



Revista Universitaria de Geografía

ISSN: 0326-8373

ceditorialdgyt@uns.edu.ar

Universidad Nacional del Sur

Argentina

Velázquez, Aldo; Sánchez, Juan Carlos; Adame Martínez, Salvador; Paredes, Jorge;
Mancino, Mariana

Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de
plaguicidas en suelos B agrícolas en Villa Guerrero, Estado de México

Revista Universitaria de Geografía, vol. 26, núm. 2, 2017, pp. 111-129

Universidad Nacional del Sur

Bahía Blanca, Argentina

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383254667005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos florícolas en Villa Guerrero, Estado de México

Aldo Velázquez*¹
Juan Carlos Sánchez*²
Salvador Adame Martínez*³
Jorge Paredes*⁴
Mariana Mancino*⁵

Resumen

La actividad florícola en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, representa una alternativa económica importante donde existe el riesgo de que los acuíferos de la zona puedan ser contaminados por plaguicidas organofosforados y carbámicos usados de manera constante y no controlada. El objetivo de este trabajo es determinar los índices de vulnerabilidad específica a la contaminación de acuíferos por plaguicidas, mediante el uso del modelo paramétrico SINTACS, así como la elaboración del respectivo mapa, para la identificación de las zonas florícolas vulnerables en 18 comunidades en el municipio. Los índices de vulnerabilidad específica indicaron la caracterización de *baja a media*, donde los coeficientes fueron calculados, desde 101 hasta 120 [rangos que representan vulnerabilidad baja (81-105) y vulnerabilidad media (106-140)]. Los mapas de vulnerabilidad fueron desarrollados usando el software ArcGIS 10.2. Las zonas del acuífero donde se destacaron los mayores niveles de vulnerabilidad específica corresponden a la región central del municipio, debido a las características de las unidades hidro-

*1 Investigador. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Toluca, Estado de México. aldovz1@hotmail.com

*2 Docente/Investigador. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Toluca, Estado de México. juancsm58@gmail.com

*3 Docente/Investigador. Facultad de Planeación Urbana y Regional. UAEMex. Toluca, Estado de México. adame_ms@yahoo.com

*4 Docente/Investigador. Facultad de Planeación Urbana y Regional. UAEMex. Toluca, Estado de México. jorge.paredes.tavares@gmail.com

*5 Docente/Investigador. Facultad de Geografía. UAEMex. Toluca, Estado de México. mancinomariana@gmail.com

geológicas, de los valores de las pendientes y la presencia de suelos arenosos, lo que indica que se favorece a la infiltración y la baja velocidad de la escorrentía.

Palabras clave: Acuífero, Agroquímicos, Contaminación, Organofosforados, Transporte.

Mapping vulnerability in aquifers through SINTACS method for pesticide application in floriculture soils in Villa Guerrero, State of Mexico

Abstract

Floriculture activity represents an important economic alternative in the municipality of Villa Guerrero, State of Mexico, where organophosphate and carbamate pesticides if used on a constant and uncontrolled basis may contaminate aquifers. The purpose of this work is, first, to determine the specific vulnerability indexes to contamination of aquifers due to pesticides through the parametric model SINTACS, then, to draw the respective map to identify vulnerable flower-growing zones in 18 communities of the municipality. The specific vulnerability indexes showed a low to medium characterization. The coefficients were calculated from 101 to 120 ranges representing low vulnerability (81-105) and medium vulnerability (106-140). Vulnerability maps were outlined by using the ArcGIS 10.2 software. It should be noted that the aquifer zones where the highest levels of specific vulnerability were found correspond to the central region of the municipality due to the characteristics of the hydro geological units, the slope values and sandy soils which may favor infiltration processes and low runoff velocity.

Key words: Aquifer, Agrochemicals, Contamination, Organophosphate, Transport.

Introducción

Este artículo se sustenta en trabajos de investigación desarrollados en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) (Sánchez Meza *et al.*, 2010), basados en la estimación de los índices de riesgo sobre el ambiente por los grupos de plaguicidas más ampliamente usados, así como también en la determinación de la migración y transporte de los mismos por fenómenos de lixiviación (Velázquez *et al.*, 2013) en la zona florícola de San Mateo Coapexco, Villa Guerrero, Estado de México. Se toma como base la importancia económica del cultivo de flores, el cual se desarrolla principalmente en los municipios de Tenancingo, Coatepec Harinas, Ixtapan de la Sal, Tonicato, Zumpahuacán, Malinalco y Villa Guerrero. El 56 % de la producción florícola

estatal es generado solamente por Villa Guerrero. Durante el año 2006 se exportaron un volumen total de 19.822,3 toneladas de flores y capullos frescos, representando un monto de 44,8 millones de dólares, lo cual significó un incremento del 146 % con respecto al valor de las exportaciones del año 2005 (Sánchez *et al.*, 2009). Se determinó que los grupos de plaguicidas más comúnmente aplicados corresponden a los organofosforados y carbamatos, observándose de manera habitual prácticas no adecuadas por parte de los productores, incurriendo en circunstancias tales como combinar productos, mal manejo en la preparación de los productos y de residuos, no usar equipo de protección personal, no contar con registro de aplicaciones y una mala disposición final de los envases contenedores. Al no llevar un control de las cargas aplicadas de plaguicidas sobre los cultivos, se desconoce el potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

El presente trabajo se enfoca en la determinación del índice de vulnerabilidad específica a la contaminación del agua subterránea mediante la aplicación del método SINTACS (Civita & Maio, 1990; Foster & Hirata, 1990) haciendo uso de una base de datos que ha sido integrada a partir de información documental y trabajo de campo, donde se caracterizaron los suelos de la zona y se analizaron las variables que se incluyen en el modelo, a la vez que se identificaron las propiedades ecotoxicológicas y fisicoquímicas relevantes de los plaguicidas comúnmente empleados en la región (organofosforados y carbamatos) aun y cuando estos grupos de plaguicidas se consideran menos persistentes que otros, como los organoclorados.

El presente trabajo contribuye al análisis ambiental de la región, aportando datos sobre los índices de vulnerabilidad y haciendo uso de información generada por programas de simulación de transporte de sustancias y por métodos geoestadísticos. Al determinar la distribución espacial de las concentraciones estimadas de las sustancias, la identificación de zonas de mayor contaminación por plaguicidas y el riesgo que estos representan para el ambiente y la salud de las comunidades, se podrán orientar acciones por parte de las instancias regulatorias y sanitarias sobre la gestión del uso y manejo adecuado de sustancias y evaluar a su vez, el grado de vulnerabilidad de los terrenos a ser afectados y prevenir así, el incremento en el daño, ya que la actividad florícola representa una alternativa económica altamente rentable para las comunidades del municipio de Villa Guerrero, que requiere un análisis cuidadoso en relación con otros aspectos como el social y el ambiental.

Área de estudio

Localización geográfica: Villa Guerrero se ubica entre las coordenadas geográficas: 18° 48' 00" latitud Norte y 18° 25' 00" latitud Sur y 98° 33' 00" longitud Este, 100° 28' 00" longitud Oeste. Se localiza al sur del Estado de México, colindando con los municipios de Zinacantepec, Toluca y Tenango del Valle al norte; Ixtapan de la Sal al sur; Tenancingo y Zumpahuacán al este y Coatepec Harinas al

oeste. Villa Guerrero, con base en información del Gobierno del Estado de México (INEGI, 2013) tiene una superficie de 20.773 hectáreas, representando el 8,5 % del total del territorio estatal (Fig. 1).

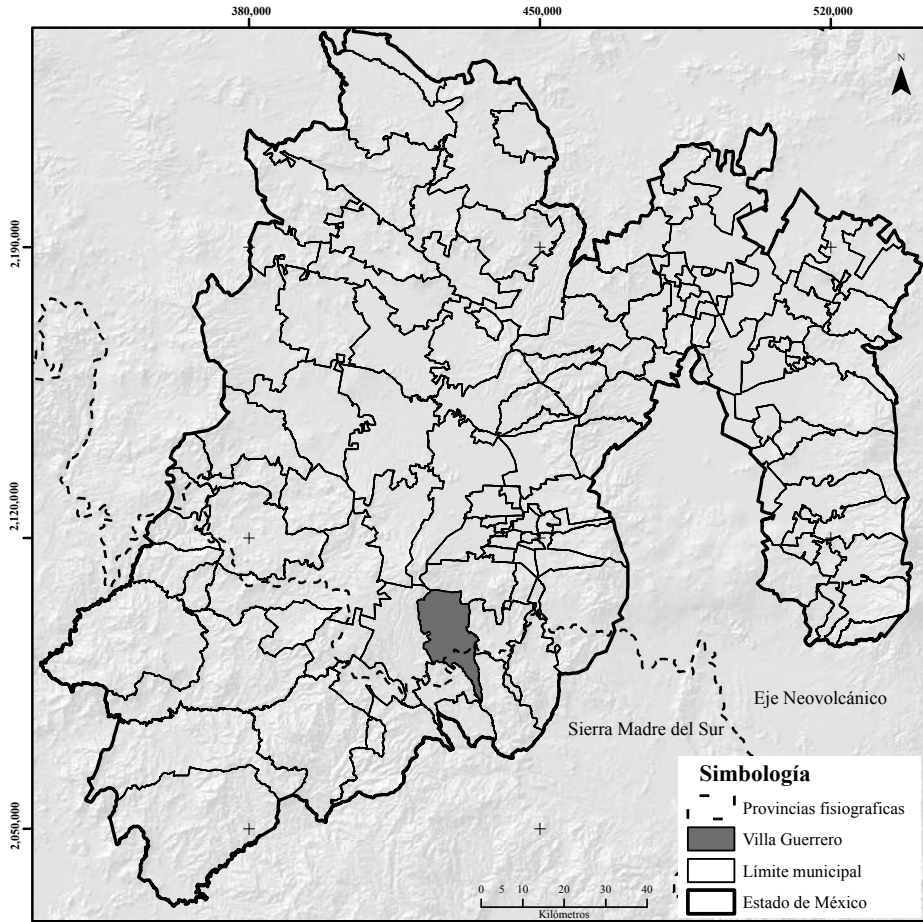


Figura 1. Área de estudio, Villa Guerrero, México. Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino (2016) sobre la base de INEGI, 2013.

Climatología: en el municipio, el clima que predomina es el templado subhúmedo. De acuerdo con la clasificación de Köppen, este clima se encuentra dentro del tipo Cw, con temperatura máxima anual de 39 °C, temperatura media anual de 18,6 °C y temperatura mínima anual de -4 °C. Villa Guerrero se localiza en una zona intertropical donde prevalecen diversos tipos de climas, todos ellos con lluvias en verano. Las condiciones arriba mencionadas permiten el cultivo de flor de manera rentable y a gran escala (INEGI-SEMARNAT, 1998; CNA, 2003, Velázquez *et al.*, 2013).

Hidrología: los principales ríos y arroyos que corren a través del municipio son el río Texcaltenco, el río Chiquito de Santa María, el río San Gaspar, el río Cruz

Colorada o San Mateo, el río Tintojo 1 y 2 y el río Calderón. El río San Jerónimo (CNA, 2003) se origina en el Nevado de Toluca a una altitud de 4.350 m s.n.m. desciende sobre las laderas de este siguiendo una dirección este-sureste, conociéndose en este tramo como río Texcaltengo, cuyos escurrimientos son aforados en la estación hidrométrica A6 Santa María. Los arroyos existentes son Los Cuervos, Los Tizates, San Mateo, del Muerto, de San Martín, de Zacango y de San Gaspar.

Fisiografía: el Estado de México incluye en su territorio áreas pertenecientes a dos provincias fisiográficas: el eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. La parte norte del área de estudio pertenece al eje Neovolcánico, el cual se caracteriza por presentar actividad volcánica reciente. En la parte centro y sur, corresponde a la sierra Madre del Sur representada por la subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses (INEGI, 2001) caracterizada por la presencia de pliegues, fallas y fracturamiento del terreno.

Geología: el municipio al formar parte del eje Neovolcánico, tiene rocas de tipo volcánico. Al norte del territorio se localizan rocas ígneas extrusivas ácidas hasta una altitud aproximada de 3.000 m con algunos afloramientos de brecha volcánica (Bv) (GEM, 2004); en la zona norte del municipio se localizan andesitas de lamprobolita y pirixénicas del Terciario Superior (INEGI, 2001). Se trata de depósitos aluviales y proluviales, producto de un evento acumulativo que se presenta hasta la actualidad. Según el INEGI (2011), está conformado por clastos de diversos tamaños, que por lo general son líticos de rocas ígneas extrusivas y metamórficas. En la parte sur de Villa Guerrero se localizan areniscas asociadas con conglomerado, rocas ígneas extrusivas, basalto y caliza. El suelo se ha formado por la sedimentación que proviene de la erosión pluvial y de la erosión eólica, dando como resultado la acumulación de materiales arcillo-arenosos de los materiales parentales.

Hidrogeología: a partir de los rasgos geológicos e hidrológicos que distinguen a la región, (SIIMA, 2001) se definieron las unidades hidrogeológicas de la zona a través de las propiedades de permeabilidad y estructurales de los sustratos que conforman el acuífero y la zona no saturada (Fig. 2). La metodología utilizada fue propuesta por la UNESCO y se basa en la “Leyenda Internacional para los mapas Hidrogeológicos” publicado conjuntamente en 1970 por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH, por sus siglas en inglés), la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS, por sus siglas en inglés), UNESCO y el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres, la cual fue revisada y ajustada en 1983. Las unidades hidrogeológicas definidas en el área de estudio se describen en el siguiente listado:

a) *Unidades en materiales granulares con importancia hidrogeológica relativa grande y pequeña.*

- a1. Acuíferos continuos de extensión variable, de tipo “libre”. Constituidos por sedimentos clásticos no consolidados. Permeabilidad variable. Calidad química generalmente buena. Posibilidades de explotación a través de pozos someros.

- a3. Acuíferos continuos generalmente de extensión regional a regional limitada. Libres y/o confinados, constituidos por sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad generalmente media a baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.
 - a4. Acuíferos locales limitados en capas delgadas o lentes arenosos, libres y/o confinados. Incluyen también acuíferos profundos de difícil explotación debido a la gran profundidad de los niveles de agua. Consisten en sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad generalmente baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.
- b) *Rocas fracturadas o fisuradas con importancia hidrogeológica relativa media a pequeña.*
- b1. Acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas, libres y/o confinadas. Compuestos de rocas ígneas extrusivas. Permeabilidad generalmente alta a media y con agua de buena calidad química.
 - b4. Acuíferos locales de extensión variable, restringidos a zonas fracturadas, libres y/o confinadas. Constituidos por rocas volcánicas y mixtas vulcano-sedimentarias. Permeabilidad baja. Calidad química de sus aguas de buena a regular.
- c) *Materiales granulares o rocas fracturadas con importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula.*
- c2. Acuíferos muy locales restringidos a zonas fracturadas, ampliadas en ciertos tramos asociados a zonas de alteración o intemperismo, de tipo libre. Constituidos de rocas metamórficas. Permeabilidad generalmente baja. Calidad química de las aguas generalmente buena.
 - c3. Acuíferos muy locales en zonas fracturadas, libres y/o confinadas en rocas volcánicas y mixtas (vulcano-sedimentarias), eventualmente con cobertura discontinua de sedimentos no consolidados. Permeabilidad muy baja a nula. Calidad química generalmente buena de reciente infiltración.

De lo anterior se desprenden una serie de unidades litológicas asociadas a diferentes ambientes geológicos, las cuales pueden integrarse en tres grandes unidades hidrogeológicas.

- 1. Acuíferos en materiales granulares: se incluyen todos los sedimentos clásticos no consolidados o consolidados de la columna geológica de la región independientemente de su forma de depósito, ya sean de origen sedimentario o vulcano-sedimentario y que por sus características litológicas y posición topográfica constituyen acuíferos de variado potencial de explotación, correspondientes a las unidades a1 y a3 del área de estudio.

2. Acuíferos en rocas fracturadas o fisuradas: se incluyen a todas las rocas que, por sus características geológicas-estructurales, como fracturación y disolución (carsticidad) forman acuíferos de relativa importancia, correspondientes a las unidades a1 y a3 del área de estudio.
3. Acuíferos y acuitardos en materiales granulares o rocas fracturadas: se incluyen los materiales granulares que por su litología (materiales clásticos finos) y las rocas con poco y discontinuo fracturación y alta compacidad forman acuíferos y/o acuitardos de importancia mínima, correspondientes a la unidad c3 del área de estudio.

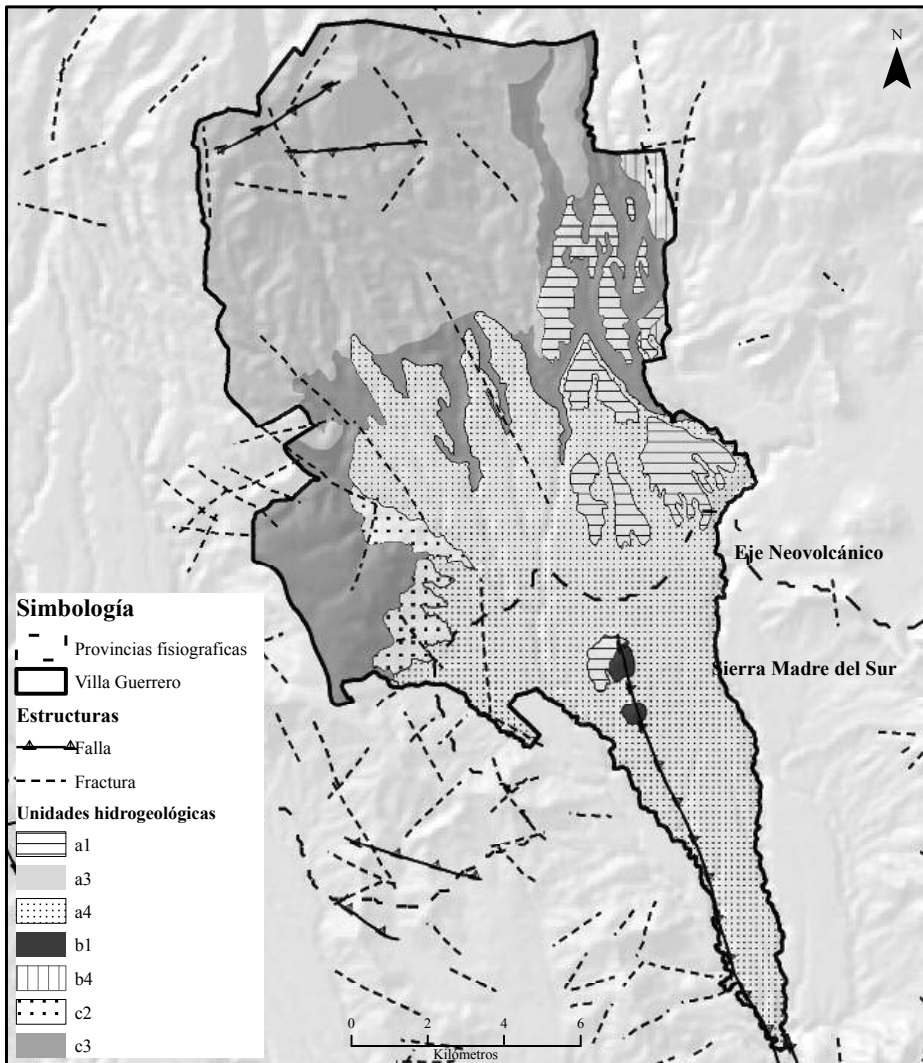


Figura 2. Unidades hidrogeológicas del municipio de Villa Guerrero.
Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino (2016) sobre la base de INEGI, 2013.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad comenzó a ser empleada como concepto en Europa en la década de 1960 por Margat (Paredes, 2010). Dependiendo de los autores, las fuentes, el campo de estudio y el orden cronológico, se presentan diversas definiciones. Foster (2003) define a la vulnerabilidad como la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta (Foster *et al.*, 2003).

Algunos autores no solo consideran las características intrínsecas del acuífero y la zona no saturada, sino que también toman en cuenta el tipo de contaminante, ya que cada sustancia se comporta de diferente manera, dependiendo de sus características fisicoquímicas. Debido a estos factores que definen la susceptibilidad de los acuíferos a ser afectados por algún agente contaminante (Vlaicu & Munteanu, 2008) se definen los siguientes tipos de vulnerabilidad:

- a. Vulnerabilidad intrínseca (VI). Indica la susceptibilidad del agua subterránea a ser afectada por contaminantes generados por las actividades humanas en función de las características físicas, geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, clima, vegetación y uso de suelo de un área, independientemente del tipo de contaminante (Harter & Walker, 2001; Vlaicu & Munteanu, 2008).
- b. Vulnerabilidad específica (VE). Es la susceptibilidad del agua subterránea frente a un contaminante particular o a un grupo de contaminantes, tomando en cuenta las propiedades fisicoquímicas de estos y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca. Depende esencialmente de tres variables relacionadas con el contaminante: el tiempo de transporte, la duración y la concentración máxima (Vlaicu & Munteanu, 2008; Vergara *et al.*, 2009; Aguilar & Bautista, 2013).

Ningún acuífero se encuentra completamente aislado del ambiente localizado en la superficie, por lo que cualquier acuífero es vulnerable a las actividades humanas (Velázquez *et al.*, 2013). El grado de vulnerabilidad dependerá, entre otros factores, principalmente de las condiciones ambientales y también sobre qué parte del acuífero se encuentra en riesgo. En el caso particular del presente trabajo, el grupo de contaminantes en estudio son los plaguicidas, por lo que fue determinada la vulnerabilidad específica. Se identificaron seis sustancias plaguicidas comúnmente aplicadas en terrenos florícolas de la región (Velázquez, 2013), sus características fisicoquímicas relevantes se muestran en la tabla I.

Se empleó un método paramétrico para su aplicación dentro de la zona de estudio, con el fin de determinar los índices de vulnerabilidad que permitan la caracterización de la misma y proveer información relacionada con el estado actual y el posible riesgo presente y el generado debido a las actividades florícolas propias de la región. Este método busca determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables (Estrada *et al.*, 2013).

Nombre plaguicida	*Grupo	Tipo	Uso	Categoría Toxicológica	DL50 Oral (rata)	Ingesta Diaria Admisible	Movilidad	Clase movilidad
					(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(log Koc)	
Carbendazim	CA	Fungicida	Agrícola urbano e industrial.	IV	>1500	0,03	0,99	Sumamente móvil
Carbofurano	CA	Insecticida-Nematicida	Agrícola e industrial.	II	8	0,002	1,3	Móvil
Dimetoato	OF	Insecticida	Agrícola, jardinería e industrial.	III	235	0,002	1,0	Sumamente móvil
Mancozeb	CA	Fungicida	Agrícola e industrial.	IV	>5000	0,03	3,3	Ligeramente móvil
Metamidofos	OF	Insecticida, Acaricida	Agrícola e industrial.	I	21	0,004	0,58	Sumamente móvil
Metomilo	CA	Insecticida	Agrícola, doméstico, industrial, pecuario y urbano.	II	17	0,03	1,2	Móvil

*CA: Carbamatos
// OF: Organofosforados

Tabla I. Información de plaguicidas identificados por su aplicación en terrenos florícolas de Villa Guerrero. Fuente: (Velázquez *et al.*, 2013).

SINTACS

Este modelo se encuentra clasificado dentro de los métodos de superposición e índices (o paramétricos) que están basados en la combinación de diferentes parámetros. SINTACS (Civita & Chiappone, 1990; Civita & Maio, 1990) analiza los mismos siete parámetros propuestos por el método DRASTIC (Tabla II) (Vargas, 2010) y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad, donde a cada parámetro se le califica cuantitativamente y se les asigna distinto valor de ponderación (Tabla III) para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (iV). La ventaja de estos métodos según Vlaicu (2008) es que otorgan algoritmos relativamente simples o árboles de decisión que permiten la integración de gran cantidad de información espacial en mapas de vulnerabilidad simple o índices, por lo que esta clase de métodos son particularmente adecuados para su uso con sistemas de información geográfica computarizada (SIG).

Parámetro (r)	
SINTACS	Descripción
S: <i>Soggiacenza</i> (Profundidad)	Indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración.
I: <i>Infiltrazione</i> (Infiltración)	Es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero.
A: <i>Acquifero</i> (Acuífero)	Características del acuífero: capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.
T: <i>Tipologia della copertura</i> (Tipo de suelo)	Capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada (se caracteriza por la actividad biológica).
S: <i>Superficie topografica</i> (Superficie del suelo)	Representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y sub-superficial.
N: <i>Non saturo</i> (Zona no saturada)	Representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.
C: <i>Conductibilità</i> (Conductividad hidráulica del acuífero)	Determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

Tabla II. Parámetros de integración del método SINTACS.

Fuente: (Velázquez *et al.*, 2015)

Factor	Impacto normal	Impacto relevante	Drenaje	Cárstico	Fisurado
	(IN)	(IR)	(D)	(C)	(F)
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4
Σ	26	26	26	26	26

Tabla III. Valores de ponderación SINTACS asignados a cada factor con base en condición específica. Fuente: (Estrada *et al.*, 2013)

Con el fin de describir la vulnerabilidad total, se incluyen variables a las anteriormente descritas, estimadas por índices (1-10). Los coeficientes de ponderación serán elegidos en el intervalo comprendido entre 8 % (1) y 22 % (5), mientras que los grados asignados a las regiones oscilan entre “muy baja” y “extremadamente alta”, como se muestra en la tabla IV. El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro (r) por su respectivo factor de ponderación (w), con base en la fórmula I, de la siguiente manera:

$$iV = (Sr \times Sw) + (Ir \times Iw) + (Nr \times Nw) + (Tr \times Tw) + (Ar \times Aw) + (Cr \times Cw) + (Sr \times Sw)$$

Fórmula I, donde: S: *soggiacenza* (profundidad), I: *infiltrazione* (infiltración), N: *non saturo* (zona no saturada), T: *tipologia della copertura* (tipo de suelo), A: *acquifero* (acuífero), C: *conductibilità* (conductividad hidráulica del acuífero), S: *superficie topografica* (textura y superficie del suelo)
r: puntuación parámetro (1-10) // w: factor de ponderación (1-5)

Simbología	Clases	Índice de vulnerabilidad
MB	Muy baja	26-80
B	Baja	81-105
M	Media	106-140
A	Alta	141-186
MA	Muy alta	187-210
EA	Extremadamente alta	211-260

Tabla IV. Clasificación del índice de vulnerabilidad SINTACS. Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino sobre la base de Estrada *et al.* (2013).

Materiales y métodos

El método SINTACS es un método paramétrico derivado del DRASTIC (Aller, 1995). DRASTIC-P es un apartado del modelo que está diseñado para la determinación de vulnerabilidad específica por plaguicidas sin embargo no fue aplicado en este estudio, debido a que ya se cuenta con información obtenida por este método que requiere ser contrastada con la generada por SINTACS. Ambos evalúan la vulnerabilidad del acuífero seccionándolo en celdas o polígonos, para los cuales calculan un valor (denominado índice de vulnerabilidad) a partir de un sistema por rangos ponderados y categorizados (Estrada *et al.*, 2013). Estos métodos definen rangos para cada uno de los factores implicados que emplean y además asignan un peso en función de la importancia relativa entre ellos, como se muestra en la tabla IV. La suma de estos rangos ponderados permite obtener un índice que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono del acuífero. Cuanto mayor sea el valor de este índice, mayor es la probabilidad de que el acuífero sea contaminado.

La aplicación de los modelos para la determinación de la vulnerabilidad requiere información de características físicas y químicas relacionadas con las variables que intervienen en los procesos de transporte de sustancias, interacción con el suelo, relieve y características propias del acuífero. La información relativa a los siete parámetros fue obtenida con base en el procedimiento descrito a continuación: a partir de un estudio de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2003) y de su inventario cartográfico de pozos se obtuvo la descripción del acuífero de la zona de Villa Guerrero, para determinar e incluir la profundidad del mismo, la litología y el grado de confinamiento; la recarga neta y el impacto al acuífero se reportan en un documento emitido por la Secretaría del Medio Ambiente y publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2011); los datos relacionados con la conductividad hidráulica y el tipo de suelo se encuentran reportados en estudios exploratorios incluidos en investigaciones realizadas por la Facultad de Química de la UAEMex (Sánchez Meza *et al.*, 2010; Velázquez *et al.*, 2013); la topografía fue obtenida mediante el cálculo de pendientes y curvas de nivel reportadas (PDMVG, 2009) mediante el uso de la herramienta de cartografía digital (INEGI, 2013) y ArcGIS 10.2. Partiendo de la generalidad de los mapas elaborados, se obtiene información para 18 comunidades relacionadas con el estudio, contribuyendo así, con una descripción general del panorama regional.

Los valores obtenidos deben ser normalizados para llevarlos a una escala comprendida entre valores de 0 a 100 (Tabla V), con el fin de homologar los índices y categorizarlos. La fórmula II, de acuerdo con Paredes (2010), se aplicó con base en la siguiente expresión matemática:

$$I_{no} = \frac{(I_c - I_{min})(100)}{I_{max} - I_{min}}$$

Fórmula II, donde: I_{no} = Índice normalizado; I_c = Valor de cada celda; I_{max} = Valor máximo del índice (cada método); I_{min} = Valor mínimo del índice (cada método).

Los valores normalizados pueden ser incluidos en la siguiente tabla de categorización de índices de vulnerabilidad.

Rango	Índice de vulnerabilidad
0-24	Muy bajo
25-35	Bajo
36-49	Medio
50-69	Alto
70-79	Muy alto
80-100	Extremadamente alto

Tabla V. Categorización de los valores normalizados del índice de vulnerabilidad. Fuente: (Paredes, 2010)

Integración de la cartografía. Los mapas relacionados con la distribución espacial de la vulnerabilidad determinada se elaboran haciendo uso de ArcGIS 10.2 y para cada uno de los parámetros que lo integran. En primer término, se presentan los insumos cartográficos requeridos, los cuales pasan por un proceso de rasterización. Los diferentes mapas, geológico, edafológico, de precipitación y de infiltración se convierten a raster de manera directa, mientras que las curvas de nivel y los niveles piezométricos se convierten a raster por medio de interpolaciones. Posteriormente a ello, se asigna un puntaje a cada mapa obtenido según se establece en cada método. Cada mapa resultante se pondera con valores propuestos según el escenario del área de estudio. El tamaño de pixel establecido fue de 100 m por lado. Finalmente, se suman los mapas resultantes, obteniendo el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea de cada método (Paredes, 2010).

Resultados y discusión

La información obtenida sobre las características físicas y químicas de las sustancias empleadas, del acuífero, el uso y tipos de suelo, las unidades hidrogeológicas y las características edafológicas y geológicas del municipio de Villa Guerrero permitieron el cálculo de los índices de *VE* haciendo uso de cada método diseñado con tal fin. Los índices de vulnerabilidad específica obtenidos se muestran en la tabla VI. La distribución de datos del método SINTACS varía desde índices de vulnerabilidad específica calculados con coeficientes desde 101 hasta 120 (que incluye el intervalo de la correspondiente caracterización de vulnerabilidad baja y media). El mapa de vulnerabilidad (Fig. 3) fue generado con base en la aplicación del modelo.

Se verificaron los índices obtenidos y se contrastaron contra la información relacionada con los parámetros de integración, las ponderaciones y la base de datos construida previamente para la aplicación de los métodos. Una vez normalizados

los valores resultantes de la aplicación del modelo y el mapa de vulnerabilidad, se integró una tabla que incluye a 18 comunidades del municipio de Villa Guerrero que se encuentran en estudio, como se muestra en la tabla VII.

SINTACS				
Calculado	Normalizado	Índice vulnerabilidad	Área (ha)	Área (%)
101 – 105	32 – 34	Bajo	1437	6.9
106 – 112	35 – 37	Bajo-Medio	8262	39.5
113 - 120	38 - 40	Medio	11221	53.6

Tabla VI. Índices de vulnerabilidad calculados y normalizados para SINTACS.

Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino.

- Los índices de *VE* corresponden a la caracterización de *vulnerabilidad baja y media*.
- Los valores mayores de *VE* corresponden a la región central del municipio, donde se concentra el mayor volumen de producción florícola, una alta aplicación de agroquímicos, poca rotación de cultivos y la correspondiente probabilidad de contaminación del acuífero, en el que se observa una tendencia de dichos valores hacia la región sur.
- La topografía del terreno es un factor determinante en la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, dado que las pendientes o las variaciones de la superficie pueden permitir la evacuación de los contaminantes a través de la escorrentía o, en caso contrario, facilitar su infiltración. Igualmente, la topografía influye en el desarrollo de los suelos y, por lo tanto, en la atenuación de la contaminación.
- Se establece que pendientes menores al 2 % favorecen la infiltración y la evapotranspiración, dada la baja velocidad de la escorrentía. En valores de pendientes mayores al 18 %, el agua de lluvia escurre con facilidad y puede evacuar mayores cantidades de sustancias dispuestas sobre el terreno en forma disuelta o en suspensión. En el presente caso, se tienen pendientes desde 3,7 a 23,3 %, presentando un comportamiento que indica escorrentía. Las comunidades que presentan valores de pendientes menores indican la probable presencia de fenómenos de infiltración y evapotranspiración, favoreciendo una mayor persistencia de los agroquímicos.
- Cabe hacer mención a que los resultados obtenidos no son absolutos, debido a la asignación de valores de los factores de ponderación *r* y *w* para cada método (se asignan a partir de la información disponible de manera subjetiva, más no arbitraria, realizando su interpretación y el establecimiento de las categorías operativas).

- f. La intensificación de los cambios climáticos en los últimos años, que modifican el régimen pluviométrico, es un factor que debe ser tomado en cuenta, ya que se generan lluvias de mayor intensidad modificando los valores de *recarga neta*. Debido a esto, las precipitaciones de gran volumen dan origen a grandes escorrentías y menores infiltraciones, lo que disminuiría los valores para la recarga.

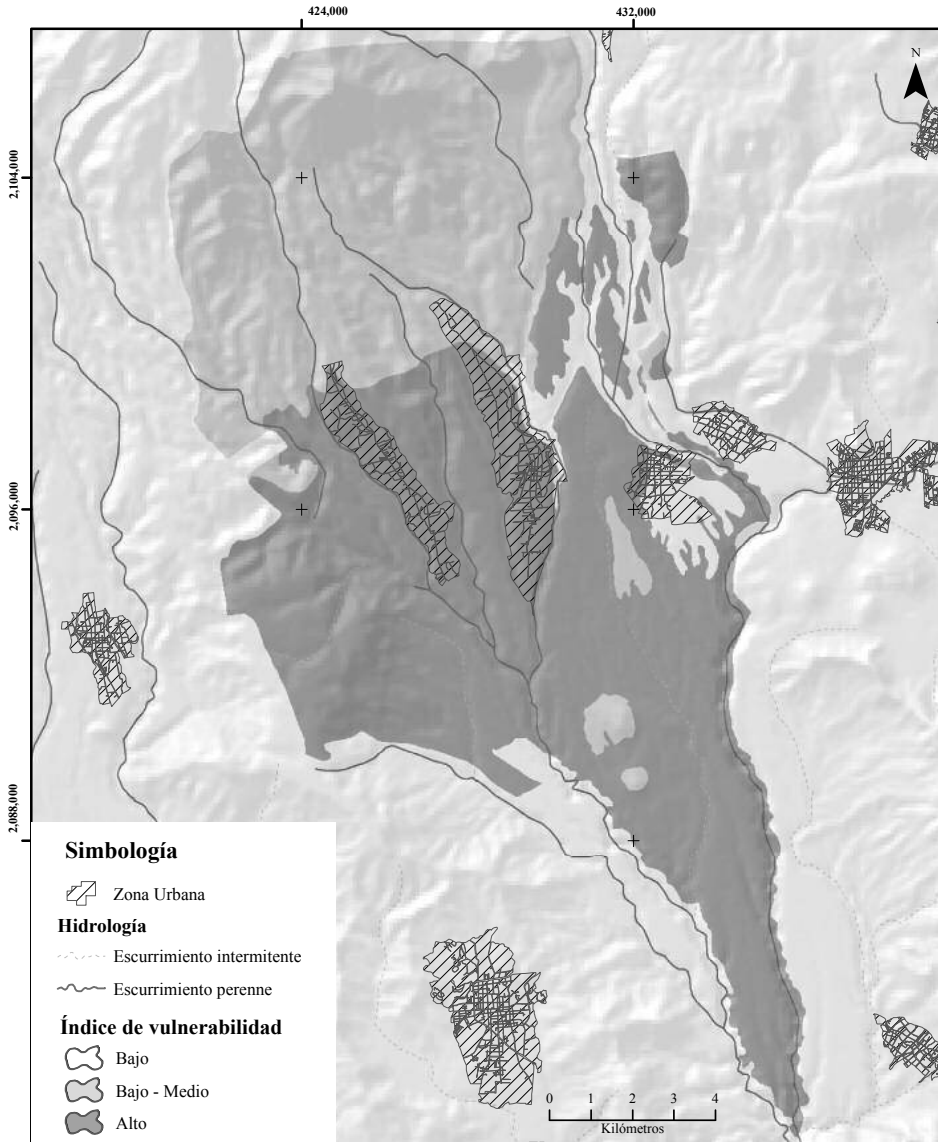


Figura 3. Mapa de Vulnerabilidad específica SINTACS.

Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino sobre la base de INEGI, 2013

LOCALIDAD	SINTACS
Aranzazú	Medio
Buena Vista	Medio
Coapexco	Medio
Coxcacoaco	Medio
El Islote	Medio
Jesús Carranza	Medio
La Finca	Medio
La Joya	Medio
Matlazincas	Bajo
Oxtotitlán	Medio
San Felipe	Medio
San Francisco	Medio
San José	Medio
San Miguel	Medio
Santa María	Medio
Totolmajac	Medio
Villa Guerrero	Medio
Zacango	Medio

Tabla VII. Índices de vulnerabilidad normalizados.

Fuente: elaborado por Velázquez, Sánchez, Martínez, Paredes y Mancino

Conclusiones

La evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación por plaguicidas en las 18 comunidades produjo como resultado que la *VE* es significativo al presentarse valores de categorización *media*, hecho que permite concluir que la fuente de agua subterránea se encuentra en riesgo de ser contaminada debido a estas sustancias plaguicidas de especial cuidado ambiental que son aplicadas con alta frecuencia y cantidad. La aplicación del método SINTACS para la determinación de los índices de vulnerabilidad específica es un recurso de exploración inicial de probable contaminación de aguas subterráneas y, debido a las variables y parámetros requeridos y la gran cantidad de información de respaldo, su confiabilidad se puede asegurar. A través del presente estudio se pretende desarrollar una alternativa académica de gestión ambiental, así como una importante herramienta con el fin de obtener datos que permitan y favorezcan a la adecuada toma de decisiones para la determinación de las zonas florícolas vulnerables a la migración de plaguicidas y de la re-evaluación de las políticas ambientales vigentes.

Agradecimientos

A la Mg. Mariana Mancino por su valiosa contribución en la integración del trabajo; al M. en C. Yered Gybram Canchola Pantoja por su amable contribución y revisión del presente trabajo; al QFBT. Leonardo Sánchez Enríquez por su valioso apoyo en la integración del presente documento, a la Mg María Guadalupe Castorena, por su amable soporte documental.

Referencias

Aguilar, Y. & Bautista, F. (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 16, 243-263.

Aller L. (1995). *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution using hydrogeologic settings*. Estados Unidos: U. S. Environmental Protection Agency.

Civita, M. & Chiappone, A. (1990). Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto pozzi dell' Aquedotto di Torino. *Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi.*, 2(2), 461-462.

Civita, M. & Maio, M. (1990). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination. *Geofísica Internacional*, 43(4), 513-532.

CNA, (2003). *Estudio de Evaluación Geohidrológica en el Acuífero de Tenancingo, Estado De México*. México: Comisión Nacional del Agua (CNA).

DOF (2011). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de 142 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. México: Diario Oficial de la Federación (DOF), Secretaría del Medio Ambiente, Estados Unidos Mexicanos.

Estrada, F., Silva, J. & Ochoa, S. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del Río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29 (4), 235-48.

Foster, S. y Hirata, R. (1990). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. 1era. Ed. Estados Unidos: Panamerican Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences.

Foster, S., Hirata, R. & Gomes, D., (2003). *Protección de la calidad del agua*. EUA: Banco Mundial.

GEM (2004). *Plan Municipal de Desarrollo Urbano Villa Guerrero*. Reporte. Toluca, México: Gobierno del Estado de Mexico (GEM). Secretaría de Desarrollo Urbano.

Harter, T. & Walker, L. (2001). *Assessing vulnerability of groundwater*. Estados Unidos: University of California.

INEGI (2013). *Sistema de Información Geográfica: Mapa Digital de México*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

INEGI-SEMARNAT (1998). *Estadísticas del medio ambiente, información de la situación general en materia de equilibrio ecológico y la protección al ambiente*. (Informe). México: Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Paredes, J. (2010). *Determinación del índice de vulnerabilidad de contaminación del acuífero del Valle de Toluca mediante la adecuación del método SINTACS*. Toluca, México: UAEMex CIRA.

PDMVG (2009). *Plan de Desarrollo Municipal de Villa Guerrero, Estado de México*. Villa Guerrero, México.

Sánchez Meza, J.C., Borja Salín, M.A. & Ávila Pérez, P. (2010). *Evaluación del riesgo ecotoxicológico derivado del uso de plaguicidas organofosforados y carbámicos empleados en la zona florícola del Estado de México, basado en el uso de bioensayos y evaluaciones rápidas de los compuestos más relevantes*. Toluca, México: Instituto Tecnológico de Toluca.

Sánchez, J., Pacheco, V., Ávila, P. & Borja, M. (2009). Uso de modelos para evaluar el destino y transporte de plaguicidas en el ambiente: alcances y limitaciones. *Ideas*, 38-48.

SIIMA (2001). *Estudio de evaluación geohidrológica en el acuífero de Tenancingo, Edo. De México*. (Informe de SIIMA), Contrato SGT-GRB-MEX-01-023-RF I3.

Vargas, M.C. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Velázquez, A., Sánchez, J., Adame, S. & Amaya, A. (2013). *Determinación de áreas de cultivo florícola vulnerables a la migración de plaguicidas organofosforados y carbámicos usando un modelo de simulación de lixiviación*. (Tesis de maestría inédita). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Mexico.

Velázquez, A., Sánchez, J.C., Ramírez, J. & Adame, S. (2015). *Evaluación del uso, aplicación y transporte de plaguicidas comúnmente empleados en suelos de cultivo florícola en Villa Guerrero, Estado de México*. (Tesis de grado inédita). Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Vergara, V., Gutiérrez, G. & Flores, H. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC. *Ingeniería y Desarrollo*, (26), 51-64.

Vlaicu, M. & Munteanu, C.-M. (2008). Karst groundwaters vulnerability assessment methods. *Travaux de l'Institut de Speologie Emile Racovitza*, 47, 107-18.

Fecha de recepción: 27 de junio de 2016

Fecha de aceptación: 14 de julio de 2017

© 2017 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR.