

Calibración del método DRASTIC en acuíferos utilizando nitratos como indicador

M.en I. Manuel Dino Aragón Sulik, CIIDIR unidad Oaxaca, IPN, México.
email: maragon@ipn.mx

MsC. Susana Navarro Mendoza, CIIDIR unidad Oaxaca, IPN, México.

Dr. Salvador Belmonte Jiménez, CIIDIR unidad Oaxaca, IPN, México.

MsC. María Ladrón de Guevara Torres, CIIDIR unidad Oaxaca, IPN, México.

RESUMEN

Se propone una manera de calibrar el método de vulnerabilidad en acuíferos DRASTIC, con los nitratos como un indicador de la contaminación. Se realizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más importantes en la atenuación de la contaminación. Se utilizó la correlación Pearson para modificar los pesos del DRASTIC para adaptar las condiciones del sitio en estudio. Los parámetros: profundidad de nivel freático, tipo de suelo y su impacto en la zona no saturada son más influyentes en el índice de vulnerabilidad. Con la calibración la correlación Pearson entre los niveles de nitrato y el índice de vulnerabilidad aumentó a 0.64.

Palabras clave: acuífero, contaminación subterránea, nitratos, vulnerabilidad, calibración.

Calibration of DRASTIC method in aquifers using nitrate as an indicator

ABSTRACT

A manner to calibrate aquifer vulnerability DRASTIC method is proposed using nitrates as an indicator of pollution. A sensitivity analysis to identify the most important parameters in pollution attenuation was performed. Pearson correlation was used to modify the DRASTIC weights for adapting conditions of the study site. The parameters: depth to water table, soil type and impact on the vadose zone are most influential in the vulnerability index. With the Pearson correlation calibration between nitrate levels and the vulnerability index increased to 0.64.

Keywords: aquifer, groundwater pollution, nitrates, vulnerability, calibration

INTRODUCCIÓN

Al igual que en diversas regiones del mundo, el agua subterránea es la mayor fuente de aprovisionamiento para la ciudad de Oaxaca y sus zonas conurbadas, anualmente se extrae un volumen de 14.6 millones de m^3 (CNA 2002).

Los valles centrales de Oaxaca se componen de tres acuíferos: Etna, Tlacolula y Zimatlán, este trabajo se centra en la parte norte del acuífero de Etna, donde se encuentra la mayor área de recarga difusa y comprende 127.12 km^2 limitado por las coordenadas Latitud Norte 17.1695° - 17.30373° y Longitud Oeste 96.9175° - 96.7938° (figura 1). Está constituido por una formación aluvial, como la unidad hidrogeológica más importante, existen sedimentos no consolidados tales como cantos rodados, gravas, arenas arcillas y limos formando una mezcla heterogénea, en un espesor variable de 10 a 100 m de noroeste a sureste.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, el clima que prevalece es semicálido (CNA 2002), con un régimen de lluvias promedio anual de 622 mm, siendo los meses de mayo a octubre donde ocurren las mayores precipitaciones.

En las campañas de piezometría realizadas en una red de 24 pozos se midieron niveles estáticos que variaron de 0.63 a 9.7 m, siendo en promedio de 4.3 m. Los niveles más profundos se localizan hacia las márgenes de las sierras y las más someras hacia el centro del valle. El acuífero es libre con un flujo subterráneo en dirección predominante de noroeste a sureste, y paralelo a la dirección del río Atoyac.

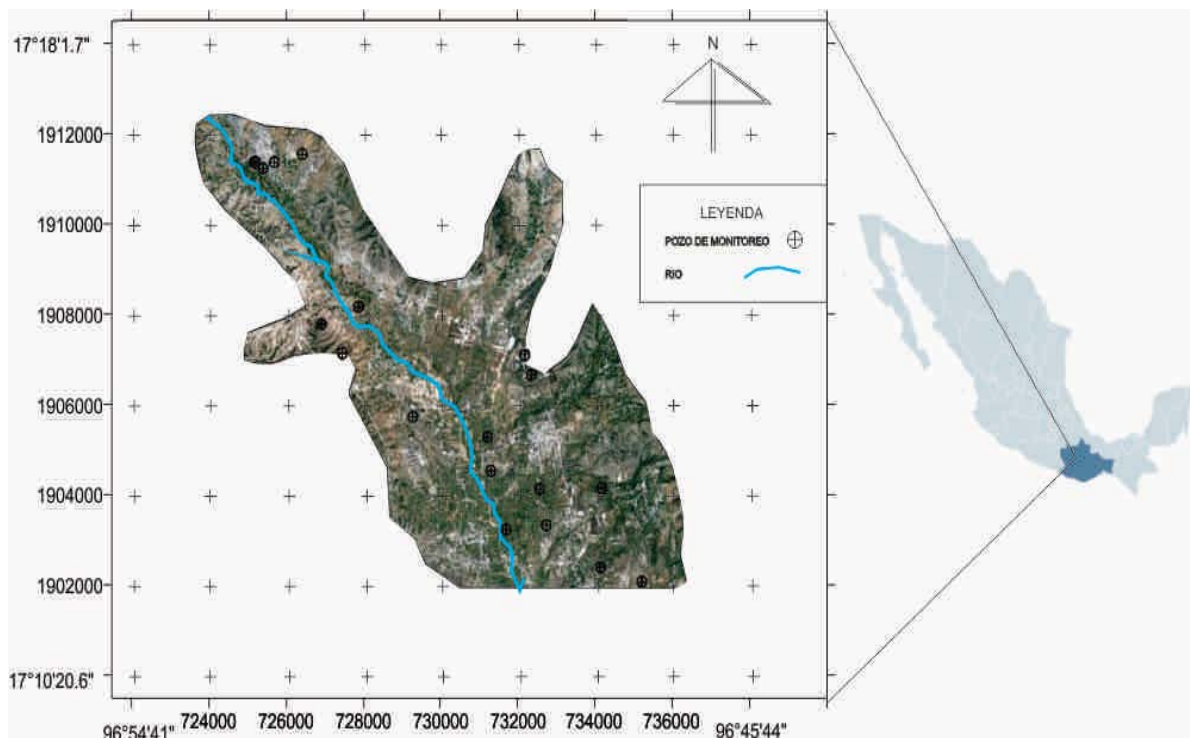


Figura 1. Localización de la zona de estudio

Se realizó el balance hídrico edafológico con el método de Thornthwaite Matter. La lluvia fue la única entrada, y se atendió a las características de humedad del suelo antecedente, de esta manera se determinó un promedio anual de 104 mm de percolación profunda.

Los acuíferos libres, como es el caso, son extremadamente susceptibles a la contaminación de fuentes superficiales, predomina un uso de suelo agrícola en esta zona, donde se emplean fertilizantes como única opción viable para mejorar la producción.

METODOLOGÍA

Vulnerabilidad del acuífero

Los mapas de vulnerabilidad son un recurso para la planeación del ordenamiento territorial, y particularmente para la protección de zonas acuíferas y sitios de veda. La National Research Council (1993) define la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación como la tendencia o verosimilitud de que un contaminante se incorpore en el sistema de aguas subterráneas después de su disposición en algún punto de la capa superior del acuífero.

El concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se basa en la suposición que el medioambiente físico proporciona algún grado de protección contra los impactos, especialmente se consideran los contaminantes que ingresan al agua subterránea (Leone *et al.* 2009).

La vulnerabilidad es una propiedad no medible físicamente e intrínsecamente conlleva un grado de subjetividad y depende de las características del medio ambiente geológico e hidrológico. La meta de los mapas de vulnerabilidad es la subdivisión de áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad, esta subdivisión de áreas considera unidades homogéneas en sus propiedades hidrogeológicas.

Las áreas vulnerables son las zonas más sensibles donde el suelo, subsuelo y el lecho rocoso no proporcionan una protección adecuada y existe un potencial para una transferencia rápida de los contaminantes al agua subterránea (Gogu y Dassargues 2000).

Principalmente existen tres tipos de métodos para evaluar la vulnerabilidad y se dividen en: modelos de simulación basados en proceso, métodos estadísticos, y métodos de rangos y pesos (Javadi *et al.* 2011).

La mayor parte de los métodos de rangos y pesos tienen un procedimiento semejante; la integración del método depende de una selección de parámetros considerados como representativos para la evaluación de la vulnerabilidad. Cada parámetro tiene un rango natural establecido y se realiza la jerarquización de intervalos (Gogu y Dassargues 2000).

Se utilizó el método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación de la zona (D_L). Este método propuesto por el U.S. Environmental Protection Agency (Aller *et al.* 1987) se basa en siete parámetros: profundidad al nivel freático (D), recarga neta (R), litología(A), tipo de suelo (S), topografía (T), impacto en la zona vadosa (I) y

conductividad hidráulica (C) como se muestra en la ecuación (1). El índice de vulnerabilidad es una suma ponderada de los siete factores:

$$D_L = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

Donde el subíndice r es el valor del rango de la subárea analizada, y el subíndice w es el peso asociado a cada parámetro.

Los resultados obtenidos al aplicar el método DRASTIC se muestran en la figura 2. Se determinaron valores de vulnerabilidad máximos de 201 y en promedio de 159, correspondiendo a un acuífero de mediana a alta vulnerabilidad.

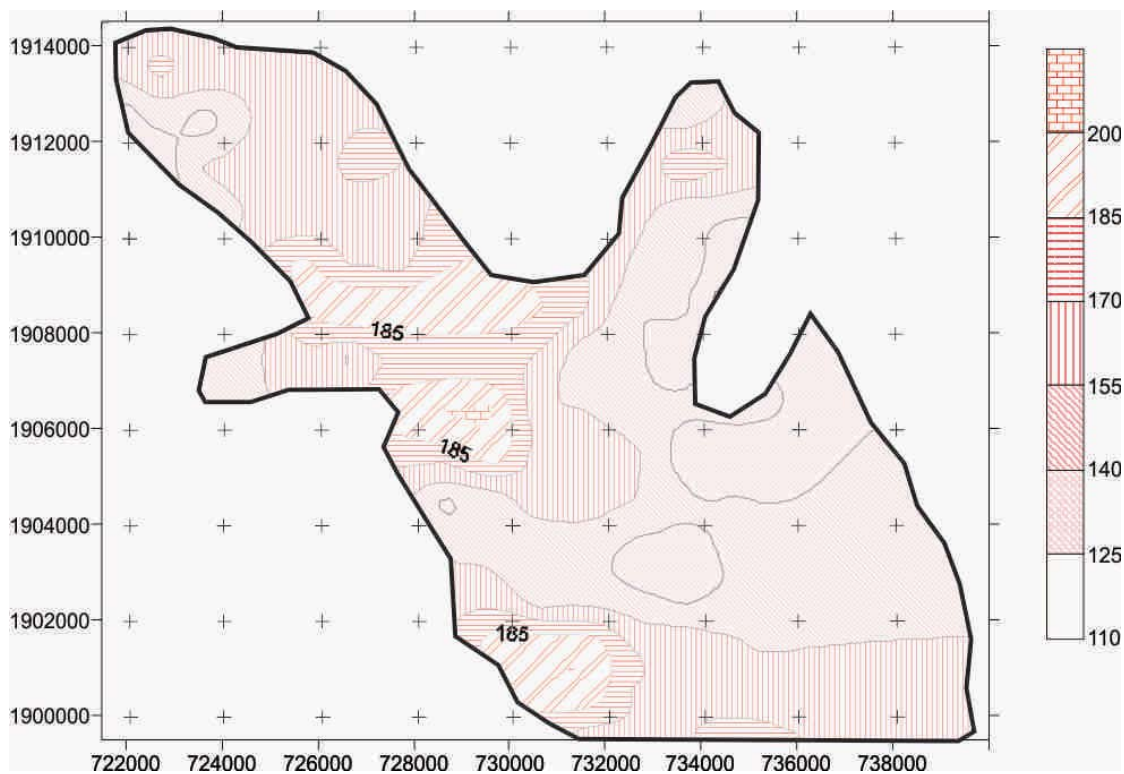


Figura 2. Valores de índice de vulnerabilidad con el método DRASTIC

Análisis de sensibilidad

La subjetividad innata del método DRASTIC al extrapolar los rangos a otros acuíferos, origina incertidumbre en el valor asignado. El análisis de sensibilidad aporta información relacionada con la contribución individual de cada parámetro a la vulnerabilidad del medio.

Exclusión de un parámetro en el análisis de sensibilidad

La sensibilidad (S) asociada con la exclusión de uno o más parámetros de un análisis de adaptación se define como:

$$s = \sum \left| \frac{Vx}{N} - \frac{vx}{n} \right| \quad (2)$$

Donde Vx es la vulnerabilidad calculada con (1), para la subárea analizada y vx es el índice de vulnerabilidad de la subárea sin considerar el parámetro en análisis, N es el número de parámetros utilizados, y n es el número de parámetros utilizados en la adaptación.

En la ecuación (3) se adecua la sumatoria modificada de los parámetros y se compara con la sumatoria total del método, lo anterior se conoce como índice de variación Vp .

$$V_p = \frac{Vx-vx}{VX} 100 \quad (3)$$

El índice de variación puede ser positivo o negativo, según la influencia de cada parámetro en reducir o incrementar el índice de vulnerabilidad. La significancia no solo depende del peso teórico asignado por el método DRASTIC, sino del valor del parámetro en el contexto de los valores de los otros parámetros dentro de la misma área según Napolitano y Fabbri (1996).

Se realizó el análisis para comparar el peso real de cada subárea con el peso teórico asignado por el método DRASTIC (4). El peso efectivo (Wp) en porcentaje para cada subárea fue obtenido como sigue:

$$W_{pi} = \frac{P_{Ri}P_{wi}}{VX} \quad (4)$$

Donde P_{Ri} y P_{wi} son los rangos y los pesos respectivamente del parámetro P asignado a la subárea i , y VX es el índice de vulnerabilidad calculado con la ecuación (1).

Calibración del método DRASTIC

Rupert (2001) menciona que la aplicación del método DRASTIC no ha sido totalmente exitosa para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos, los mapas no siempre corresponden al nivel de contaminación medido en campo. El objetivo de este trabajo es emplear el contenido de nitratos como indicador de contaminación y calibrar el modelo DRASTIC para ajustar las zonas más sensibles a la contaminación, mediante un análisis de sensibilidad que defina la selección de parámetros a modificar.

El contenido de nitratos es un contaminante significativo de las aguas subterráneas en muchas áreas (Nolan *et al.* 1997), a menudo se asocia con actividades antropogénicas en la superficie, tal como la fertilización de las zonas agrícolas.

El nitrato es un contaminante que dada su estabilidad química en agua presenta una alta movilidad, amplio rango de fuentes y la frecuencia en la cual el nitrato se ha medido en el agua subterránea, representa una elección natural como un indicador efectivo para la protección del agua subterránea a la contaminación (Masetti *et al.* 2007).

En la zona se realizó la medición del contenido de nitratos en una red de pozos, la concentración máxima obtenida fue de 5.88 mg/l y en promedio de 1.39 mg/l.

La correlación entre el contenido de nitratos con la vulnerabilidad del método DRASTIC define una correlación baja de 0.23. Con los datos de la concentración de nitratos, se realizó un cambio únicamente en los rangos del método DRASTIC, para adecuar el mapa de vulnerabilidad a la realidad de la contaminación del acuífero.

Para realizar este cambio, en cada parámetro del DRASTIC se obtuvo su valor más alto para toda el área del acuífero, por ejemplo el producto $D_r D_w$ para la profundidad al nivel freático, este valor se correlacionó con la mayor concentración de nitratos, y los demás rangos se variaron de manera proporcional con lo cual se estimaron los nuevos rangos de la tabla 4. Para el caso del acuífero en análisis se modificaron los rangos de los siete parámetros porque se obtuvo una correlación más alta.

Finalmente se realizó un nuevo análisis de sensibilidad con los rangos modificados para contrastar los pesos teóricos con los obtenidos.

RESULTADOS

Del análisis de sensibilidad se muestran las tablas 1, 2, y 3 determinadas con las ecuaciones (2), (3) y (4) respectivamente.

Tabla 1. Sensibilidad de los parámetros

	D	R	A	S	T	I	C
Promedio	3.29	1.10	0.72	3.03	1.96	1.22	0.99
Desviación estándar	0.77	0.88	0.57	0.44	1.21	0.81	0.54
Mediana	3.44	1.06	0.62	3.01	1.42	1.11	1.01
Máximo	5.20	3.49	2.50	4.04	4.29	3.56	2.13
Mínimo	0.73	0.01	0.00	1.92	0.08	0.06	0.02

La tabla 1 muestra que la profundidad al nivel estático freático y el tipo de suelo son los parámetros de mayor peso en la determinación del índice de vulnerabilidad y de menor importancia corresponde a la litología del medio y la conductividad hidráulica.

La tabla 2 muestra que los pesos asignados por el método DRASTIC confirman la importancia del parámetro profundidad al nivel freático seguido por el impacto en la zona vadosa y la pendiente topográfica.

En la tabla 3, el parámetro profundidad al nivel freático tiene una influencia de 25.5% mayor que su valor teórico de 19.2%. Por el contrario el parámetro conductividad hidráulica tiene un peso teórico más alto de 7.7% contra el peso real de 1.38%.

Tabla 2. Índice de variación del parámetro en análisis

	D	R	A	S	T	I	C
Peso real promedio	26.90	10.56	11.89	2.92	13.17	17.87	2.92
desviación estándar	3.83	3.99	2.27	0.79	5.78	2.88	0.79
mediana	26.42	9.34	12.00	2.63	14.89	17.91	2.63
máximo	38.02	17.58	17.97	5.11	22.14	24.90	5.11
mínimo	17.30	2.29	4.08	2.03	1.76	11.30	2.03

Tabla 3. Peso real con sus estadísticos, y peso teórico de cada parámetro

	D	R	A	S	T	I	C
Peso real promedio	25.50	10.56	11.52	20.43	14.83	17.84	1.38
desviación estándar	5.07	3.99	2.62	9.77	6.29	3.55	0.39
mediana	24.66	9.34	11.85	23.75	17.03	18.24	1.28
máximo	41.47	17.58	17.97	41.47	27.65	27.65	2.96
mínimo	15.38	2.29	6.02	7.44	1.51	10.08	0.99
peso teórico	5.00	4.00	3.00	5.00	3.00	4.00	2.00
peso teórico (%)	19.23	15.38	11.54	19.23	11.54	15.38	7.69

El mapa DRASTIC fue calculado con el nuevo sistema de rangos de la tabla 4, se determinó nuevamente la correlación Pearson, este factor se incrementó a 0.64. La figura 3 muestra el mapa DRASTIC calibrado.

Tabla 4. Modificación de los rangos del Índice de vulnerabilidad

Parámetro	contenido de nitratos (mg/l)	Rangos del DRASTIC	
		originales	modificados
Profundidad al nivel freático	1.65	9	10.0
	0.86	10	5.2
	0.52	7	3.2
	0.4	5	2.4
Recarga neta	2.03	6	10.0
	0.87	3	4.3
	0.56	1	2.8
Litología	2.82	4	10.0
	1.35	6.5	4.8
	0.8	3.5	2.8
	0.35	2	1.2
Tipo de suelo	1.5	9	10.0
	1.33	4	8.9
	1.21	3	8.1
Topografía	1.7	5	10.0
	1.44	10	8.5
	1.42	9	8.4
	0.88	1	5.2
Impacto en la zona vadosa	1.95	3.5	10.0
	1.64	4	8.4
	1.34	6	6.9
Conductividad hidráulica	1.42	8	8.0
	1.33	4	7.5

Con los resultados de la calibración, se realizó nuevamente el análisis de sensibilidad para confirmar el cambio en el ajuste de los parámetros.

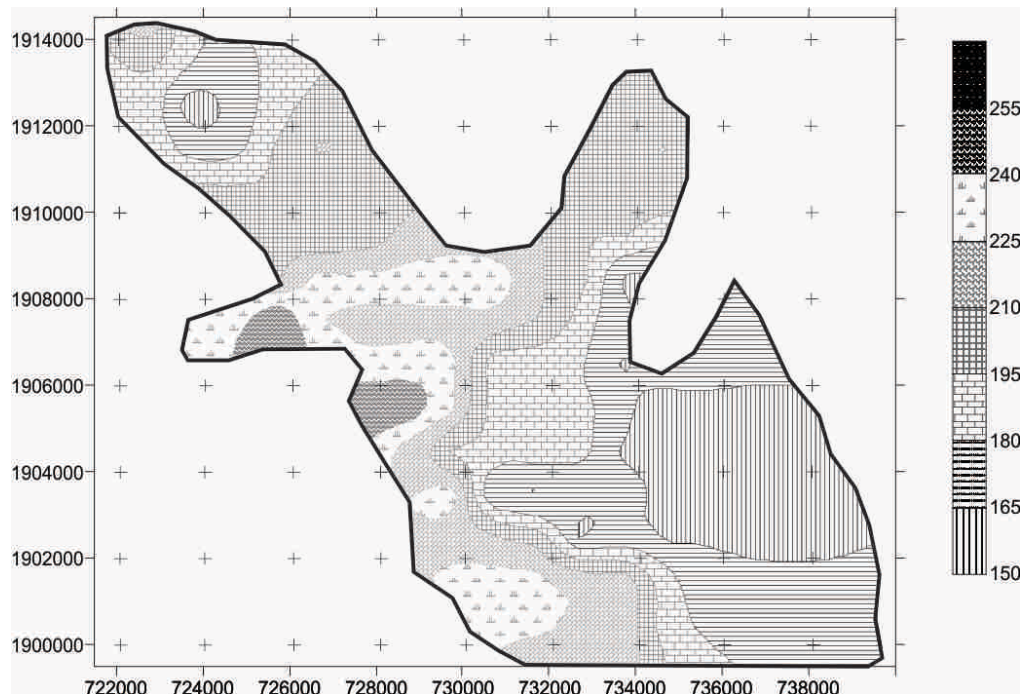


Figura 3. Nuevos valores del índice de vulnerabilidad

Tabla 5. Peso real con sus estadísticos y peso teórico modificados de cada parámetro

	D	R	A	S	T	I	C
Peso real Promedio	19.381	13.380	7.354	22.117	12.272	17.923	7.573
Desviación estándar	6.524	5.206	1.694	2.648	2.480	2.687	0.896
Mediana	22.282	10.581	7.189	21.815	12.581	17.451	7.489
Peso teórico	5	4	3	5	3	4	2
Peso teórico (%)	19.231	15.385	11.538	19.231	11.538	15.385	7.692

Se presenta en la tabla 5 la variación del peso real y modificado, donde se observa una variación significativa en los resultados, los valores promedio se acercan más a los valores teóricos. La profundidad al nivel freático presentó una mayor modificación positiva, el valor

teórico se acercó al calculado, además la correlación Pearson inicial de 0.22 se incrementó al 0.31.

El parámetro litología del medio (A) si bien no tuvo un peso significativo en la determinación del índice de vulnerabilidad sufrió una modificación importante en su correlación con el contenido de nitratos de 0.04 a 0.29. El tipo de suelo no sufrió variación significativa, y no se modificó en su correlación Pearson de 0.06.

CONCLUSIONES

Con la modificación de los rangos del método DRASTIC se demuestra que es posible acercarse a la realidad en la representación de las zonas más vulnerables a la contaminación, eliminando de manera importante la subjetividad del método.

Un aspecto importante del análisis de sensibilidad es que permite definir los parámetros de mayor importancia para cada acuífero en estudio, y a partir de éstos modificar sus rangos. Cabe señalar que en el análisis realizado la modificación de los rangos del medio geológico representado por la litología, resultó favorable en la correlación con el contenido de nitratos, aun cuando no fue significativo en la determinación del índice de vulnerabilidad.

El proceso de calibración debe ser parte esencial en este tipo de estudios para cumplir con el propósito de los mapas de vulnerabilidad.

RECONOCIMIENTO.

Al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento de este trabajo derivado de un proyecto de investigación SIP.

REFERENCIAS

Aller L., Benett T., Lehr J.H., and Petty R.J. (1987). DRASTIC- A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, EPA/600/2-85/018.

CNA (2002). “Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valles Centrales, Estado de Oaxaca”. Reporte interno, Comisión Nacional del Agua (CNA). México.

Gogu R.C. and Dassargues A. (2000). “Current trend and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods”. *Environmental Geology*, Vol. 39 (6), pp. 549-559, Springer Verlag.

Javadi S., Kavehkar N., Mousavizadeh M. H. and Mohammadi K. (2011). “Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrates measurement in agricultural areas”. *Journal of Agricultural, Science and Technology*, Vol 13, pp. 239-249.

Leone A., Ripa M. N., Uricchio V., Deák J. and Vargay Z. (2009). “Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary’s main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models” *Journal of Environmental Management*. Vol. 90, pp. 2969-2978, Elsevier.

Masetti M., Poli S. and Sterlacchini S. (2007). “The use of the weights-of-evidence modeling technique to estimate the vulnerability of groundwater to nitrate contamination”. *Natural Resources Research*, Vol. 16, No.2, pp. 109-119, International Association for Mathematical Geology.

Napolitano P. and Fabbri A.G. (1996). “Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS”. *HydroGIS 96: Application of geographic information systems in Hydrology and water resources management*. Proceedings of the Vienna Conference, IAHS, Publ. no.235, pp. 559-566.

National Research Council (1993). “Groundwater vulnerability assessment predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty”. National Academy Press, Washington D.C.

Nolan B.T., Ruddy B.C., Hitt K.J. and Helsel, D.R. (1997). “Risk of nitrate in groundwater of the United States—a national perspective”. *Environmental Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp. 2229-2236.

Rupert M.G. (2001). “Calibration of the DRASTIC groundwater vulnerability mapping method”. *Groundwater*, Vol.39, No.4, pp. 625-630.