



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 Generalidades

2.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera

2.2.1 Métodos basados en simulaciones

2.2.2 Métodos estadísticos

2.2.3 Métodos de Índices y superposición

2.3 DRASTIC

2.4 Estudios de comparación

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 Generalidades

El término de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue introducido primeramente por Margat, un hidrogeólogo francés, en 1968 (Vrba y Zaporozec, 1994). En un principio sólo tenía relación con los aspectos cualitativos de la contaminación. Hoy en día puede también determinar aspectos cuantitativos y de calidad del agua subterránea (Ramos Leal, 2010a).

El concepto de vulnerabilidad del agua subterránea está fundado en la premisa de que el medio físico en el que se encuentra el acuífero le proporciona cierta protección de los agentes externos, por ello existen zonas con mayor propensión que otras a ser contaminadas (Al-Zabet, 2002).

La vulnerabilidad del agua subterránea no es una característica que pueda medirse directamente en campo. Esta se basa en un concepto básico que definen Vrba y Zaporozec (1994) que algunas áreas del suelo son más vulnerables a la contaminación de aguas subterráneas que otras. El nivel del agua subterránea es la clave en la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación, que se define como la probabilidad de que una cierta cantidad de un contaminante pueda alcanzar el nivel del agua subterránea dentro de un tiempo determinado (Voigt et al., 2004).

El concepto de vulnerabilidad implica dos conceptos: vulnerabilidad intrínseca, que define la vulnerabilidad del agua subterránea a contaminantes generados por actividades humanas tomando en cuenta las características inherentes a la geología, hidrología e hidrogeología independientemente de la naturaleza de los contaminantes. La vulnerabilidad específica, por otro lado, define la vulnerabilidad del agua subterránea a un contaminante o un grupo de ellos tomando en cuenta las propiedades del

contaminante y su relación con los distintos componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Gogu y Dassargues, 2000).

El grado de contaminación del agua subterránea es determinado frecuentemente por los procesos de atenuación natural que se generan en el área ubicada entre la fuente de contaminación y el acuífero. Existen varios procesos naturales, físicos y químicos que ocurren en el subsuelo responsables de que el contaminante cambie su estado físico y químico. Estos cambios pueden generar una disminución en el potencial de contaminación que poseía la sustancia, o un cambio en la naturaleza de la misma. Algunos de estos procesos poseen mayor eficacia en la zona del suelo y la zona vadosa que en la zona saturada (Gogu y Dassargues, 2000).

El riesgo a la contaminación difiere de la vulnerabilidad a la contaminación en que el primero toma en cuenta el impacto que ocasiona la actividad del ser humano en la calidad del agua subterránea, no sólo considerando la vulnerabilidad sino también la existencia de una fuente de contaminación potencial como factor dinámico. Lo fuerte que pueda ser el impacto dependerá de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y el valor del acuífero como un recurso (Ducci, 2000).

Tanto la vulnerabilidad como el riesgo del agua subterránea a un contaminante se pueden plasmar en un mapa como una función de las condiciones hidrogeológicas. Esto proporciona un panorama de cómo la protección efectiva que el ambiente natural proporciona puede cambiar drásticamente de un lugar a otro (Gogu y Dassargues, 2000).

2.2 Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera

A continuación se describen brevemente los principales métodos para la evaluación de la vulnerabilidad acuífera, los cuales pueden ser divididos en tres grupos: métodos basados en simulaciones, métodos estadísticos, y métodos de índices y superposición.

2.2.1 Métodos basados en simulaciones: utilizan modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la subsuperficie.

2.2.2 Métodos estadísticos: utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presenten estas áreas.

2.2.3 Métodos de Índices y superposición: combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, la zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evaluación de la vulnerabilidad. Dentro de estos métodos se encuentran los métodos de Sistemas de matriz (superposición) y los Modelos de sistema de conteo de puntos (índices). Para utilizar estos métodos primero se deben seleccionar los parámetros representativos para la evaluación de la vulnerabilidad y posteriormente a cada parámetro se le asigna un rango de valores que reflejan el grado de vulnerabilidad a la contaminación (Gogu y Dassargues, 2000).

Métodos de sistemas de matriz: Estos se utilizan con un número restringido de parámetros cuidadosamente elegidos. Para obtener la vulnerabilidad se realiza una combinación que refleja la evaluación de cualquier punto del área de estudio. El resultado numérico final es dividido en intervalos que expresan el grado de vulnerabilidad (Gogu y Dassargues, 2000). Dentro de este tipo de métodos están el sistema GOD (Foster, 1987), el método AVI (Van Stempvoort et al., 1993) y el método ISIS (Civita y De Regibus 1995).

El método GOD es una herramienta sencilla para evaluar la vulnerabilidad acuífera ya que sólo toma en cuenta tres parámetros: G (ground water occurrence - tipo de acuífero), O (overall aquifer class - litología de la cobertura), D (depth - profundidad del agua o del acuífero). El índice de vulnerabilidad se obtiene al asignar valores a estos parámetros y multiplicarlos entre sí. El valor de vulnerabilidad se presenta en un rango de valores de 0 a 1 (Auge, 2004).

Van Stempvoort et al. (1993) desarrollaron la metodología AVI, Índice de Vulnerabilidad Acuifera (Aquifer Vulnerability Index). Para este método se toman en cuenta dos parámetros: el espesor de cada unidad por encima del acuífero más somero (d) y la conductividad hidráulica estimada de cada una de estas unidades (k). El resultado (c) está dado por

$$c = \sum_{i=1}^n d_i/k_i \dots (2), \text{ donde:}$$

c = resistencia hidráulica dada por el método AVI

n = el número de capas

k= conductividad hidráulica estimada de cada capa n

Se realiza este cálculo para cada pozo con corte litológico y posteriormente se realiza una interpolación de valores para visualizar la vulnerabilidad (Gogu y Dassargues, 2000).

El método ISIS fue desarrollado por Civita y De Regibus (1995) como la síntesis de varios estudios de vulnerabilidad acuifera. Este método es un híbrido que combina el sistema de pesos y valores de DRASTIC y SINTACS con el método y estructura general de GOD. Los parámetros utilizados son: la recarga media anual, topografía, tipo de suelo, espesor del suelo, litología de la zona no saturada, espesor de la zona no saturada, medio acuífero y espesor del acuífero. A estos parámetros se añade el uso de suelo que ha sido tomado de la metodología SINTACS, dependiendo del tipo de uso, ya sea para

agricultura, de condiciones normales y con un área superficial fuertemente drenada (Gogu y Dassargues, 2000).

Para estimar el índice de vulnerabilidad de ISIS se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_v = p_{Inf} \times f_{Inf} + p_{Su} \times f_{Sus} \times f_{Su} + p_{Ins} \times f_{Si} \times f_{Ins} + p_{Sat} \times f_{Ss} \times f_{Sat} \dots (3), \text{ donde:}$$

p_{Inf} = valores para los rangos de recarga neta

f_{Inf} = coeficiente de infiltración dependiente del uso de suelo

p_{Su} = valores para el tipo de suelo

f_{Sus} = coeficiente para el tipo de suelo dependiente del uso de suelo

f_{Su} = coeficiente de peso dependiente del espesor del suelo

p_{Ins} = valores asignados a la zona vadosa

f_{Si} = coeficiente de peso dependiente de la litología y espesor de la zona no saturada

f_{Ins} = coeficiente de la zona vadosa dependiente del uso de suelo

f_{Ins} = coeficiente de la zona vadosa dependiente del uso de suelo

p_{Sat} = valores asignados al medio acuífero

f_{Ss} = coeficiente de peso dependiente del espesor del acuífero

f_{Sat} = coeficiente del acuífero dependiente del uso de suelo

El índice de vulnerabilidad final dependiente del uso de suelo varía entre 24 y 180, dividido en 6 clases de vulnerabilidad: extrema (141-180); muy alta (124-140); alta (88-123); media (64-87); baja (44-63); muy baja (24-43).

Métodos de conteo de puntos: Estos métodos son sistemas de evaluación en los que cada parámetro es multiplicado por un peso asignado para reflejar la relación entre ellos. Los parámetros valuados y multiplicados son después sumados para obtener la puntuación final (Gogu & Dassargues, 2000). Esta puntuación provee una medida de la vulnerabilidad para un punto del área de estudio. A este tipo de métodos pertenecen DRASTIC (Aller et al. 1987), SINTACS (Civita y De Maio, 1997) y EPIK (Doerfliger y Zwahlen, 1997) que es utilizado para medios kársticos.

En Italia, Civita y De Maio (1997) crearon una variante del DRASTIC llamada SINTACS que fue creada especialmente para las características hidrogeológicas de Italia y a la vez proporciona un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS representa: S (soggiacenza - profundidad del agua), I (infiltrazione - infiltración), N (non saturo - sección subsaturada), T (tipologia della copertura - tipo de suelo), A (acquifero - características hidrogeológicas del acuífero), C (conducibilità - conductividad hidráulica), S (superficie topografica - pendiente topográfica) (Auge, 2004). La diferencia entre DRASTIC y SINTACS que es que el último tiene un sistema de pesos y valores más flexible y permite crear nuevas clasificaciones de pesos. Se basa en:

$$I_v = \sum (P_{(1,7)} \times W_{(1,n)}) \dots (4), \text{ donde:}$$

I_v = índice de vulnerabilidad del método SINTACS

$P_{(1,7)}$ = valuación de cada uno de los siete parámetros

$W_{(1,n)}$ = peso asociado

n = número de arreglos de clasificación de pesos

2.3 DRASTIC

Desarrollado por la EPA (Aller et. al., 1987), DRASTIC es uno de los métodos más utilizados para la evaluación del potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

Sus siglas provienen de cada uno de los siete parámetros hidrogeológicos que lo conforman (en inglés): profundidad al nivel freático (D), recarga neta (R), litología del acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto a la zona vadosa (I) y conductividad hidráulica (C). Estos parámetros son los que mayor impacto tienen en el potencial de contaminación de una zona.

El método DRASTIC produce una serie de resultados que permiten desarrollar programas para la protección del agua subterránea, el monitoreo y trabajos de limpieza (Al-Zabet, 2002). Este método ha sido utilizado en múltiples trabajos por su practicidad,

facilidad para aumentar o disminuir el número de parámetros y posibilidad de adaptar estos a condiciones específicas del área de estudio (Kim, Y.J., Hamm, S.Y., 1999; Fritch, T.G. et al., 2000; Al-Zabet, 2002; Babiker, I.S. et al., 2005; Jamrah, A. et al., 2008; Ahmed, A.A., 2009; Tilahun, K. & Merkel, B.J., 2009; Liggett, J.E. & Allen, D.M., 2010; Ormeci V. S. & Davraz, A., 2010; Expósito, J.L. et al., 2010)

En esta metodología se tiene un sistema donde cada parámetro tiene un valor y un peso dependiendo de la importancia que tiene en la evaluación del área (Tabla 2.2). A cada parámetro se le asigna un valor entre 1 y 10. Después, este valor es multiplicado por un factor de importancia que va de 1 a 5 y estos factores valuados son sumados para obtener el índice $D_i = D_r * D_w + R_r * R_w + A_r * A_w + S_r * S_w + T_r * T_w + I_r * I_w + C_r * C_w$.

Donde $D_r, R_r, A_r, S_r, T_r, I_r$ y C_r son los parámetros valuados por su importancia de 1 a 10 y como se muestra en la Tabla 2.1 $D_w, R_w, A_w, S_w, T_w, I_w$ y C_w son los parámetros ponderados por su peso de 1 a 5 (Al-Zabet, 2002).

	Parámetro	Peso
D	Profundidad al Nivel freático	5
R	Recarga neta	4
A	Material del acuífero	3
S	Tipo de suelos	2
T	Topografía	1
I	Material de la zona vadosa	5
C	Conductividad Hidráulica	3

Tabla 2.1 Peso de los parámetros de DRASTIC (Aller et al., 1987).

EPIK fue creado por Doerfliger y Zwahlen (1997) para determinar la vulnerabilidad de acuíferos kársticos. Los parámetros evaluados son: Epikarst (E), Cubierta protectora

(Protective cover) (P), Condiciones de infiltración (Infiltration conditions) (I), Desarrollo de la red kárstica (Karst network development)(K) las cuales son parámetros muy importantes en el flujo y transporte dentro de sistemas kársticos (Auge, 2004). En este método mientras mayor sea la puntuación, mayor es la protección que tiene el área. El sistema de cuenta de puntos que utiliza está basado en el método DRASTIC. La evaluación de la vulnerabilidad con este método se realiza en escalas que van de 1:10000 a 1:5000.

2.4 Estudios de comparación

Existen pocos estudios en los que se realicen comparaciones entre los resultados que arrojan los distintos métodos de vulnerabilidad. Uno de estos es el realizado por Corniello et al. (1997) en la región de Piana Campana en el sur de Italia. En esta zona se utilizaron los métodos DRASTIC, SINTACS, GOD y AVI para realizar una comparación cualitativa de aspectos específicos. En cuanto al método SINTACS, se observa que genera áreas de muy alta vulnerabilidad en zonas en las que se ven involucradas las aguas superficiales y las interacciones con el acuífero. Esto es resultado de la identificación del acuífero y de los valores de vulnerabilidad asignados a las áreas afectadas por el drenaje. En el método DRASTIC, el área correspondiente a la clase de vulnerabilidad baja fue más extensa que con SINTACS, este último, da más importancia al parámetro que evalúa el uso de suelo a causa de los pesos que se le asignan en la evaluación. En las áreas que tienen una variación considerable en los valores de vulnerabilidad, el método GOD da una distribución homogénea de valores, por ello este método sólo puede ser usado en aquellos lugares donde se de un alto contraste entre valores. Un método que utiliza pocas variables pero que provee resultados similares es el método AVI, inclusive al realizar una comparación estadística entre los métodos se muestra que la mayor similitud está entre DRASTIC y SINTACS pero existe una gran correlación con AVI (Gogu y Dassargues, 2000).

Otro estudio comparativo fue realizado por Civita y De Regibus (1995). En este trabajo se estudiaron tres tipos de regiones del norte de Italia para cubrir distintas situaciones hidrogeológicas, como regiones planas, con colinas y montañosas. Los métodos comparados más importantes fueron: DRASTIC, SINTACS y GOD. Utilizando los distintos métodos en la misma área con los mismos datos se demostró que los métodos simples dan resultados similares que los métodos complejos y que resulta más adecuado utilizar los métodos sencillos en áreas grandes, y métodos más flexibles y precisos como SINTACS y DRASTIC en estudios de mayor detalle (Gogu y Dassargues, 2000).

En Bélgica, Gogu et al., (2003) realizaron otra comparación entre métodos en la cuenca del río Néblon. Entre los métodos utilizados están EPIK, DRASTIC, GOD e ISIS. En este estudio se encontró que el método ISIS utiliza el parámetro de la profundidad al nivel estático de una manera en la que suaviza el índice resultante y que el parámetro utilizado para los coeficientes de escurrimiento dependiendo del uso de suelo es un factor que influye en todos los demás coeficientes. En el método DRASTIC se observa que la profundidad del nivel estático es determinante en la evaluación de la vulnerabilidad y que las características kársticas no siempre se muestran con alta o muy alta vulnerabilidad. En cuanto a DRASTIC y EPIK, se corrobora que ambos hacen énfasis en las mismas características hidrogeológicas y geomorfológicas aunque los enfoques sean distintos.

La ventaja de los métodos de vulnerabilidad es la flexibilidad que presenta la cuantificación de los parámetros y el hecho de que permiten incluir o excluir parámetros dependiendo de las características geológicas, hidrogeológicas, hidrológicas, de suelo, topografía, clima y uso de suelo de la zona de estudio (Gogu et al., 2003).