

Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca, México

Salvador I. Belmonte-Jiménez^{*}
J. Oscar Campos-Enríquez^{**}
Jaime Herrera-Barrientos^{***}

Abstract

We assessed the vulnerability to the contamination of the central portion from the valley of Etna aquifer, Oaxaca, Mexico based in the SINTACS method. Direct current vertical electrical and EM-34 electromagnetic induction soundings enabled to establish the geometry as well as the lithology from the aquifer.

In particular, these geophysical studies enabled to obtain key hydrological parameter (thicknesses of the unsaturated zone as well as from the aquifer, and the hydraulic conductivity) in zones without wells.

The vulnerability to contamination was assessed considering a normal impact scenario. Accordingly, we obtain medium to high vulnerability indices, implying that this aquifer is very vulnerable to contamination. Based in this study, alternatives for the protection and management from this aquifer can be formulated.

Key words: Vulnerability, aquifer, SINTACS, geophysical methods.

Resumen

Se determinó la vulnerabilidad a la contaminación de la porción central del acuífero del valle de Etna, Oaxaca, México, empleando el método SINTACS. Los sondeos eléctricos verticales de corriente directa y de inducción electromagnética (bobinas EM-34) permitieron obtener tanto la geometría como la litología del acuífero. Adi-

* Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, CIIDIR-OAXACA-IPN, Hornos 1003, Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, C.P. 71230, México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, Del. Coyoacán, 04510, México, D.F., México, correo electrónico: sjimenez@ipn.mx

** Departamento de Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica-UNAM, Del. Coyoacán, 04510, México, D.F., México, correo electrónico: ocampos@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

*** Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, correo electrónico: jherra@cicese.mx

cionalmente estos estudios geofísicos permitieron obtener, en zonas desprovistas de pozos, parámetros geohidrológicos necesarios para la evaluación de la vulnerabilidad (espesor de la zona no saturada, y del acuífero, así como la conductividad hidráulica).

La vulnerabilidad del acuífero se estimó considerando un escenario hidrogeológico de “impacto normal”. De esta forma se obtienen índices de vulnerabilidad predominantemente de media a alta, lo que significa que se trata de un acuífero muy vulnerable a la contaminación. A partir de estos resultados se podrán proponer alternativas para la protección y manejo de este acuífero que es fuente importante de abastecimiento a una parte de la ciudad de Oaxaca y poblaciones asentadas en la región.

Palabras Clave: Vulnerabilidad, acuífero, SINTACS, geofísica.

Introducción

El concepto vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue propuesto por el hidrogeólogo francés J. Margat a finales de la década de los años 60's (Vrba y Zaporozec, 1994). Este concepto parte de la suposición de que el ambiente físico (el acuífero y materiales suprayacentes a éste) lo protegen del impacto de contaminantes, por ejemplo pesticida, fertilizante, metales pesados, nutrientes, químicos orgánicos, sales, virus y bacterias, bien producidos por el hombre o naturales que pueden infiltrarse a través del subsuelo al acuífero.

Vrba y Zaporozec (1994) presentan diferentes definiciones de la vulnerabilidad elaboradas por varios autores, entre ellas la propuesta por ellos, según la cual la “vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de un sistema de aguas subterráneas. Dicha propiedad depende de la sensibilidad de el sistema a los impactos naturales y antropogénicos”. La definición de estos autores es de tipo intrínseco. Recordemos que hay dos tipos de vulnerabilidades, la intrínseca como ya se indicó y la específica. La intrínseca depende de factores hidrogeológicos, de las características del suelo y materiales geológicos que suprayacen al acuífero o sistema de aguas subterráneas (capacidad depuradora o de atenuación).

Civita (1987) y Hearne *et al.* (1995) han definido la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea como la sensibilidad de un sistema acuífero en sus diferentes componentes y diversos escenarios geométricos e hidrodinámicos que pueden producir un impacto en la calidad del agua subterránea en el espacio y el tiempo ante una carga contaminante potencial.

La vulnerabilidad específica se refiere al nivel de riesgo o daño a que es expuesto un acuífero sujeto a carga contaminante, para lo cual se considera la incidencia de sustancias contaminantes al acuífero, tiempo de viaje de los contaminantes en

la zona no saturada, tiempo de residencia en el acuífero, características geohidrológicas del acuífero y de los materiales que yacen sobre éste.

Existen diversos métodos para obtener la vulnerabilidad del agua subterránea, bien la intrínseca y específica. Vrba y Zaporozec (1994) presentan 24 métodos usados para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea; cabe destacar entre ellos los métodos DRASTIC (Aller *et al.*, 1985), SINTACS (Van Stempvoort *et al.*, 1992), EPIK (Gogu y Dessargues, 2000). Los parámetros que intervienen en estos métodos son jerarquizados, asignándoles un peso e intervalo de variación respectivamente. Los métodos para obtener la vulnerabilidad específica utilizan modelos físicos, químicos, biológicos o combinación de éstos asociados a procesos de infiltración de sustancias específicas como plaguicidas, fertilizantes, metales pesados, microorganismos, entre otros. Por ejemplo Holtschlag y Luukkonen (1995) utiliza un modelo físico sobre la infiltración.

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea varían conforme a las diversas fisiografías de la Tierra, propósitos del estudio (objetivos y escala), cantidad y calidad de datos disponibles. Los métodos se agrupan en 3 categorías: a) de marco hidrológico (que se fundamentan en la comparación de áreas hidrológicas similares); b) paramétricos (consisten en jerarquizar las variables o parámetros del método asignando pesos a las variables y a sus intervalos de variación); c) relaciones analógicas y modelos numéricos aptos para determinar la vulnerabilidad específica.

El método DRASTIC se desarrolló por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y la National Water Well Association (Aller *et al.*, 1987) en los Estados Unidos (Heame *et al.*, 1995; Clark, 2000). Este método es de aplicación general y se ha usado en muchas partes de los Estados Unidos, Israel, Nicaragua, Portugal, Sudáfrica y Corea del Sur (Rupert, 2001; Kim y Hamm, 1999; Lee, 2003). El método ha sufrido modificaciones en lo que se refiere al peso de los parámetros e intervalos de variación, esto debido a la escala de las áreas de aplicación, ya que el método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) se desarrolló considerando unidades de información hidrogeológica mayores a 40.5 ha, por lo que, para discretizaciones más finas, los pesos de los parámetros han sido modificados; es el caso del método SINTACS, el cual es una adecuación del método DRASTIC realizada por Civita (1987) que considera la hidrología italiana altamente diversificada bajo estudios a escala pequeña.

En este trabajo se determina la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea del acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca con el método SINTACS. Este acuífero proporciona aproximadamente el 80% del agua que consume la ciudad de Oaxaca, por lo que es de interés determinar sensibilidades relativas diferenciadas de fuentes contaminantes potenciales. Para la aplicación de este método se utilizó información de dependencias gubernamentales, centros académicos así como información generada a través de observaciones y mediciones en campo. Entre las mediciones reali-

zadas se cuenta con datos geofísicos obtenidos mediante prospecciones eléctricas por corriente continua e inducción electromagnética en el campo cercano, así como medidas piezométricas y de otras variables geohidrológicas.

Marco hidrogeológico

El valle de Etna (cruzado por el Río Atoyac) es un graben acotado al este y oeste por las fallas de Etna y Oaxaca (Flores-Márquez *et al.*, 2001) respectivamente. Se ubica al noroeste de la ciudad de Oaxaca (Figura 1), entre 17° 05' y 17° 15' de latitud norte y 95° 55' y 96° 40' de longitud oeste. Este valle es de origen aluvial constituido por materiales granulares de edad cenozoica provenientes de las sierras de Juárez (complejo milonítico) y Oaxaca (granitos cubiertos por secuencias sedimentarias paleozoicas y mesozoicas). En la parte superior del valle se encuentran sedimentos de tamaños diferentes tales como arcillas, arenas, gravas y cantos rodados en forma de una mezcla heterogénea. Estos sedimentos forman el acuífero superior no confinado cuyo espesor varía de 10 a 50 m (Belmonte *et al.*, 1998; Flores-Márquez *et al.*, 2001). El relieve del basamento geohidrológico es irregular y poco profundo, conformado por arcillas que afloran en algunos lugares dentro del valle como San Andrés Zautla. La transmisividad hidráulica es baja (entre 20 y 220 m²/día) debido a la presencia de las arcillas y el grosor pequeño de la zona acuífera (10 a 50 m). Las alturas piezométricas varían de 1560 a 1670 m y la profundidad del nivel freático de 2 a 15 m, siendo más someros hacia Alemán, Guadalupe y Soledad Etna, la parte central del valle.

Método SINTACS

El método SINTACS desarrollado por Civita y De Maio (1997) incluye los mismos parámetros que el DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), aunque con diferentes pesos en los parámetros geohidrológicos correspondientes. El nombre corresponde a los acrónimos siguientes en idioma italiano (Sappa y Vitale, 2001):

- S (Soggiancenza) Profundidad al nivel freático.
- I (Infiltrazione) Infiltración.
- N (Effetto depurante del Non saturo) Efecto depurante de la zona no saturada.
- T (Tipologia della copertura) Tipología de los suelos de la cobertura.
- A (Caratteristiche idrogeologiche dell'Acquifero) Características hidrogeológicas del acuífero.
- C (Conducibilità hidráulica del mezzo saturo) Conductividad hidráulica del acuífero
- S (Acclività della Superficie topografica) Pendiente de la superficie topográfica.

El índice SINTACS de vulnerabilidad ($I_{SINTACS}$) del agua subterránea se determina como:

$$I_{SINTACS} = \sum_{J=1}^7 P_J W_J$$

Donde P_J son los pesos para cada parámetro SINTACS, y W_J los pesos correspondientes a los intervalos de variación del j-ésimo parámetro para un escenario hidrogeológico dado. El índice de vulnerabilidad se obtiene para cada celda en que se discretiza el área de estudio. Una vez obtenidos los índices para cada una de las celdas en que se ha dividido el área de estudio se elabora el plano de vulnerabilidad. Para ello los índices se segmentan en intervalos asignándoles adjetivos calificadores cualitativos que denotan diferencias relativas en la intensidad de la vulnerabilidad del agua subterránea. Los adjetivos utilizados son en orden de menor a mayor la vulnerabilidad: bajo, medio y alto. Se construyen planos con símbolos o colores que muestran los distintos tipos de vulnerabilidad.

Geofísica y parámetros hidrogeológicos

En la zona de estudio existe un número considerable de pozos norias, sin embargo se estima que sólo se utilizaron en este estudio el 10 % de los existentes (54 norias) lo cual ya permite determinar la profundidad del nivel del agua (S), características de la zona saturada (A), y no saturada (N) así como la conductividad hidráulica (C). Para determinar esta última se realizaron campañas de prospección geoelectrica con sondeos de corriente continua y electromagnéticos (EM-34). Se realizaron 30 sondeos eléctricos verticales (SEV's) y 216 sondeos electromagnéticos.

Los sondeos eléctricos verticales (Belmonte *et al.*, 1998) se interpretaron mediante la técnica de inversión 1-D de Cooper (2000) obteniéndose secciones geoelectricas que permiten determinar la profundidad del agua subterránea, el espesor de la zona saturada y no saturada e inferir mediante los valores de la resistividad eléctrica del subsuelo la litología de las zonas saturada y no saturada.

La Figura 2 muestra una sección geoelectrica elaborada con base en la interpretación de 6 sondeos eléctricos verticales, y de 40 sondeos electromagnéticos distribuidos en la sección 1 (ver ubicación en la Figura 1). Los datos correspondientes a los sondeos electromagnéticos se interpretaron mediante modelado 1-D directo (Herrera-Barrientos *et al.*, 1995) e inverso (Pérez-Flores *et al.*, 2001). En el modelado directo se considera una tierra plana y propagación del campo electromagnético para bajos números de inducción (límite resistivo). De esta manera se obtuvieron las resistividades verdaderas y los grosores de las capas que mejor reproducen las observaciones de cada sondeo. Con el conjunto de cortes eléctricos así obtenido se

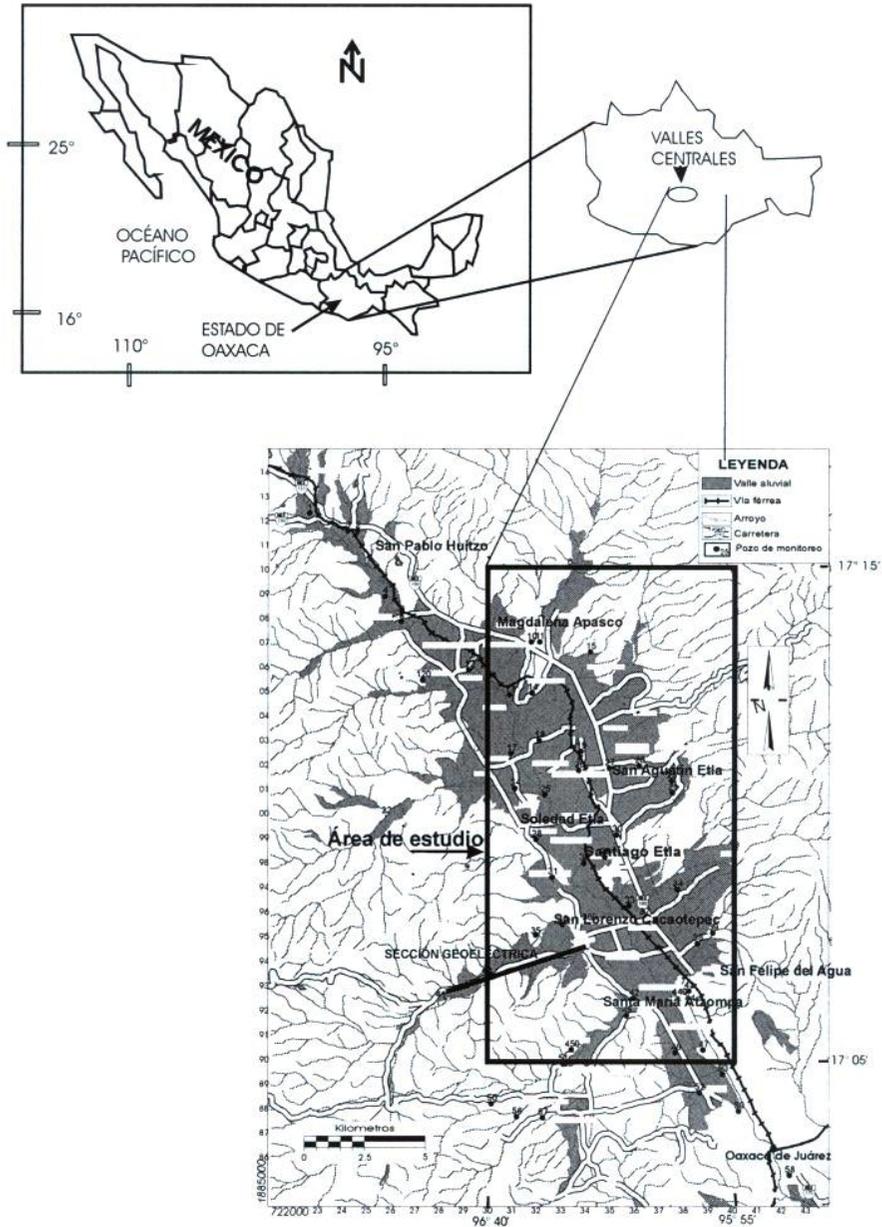


Figura 1. Localización de la zona de estudio. El área marcada en rectángulo indica la parte estudiada.

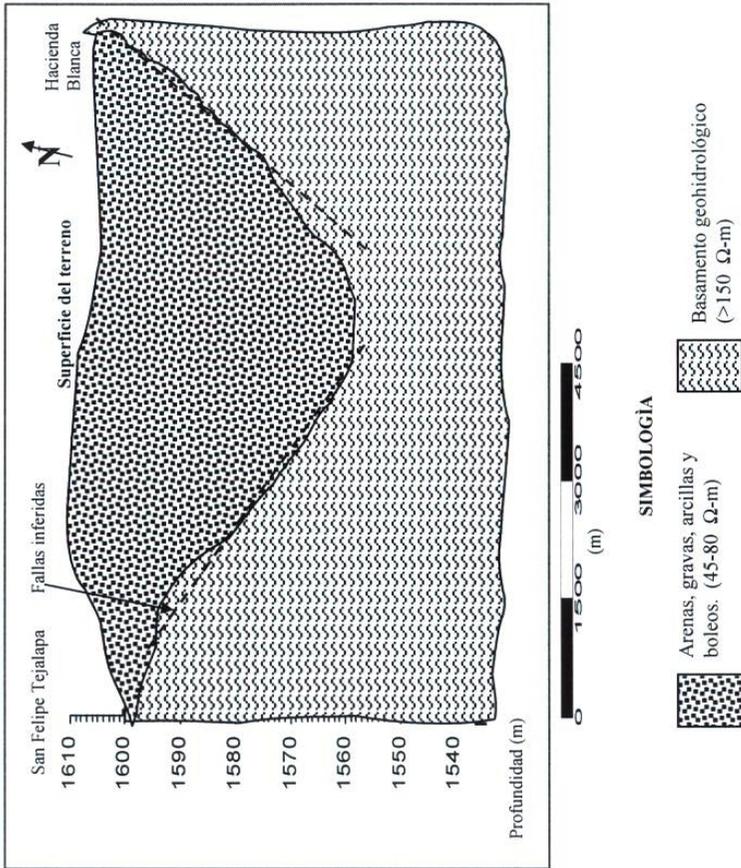


Figura 2. Perfil geológico geofísico determinado con datos de resistividad (SEV's) y bobinas electromagnéticas (EM-34) entre San Felipe Tejalapa – Hacienda Blanca.

construyó la sección mostrada en la Figura 2. La inversión de los sondeos electromagnéticos se realizó para números de inducción bajos considerando una aproximación bidimensional a través de la solución de una ecuación integral la cual relaciona linealmente las mediciones de la conductividad electromagnética aparente obtenida con el equipo EM-34 y la conductividad del terreno (Pérez-Flores, 1995, Pérez-Flores *et al.*, 2001).

Profundidad del Nivel Freático (S)

En los pozos y norias disponibles en el Valle se midió la profundidad del nivel freático con una sonda eléctrica. La Figura 3 muestra la distribución de la profundidad promedio del agua subterránea, la cual varía de 2 a 15 m. Esta figura se elaboró considerando estas profundidades, así como las inferidas por los datos geofísicos.

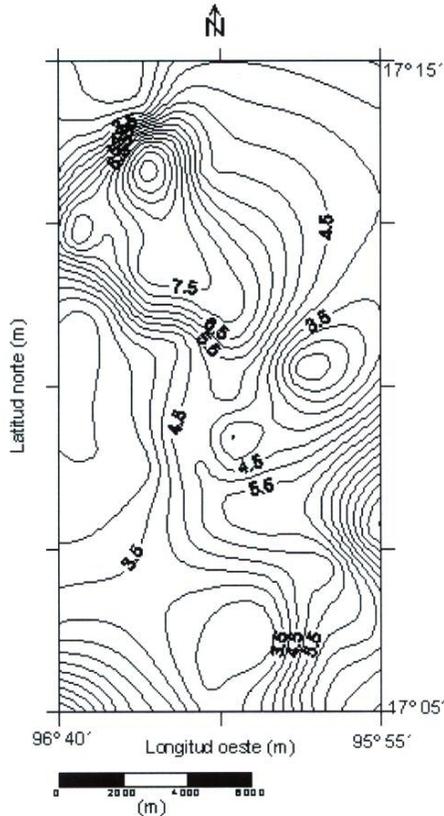


Figura 3. Mapa de profundidad al nivel freático de una parte del valle de Etna, Oaxaca.

Infiltración (I)

La infiltración (I) se determinó mediante una ecuación propuesta por Custodio y Llamas (1983) para cuencas pequeñas a partir de la precipitación y evaporación (CNA, 2001); obteniéndose un valor promedio de 46 mm/año.

Zona no saturada (N)

Considerando la litología de pozos y norias, así como los valores de resistividad eléctrica y electromagnética obtenidos, la litología dominante en esta zona corresponde a una mezcla heterogénea de arenas, gravas, arcillas y rocas metamórficas alteradas, cuyo espesor varía de 0 a 15 m.

Tipo de Suelo (T)

Para la clasificación de tipo de suelo se utilizó la carta edafológica Oaxaca E14-9 (INEGI, 1995), escala 1:250,000. También se realizaron 10 muestreos en sitios del valle correspondiendo texturalmente a suelos arenolimosos y limoarcillosos, aunque en algunos sitios como Atzompa y Santo Domingo Barrio alto aflora roca metamórfica.

Características del acuífero (A)

El acuífero del valle de Etlá se encuentra esencialmente en formaciones granulares compuestas por arenas, gravas y material limoarcillosos. El espesor de la zona saturada se determinó a partir de sondeos eléctricos verticales y bobinas electromagnéticas. El espesor promedio del acuífero es de 30 m.

Conductividad Hidráulica (C)

Considerando 6 pruebas de bombeo en régimen permanente, se determinó la transmisibilidad hidráulica, la cual varía de 20 a 220 m²/día (Belmonte *et al.*, 1988). Por otra parte se obtuvo el espesor saturado (b) a partir de estudios geofísicos; se observa una variación entre 10 y 35 m. Considerando T y b se obtuvo K a partir de la expresión: $K = T / b$. Los valores de K así obtenidos varían entre 9.51281E-06 y 1.66062E-04 m/día.

Pendiente de la superficie topográfica (S)

La pendiente topográfica se obtuvo a partir de la carta INEGI (1994) escala 1:50,000. Para ello se usó la carta topográfica clave E14D47. La pendiente se obtuvo conside-

rando las curvas topográficas contenidas en cada celda cuadrada en que se discretizó el área de estudio, obteniéndose la pendiente promedio para cada celda. Las pendientes varían de 0 a 6% en la parte central y de hasta 25% para la porción perimetral que corresponde a la zona montañosa.

Se consideró un área de 200 km², la cual fue discretizada en celdas cuadradas de 1 km de lado. El método SINTACS permite trabajar en cinco escenarios hidrogeológicos: impacto normal, impacto severo, filtración, carsticidad y fracturamiento. En este trabajo se utilizó el primer escenario (Sappa and Vitale, 2001).

La Tabla 1 muestra los pesos de los parámetros SINTACS y de los intervalos de variación de cada parámetro.

Tabla 1
Pesos, rangos (Sappa y Vitale, 2001) y valores asignados a los parámetros utilizados para el método SINTACS en el Valle de Etna

<i>Parámetro</i>	<i>Peso utilizado</i>	<i>Rango de clasificación de valores</i>	<i>Rango del parámetro</i>
S	5	4-9	2-15 m
I	4	1-2	46 mm (promedio)
N	5	4-6	Arena, arcilla-rocas metamórficas fracturadas
T	4	3-9	Arena, arcilla
A	3	2-7	Aluvión, lutita, arenisca y roca metamórfica fracturadas
C	3	3-7	9.51281E-06- 1.66062E-04 m/día
S	2	2-10	1-25 %

Vulnerabilidad

Considerando los valores de vulnerabilidad en las 200 celdas que integran el área de estudio. Se obtuvieron los valores teóricos de los índices de vulnerabilidad SINTACS los cuales varían en el rango de 26 a 260. En la Tabla 2 se muestran los intervalos obtenidos para el valle de Etna con los correspondientes adjetivos calificativos cualitativos. Igualmente se muestran los intervalos obtenidos para el acuífero del Valle de Etna, establecidos por el método SINTACS con su correspondiente seis clasificaciones (a través de adjetivos calificativos cualitativos) de vulnerabilidad. El índice SINTACS varió de 99 a 180, correspondiente a una vulnerabilidad comprendida entre media a alta, y sólo una zona muy pequeña como vulnerabilidad baja.

Tabla 2
Clasificación de intervalos de vulnerabilidad según el método SINTACS
y valores obtenidos en el Valle de Etlá

<i>Clasificación de vulnerabilidad</i>	<i>Intervalo SINTACS</i>	<i>Índices calculados en el Valle de Etlá</i>
Muy baja	0-80	No se obtuvieron valores en este rango
Baja	81-105	Valores a partir de 99
Media	106-140	Valores obtenidos en el rango
Alta	141-186	Valores hasta 180
Elevada	187-210	No se obtuvieron valores en este rango
Muy elevada	211-260	No se obtuvieron valores en este rango

La Figura 4 muestra el mapa de vulnerabilidad obtenido, observándose principalmente dos zonas; una con índice alto y otra con índice elevado. Las zonas con alta vulnerabilidad se distribuyen de manera irregular, pero es más evidente hacia la parte norte del valle. Los valores de vulnerabilidad elevada comprenden áreas como Santo Domingo Barrio Bajo y Barrio alto, Guadalupe Etlá, San Agustín Etlá, Magdalena Apasco, San Jacinto Amilpas, San Lorenzo Cacaotepec y Santa María Atzompa.

Conclusiones

La realización de sondeos eléctricos verticales mediante el dispositivo Schlumberger y de sondeos inductivos electromagnéticos (EM-34) permitió definir cuatro parámetros de la técnica SINTACS, a saber: S, C, N, A., por lo que, las técnicas geofísicas son altamente complementarias con los métodos de determinación de la vulnerabilidad del agua subterránea.

La vulnerabilidad obtenida indica que el acuífero es sensible a las cargas contaminantes potenciales, en lo especial llama la atención que los índices obtenidos predominantes en el área son medio y alto. Esto hace que sea considerado como un acuífero altamente vulnerable a ser contaminado por fuentes superficiales.

El mapa de vulnerabilidad constituye una contribución para la academia y las autoridades responsables de la administración de los recursos hidrológicos en la toma de decisiones. En el caso de la primera para encauzar trabajos de investigación cuantitativos sobre los procesos de transporte de contaminantes de impacto al acuífero. En la toma de decisiones para apoyar la orientación de los planes de ordenamiento y uso del suelo del Valle de Etlá, Oaxaca.

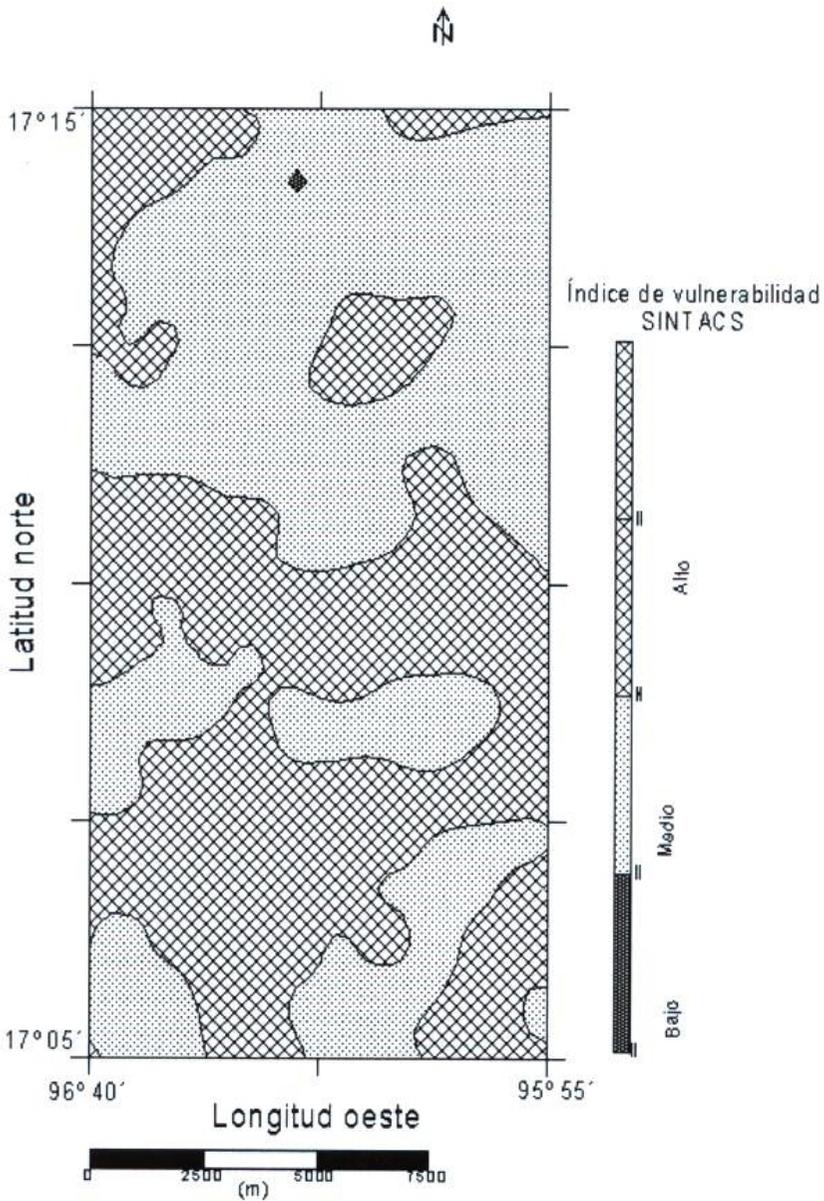


Figura 4. Mapa de índices de vulnerabilidad determinado con el método SINTACS en el valle de Etlá, Oaxaca. Predominan índices de vulnerabilidad medio y altos.

Agradecimientos

Los datos usados en este trabajo fueron obtenidos en su mayoría con el apoyo de los proyectos SIBEJ-CONACYT (Clave: RNMA-042) y CGPI-IPN (Clave: 960081).

Referencias

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G., 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA-600/2-87-035, Ada, Oklahoma, 622 pp.
- Belmonte, J.S.I., Navarro, M.S., Bautista, B.A., López, G.P., Herrera, B. J. y Valeriano, I., 1998. Estudio para el uso y manejo racional de acuíferos a través de la modelación matemática en el estado de Oaxaca. *Reporte Técnico*, 81 pp. CIIDIR-OAXACA-IPN. Oaxaca, México.
- Civita, M., 1994. *Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria and Pratica*. Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.
- Civita, M. and De Maio, 1997. *SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquifer all'inquinamento. Metodologia & Automatizzazione*. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- Clark, A., 2000. Vulnerability of ground water to contamination, Edwards Aquifer recharge zone, Bexar Country, Texas, 1998. U.S. Geological Survey. *Water-Resources Investigations Report 00-4149*, 9 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001. *Datos meteorológicos mensuales, estación aeropuerto*. Oaxaca, México.
- Cooper, G.R.J., 2000. *Forward modelling and inversion of Schlumberger resistivity soundings, international network*. grcooper@iafrica.com
- Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983. *Hidrología Subterránea. Tomos I y II*. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Flores-Márquez, Chávez, R.E., Martínez-Serrano, R.G., Herrera-Barrientos J., Tejero-Andrade, A. y Belmonte, S. 2001. Geophysical characterization of the Etlá Valley aquifer, Oaxaca, México. *Geofísica internacional*, 40, 4, 245-257.
- Gogu, R. C. and Dassargues, A., 2000. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. *Hydrogeology Journal*, 8, 337-345.
- Hearne, G. A., Wireman, M., Campbell, A., Turner, S. and G. P. Ingersoll, 1995. Vulnerability of the uppermost ground water to contamination in the Greater Denver Area, Colorado. U.S. Geological Survey. *Water-Resources Investigations Report*, 92-4143, 244 pp.

- Holtschlag, D.J. and C.L. Luukkonen, 1995. Vulnerability of ground water to atrazine leaching in Kent Country, Michigan. U.S. Geological Survey. *Water-Resources Investigations Report*, 96-4198, 49 pp.
- Herrera-Barrientos, J., Herrera-Barrientos, F. y Mendoza C., E. Y., 1995. Determinación de la conductividad eléctrica del subsuelo mediante inducción electromagnética en la zona cercana. Informe Técnico, Comunicaciones Académicas, Serie Geofísica Aplicada, CICESE, p. 55, CTGAT9503.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1994. *Carta topográfica E14D47*, Oaxaca de Juárez, escala 1:50, 000.
- , 1995. *Carta edafológica*, Oaxaca, E14-9, escala 1:250, 000, Instituto Nacional de Geografía e Informática, México.
- Kim, Y.J., Hamm, S.Y., 1999. Assessment of the potential for groundwater contamination using the DRASTIC/EGIS technique, Cheongju area, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 7, 227-235.
- Lee, S., 2003. Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC System in Southern Korea. *Environmental Geology*, 44, 654-664.
- Pérez-Flores, M.A., 1995. Inversión rápida en 2-D de datos de resistividad, magnetotélúricos y electromagnéticos de fuente controlada a bajos números de inducción. Tesis Doctoral. CICESE, 336 pp.
- Pérez-Flores, M.A., Méndez-Delgado, S and Gómez-Treviño, E., 2001. Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, 66, 4, 1067-1081.
- Rupert, M.G., 2001. Calibration of the DRASTIC Ground Water Vulnerability Mapping Method. *Ground Water*, 39, 4, 625-630.
- Sappa, G. and Vitale, S., 2001. Groundwater protection: contribution from Italian experience. Department of Hydraulics, Transportation and Roads, Universidad "La Sapienza" of Roma, artículo bajado de Internet, p. 10. <http://www.unece.org/env/water/meetings/groundwater01/italy.pdf>
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. E. and Wassenaar, L., 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18, 1, p.25-37.
- Vrba, J., Zaporozec, A., 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists. Ed. Hannover: Heise, 16, 131 pp.