica (C)

El método posee tres supuestos importantes: el contaminante es introducido sobre la superficie de la tierra, el contaminante es trasladado al agua subterránea por precipitación y el contaminante es móvil en el agua.

El índice DRASTIC es calculado con estos factores de la siguiente forma:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = \text{Contaminación Potencial}$$

Los subíndices r representan tasas y los subíndices w representan rangos, por lo que D_r y D_w son dos cubiertas o capas dentro del SIG obtenidas a partir de la cubierta o capa (Layer) de la profundidad de agua del acuífero

(D), corresponde para cada propiedad del acuífero de la siguiente forma:

D_r = Tasa asignada a la profundidad de la tabla de agua (D)

D_w = Peso de la profundidad de la tabla de agua (D)

R_r = Tasa asignado para rangos de recarga del acuífero (R)

R_w = Peso para la recarga del acuífero (R)

A_r = Tasa asignada al medio del acuífero (A)

A_w = Peso asignado al medio del acuífero (A)

S_r = Tasa para el suelo (S)

S_w = Peso para el suelo (S)

T_r = Tasa para la pendiente (T)

T_w = Peso asignado a la topografía (T)

I_r = Tasa asignada a la zona vadosa (I)

I_w = Peso asignado a la zona vadosa (I)

C_r = Tasa de rangos de conductividad hidráulica (C)

C_w = Peso de conductividad hidráulica (C)

Los valores de las capas que considera la metodología DRASTIC son mostrados de los cuadros (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7).

Este método provee una forma simple de asignar la susceptibilidad de ciertas áreas a la contaminación. Los factores de clasificación se establecen del 1 al 10, mientras los factores de ponderación varían según el factor implicado. Los factores más importantes son la profundidad del nivel de agua, el tipo de suelo y el impacto de la zona no saturada. Además los factores de ponderación

cambian cuando se trata de agentes contaminantes pesticidas. Estas diferencias se deben a que los pesticidas resultan menos volátiles y más persistentes en el ambiente.

Cuadro 3.1. Valor del factor profundidad del agua (D)(Tomado de Agüero, 2000).

Profundidad (m)*	Clasificación D_r
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
> 30.5	1
Tipo	Ponderación D_w
Pesticida	5
No pesticida	5

*Los valores de profundidad originalmente establecidos en el método se encuentran en pies.

Cuadro 3.2. Valor para el factor recarga neta (R)(Tomado de Agüero, 2000).

Recarga (mm)	Clasificación R_r
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9
Tipo	Ponderación R_w
Pesticida	4
No pesticida	4

Cuadro 3.3. Valor para el factor medio acuifero (A)(Tomado de Agüero, 2000).

Tipo de acuifero	Rango de clasificación A_r	Valor típico A_r
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ignea meteorizada	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza karstica	9 – 10	10
Tipo	Ponderación A_w	
Pesticida	3	
No pesticida	3	

Cuadro 3.4. Valor para el factor medio del suelo (S)(Tomado de Agüero, 2000).

Tipo de suelo	Clasificación S_r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1
Tipo	Ponderación S_w
Pesticida	5
No pesticida	2

Cuadro 3.5. Valor para el factor de topografía (T)(Tomado de Agüero, 2000).

Pendiente (%)	Clasificación T_r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1
Tipo	Ponderación T_w
Pesticida	3
No pesticida	1

Cuadro 3.6. Valor del factor impacto de la zona no saturada (I)(Tomado de Agüero, 2000).

Tipo de medio	Rango de clasificación I_r	Valor típico I_r
Capa confinante	1	1
Cieno – arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ignea	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza karstica	8 – 10	10
Tipo	Ponderación I_w	
Pesticida	4	
No pesticida	5	

Cuadro 3.7. Valor de conductividad hidráulica (C)(Tomado de Agüero, 2000).

Conductividad Hidráulica		Clasificación C_r
(m/día)	(cm/s)	
0.04 – 4.08	$4.6 \times 10^{-5} - 4.7 \times 10^{-3}$	1
4.08 – 12.22	$4.7 \times 10^{-3} - 1.4 \times 10^{-2}$	2
12.22 – 28.55	$1.4 \times 10^{-2} - 3.4 \times 10^{-2}$	3
28.52 – 40.75	$3.4 \times 10^{-2} - 4.7 \times 10^{-2}$	6
40.75 – 81.49	$4.7 \times 10^{-2} - 9.5 \times 10^{-2}$	8
> 81.49	> 9.5×10^{-2}	10
Tipo		Ponderación C_w
Pesticida		2
No pesticida		3

Para realizar todos estos cálculos primero se introducen todas las cubiertas dentro de un mismo sistema de coordenadas geográficas, los que se georeferencian y se convierten a formato raster con celdas de 50x50 metros cuadrados. El resultado final del cálculo es una cubierta que contiene un valor numérico en cada celda. Para identificar las zonas vulnerables dentro de la cubierta o capa resultante, se divide estadísticamente en ocho clases a todos

los valores encontrados. De esta manera se pueden definir algunas clases intermedias entre las zonas de mayor y menor vulnerabilidad.

El Índice DRASTIC es un resultado cualitativo dentro de las clases y de ninguna manera excluye el factor vulnerabilidad dentro de las zonas. Esto quiere decir que una zona de baja vulnerabilidad es menos vulnerable que una zona de alta vulnerabilidad, sin embargo no deja de ser vulnerable. Por lo tanto a partir de esta zonificación de vulnerabilidad se pueden crear otros criterios para establecer puntos críticos de vulnerabilidad dentro de una misma clase.

El método DRASTIC fue desarrollado en los Estados Unidos de Norte América, con el objeto de crear una herramienta para evaluar sistemáticamente el potencial de contaminación del agua subterránea de cualquier ambiente hidrogeológico con la información existente. Para ser aplicada, esta metodología debe reunir una serie de condiciones:

- a) Debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego).
- b) Al valor de cada parámetro se aplica un índice de ponderación entre 1 y 5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante.
- c) El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación: $DrDw + RrRw +$

$ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw =$ Índice de vulnerabilidad de los cuadros (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7). El rango posible de valores del índice DRASTIC está comprendido entre 23-226 siendo más frecuentes valores entre 50-200. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación (Martínez, 1998).

<100	Vulnerabilidad insignificante
101-119	Vulnerabilidad muy baja
120-139	Vulnerabilidad baja
140-159	Vulnerabilidad moderada
160-179	Vulnerabilidad alta
180-199	Vulnerabilidad muy alta
>200	Vulnerabilidad extrema

- d) El método DRASTIC se aplica sobre los denominados ambientes hidrogeológicos, unidades cartográficas con características hidrogeológicas e hidrodinámicas similares.

En la figura 3.1 se muestra una descripción esquemática donde indican las diferentes capas que considera la metodología DRASTIC.

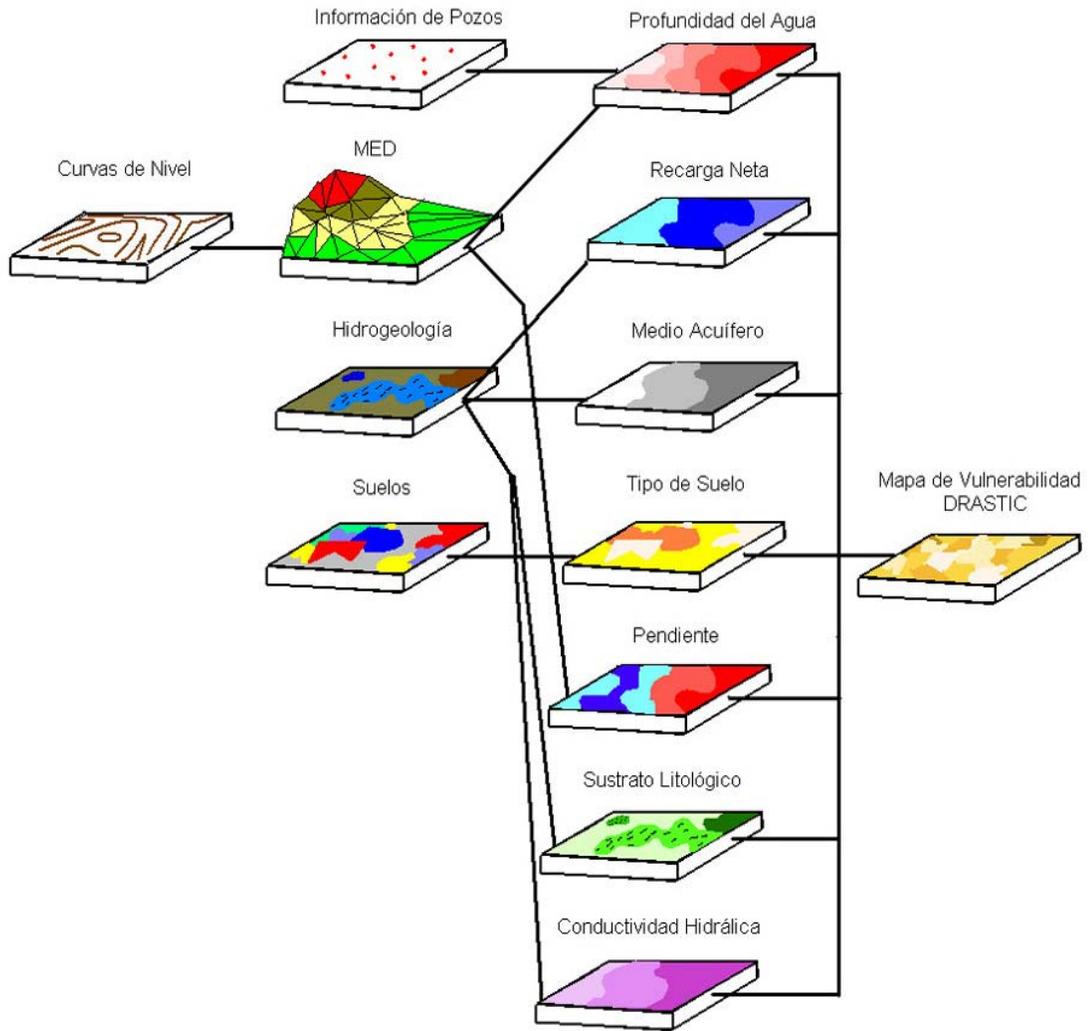


Figura 3.1. Descripción esquemática de las diferentes capas que considera la metodología DRASTIC. (Tomado de Agüero, 2000).

Método GOD

El método de GOD fue desarrollado en 1987 por Foster y trata de ser simple y sistemático. Éste se considera el primer paso para la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades. El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

Los factores que considera el método son: La profundidad del nivel del agua, el tipo de substrato litológico y la ocurrencia del agua subterránea o confinamiento del acuífero.

el método se basa en la asignación de índices entre 0, 1 y 3 variables que son las que nominan el acrónimo:

G (ground water occurrence - tipo de acuífero)

O (overall aquifer class - litología de la cobertura)

D (depth - profundidad del agua o del acuífero)

Este método establece la vulnerabilidad del acuífero, como una función de la inaccesibilidad de la zona saturada, desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster e Hirata, 1991).

Es claro que se trata de un método empírico que establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación, factores que poseen relaciones complejas que dependen de gran cantidad de variables difíciles sino imposibles de cuantificar. Para solventar este inconveniente la metodología utiliza la clasificación de tres facetas discretas que son:

- Distancia del agua
- Ocurrencia del agua subterránea
- Substrato litológico

La vulnerabilidad según el método se calcula como el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G \cdot O \cdot D$$

Donde G = índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence)

O = índice del substrato litológico en términos de grado de consolidación y características litológicas (Overall aquifer class).

D = índice por profundidad del nivel del agua o techo del acuífero confinado (Depth).

Cada uno de los factores posee valores entre 0 y 1, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición (Figura. 3.2). Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

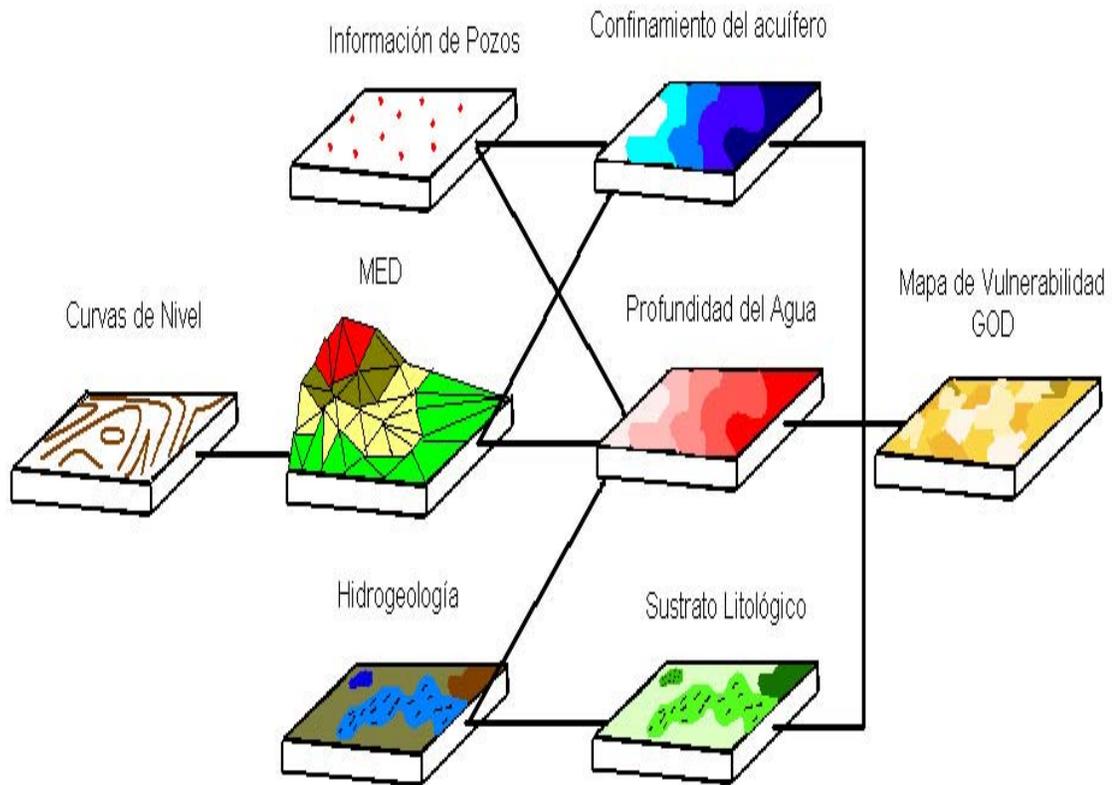


Figura 3.2 Descripción esquemática de la determinación de las variables del método GOD. (Tomado de Agüero, 2000).

Algunos otros factores reconocidos como modificadores de la vulnerabilidad son tomados en cuenta por el método dentro de la carga contaminante. Entre estos se puede citar la infiltración efectiva y el tipo de suelo.

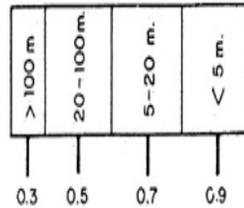
Otra característica del método importante de destacar es que solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero como se muestra en la figura 3.3.

Se considera vulnerabilidad muy baja si el valor es menor a 0.1, baja si el valor está entre 0.1 y 0.3, moderada si está entre 0.3 y 0.5, alta si está entre 0.5 y 0.7 y extrema si es mayor a 0.7.

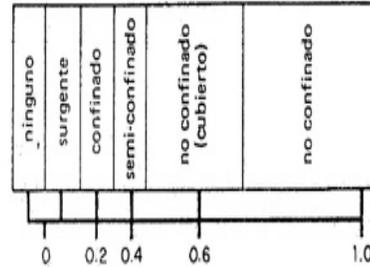
(a) DISTANCIA AL AGUA

(b) OCURRENCIA DE AGUA SUBTERRANEA

PROFUNDIDAD DE LA NAPA
FREATICA (acuífero no confinado)
O TECHO DEL ACUIFERO
(confinado)



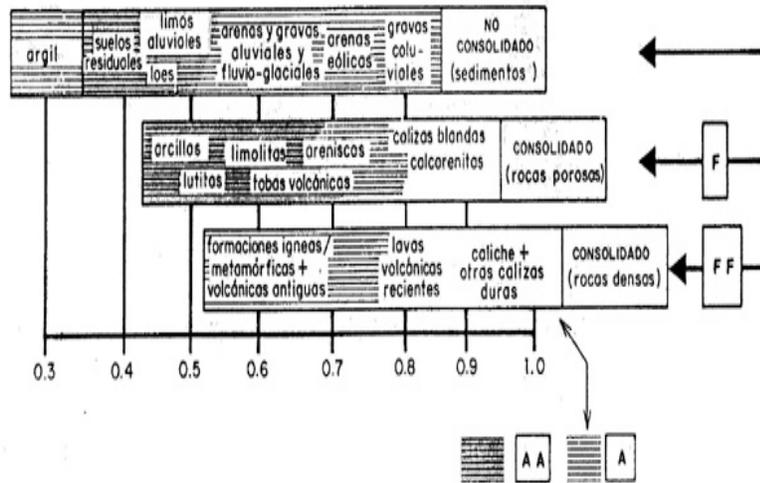
CONDICION DEL ACUIFERO



(c) SUBSTRATO LITOLOGICO

CARACTER DEL ACUIPERMO O ACUITARDO

- (i) GRADO DE CONSOLIDACION
- (ii) CARACTER LITOLOGICO
- F grado de fisuración
- A capacidad relativa de atenuación (contenido de arcilla)



CARACTERIZACION DE LOS COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUIFERO

Para cada componente, se indica un índice comparativo de peligrosidad creciente.

Figura 3.3 Caracterización de la vulnerabilidad GOD (Tomado de Agüero, 2000).

3.3. Método SINTACS.

Es una derivación del DRASTIC, desarrollado por Civita *et al* (1990) para adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y al requerimiento de un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS comprende:

S (**S**oggiacenza - profundidad del agua)

I (**I**nfiltrazione - infiltración)

N (**N**on saturo - sección subsaturada - zona no saturada)

T (**T**ipologia de la cobertura - tipo de suelo)

A (**A**cuífero - características hidrogeológicas del acuífero)

C (**C**onducibilità - conductividad hidráulica)

S (**S**uperficie topografica - pendiente topográfica).

Este método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un programa preparado especialmente para el mismo. A las variables mencionadas, que influyen en la vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso del suelo.

En la figura 3.4 tomada de Vrba y Zaporozec (1994), se indican los pesos relativos en por ciento de las variables intrínsecas adoptadas para la región de La Loggia – Carignano y, como puede observarse, la de mayor incidencia respecto a la vulnerabilidad es **S** la profundidad de la superficie freática (22) y la menor **I** la recarga neta (8).

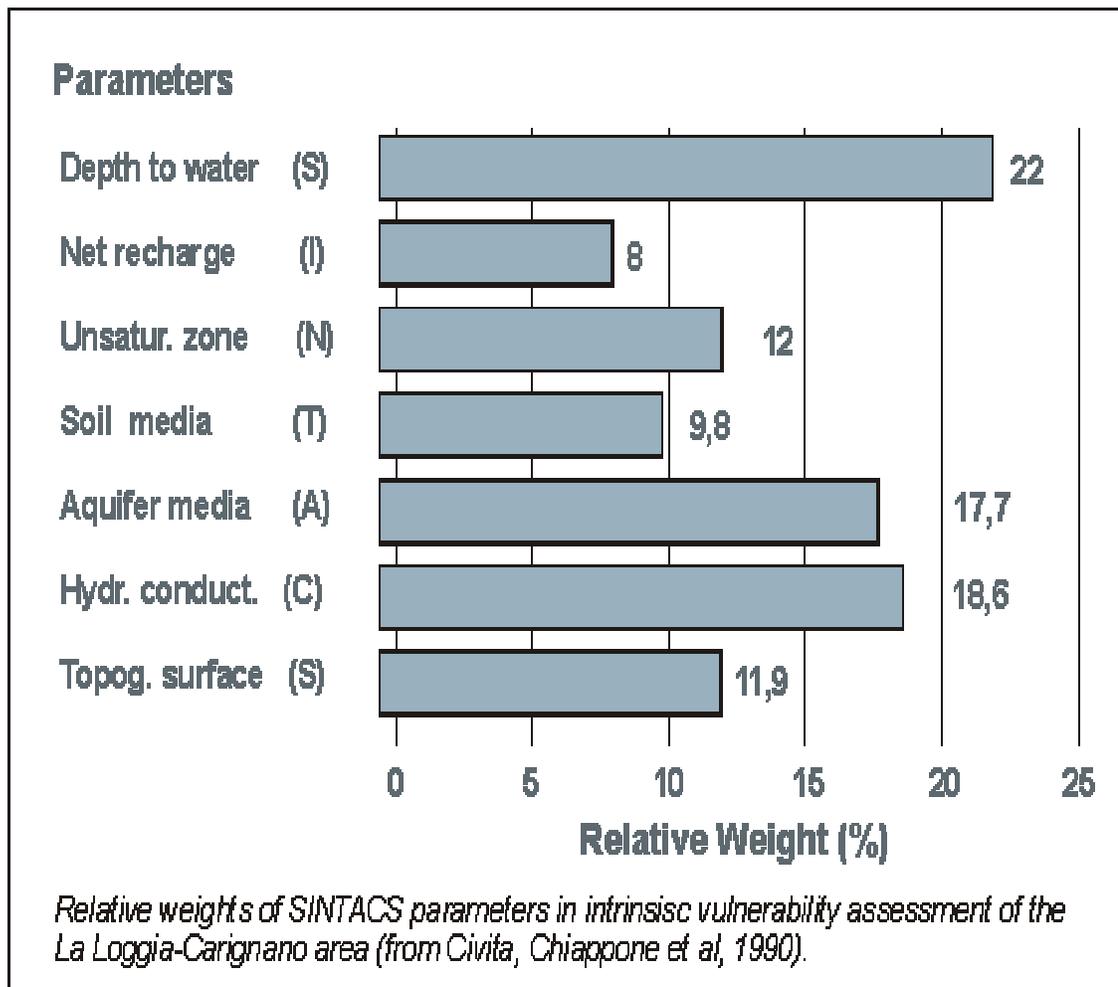


Figura 3.4. Pesos relativos de los parámetros SINTACS para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de la región de La Loggia – Carignano. (Tomada de Auge, 2004).

3.4. Método EPIK.

Es un método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para acuíferos kársticos. El acrónimo **EPIK** significa:

E (Epikarst)

P (Protective cover)

I (Infiltration conditions)

K (Karst network development)

El **Epikarst** es una zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad, cercana a la superficie (Tripet *et al*, 1997), al que se le asignan 3 valores:

E1 corresponde a la red kárstica típica (dolinas, depresiones, cavidades, grutas, etc.)

E2 cuando hay superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos (valles secos, alineación de dolinas, etc.)

E3 ausencia de morfología epikárstica.

El **Protective cover** está formado por el suelo y otros materiales de cobertura como depósitos glaciales, loess, limos aluviales, derrubios de falda, etc. A este parámetro se le asignan 4 valores (de P1 a P4), en función del espesor de la cobertura.

El parámetro **Infiltration** (infiltración) es el de más complicada estimación.

I1 se aplica a regiones con vías accesibles para la infiltración directa.

I2 e I3 se emplean para zonas con pendientes topográficas entre 0 y 25%.

Contrariamente a otros métodos paramétricos, en éste la vulnerabilidad aumenta con el incremento de la pendiente, que favorece la concentración de la escorrentía en los sitios más karstificados.

Al parámetro **Karst network** (red kárstica) se le asigna 3 valores:

K1 para una red kárstica bien desarrollada.

K2 para zonas pobremente karstificadas.

K3 para acuíferos kársticos con descarga en medios porosos, o que presentan fisuración, pero subordinada.

El método incluye 4 factores de ponderación (α β γ δ), aplicables a cada parámetro (EPIK), para valorar su peso relativo en el cálculo del **índice de vulnerabilidad intrínseca**. Este índice de vulnerabilidad, denominado también **factor de protección** es:

$$V_i = (\alpha \cdot E_i) + (\beta \cdot P_i) + (\gamma \cdot I_i) + (\delta \cdot K_i)$$

Donde:

Vi: índice de vulnerabilidad en el área i

Ei, Pi, li, Ki: valores relativos de los parámetros E, P, I, K

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: factores de ponderación correspondientes a los parámetros EPIK.

Cuadro 3.8. Valores relativos para los parámetros E,P,I y K (Tomada de Auge, 2004).

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

A diferencia de la mayoría de los otros métodos, el EPIK brinda vulnerabilidades crecientes a medida que disminuyen los valores relativos de los parámetros considerados. Esto, pues el método apunta a definir el factor de protección para el agua subterránea, más que la vulnerabilidad.

Para los factores de ponderación Doerfliger y Zwahlem (1997) proponen:

$$\alpha = 3 \quad \beta = 1 \quad \gamma = 3 \quad \delta = 2$$

Considerando los valores relativos y los factores de ponderación, surge que el índice de vulnerabilidad o factor de protección de un acuífero en medio kárstico puede variar entre extremos de 9 (más vulnerable) y 34 (menos vulnerable).

Los mismos autores recomiendan emplear las siguientes categorías:

vulnerabilidad alta (9 – 19)

vulnerabilidad media (20 –25)

vulnerabilidad baja (26 – 34)

vulnerabilidad muy baja cuando existe una cobertura de suelo detrítico, de por los menos 8 m de espesor, con baja conductividad hidráulica.

3.5. Método EKv.

Auge (1995), considera que la vulnerabilidad es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello también se la conoce como protección o defensa natural.

En relación a los acuíferos libres desarrolla una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (**E**) y en la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (**Kv**), parámetros que también considera el método AVI (Aquifer Vulnerability Index).

A ambas les asigna índices que van de 1 (menos vulnerable) a 5 (más vulnerable), finalizando en el cuadro 3.11 donde **Kv** es la permeabilidad vertical y **E** el espesor de la sección subsaturada. Ambos valores se suman brindando un índice final, con extremos de 2 y 10. Para índices de **E + Kv** entre 2 y 4 la vulnerabilidad es baja, entre 5 y 7 media y de 8 a 10 alta como se muestra en el cuadro 3.9 y 3.10.

Cuadro 3.9. Valor del índice según el espesor de la zona subsaturada (Tomada de Auge, 2004).

	Espesor de la zona subsaturada (E)				
M	>30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
índice	1	2	3	4	5

Cuadro 3.10. Valor del índice según la Permeabilidad vertical (Tomada de Auge, 2004).

	Permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv)				
m/día	<1.10 ⁻³	>1.10 ⁻³ a 0,01	>0,01 a 1	>1 a 50	>50 a 500
Índice	1	2	3	4	5
Vulnerabilidad	muy baja	baja	media	alta	muy alta

5: con permeabilidades verticales (K_v) de 50 a 500 m/día, está representado por arena mediana y gruesa, grava arenosa y grava.

4: K_v de 1 a 50 m/d, por arena muy fina a limosa, arena fina y arena mediana a gruesa.

3: K_v de 0,01 a 1 m/d, por limo y limo arenoso.

2: K_v de 0,001 a 0,01 m/d, por limo y limo arcilloso.

1: $K_v <$ de 0,001 m/d, por arcilla y arcilla limosa.

Cuadro 3.11. Diagrama de vulnerabilidad - acuíferos libres (Tomada de Auge, 2004).

	1	6	5	4	3	2
	2	7	6	5	4	3
	3	8	7	6	5	4
	4	9	8	7	6	5
	5	10	9	8	7	6
K_v		5	4	3	2	1
				E		

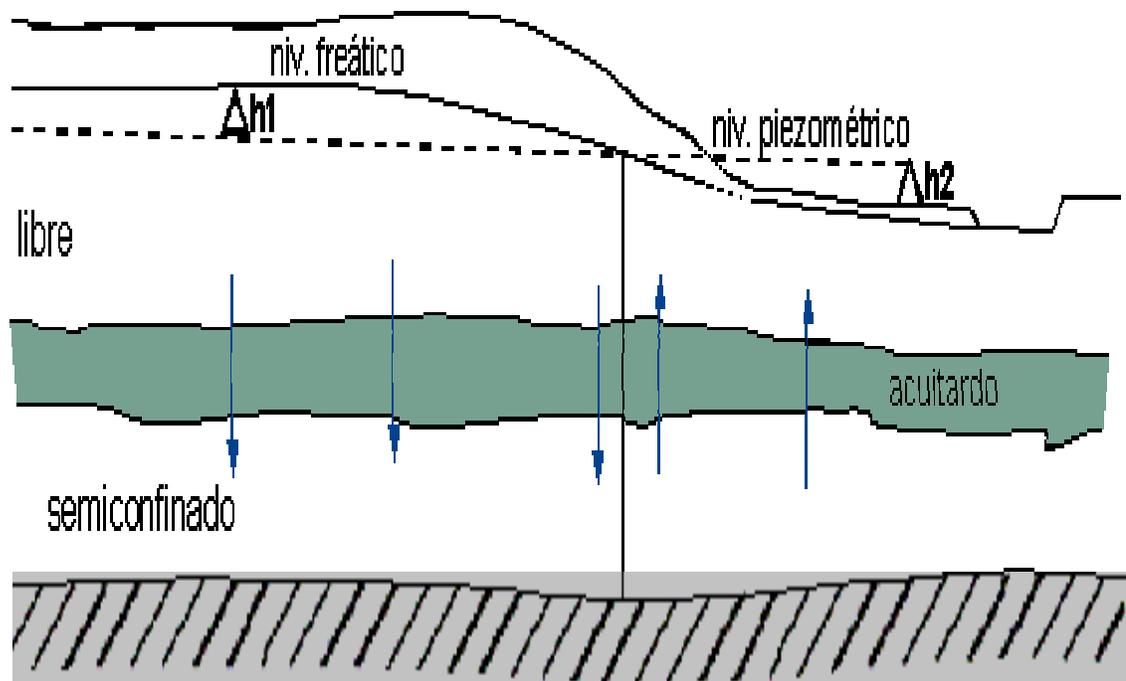
Es muy poco lo que se ha hecho respecto a la vulnerabilidad de acuíferos parcialmente confinados o semiconfinados.

3.6. Método DhT' (Relación de potenciales hidráulicos)

La vulnerabilidad de este tipo de acuífero, está controlada por las propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo (permeabilidad vertical, porosidad, espesor y continuidad) y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el libre sobrepuesto. Esta diferencia, que bajo condiciones de no alteración generalmente es pequeña (algunos dm a pocos m), se magnifica en los ámbitos bajo explotación, donde puede alcanzar decenas y aún centenas de metros.

En la figura 3.5 se señala una relación hidráulica natural con un Δh_1 favorable al acuífero libre, que define el sector de recarga del semiconfinado y un Δh_2 , favorable a este último que tipifica al ámbito de descarga.

El acuífero semiconfinado sólo puede contaminarse a partir del libre en el ámbito de recarga, pero no en el de descarga.



La Figura 3.5. Potenciales hidráulicos naturales acuífero libre y semiconfinado. (Tomada de Auge, 2004).

En la figura 3.6 se muestra como la extracción generó una nueva relación hidráulica entre los dos acuíferos, cuya consecuencia más trascendente respecto a la vulnerabilidad del semiconfinado, es el descenso de su superficie piezométrica con la consecuente sobrecarga hidráulica del libre en el techo del acuitardo, lo que facilita la filtración vertical descendente y el acceso de contaminantes al semiconfinado.

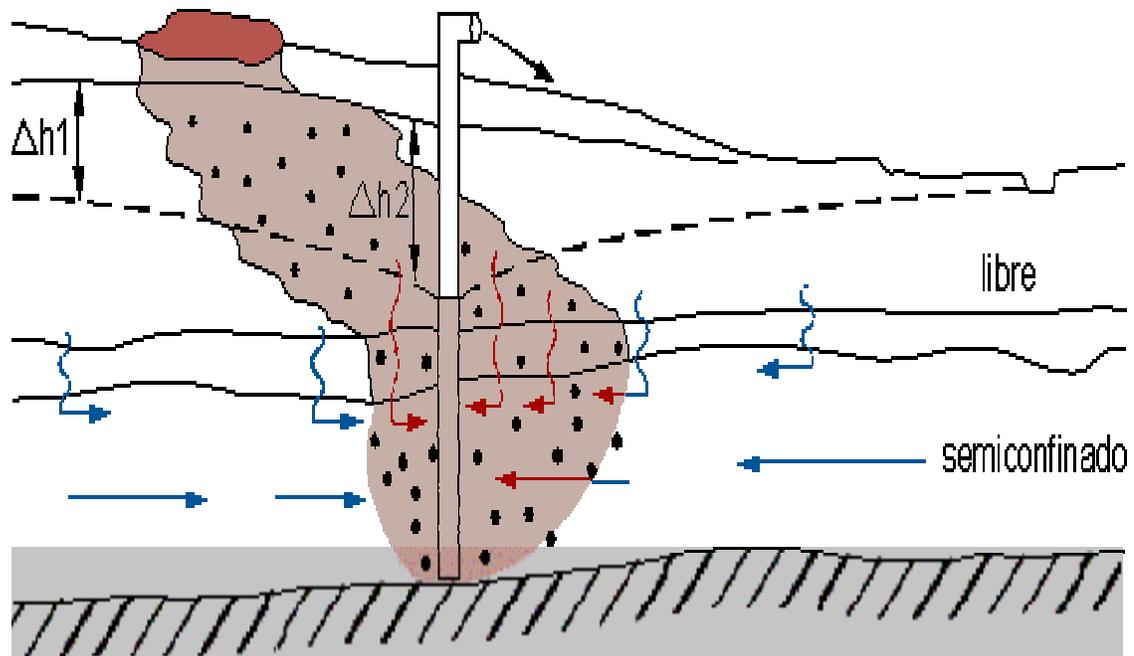


Figura 3.6. Contaminación por bombeo - acuífero semiconfinado. (Tomada de Auge, 2004).

La permeabilidad vertical del acuitardo (K') y su transmisividad vertical ($T'=K'/e'$) no son de fácil determinación. Una forma es mediante ensayos hidráulicos, pero estos pueden brindar valores bastante más altos que los reales, particularmente cuando las perforaciones ensayadas carecen de un buen aislamiento entre el acuífero libre y el semiconfinado. Más representativo es comparar la freaticimetría con la piezometría de la misma zona y obtener un mapa residual, con las diferencias de potencial hidráulico entre el freático y el acuífero semiconfinado y a partir de este último, conociendo el flujo por el acuífero parcialmente confinado, estimar el valor de T' (Auge, 1986). Magnitudes de T' entre 10^{-3} y 10^{-6} día⁻¹ son típicas de acuíferos semiconfinados, mientras que las menores de 10^{-6} indican un alto grado de confinamiento y las mayores de 10^{-3} d⁻¹ apuntan hacia acuíferos libres o semilibres. Un valor de $T' = 5 \cdot 10^{-4}$ día⁻¹ significa que por

cada metro de diferencia de potencial hidráulico entre el acuífero parcialmente confinado y el freático, pasarán por una superficie de 1 m² del sellante, $5 \cdot 10^{-4}$ m³ (0,5 litros) al cabo de 1 día. Esta magnitud que parece despreciable, deja de serlo cuando el ámbito involucrado en el pasaje, adquiere dimensiones naturales (cientos o miles de km²).

Los potenciales hidráulicos relativos de las unidades hidrogeológicas involucradas resultan fundamentales, pues condicionan el flujo vertical. Si los niveles son parecidos el flujo vertical a través del acuitardo estará muy limitado (figura 3.7), pero la dinámica vertical se acentúa notoriamente en condiciones de alteración artificial (figura 3.8).



Figura 3.7. Flujo a través del acuitardo - potenciales hidráulicos naturales. (Tomada de Auge, 2004).

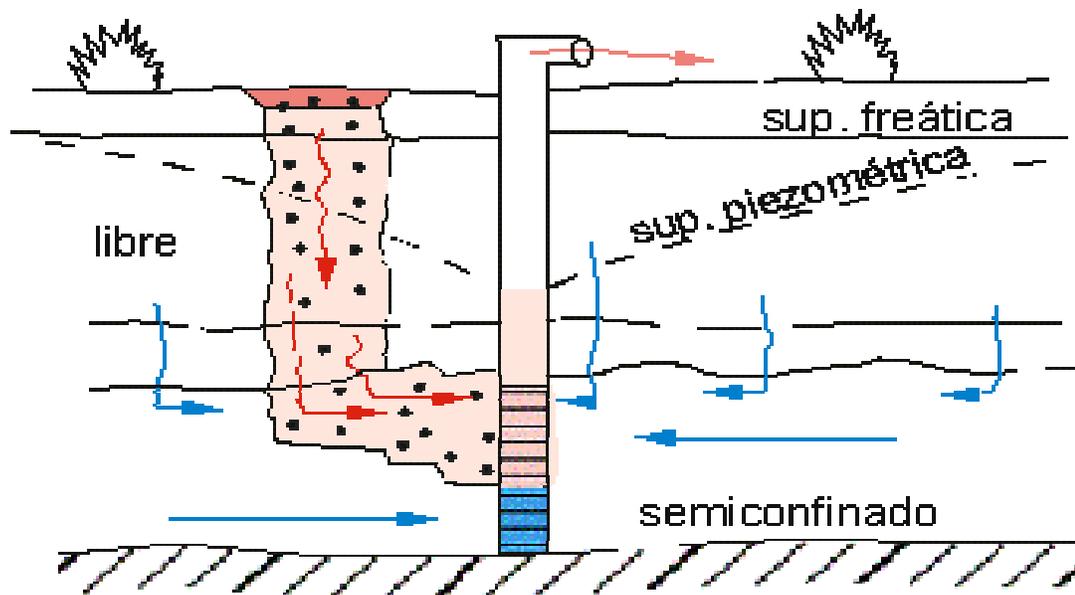


Figura 3.8. Flujo a través del acuitardo - potenciales hidráulicos artificiales. (Tomada de Auge, 2004).

De los esquemas se desprende que la situación menos favorable para la protección del acuífero parcialmente confinado, se da cuando su potencial hidráulico es menor que el del freático; o sea existe un gradiente hidráulico vertical negativo en profundidad (figura 3.9).

Otro factor que incide en la comunicación hidráulica es la continuidad areal y litológica del sellante, dado que los cambios faciales suelen modificar notablemente su capacidad respecto a la transmisión de agua (figura 3.9).

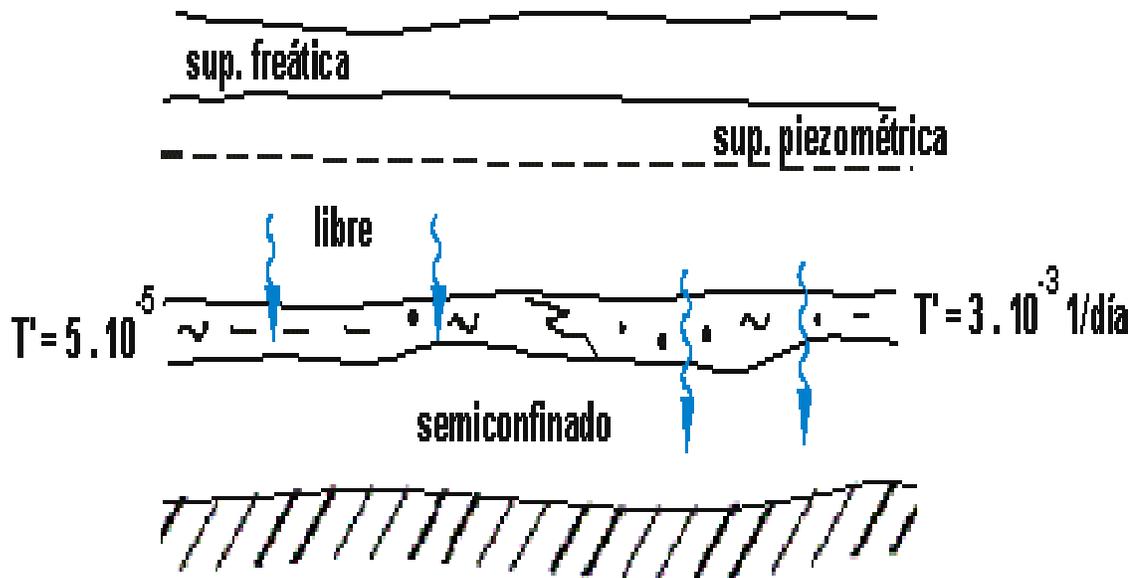


Figura 3.9. Flujo a través del acuitardo por variación de la transmisividad vertical. (Tomada de Auge, 2004).

Considerando ambas variables (potenciales hidráulicos y transmisividades verticales) se pueden establecer 3 grados de vulnerabilidad (alta, media y baja), determinados primariamente por el gradiente vertical de potenciales hidráulicos y secundariamente por la T' .

Resulta importante señalar que los potenciales hidráulicos pueden variar, tanto por causas naturales (períodos de exceso o déficit) como artificiales (extracción) y que ello puede modificar el sentido del flujo vertical. Por lo tanto debe seguirse periódicamente (monitoreo) la evolución espacial y temporal de los mismos.

Si se denomina H_1 al potencial hidráulico del acuífero libre y H_2 al del parcialmente confinado, se tiene: (en el cuadro 3.12 y 3.13).

Cuadro 3.12 Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en relación al potencial hidráulico respecto al del libre asociado (Tomada de Auge, 2004).

H2 > H1	vulnerabilidad baja
H2 ~ H1	vulnerabilidad media
H2 < H1	vulnerabilidad alta

A esto se le puede adicionar la resistencia hidráulica que ofrece el sellante al pasaje vertical.

Cuadro 3.13 Vulnerabilidad de un acuífero semiconfinado en relación a la transmisividad vertical del acuitardo sobrepuesto (Tomada de Auge, 2004).

$T' < 10^{-5}$ 1/día	vulnerabilidad baja
$10^{-5} < T' < 10^{-3}$ 1/día	vulnerabilidad media
$T' > 10^{-3}$ 1/día	vulnerabilidad alta

3.7. Método índice de vulnerabilidad AVI

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua. (Baez, 2001).

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero (Van Stempvoort et al. 1992), por medio de la resistencia hidráulica “c” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero. La resistencia hidráulica “c” se calcula por la expresión:

$$c = \sum [b_i / K_i] \text{ para las capas } 1,2,3,\dots,i$$

Donde:

b_i - Es el espesor de cada capa sobre el acuífero

K_i - Es la conductividad hidráulica de cada capa

C - Es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero.

A mayor resistencia hidráulica c, menor vulnerabilidad.

4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS

4.1. Índice de vulnerabilidad como caracterización de los estudios de impactos ambientales

En los Estudios de Impactos Ambientales (EIA), proceso para prever las afecciones al medio ambiente son uno de los elementos a tener bien en cuenta, y frecuentemente los acuíferos apenas son tratados. Las obras lineales (carreteras, autovías, líneas de ferrocarril, oleoductos y gasoductos entre otras) por sus propias características geométricas precisan respecto a la posible interacción con las aguas subterráneas un tratamiento diferente, debido a que las condiciones hidrológicas a lo largo del trazado pueden ser muy diferentes.

El impacto ambiental de las aguas subterráneas pueden producirse tanto en cantidad como en calidad, los índices de vulnerabilidad de acuíferos como técnica para cuantificar y representar gráficamente la valoración del grado de vulnerabilidad de los acuíferos, pueden proponerse como metodología para una valoración de esta vulnerabilidad y en función de la actividad, la función del tipo de obra, tener una aproximación al riesgo afección a las aguas subterráneas.

La utilización de un determinado índice (DRASTIC, GOD, otros), obliga a conocer una serie de parámetros hidrológicos a lo largo de todo el trazado, en estos casos la utilización de un sistema de información geográfica, permite de una manera rápida y sencilla, identificar aquellos tramos de la obra donde deben de preverse posibles riesgos de afección a las aguas subterráneas.

4.2. El uso de métodos para la vulnerabilidad de capa acuífera

La ciudad de Zacatecas obtiene su suministro de agua potable de pozos profundos. En 1996 el Instituto de Ingeniería de la UNAM hizo un estudio hidrogeoquímico en la zona de Zacatecas y con base a estos datos hidrológicos, se realizaron los planos de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en la zona de Calera (Rodríguez, Massimo, Mayo. 2003).

El estudio contemplo cuatro zonas hidrológicas pero en este caso se selecciono la zona de Calera por contar con mayor número de perfiles de pozos y algunos de los niveles freáticos se obtuvieron del estudio realizado por el Instituto de Ingeniería.

En este trabajo se aplicaron tres métodos para la obtención de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero: DRASTIC, GOD, AVI. Los dos primeros métodos coinciden en sus resultados mientras que la metodología AVI tiene cierta discrepancia.

4.3. La contaminación de riesgo de las fuentes de abastecimiento de agua.

La salvaguarda con calidad adecuada del agua captada para el suministro a la población hace imprescindible la elaboración de perímetros de protección de las captaciones de abastecimiento urbano que protejan estas ante los riesgos de contaminación por diversas actividades (agrícolas, ganadera, industriales y urbanas) existentes en su entorno.

Se contemplan en primer lugar la utilización de los estudios de vulnerabilidad como criterio para establecer un orden de prioridad en la implantación regional de perímetros de protección. Se muestran los resultados de su aplicación regional en la Comunidad Valenciana, en la costa oriental española.

El tratamiento metodológico para la delimitación de perímetros dependen de las características del material captado. Se exponen los diferentes métodos aplicables para su delimitación en medios porosos o asimilables en su funcionamiento a los mismos, evaluándose la precisión obtenida, y los métodos aplicables en acuíferos kársticos y fisurados.

Se analizan los requisitos, métodos existentes, así como las ventajas y desventajas de utilizar los estudios de vulnerabilidad como complemento (en el caso de acuíferos porosos) o como alternativa al empleo de otros métodos (hidrológicos, analíticos o modelos matemáticos de flujo y de transporte de solutos) habitualmente empleados en la delimitación de perímetros de protección.

4.4. La protección de aguas subterráneas.

El agua subterránea, en ciertas condiciones, constituye un importante recurso de abastecimiento de agua para distintos usos. En algunas ocasiones, las características propias del sistema natural determinan que la cantidad, accesibilidad y en especial la cantidad de agua subterránea se torne inadecuada para alguno o todos los usos requeridos.

Por ello la complejidad de los medios geológicos, así como el que cada vez más se requieran estudios de mayor detalle, ha provocado un gran auge en el empleo de números en hidrogeología, fundamentalmente de flujo de agua, pero también de forma creciente de transporte de solutos.

La vulnerabilidad intrínseca fue adecuado, delimitándose nuevas áreas a proteger considerando la contaminación a un plazo igual o menor a 50 años, el análisis a las condiciones de explotación del acuífero. Los cambios que se obtienen se reflejan en los índices de baja, media y alta vulnerabilidad.

La estimación de la tasa promedio de cambio es del 43 por ciento, la cual refleja la incertidumbre entre la vulnerabilidad intrínseca y la vulnerabilidad específica. El hecho de considerar el flujo regional o el flujo local incide directamente a los resultados, por ello es difícil establecer un criterio de comparación entre ambas metodologías.

La elección del método y el correcto manejo de la incertidumbre requiere la definición simultánea del flujo local y regional, así como la definición previa del sistema bajo estudio (objeto de análisis) y las actividades humanas (componente activa). Por consiguiente, los resultados que se presenta ponen de manifiesto la necesidad de cambiar los modelos y los mapas de vulnerabilidad intrínsecos, para generar los mapas de riesgo, los cuales podrán ser utilizados como herramientas para el manejo sustentable de los recursos hídricos subterráneos y el ordenamiento territorial del área de estudio.

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

DRASTIC: Es más robusto que GOD, dado que emplea mayor cantidad de variables (7), pero esto puede transformarse en un inconveniente, cuando no se dispone de los valores de alguna(s) de ella(s). También se le critica a DRASTIC la reiteración en el alcance de algunos parámetros como **R** y **C**, ambos vinculados a la renovación de agua en el acuífero, y la poca incidencia que tienen otros respecto a la vulnerabilidad como **S** (suelo).

SINTACS: Es una derivación de DRASTIC, por lo que presenta las mismas ventajas y desventajas que este, con el agregado de que para su operación se requiere el empleo del software correspondiente. Esto a su vez es de utilidad doble (dual); por un lado simplifica la entrada (input) de nueva información del crecimiento y disminución del nivel freático (oscilación freática), lo que permite actualizar rápidamente la cartografía resultante, especialmente si se lo emplea dentro de un programa SIG. Por el otro, la falta del software limita el uso del método.

GOD: Posee como mayor ventaja, lo sencillo de su operación y el escaso número de parámetros requeridos para su empleo. Esto a su vez resulta en definiciones menos claras que DRASTIC y SINTACS. Otro defecto es no considerar la incidencia del suelo, que es un factor de gran trascendencia como filtro natural para la contaminación.

EPIK: Presenta como atributo favorable ser el único método desarrollado específicamente para acuíferos kársticos y como mayor desventaja la indefinición de algunos parámetros como **K** e **I**.

EKv: Es sencillo y de fácil aplicación, pero sólo considera 2 parámetros (profundidad de la freática y permeabilidad vertical de la sección subsaturada).

$\Delta hT'$: Es para acuíferos semiconfinados y está en proceso de desarrollo.

AVI: El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por (Van Stempvoort *et al.* 1992)

6. PROGRAMAS DE MONITOREO

Se cree que la definición más aceptada es que éste es un programa dirigido a la obtención de información en puntos preestablecidos y a intervalos regulares de tiempo con el objetivo de proveer datos que pueden usarse para definir las condiciones actuales y establecer tendencias respecto a la calidad de aguas de la(s) fuente(s) que son objeto de estudio.

Es parte de un programa mucho más amplio que podrían llamarle Evaluación de la Calidad de Aguas. Investigadores y agencias de gobierno de países de la Europa Occidental y de los Estados Unidos, principalmente, sin desmerecer esfuerzos realizados por otros países.

Ello significó la emisión de una serie de recomendaciones y regulaciones dirigidas al buen manejo de los recursos hídricos con un fin común: la preservación de la salud pública.

A inicios de los años 1900 se tenían, en los países nombrados, equipos multidisciplinarios conformados para el diseño y ejecución de planes acordes con el fin de proteger la salud y el bienestar del público. A raíz de ello nacieron agencias como las de salud pública y del control de aguas que se sumaron a las ya existentes como las de levantamientos geológicos, de suelos, de demografía, de estadísticas, de agricultura, y muchas otras para trabajar por el bien común.

6.1. Monitoreo de Aguas Subterráneas

En términos generales el monitoreo ha sido definido como la observación continua con métodos estandarizados del medio ambiente. De manera particular, el monitoreo del agua subterránea puede ser entendido como un programa diseñado científicamente de continua supervisión que incluye observaciones, mediciones, muestreo y análisis estandarizado metodológicamente y técnicamente de variables físicas, químicas y biológicas seleccionadas con los siguientes objetivos :

- Colectar, procesar y analizar los datos sobre la cantidad y calidad de las aguas subterráneas como línea base para reconocer el estado y las tendencias a nivel de pronóstico debida a procesos naturales e impacto por actividad antropica que es causada por el hombre en forma artificial en tiempo y espacio.
- Proveer información para el mejoramiento en la planeación y diseño de políticas para la protección y conservación de las aguas subterráneas. La integración y coordinación de las actividades de monitoreo de aguas subterráneas con las correspondientes al agua superficial, precipitación, evaporación y suelos se recomienda con base en el reconocimiento de que es el ciclo hidrológico la base conceptual para la estrategia de manejo integrado del recurso hídrico.

El monitoreo de las aguas subterráneas comprende:

- Programa de monitoreo
- Estrategias de monitoreo
- Métodos de monitoreo

6.2. Programa de Monitoreo

El programa de monitoreo comprende el monitoreo en sí, la información y los sistemas de manejo. Una vez definidos claramente los objetivos es esencial identificar los resultados esperados del monitoreo (Vargas, 2004).

Los requerimientos de información por los usuarios (planeadores, políticos y tomadores de decisiones, científicos y público en general) no pueden ser satisfechos cuando los objetivos del monitoreo no han sido claramente establecidos. El diseño de redes de monitoreo, construcción de pozos y métodos de muestreo difieren particularmente de acuerdo con el alcance previsto.

En este sentido, los programas nacionales y regionales tienen características que los diferencian de los programas locales de monitoreo relacionados con problemas de contaminación específica.

La definición de objetivos y requerimientos de información primaria y agregada es el primer punto crítico de un programa de monitoreo y tiene que ser definido antes de localizar la primera estación de monitoreo y de hacer el primer muestreo. El sistema de monitoreo incluye las siguientes actividades:

- Delimitación del área de monitoreo

- Análisis de la estructura geológica, el sistema de flujo de aguas subterráneas y la calidad de las aguas subterráneas.

- Diseño de la red de monitoreo

- Designación e implementación de métodos de campo y procedimientos analíticos de laboratorio.

- Determinación de la frecuencia de muestreo y selección de variables a ser analizadas incluyendo muestras de campo.

- Manejo de la base de datos, especialmente en lo relacionado con manipulación, procesamiento y evaluación de los datos. El análisis de los datos y la transformación de los datos analizados en información útil para los usuarios es otro punto crítico en el programa de monitoreo de las aguas subterráneas.

Es claro que a pesar de que se tenga una alta calidad de la información, si esta no es transmitida a los usuarios en sistemas inteligentes de información realmente no será utilizada de manera efectiva y perderá su valor como insumo para la toma de decisiones. Las salidas de información deben ser entendidas por técnicos, sectores socioeconómicos, sectores ambientales, científicos, tomadores de decisiones y público en general. El sistema de manejo del estado del sistema hidrogeológico como una fase final del programa de monitoreo esta basada sobre los resultados del monitoreo y pretende orientar la implementación de políticas y estrategias de protección y conservación del recurso en el marco legal e institucional existente.

El programa de monitoreo es gobernado principalmente por los objetivos de monitoreo, la extensión del territorio a ser monitoreado, duración del monitoreo y los efectos de impactos sobre los sistemas hidrogeológicos. Dentro del programa de monitoreo en lo referente a la extensión se comprende el programa Nacional, Regional, y Local de agua subterráneas.

El programas Nacionales de Aguas Subterráneas. comprenden la recolección de datos sobre el estado natural y el estado intervenido de las aguas subterráneas, en cantidad y calidad, de los principales sistemas acuíferos. Esta información soporta la política nacional de protección y conservación de aguas subterráneas.

La importancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento de agua potable, como bien ambiental y la vulnerabilidad de acuíferos controlan el diseño de la red nacional de aguas subterráneas. La frecuencia de monitoreo de esta red se estima en dos veces al año teniendo en cuenta las condiciones hidroclimáticas y socioeconómicas del país.

El programas Regionales de Aguas Subterráneas. Los programas regionales de aguas subterráneas, del gobierno de las autoridades ambientales regionales, están interrelacionadas con otras redes regionales de aguas superficiales y programas ambientales. Un programa regional de monitoreo debe ser flexible y capaz de servir a diferentes propósitos. Su principal objetivo es adquirir datos estadísticamente representativos y significativos sobre el agua subterránea para establecer planes de manejo regional del recurso, políticas regionales y estrategias de protección para las áreas de jurisdicción de las autoridades ambientales del país.

Los programas regionales de monitoreo complementan el programa nacional de monitoreo pero sus propósitos se orientan al seguimiento de actividades que causan potencial o real contaminación y a la protección de área de captación de abastecimiento de agua potable. El diseño de pozos de monitoreo debería permitir el seguimiento de movimiento vertical de contaminantes, incluso en la zona no saturada. Las empresas abastecedoras de agua potable están obligadas por su parte a implementar programas de monitoreo como parte de la política de protección de sistemas de abastecimiento de agua potable.

El programas locales de monitoreo de aguas subterráneas. Los programas locales de monitoreo de aguas subterráneas se establecen alrededor de los siguientes objetivos:

a) Identificación de fuentes potenciales de contaminación, con el propósito de dar alertas tempranas acerca del deterioro o degradación de las aguas subterráneas.

b) Observación y control del movimiento de plumas de contaminación o efectos de remediación en fuentes de contaminación existentes. Estos programas operan independientemente de los programas nacionales y regionales. Se circunscriben a los sitios específicos y requieren gran cantidad de pozos de monitoreo (del orden de m^2 a $1 km^2$), alta frecuencia de monitoreo y selección de variables específicas de acuerdo con el tipo y propiedades de los contaminantes identificados.

6.3. Estrategias de Monitoreo

Las diferentes propiedades de un sistema hidrogeológico comparado con los de un sistema hídrico superficial deben ser consideradas cuando se establece la estrategia de monitoreo. El agua subterránea, raramente es afectada por los impactos antropogénicos tan rápidamente como el agua superficial. La respuesta de un sistema acuífero es usualmente retardada debido a que el movimiento de los contaminantes en el subsuelo es lento por las condiciones hidrodinámicas y la naturaleza de los procesos bioquímicos. Esta condición debe ser usada efectivamente en la estrategia de protección del sistema hídrico subterráneo. Los principales objetivos de una estrategia de monitoreo de aguas subterráneas incluyen:

- Soportar la estrategia de protección de aguas subterráneas en los niveles locales, regionales y nacionales con el objetivo de preservar sus propiedades naturales especialmente para propósitos de abastecimiento de agua potable.

- Proveer datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del sistema hidrogeológico con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.

- Disponer de datos precisos y confiables para ayudar a identificar la existencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación.

- Producir datos para estudiar los cambios en el espacio y en el tiempo en la calidad de los sistemas hidrogeológicos debido a procesos naturales. El desarrollo de la estrategia debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Importancia y vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos

- Tipos y extensión de las fuentes potenciales de contaminación y problemas de degradación.

- Prioridades, intereses y necesidades conectadas con el desarrollo de los recursos hídricos. Los objetivos de monitoreo dependen del nivel (nacional, regional, local), de las prioridades, de los intereses y de las necesidades de los usuarios y por ello su determinación es complicada. En sentido amplio, son objetivos comunes:

- Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema de aguas subterránea.

- Definir el estado, en cantidad y calidad, de las aguas subterráneas.

- Identificar los efectos de los procesos naturales y los impactos humanos de los sistemas hidrogeológicos

- Pronosticar a largo plazo las tendencias en cantidad y calidad de las aguas subterráneas.

- Definir el grado de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos.

- Definir medidas a ser adoptadas para prevenir la degradación de las aguas subterráneas o restaurar los acuíferos que ya han sido afectados.

- Determinar prioridades y conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales. No obstante, cada autoridad ambiental debe definir sus propios objetivos de monitoreo de acuerdo con las realidades regionales y locales sin perder de vista que el control del monitoreo de las aguas subterráneas es parte de las actividades y responsabilidades de la estructura gubernamental y autoridades ambientales encargadas de implementar de manera coordinada estrategias y políticas para regular el manejo y control sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.

6.4. Métodos de Monitoreo

El monitoreo de aguas subterráneas se realiza en pozos construidos o adecuados para tal fin que debe cumplir especificaciones técnicas para considerarse como tal. La selección de métodos sustentables de toma representativa de muestras de aguas subterráneas es la parte más problemática del procedimiento. El agua ha permanecido normalmente algunas semanas o algunos meses en el pozo de monitoreo. La columna se mantiene sobre los filtros sin contacto directo con el sistema de flujo de aguas subterráneas y bajo el impacto de factores atmosféricos y del material de la tubería lo cual afecta todas sus propiedades químicas.

Los principales métodos de muestreo implementados de acuerdo con las condiciones de flujo del acuífero son 1) muestreo después de remover el agua acumulada sobre el intervalo de filtros, 2) en pozos de bajo rendimiento muestreo por succión o recolección de muestras después de bombear el pozo y recuperar la columna de agua, 3) purgar el pozo mientras se miden parámetros de campo (usualmente pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto).

- Diseño de pozos de monitoreo que pueden clasificarse en dos clases:

a) Pozos convencionales

Existen tres tipos de piezómetros, sencillos, dobles y múltiples. Los segundos se instalan para considerar la evaluación simultanea de dos niveles acuíferos. Los de tipo múltiple se utilizan cuando se van a evaluar mas de dos niveles acuífero. Pueden ser más económicos y se instalan de acuerdo con la experiencia, el conocimiento geológico y las necesidades de muestreo. Cuando se trata de acuíferos confinados y profundos se debe evaluar cada caso y determinar si se requieren multipozos en un solo punto para muestreo de varios acuíferos o muestreo puntual de un acuífero en particular.

Las especificaciones técnicas para la construcción de pozos de monitoreo de aguas subterráneas se encuentran en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-CNA-1996 (Diario. Oficial. Federación. 2004 En esta norma se detallan metodologías para la construcción de piezómetros, métodos de perforación, materiales y procesos de limpieza y desarrollo.

b) Pozos no convencionales.

Estos pozos corresponden a aquellos abandonados que eventualmente se adecuan como pozos de monitoreo por razones económicas. Deben cumplir con especificaciones mínimas relacionadas con el reconocimiento de su diseño, captar únicamente el acuífero objeto de monitoreo y cumplir con disposiciones sanitarias que impidan el acceso de contaminantes desde la superficie.

En algunos casos se utilizan pozos de producción como pozos de monitoreo pero los procedimientos de muestreo y toma de datos deben considerar un estado estático y un aforo adecuada. En todos los casos los pozos de monitoreo deben:

a) Estar georreferenciados y nivelados

b) Cumplir con disposiciones sanitarias (cerramiento, tapa de seguridad y sello sanitario.

c) Tener zonas de protección definidas

d) Tener una ficha en la base de datos del sistema de monitoreo que incluya codificación, fotografía del pozo, características de diseño, fecha de instalación, propiedades hidráulicas del acuífero y del pozo obtenidas a partir de pruebas de

bombeo, opcionalmente descripción de sistema de recepción y transmisión de datos, fechas de limpieza, desarrollo y mantenimiento.

Dentro del muestreo de aguas subterráneas las orientaciones para el muestreo y manejo de muestras de aguas subterráneas son abordadas por parte del PROY-NOM-083-SEMARNAT-2003, (Diario. Oficial. Federación. 2003). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales.

Los procedimientos analíticos de laboratorio son expeditos para cada variable y objeto de procedimientos analíticos que garantizan la confiabilidad y precisión en el análisis.

El almacenamiento de datos es adquirido mediante un programa de monitoreo que deben ser incorporados en una bases de datos. El protocolo para el almacenamiento, procesamiento y obtención de reportes de salida de la red nacional se encuentra en una etapa de diseño y forma parte integral del proyecto “Diseño, Formulación e Implementación de la Red Básica Nacional de Seguimiento y Muestreo de Aguas Subterráneas” que actualmente se encuentra en una fase de concertación con las autoridades ambientales.

Igualmente las corporaciones y autoridades ambientales de grandes centros urbanos deben desarrollar sus propios sistemas de información regional que

incluyan el componente de aguas subterráneas siguiendo las directrices del Sistema de Información Ambiental. Asimismo, es necesario desarrollar las estrategias e instrumentos de divulgación a los usuarios para sus fines pertinentes.

6.5. Monitoreo de la Calidad de Aguas

Este importante aspecto, cuya preservación es otra de las principales recomendaciones del estudio de referencia principalmente, se dirigirá a llevar un seguimiento periódico y documentado de las variaciones de los elementos y compuestos químicos de los cuales se realizó una muestra en el estudio de referencia y que podrían comprometer la calidad de los acuíferos (Huici, 2000).

Mediante la introducción de los resultados de las muestras y su digitalización, se elaborarán modelos que relacionen las variaciones en la calidad de las aguas, con las fuentes de contaminación localizadas geográficamente, de acuerdo al mapa de vulnerabilidad y riesgo.

6.6. Monitoreo de Niveles Freáticos y de Precipitación

El mismo sistema diseñado para el monitoreo de los pozos, será empleado en el monitoreo de los niveles freáticos a las salidas de las cuencas, como también para la medición de la precipitación en diferentes altitudes y a lo largo de todo el valle, con la finalidad de contar con la mayor información posible para que sirva de insumo a los modelos matemáticos a ser establecidos.

Toda esta información generada y los modelos establecidos permitirán, a las autoridades competentes y a los sujetos actores, tener elementos confiables y efectivos para la toma de decisiones en materia de control y protección de los recursos hídricos subterráneos.

6.7. Dispositivos y Tecnología para la Medición de Nivel de Agua de Pozos

El Sistema de Monitoreo de Aguas Subterráneas plantea la utilización de sensor de nivel por transductor de presión, instalados en una muestra representativa de pozos, conectados mediante una red, a un sistema central de acopio, procesamiento y digitalización de la información.

Datos que serán registrados de manera permanente en el medio electrónico e interrelacionados con la información proveniente de las otras estaciones de monitoreo de precipitación, niveles de caudal y del laboratorio de calidad de aguas.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

El termino vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación aún se discute la definición y el alcance del mismo. En este sentido la mayoría de los autores consideran a la vulnerabilidad una propiedad cualitativa que indica el grado de protección natural de una acuífero respecto a la contaminación.

Alrededor del mundo se ha propuesto diferentes modelos para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. Estos modelos son matemáticos y hacen uso de los sistemas de información geográfica (SIG). Lo que resulta que toda investigación sobre los recursos naturales, su representación es en forma cartográfica.

El SINTACS es una derivación del DRASTIC por lo que presentan las mismas ventajas y desventajas, el GOD posee como mayor ventaja lo sencillo de su operación y el escaso número de parámetros requeridos para su empleo, el EPIK es el único método desarrollado para acuíferos kársticos, EKV es el mas sencillo y de fácil aplicación, DhT esta en proceso de desarrollo, el AVI es uno de los métodos mas sencillos, fácil y rápido de cuantificar la vulnerabilidad.

La importancia de la descripción de los programas de monitoreo nos ayuda a mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de las aguas subterráneas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación o degradación de la misma.

RECOMENDACIONES

Las metodologías discutidas son formas de estimar preliminarmente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, para establecer claramente el riesgo real de la contaminación son necesarios estudios hidrogeológicos y ambientales, que involucran variables como: Profundidad del agua, Conductividad hidráulica, Topografía del terreno, Infiltración, Tipo de suelo, Tipo de acuífero los cuales definirán en forma práctica cuál de los métodos será el mejor para su estudio en una cierta región.

Se recomienda estar en continua actualización de la documentación citada en este trabajo, para que los interesados en el tema estén mejor informados sobre prevención de posibles riesgos de contaminación.

Es recomendable, además de la determinación de la vulnerabilidad llevar a cabo un programa de monitoreo ya que es uno de los métodos para soportar la estrategia y políticas de la protección y conservación de los recursos del agua subterráneos, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación o degradación de la misma.

7. BIBLIOGRAFÍA

Auge, M. 1986. Hydrodynamic Behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. Ground Water. Vol. 24 # 5: 636-642.

Auge, M. 1995. Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. UBA: 1-65.

Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos.

<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>

Agüero, V. J. 2000. Análisis de Vulnerabilidad a la Contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.

http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm

Baez, V. A. 2001. Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos.

<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/baez.html>

Cortes, B. J. 1999. Simulación del flujo de agua subterránea en un medio fracturado de calizas. Tesis de Doctorado. Facultad de, Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. México. P 35 - 39

Custodio, E y Llamas, M 1995. *Hidrología Subterránea*. Tomo I. Ediciones Omega, segunda edición Barcelona.

Diario. Oficial. Federación. 10 de octubre de 2003.

http://www.ordenjuridico.gob.mx/PE/administracion_1/PROY-NOM-083.SEMARNAT-2003.pdf

Diario. Oficial. Federación. 4 de febrero de 2004.

http://www.ordenjuridico.gob.mx/PE/administracion_1/NOM-013-CNA-2000.pdf

Doerfliger N & F. Zwahlen 1997. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In Gunay & Jonshon (Ed). Int. Symp. on Karst Waters and Environ. Impacts. Antalya, Turkey, 1997. Balkema: 117-123. Rotterdam.

E.P.A. 1991. Evaluación de la vulnerabilidad.

<http://www.fing.edu.uy/imfia/proyin/cvraigon/cap6.html>

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy. TNO Comm. on Hydrog. Research. Proceed. and Information # 38: 69-86.

Foster, S & Hirata, R. 1988. Determinación del riesgo de contaminación de aguassubterráneas.

<http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/vulnerabilidad.pdf>

Foster, S. y R. Hirata 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

<http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/vulnerabilidad.pdf>.

Huici, W. R .2000. Sobreexplotación, vulnerabilidad y protección de las aguas subterráneas.

<http://www.aguabolivia.org/PublicarX/GESTION/TEMA3B.htm>

Margat, J., 1968. Groundwater vulnerability to tamination. BRGM, 68 sgl 198, HYD, Orleans, France.

Martínez, M. 1998. Aplicación del Método DRASTIC Para la Evaluación del Riesgo de afección a las Aguas Subterráneas por una Obra Lineal.

http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdflib3/martinez.pdf

Rading, S. 1994 North Dakota Geographic Targeting System for Groundwater Monitoring, North Dakota Health Department Division of Water Quality.

Rangel, M. M. 2001. análisis de vulnerabilidad en zonas áridas y semiáridas con énfasis en las condiciones de Mátape, sonora, México.

<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/medina.html>

Rodrigues, R. C. Massimo. M. De Mayo. 2003. Aquifer Vulnerability and Risk. 1st. International Workshop. México. Pag 82, 269, 270, 271,272. Vol 1.

Tripet J. P. Doerfliger N. & F. Zwahlen 1997. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. Hydrogéologie 3: 15-57.

USEPA, 1993 A Review of Methods for Assessing Aquifer Sensivity and Ground Water Vulnerability to pesticide Contamination. Office of Water (4602) 813-R-93-002.

Van Stempvoort, D., L., Ewert and L. Wassenaar.1992, AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Praire Province of Canada, PPWB Report No. 114, National Hydrogeology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada, ,1995.

Vrba y Zaparozec, 1994: Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability International Association of Hydrogeologists. Vol. 16. ISBN 3-922705-97-

Vargas, M. N. O. 2004. monitoreo de aguas subterráneas.

<http://www.ideam.gov.co/temas/guiaagua/Anexo%204.pdf>