

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN YUCATÁN

Vulnerability and risk assessment of groundwater pollution in Yucatan

*María Concepción Torres Díaz, Yanet Yahaira Basulto Solís, Jorge Cortés Esquivel, Karla García Uitz, Ángel Koh Sosa, Franklin Puerto Romero, Julia Guadalupe Pacheco Ávila

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Avenida Industrias no Contaminantes por Anillo Periférico Norte. Tablaje Catastral 12685. Mérida Yucatán.

*conchitorres@hotmail.com

Artículo recibido: 5 de septiembre de 2012, **aceptado:** 26 de mayo de 2014

RESUMEN. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea mediante la generación y análisis del mapa de riesgo de las regiones hidrogeológicas "Semicírculo de cenotes" y "Zona costera" en el estado de Yucatán, México. El mapa de riesgo se obtuvo a partir de los mapas de vulnerabilidad y peligrosidad. La vulnerabilidad se evaluó con base en las siete variables que integran el método DRASTIC: D, profundidad; R, recarga neta; A, litología y estructura media del acuífero; S, tipo de suelo; T, topografía; I, impacto a la zona vadosa; y C, conductividad hidráulica. La información para la aplicación de esta metodología se obtuvo de fuentes públicas y a través de una revisión bibliográfica. El mapa de peligrosidad se elaboró con base en las fuentes potenciales de generación de residuos peligrosos de la región de estudio. Los resultados mostraron que existe una vulnerabilidad clasificada como alta, muy alta y extrema; asimismo, se observó que la peligrosidad fue mayor para los municipios de Mérida, Progreso y Dzidzantún representando un riesgo muy alto de contaminación para el acuífero.

Palabras clave: Riesgo, contaminación, acuífero kárstico, vulnerabilidad intrínseca, peligrosidad.

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate the risk of groundwater pollution through a risk map creation and analysis from the "Semicírculo de cenotes" and "Zona costera" hydrogeological regions in the State of Yucatan, Mexico. The risk map was obtained from vulnerability and hazard maps. The vulnerability was evaluated considering the seven variables that compose the DRASTIC method: D, depth; R, net recharge; A, lithology and media structure of the aquifer; S, soil type; T, topography; I, impact of vadose zone; and C, hydraulic conductivity. The information used in the application of this methodology was obtained from public sources and through literature review. The hazard map was developed based on the potential sources of hazardous waste generation in the region of study. The results showed the presence of a vulnerability classified as high, very high and extreme; additionally, a greater hazard was observed for the municipalities of Merida, Progreso and Dzidzantún, representing a very high risk of aquifer contamination.

Key words: Risk, contamination, karstic aquifer, intrinsic vulnerability, hazard.

INTRODUCCIÓN

En el Estado de Yucatán, México, no existen corrientes superficiales de agua debido a las características del subsuelo kárstico, por lo que la única fuente de abastecimiento es el agua subterránea. La disponibilidad de este recurso es mayor que la demanda prevista a largo plazo ya que solo se explota el 6 % del agua disponible, sin embargo su calidad es

cuestionable ya que también es receptora del agua de desecho que se genera en el Estado (SAGARPA 2010). El principal problema sobre este recurso es el incremento en la contaminación debido a la falta de alcantarillado, a fosas sépticas mal construidas, al fecalismo a cielo abierto y a la intrusión salina en la franja costera del Estado (Marín *et al.* 2004, Ayuntamiento de Mérida 2006, Graniel 2010). Las características cársticas de Yucatán, catalogan al acuífero

como muy vulnerable, ya que las fracturas, canales de disolución y la presencia de cavernas, permiten una rápida infiltración de los elementos contaminantes que se encuentran en la superficie del terreno (Pacheco *et al.* 2004).

Para preservar la calidad del agua es necesario realizar estudios sobre: (1) la vulnerabilidad, (2) los peligros, y (3) el riesgo de contaminación del agua subterránea. La vulnerabilidad, es una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea, que depende de la sensibilidad de éste frente a los impactos humanos y/o naturales (Vrba y Zaporozec 1994). Este concepto se basa en el supuesto de que el entorno físico puede proporcionar un cierto grado de protección contra los impactos de los contaminantes; consecuentemente, algunas áreas son más vulnerables que otras (Al-Kuisi *et al.* 2006). Existen diferentes metodologías para la cualificación y mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea. Entre las más empleadas se encuentran: DRASTIC, que es un modelo empírico desarrollado por Aller *et al.* (1987), es usado tanto para la cualificación como para la cartografía y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad) de acuerdo con las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC; GOD fue desarrollado por Foster en 1987 y publicado formalmente por Foster e Hirata (1988), es un método sencillo y sistemático por lo que se usa cuando no se cuenta con datos suficientes, no son fiables o no cubren la totalidad del área a estudiar; SINTACS es una derivación del DRASTIC, ya que usa los mismos parámetros, fue desarrollada por Civita y De Maio (1997) como una adaptación a las características hidrogeológicas de Italia a una escala de mayor detalle y el método EPIK, el cual fue desarrollado para acuíferos kársticos por Doerfliger y Zwahlen (1998). El método DRASTIC, desarrollado para la US Environmental Protection Agency (EPA) es probablemente el índice de vulnerabilidad más ampliamente utilizado y tiene como finalidad evaluar diversas variables representativas de la vulnerabilidad a la contaminación, basado particularmente en siete variables intrínsecas del acuífero: Profundidad al nivel estático (D), Recarga neta (R), Acuífero medio (Litología y estructura media del acuífero)

(A), Tipo de suelo (S), Topografía (T), Impacto a la zona vadosa (I) y Conductividad hidráulica (C) (Aller *et al.* 1987, Shahid 2000, Auge 2004, Rahman 2008). La interacción entre la vulnerabilidad y la carga contaminante (peligro) determinan el riesgo de contaminación al agua subterránea, el cual está asociado a las medidas preventivas que se pudieran proponer (Raham 2008).

La cartografía de la vulnerabilidad y el riesgo son herramientas valiosas para los tomadores de decisiones para planificación del uso del suelo y para establecer zonas de protección necesarias para preservar la cantidad y calidad óptima de las aguas subterráneas (Vías *et al.* 2005, Minh-Nguyet y Goldscheider 2006). El estudio de la vulnerabilidad y riesgo a la contaminación del agua subterránea en estas regiones, se realizó debido a que en la primera se efectúa la descarga del acuífero al mar (Aranda-Cirerol *et al.* 2006, Valle-Levinson *et al.* 2011) y en la segunda, porque en ella se ubica la Zona Metropolitana de Mérida, Yucatán la cual concentra la mayor parte de la población y, por lo tanto, las actividades económicas que pueden afectar la calidad del agua subterránea (CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatán 2011, DOF-Gobierno del Estado de Yucatán 2013). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue clasificar el riesgo a la contaminación del agua subterránea de las regiones hidrogeológicas "Semicírculo de cenotes" y Zona costera con la finalidad de coadyuvar a la búsqueda de estrategias que permitan la protección del recurso hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Yucatán está conformado por cuatro zonas geohidrológicas denominadas Costera, Semicírculo de cenotes, Planicie Interior y, Cerros y Valles (INEGI 2002). La región de estudio comprende las zonas Costera y Semicírculo de cenotes, localizadas al norte y centro-norte del Estado (Figura 1); los nombres de los municipios y sus georreferencias se muestran en la Tabla 1.

La Zona Costera comprende las playas de barrera y lagunas de inundación, además de una

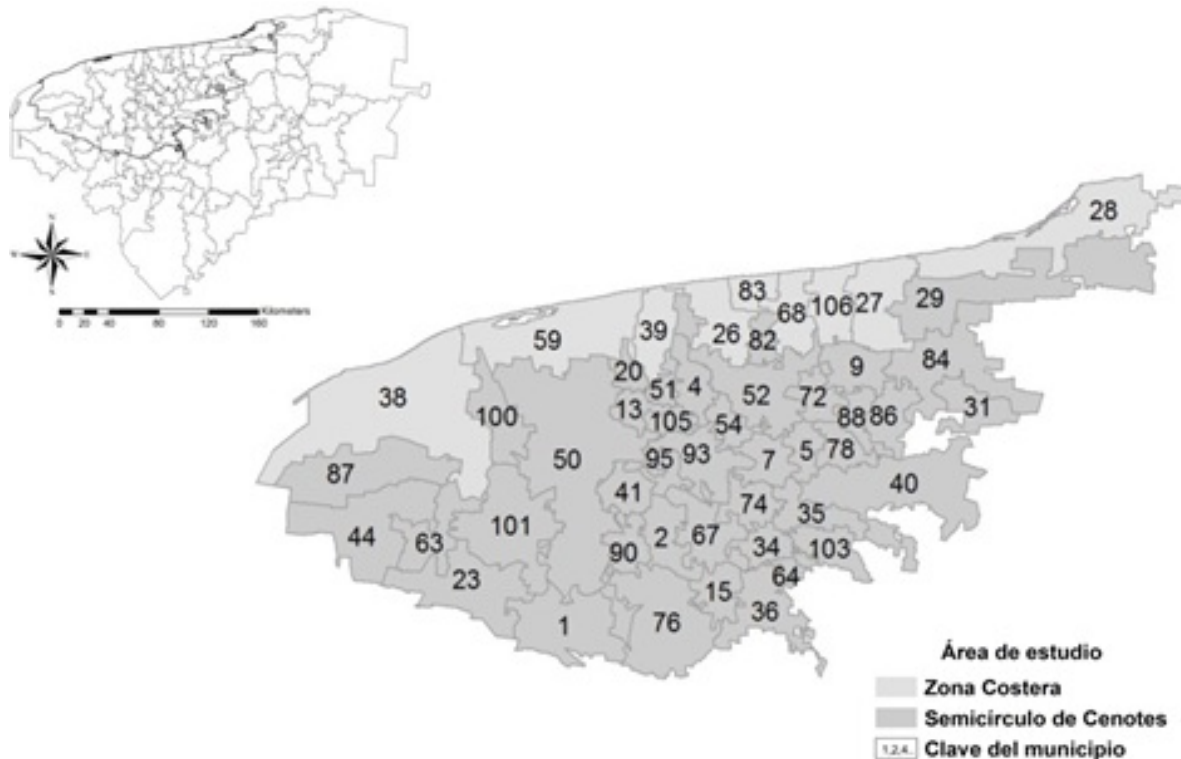


Figura 1. Localización del área de estudio.

Figure 1. Location of the study area.

serie de bahías someras, asociadas con sistemas de fracturas; y de calizas coquiníferas de ambiente de litoral semiconsolidadas, algunas muy deleznable. Se ubica al norte a lo largo de la costa del estado y su limitación básicamente se debe a que contiene aguas de la familia sódico-cloruradas, tiene una superficie que representa 6.83 % del total estatal. La zona del Semicírculo de cenotes, se ubica en la parte centro norte del Estado, su nombre se debe a la alineación de cenotes en forma semicircular que determina un sistema de fracturas, cuyo origen aún no ha sido precisado pero que a últimas fechas se le relaciona con el Cráter de Chicxulub; se extiende sobre un área que representa 20.2 % de la superficie estatal.

Selección de la metodología y recopilación de datos para la evaluación de la vulnerabilidad

La selección de la metodología DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea

a la contaminación en la región de estudio se debió a que, tal como lo señala Margane (2003) es un método que no es costoso ya que los datos utilizados están disponibles o pueden ser estimados para mostrar mapas de vulnerabilidad que pueden ser fácilmente interpretados.

Para esto, se consultaron fuentes electrónicas e impresas de instituciones gubernamentales como la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), así como revistas científicas.

Determinación del índice de vulnerabilidad intrínseca DRASTIC

Para la determinación del índice DRASTIC, a los parámetros se le asignó un valor numérico entre 1 y 10, el mínimo y el máximo potencial para la contaminación, respectivamente. De manera similar, a cada parámetro se le asignó un factor de ponderación con valores entre 1 y 5 con base en su

Tabla 1. Parámetros para la determinación del Índice DRASTIC.

Table 1. Parameters for the determination of the DRASTIC Index.

Clave	Municipio	Coordenadas		Profundidad a nivel estático(m)	Recarga neta (mm)	Tipo de suelo	Topografía (%)
		X	Y				
SEMICÍRCULO DE CENOTES							
1	Abalá	-89.6797222	20.6466667	10.26	240	A o F	0.03
2	Acanceh	-89.4536111	20.8127778	12.46	228	A o F	0.02
4	Baca	-89.3986111	21.1091667	6.00	216	A o F	0.04
5	Bokobá	-89.1794444	21.0063889	8.00	252	A o F	0.02
7	Cacalchén	-89.2277778	20.9822222	8.00	252	A o F	0.05
9	Cansahcab	-89.1019444	21.1572222	5.00	240	A o F	0.04
20	Chicxulub Pueblo	-89.5166667	21.1363889	4.00	228	A o F	0.05
23	Chocholá	-89.8297222	20.7508333	6.58	252	A o F	0.02
13	Conkal	-89.5208333	21.0733333	5.00	228	A o F	0.04
15	Cuzamá	-89.3155556	20.7413889	15.00	228	A o F	0.01
29	Dzilam González	-88.9291667	21.2800000	3.00	264	Arena	0.08
31	Dzoncauich	-88.8905556	21.1277778	10.00	240	A o F	0.03
34	Hocabá	-89.2450000	20.8155556	14.50	228	A o F	0.02
35	Hoctún	-89.2019444	20.8644444	15.10	252	A o F	0.02
36	Homún	-89.2850000	20.7386111	15.10	240	A o F	0.01
40	Izamal	-89.0177778	20.9313889	12.69	240	A o F	0.04
41	Kanasín	-89.5577778	20.9344444	8.00	228	A o F	0.02
44	Kinchil	-89.9469444	20.9161111	3.12	240	A o F	0.03
50	Mérida	-89.6216667	20.9677778	4.66	228	A o F	0.03
51	Mocochá	-89.4513889	21.1055556	5.00	228	A o F	0.04
52	Motul	-89.2830556	21.0950000	6.00	216	A o F	0.03
54	Muxupip	-89.3297222	21.0419444	8.50	252	A o F	0.03
63	Samahil	-89.8894444	20.8858333	4.50	252	A o F	0.03
64	Sanahcat	-89.2138889	20.7708333	14.00	240	A o F	0.03
67	Seyé	-89.3719444	20.8372222	13.96	228	A o F	0.02
72	Suma	-89.1486111	21.0861111	5.45	252	A o F	0.03
74	Tahmek	-89.2561111	20.8741667	12.00	240	A o F	0.02
76	Tecoh	-89.4744444	20.7419444	12.77	216	A o F	0.02
78	Tekantó	-89.1055556	21.0105556	9.00	252	A o F	0.02
82	Telchac Pueblo	-89.2722222	21.2022222	4.00	204	A o F	0.05
84	Temax	-88.9388889	21.1500000	7.04	276	A o F	0.04
86	Tepakán	-89.0388889	21.0486111	9.00	264	A o F	0.03
87	Tetiz	-89.9338889	20.9622222	2.00	228	A o F	0.04
88	Teya	-89.0733333	21.0488889	7.00	252	A o F	0.03
90	Timucuy	-89.5133333	20.8105556	10.00	228	A o F	0.02
93	Tixkokob	-89.3936111	21.0022222	8.68	252	A o F	0.03
95	Tixpehual	-89.4416667	20.9777778	8.00	240	A o F	0.03
100	Ucú	-89.7469444	21.0308333	3.00	216	A o F	0.04
101	Umán	-89.7500000	20.8833333	7.00	240	A o F	0.02
103	Xocchel	-89.1833333	20.8333333	13.00	252	A o F	0.03
105	Yaxkukul	-89.4200000	21.0616667	7.00	240	A o F	0.03
ZONA COSTERA							
26	Dzemul	-89.3088889	21.2102778	2.00	204	Arena	0.07
27	Dzidzantún	-89.0430556	21.2458333	2.00	212	Arena	0.07
28	Dzilam de Bravo	-88.8913889	21.3925000	1.00	212	Arena	0.00
38	Hunucmá	-89.8744444	21.0152778	3.15	204	A o F	0.04
39	Ixil	-89.4822222	21.1522222	2.00	192	A o F	0.05
59	Progreso	-89.6636111	21.2827778	1.00	198	Arena	0.00

Tabla 1. Continúa.

Table 1. Continue.

Clave	Municipio	Coordenadas		Profundidad a nivel estático(m)	Recarga neta (mm)	Tipo de suelo	Topografía (%)
		X	Y				
68	Sinanché	-89.1850000	21.2250000	2.00	180	Arena	0.07
83	Telchac Puerto	-89.2630556	21.3405556	1.00	156	Arena	0.00
106	Yobain	-89.1166667	21.2325000	2.00	192	Arena	0.06

A o F: Ausente o fino.

relativa influencia para la contaminación del agua subterránea (Tabla 2).

El modelo DRASTIC aplica una combinación lineal de todos los factores (Ecuación 1):

$$IV = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde IV (índice de vulnerabilidad) es el resultado final de la evaluación de los factores del acrónimo y, R (1 a 10) y W (1 a 5) indican los valores de los rangos y de las ponderaciones para cada parámetro, respectivamente.

En DRASTIC, la precipitación pluvial y la profundidad al nivel freático se aplican a áreas extensas haciendo posible una evaluación a escala regional sin requerir del uso extensivo de datos. Los valores de los parámetros utilizados para determinar el grado de vulnerabilidad se obtuvieron de las siguientes fuentes: a) Profundidad al nivel estático (D), de la base de datos de profundidades a nivel freático y del mapa digital correspondiente a junio de 2004 (CONAGUA 2006); b) la recarga neta (R), se calculó con los valores de precipitación (CONAGUA 2011) los cuales se multiplicaron por la tasa de recarga del 24 % sugerida por González-Herrera *et al.* (2002); c) el tipo de acuífero (A), el tipo de suelo (S) y la topografía (T), se obtuvieron de Pérez-Ceballos *et al.* (2008); d) para el impacto de la zona vadosa (I), se consideró la naturaleza kárstica del estado de Yucatán (Lugo-Hubp *et al.* 1992, Marín *et al.* 2000, Perry *et al.* 2003, Batllori *et al.* 2006, Bauer-Gotwein *et al.* 2011) y e) el valor para la conductividad hidráulica (C), se tomó de González-Herrera *et al.* (2002).

Con estos valores se elaboró una base de datos para determinar el índice de vulnerabilidad y posteriormente, se obtuvieron los mapas

temáticos incluyendo el mapa de clasificación de la vulnerabilidad para el área estudiada (Tabla 3), mediante el Arcview (SIG).

Determinación de la peligrosidad

Para conocer los tipos y las cantidades de Residuos Peligrosos (RP) que se generan en el estado de Yucatán, se realizó un inventario de fuentes potenciales de generación de residuos peligrosos (FPGRP). Con base en dicho inventario, se obtuvo el número de FPGRP para cada uno de los municipios que integran la zona asignando la clasificación en función del número de FPGRP (Tabla 4) (Cabañas-Vargas *et al.* 2010).

Determinación del riesgo

Para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas se usó un índice de riesgo (IR) calculado mediante el producto de los valores de la vulnerabilidad intrínseca y de la intensidad de las presiones (peligrosidad) (Jiménez-Madrid *et al.* 2011), también conocido como índice de riesgo básico de contaminación (Wang *et al.* 2012) (Ecuación 2).

$$\text{Índice básico de riesgo de contaminación} = (N_h)(N_i) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: N_h es el número de las clases de peligrosidad (1 a 5) y N_i es el número de las clases de vulnerabilidad intrínseca. El resultado final del índice de riesgo (Índice IR) se calculó a partir de una matriz de doble entrada (Van-Westen 1997, Jiménez-Madrid *et al.* 2011). Para el cálculo de la matriz, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: a) cuando el peligro es muy bajo, el riesgo será bajo en todos los casos ya que no importa

Tabla 2. Rangos y valores considerados para los parámetros de la metodología DRASTIC.

Table 2. Ranges and values considered for the parameters of the DRASTIC method.

Valor	(D) Profundidad (m)	(R) Recarga (mm)	(A) Medio acuífero	(S) Tipo de suelo	(T) Topografía (%)	(I) Impacto de la zona vadosa	(C) Conductividad hidráulica (m/s)
1	> 30.5	0 - 50	—	Arcilla no compactada y no agregada	>18	Limo/Arcilla	4.6×10^{-7} - 4.7×10^{-5}
2	22.9 - 30.5	—	Lutita masiva	Suelo orgánico	—	—	4.7×10^{-5} - 1.4×10^{-4}
3	15.2 - 22.9	50 - 102	Ígnea metamórfica	Marga arcillosa	12 - 18	Lutita	—
4	—	—	Ígnea metamórfica (alterada)	Marga limosa	—	Ígneas metamórficas	1.4×10^{-4} - 3.4×10^{-4}
5	9.1 - 15.2	—	Sedimentos de origen glaciar	Marga	6 - 12	—	—
6	—	102 - 178	Secuencias de arenisca, caliza y lutita. Arenisca masiva. Caliza masiva	Marga arenosa	—	Caliza. Arenisca. Secuencias de caliza, lutita y arenisca. Arena y grava con limo y arcillas.	3.4×10^{-4} - 4.7×10^{-4}
7	4.6 - 9.1	—	—	Arcilla compactada y agregada	—	—	—
8	—	178 - 254	Arena y grava	Turba	—	Arenas y gravas	4.7×10^{-4} - 9.5×10^{-4}
9	1.5 - 4.6	> 254	Basalto	Arena	2 - 6	Basalto	—
10	0 -1.5	—	Calizas kársticas (CK)	Grava. Fino o ausente.	0 - 2	Calizas kársticas (CK)	$> 9.5 \times 10^{-4}$
Ponderación	Dw=5	Rw=4	Aw=3	Sw=2	Tw=1	Iw=3	Cw=3

Tabla 3. Clasificación de la vulnerabilidad (Modificado de Aller et al. 1987).

Table 3. Vulnerability classification (modified from Aller et al. 1987)..

RANGOS	VULNERABILIDAD
211 - 220	Extrema
200 - 210	Muy alta
180 - 199	Alta
160-179	Moderada
140-159	Baja
101-139	Muy baja
< 100	Insignificante

Tabla 4. Clasificación de la peligrosidad.

Table 4. Hazard classification.

NÚMERO DE FPGRP	PELIGRO
176 - 1882	Muy alto
92 - 175	Alto
38 - 91	Moderado
12 - 37	Bajo
0 - 11	Muy Bajo

FPGRP: Fuentes Potenciales Generadoras de Residuos Peligrosos.

considerar la clasificación de la vulnerabilidad; y cuando la vulnerabilidad es muy baja (significa que el área no contiene algún elemento importante para el riesgo), el riesgo es siempre bajo; para los demás casos, se consideraron las clasificaciones mostradas en la Tabla 5.

Elaboración de los mapas de vulnerabilidad, peligrosidad y riesgo

Para la elaboración de cada mapa, se utilizó una base de datos georreferenciada con la información de valores de los índices de vulnerabilidad y riesgo calculados de la aplicación de los modelos lineales correspondientes (Ecuaciones 1 y 2) y el software ArcMap de la plataforma del sistema de información geográfica Arc-GIS versión 9.3 (ESRI 2008).

RESULTADOS

Parámetros del modelo

En la región de estudio, la profundidad al nivel freático disminuye gradualmente de sur a norte con valores de 15.1 m hasta 1.0 m de profundidad (Tabla 1), a los cuales les corresponden los valores entre 5 y 10 de acuerdo con los rangos considerados en la metodología DRASTIC (Tabla 2) (Figura 2a).

Con respecto a la recarga neta (R), se obtuvieron recargas de 156 a 276 mm (Tabla 1), como resultado de los volúmenes de precipitación (de 650 a 1150 mm) registrados en el período de 2000 a 2010. Las Recargas netas entre el rango de 180 y 240 mm se localizaron en la mayor parte de la región de estudio con un valor de 8; a la mayor recarga (276 mm) le correspondió un valor de 9 y se localizó al noreste de la región (municipio de Temax) como resultado de una mayor precipitación pluvial en esta zona (Figura 2b, Tablas 1 y 2).

El tipo de suelo (T) fue clasificado como fino o ausente, ya que la disolución de la roca caliza no permite la formación de suelo y, como arena, para la región costera con valores de 10 y 9, respectivamente (Tablas 1 y 2, Figura 2c).

Debido a que el material del acuífero es básicamente caliza kárstica, el valor que le correspondió fue 10 (Tabla 2). Debido a que el estado de Yu-

catán es una plataforma kárstica, los valores de la pendiente topográfica varían entre 0 % para los municipios costeros y 7.2 % para los municipios cercanos a la Sierrita de Ticul, correspondiéndoles un valor de 10. Al evaluar el impacto de la zona vadosa en la contaminación del agua subterránea, se consideró la naturaleza kárstica del Estado, por lo que el valor fue 10. Dada esta naturaleza kárstica, los valores para la conductividad hidráulica suelen ser variados debido a la presencia de pequeñas fracturas o conductos de disolución que se reflejan en valores más grandes que los obtenidos en las pruebas de laboratorio con las rocas carbonatadas. En este estudio, el valor considerado para la Conductividad hidráulica fue $96\ 336\ \text{m}\ \text{d}^{-1}$. Por lo tanto, estas cinco variables al tener un solo valor para toda la región de estudio, se describen en un solo mapa (Figura 2d) con el valor más alto (10).

Mapa de vulnerabilidad

Para mostrar con detalle las áreas de la región de estudio que son más vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas, se calculó la diferencia entre el valor máximo de vulnerabilidad obtenido (220) y el valor de 200 sugerido por el Índice y e El resultado se dividió entre dos para dar lugar a las clasificaciones Muy alto y Extremo. De esta manera, el mapa obtenido mostró un índice de vulnerabilidad de 180 a 199 (Alto) en los municipios localizados al sur de la zona de estudio, de 200 a 210 (Muy alto) en los municipios ubicados al centro de la región hidrogeológica Semicírculo de cenotes (SC) y un índice de vulnerabilidad de 211 a 220 (Extremo) al norte de la región SC y en la zona costera (Figura 3).

Mapa de peligrosidad

El mapa de peligrosidad se clasificó de acuerdo al número de fuentes potenciales de generación de residuos peligrosos (FPGRP) por municipio, determinándose cinco niveles de peligrosidad: muy baja (de 0 a 11 FPGRP), baja (entre 12 y 37), moderada (entre 38 y 91), alta (entre 92 y 175) y muy alta (entre 176 y 1500) (Tabla 4).

El 84 % de los municipios presentaron una peligrosidad muy baja y baja, Mérida fue el único

Tabla 5. Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación del agua subterránea.

Table 5. Matrix for the determination of the risk of groundwater contamination.

MATRIZ DE RIESGO		PELIGRO						
		Muy bajo 0	Bajo 1	Moderado 2	Alto 3	Muy alto 4	Extremo 5	
VULNERABILIDAD	Muy baja	0	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
	Baja	1	Bajo	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado	Alto
	Moderada	2	Bajo	Moderado	Moderado	Alto	Alto	Muy alto
	Alta	3	Bajo	Moderado	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto
	Muy alta	4	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Muy alto	Extremo
	Extrema	5	Bajo	Alto	Muy alto	Muy alto	Extremo	Extremo

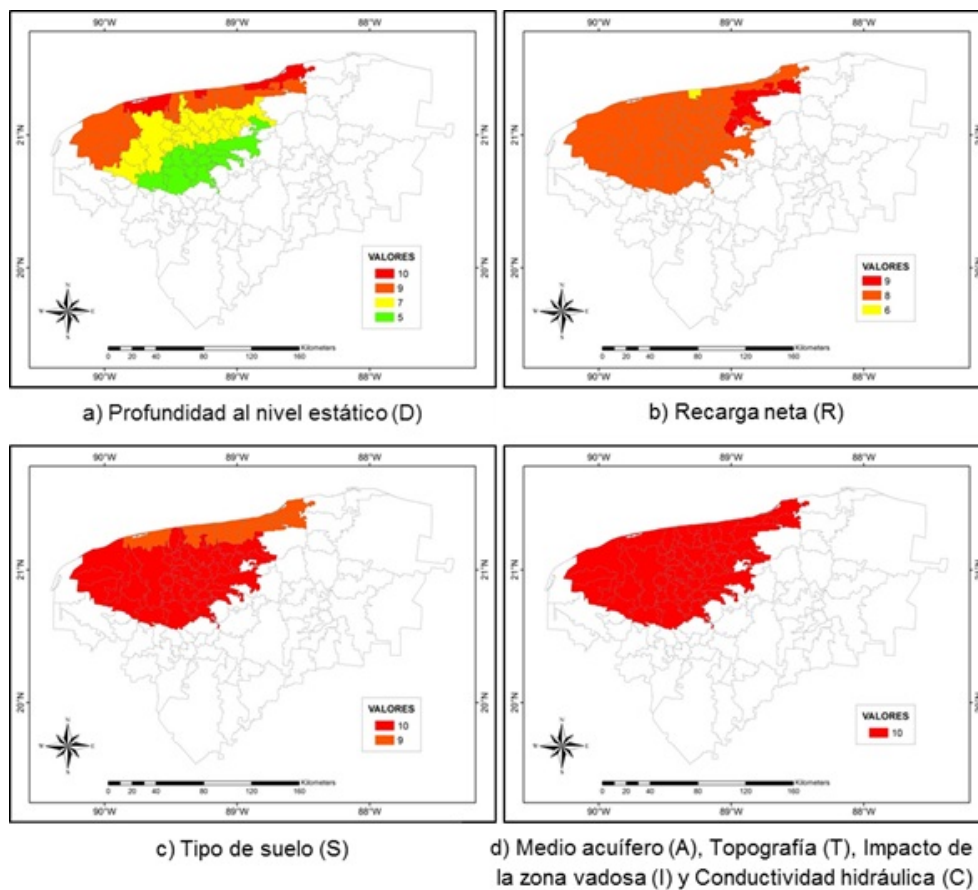


Figura 2. Mapas de las variables DRASTIC.

Figure 2. Maps of the DRASTIC variables.

municipio con un nivel de peligrosidad muy alto seguido de Progreso con un nivel alto de peligro; el 12 % restante, se clasificó como moderado (Figura 4).

Mapa de riesgo

La realización de la matriz de riesgo mediante la interacción de la vulnerabilidad del acuífero y las fuentes contaminantes, permitió evaluar el riesgo

de contaminación del agua subterránea en el área de estudio. Como resultado se obtuvieron las clasificaciones: bajo (B), moderado (M), alto (A), muy alto (MA) (Figura 5). Las clasificaciones para el riesgo de contaminación al agua subterránea, se obtuvieron a partir de la matriz de riesgos (Tabla 5); sin embargo, es importante destacar que: a) los municipios con un riesgo bajo de contaminación al del agua subterránea correspondieron a los municipios con una peligrosidad muy baja, ya que a pesar de que la vulnerabilidad en la región de estudio se clasificó como alta, muy alta y extrema (Figura 3), la cantidad de sitios potencialmente generadores de residuos peligrosos fue nulo o muy bajo, por lo que el agua que los subyace no es susceptible de ser contaminada por las actividades que en ellos se desarrollan actualmente; b) Mérida y Progreso presentaron un riesgo de contaminación muy alto derivado de una vulnerabilidad muy alta y extrema, respectivamente; y de la mayor cantidad de sitios potencialmente generadores de residuos peligrosos y; c) el municipio de Dzidzantún presentó la clasificación muy alta, debido a que su vulnerabilidad fue Extrema y su peligrosidad Moderada.

DISCUSIÓN

En la región de estudio donde los niveles freáticos varían entre 1.0 y 15.1 m, los valores de profundidad de la zona costera que están entre 1.0 y 3.15 m significan que las distancias que tienen que recorrer los contaminantes depositados en la superficie hacia el agua subterránea son cortas haciéndola más vulnerable a la contaminación en comparación con la otra zona de la región de estudio. Al igual que el presente estudio, Dubey *et al.* (2006) reportaron profundidades bajas (3.5 a 6.8 m) con valores de 9 y 7 para el acuífero kárstico de la ciudad de Rewa, Madhya por lo que la vulnerabilidad a la contaminación debida a la profundidad del nivel freático es, aproximadamente, seis veces mayor en comparación con el acuífero kárstico (cuenca de Gümüşaciköy-Merzifon en Turquía) estudiado por Firat y Gültekin (2013) donde la profundidad varió entre 9 y 40 m.

La recarga neta representa la cantidad de agua que penetra la zona vadosa y alcanza el nivel

freático (Al-Hanbali y Kondoh 2008). Los valores de recarga neta entre 156 y 276 obtenidos en toda el área estudiada se deben a la relativa homogeneidad del sustrato geológico conformado por rocas calizas con porosidades primaria y secundaria que le confieren una permeabilidad alta.

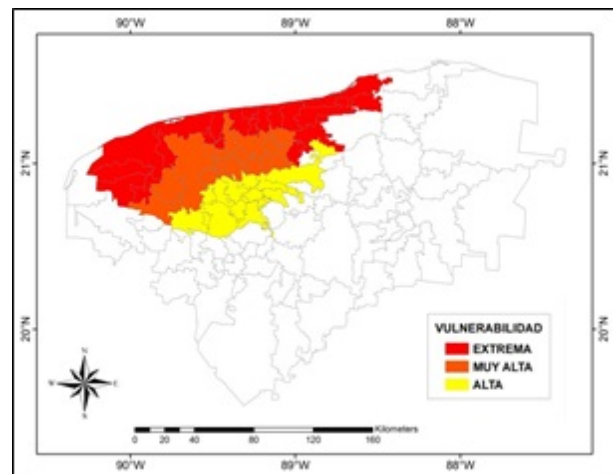


Figura 3. Mapa de vulnerabilidad intrínseca por el método DRASTIC (Modificado de Aller *et al.* 1987).

Figure 3. Intrinsic vulnerability map following the DRASTIC method (modified from Aller *et al.* 1987).

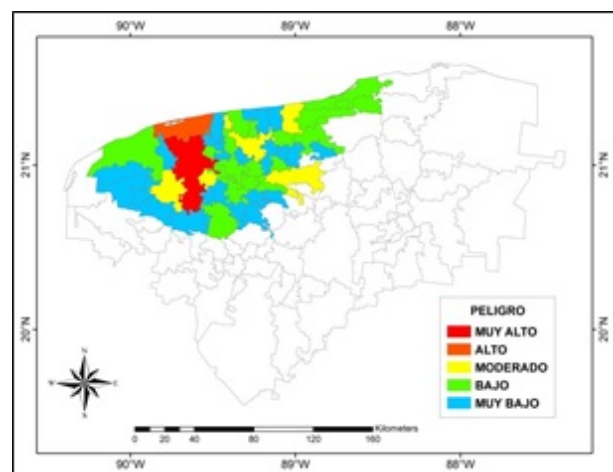


Figura 4. Mapa de peligrosidad.

Figure 4. Hazards map.

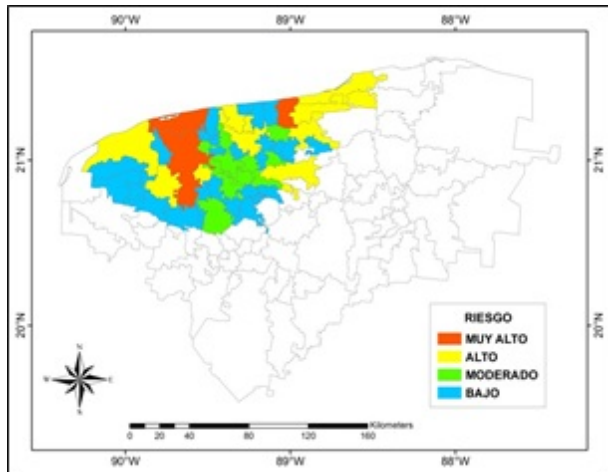


Figura 5. Mapa de riesgos potenciales de contaminación.

Figure 5. Potential risks of contamination map.

Dubey *et al.* (2006) encontraron para un lugar kárstico de la India, tasas de recarga de 170.25 a 190.4 mm (con un valor de 8 para DRASTIC).

Los materiales geológicos encontrados muestran rocas calizas del Terciario y Cuaternario, con permeabilidad alta en la mayor parte de la entidad y de permeabilidad baja media en su área norte, particularmente en la franja costera (INEGI 2002). Por su parte, Steinich y Marín (1996) consideran que la permeabilidad del acuífero kárstico en Yucatán, es dominada por una permeabilidad secundaria presente como fracturas, canales y cavernas. Asimismo, la conductividad hidráulica presentó valores de 1 133.56 a 3 628.8 m d⁻¹, que se encuentran en el rango encontrado por Villasuso *et al.* (2011).

El medio acuífero en la región de estudio presentó un valor homogéneo (10), debido a que desde la superficie hasta los 220 m de profundidad se conforma de estratos casi horizontales de calizas masivas, recristalizadas y de buena permeabilidad (Graniel 2010). Está conformado por un sistema kárstico maduro en el que la disolución de la roca caliza no permite la formación de suelo, por lo que en la planicie, principalmente en la región costera, el espesor del suelo es menor que 10 cm lo que provoca que el agua se infiltre con una velocidad de 23.79

mm min⁻¹ en comparación con 14.10 mm min⁻¹ para la planicie kárstica (Duch 1988, Marín *et al.* 2004, Bolio *et al.* 2011). Dubey *et al.* (2006) asignaron a la variable medio acuífero valores de 10 para el área karstificada y de 6 para las áreas sin karst. Firat y Gültekin *et al.* (2013) fijaron valores al medio acuífero entre 2 y 10 y, al tipo de suelo entre 3 y 10 debido a la heterogeneidad del área de estudio. La topografía expresada como pendiente (en porcentaje) es otro factor que incide en la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación; una pendiente de 0 a 2 % da un valor de 10 en comparación con el valor de 1 para las pendientes topográficas mayores a 18 % (Aller *et al.* 1987). De acuerdo con Firat y Gültekin (2013), el grado de la pendiente determina la escorrentía o la infiltración de los contaminantes.

La pendiente topográfica en la región de estudio es reducida ya que varía de 0 a 0.08 %. Dubey *et al.* (2006) reportaron pendientes entre 0 y 2 % en la mayor parte de la zona de estudio y una pendiente entre 2 y 6 % en la zona restante asignándole valores de 10 y 6, respectivamente. Firat y Gültekin (2013) mencionaron que 27 % de la zona de estudio presentaba una pendiente suave y la mayor parte, una pendiente pronunciada con crestas de hasta 1 050 m por lo que le dió valores entre 1 y 10.

El acuífero se clasificó como karst, correspondiéndole el valor de 10 debido a que éste es libre excepto por una banda paralela a la costa (Marín *et al.* 2004), por lo que el impacto a la zona vadosa corresponde a la propia litología. La zona vadosa en Dubey *et al.* (2006), tuvo valores de 10 y 6 correspondientes a áreas con caliza karstificada y no karstificada. Valores de 7, 8 y 10, para las áreas con materiales porosos, permeables y con menos suelo, dieron como resultado una vulnerabilidad mayor a 140, de manera similar al presente trabajo (Firat y Gültekin 2013).

La conductividad hidráulica en la zona de estudio tiene, de manera general, un valor constante de 96 336 m d⁻¹, que es un valor alto para la determinación de la vulnerabilidad. Dubey *et al.* (2006) y Firat y Gültekin (2013), reportaron valores de 8.77 y 86.4 m d⁻¹, respectivamente. Vías *et al.* (2006) reportaron una conductividad hidráulica de 10⁻² m

d^{-1} en el acuífero en Torremolinos, España. El valor de conductividad encontrado en el presente estudio se debe a que el karst está más desarrollado (presencia de fracturas, fisuras y conductos de disolución) en comparación con las áreas estudiadas por los autores mencionados.

En la clasificación del índice de vulnerabilidad (IV) los valores extremos son 23 y 230, para las vulnerabilidades mínima y máxima, respectivamente. Para la zona de estudio, los índices de vulnerabilidad calculados por medio de la Ecuación 1, estuvieron en el rango de 197 a 220. Al clasificar estos valores con respecto a la metodología de Aller *et al.* (1987), les corresponderían las clasificaciones de "Alta" (IV de 180 a 199) y Muy alta (IV > 200); sin embargo, como uno de los objetivos es mostrar con mayor detalle el mapa de vulnerabilidad, se diferenciaron grados de la clasificación Muy alta con dos clasificaciones: "Muy alta" y "Extrema" con la finalidad de hacer énfasis en aquellos municipios que requieren una mayor protección. Los mayores índices (200 a 220) se encontraron en áreas donde la caliza karstificada está expuesta sobre la superficie y el espesor de suelo es nulo. Dubey *et al.* (2006) clasificaron la vulnerabilidad como baja (< 141), moderada (de 141 a 181) y alta (> 181). Los índices de vulnerabilidad de 162 y 217 son debidos a la heterogeneidad de la zona de estudio (Dubey *et al.* 2006). Vías *et al.* (2005) obtuvieron grados de vulnerabilidad: muy bajo (23 a 63.6), bajo (63.6 a 104.2) y moderado (104.2 a 144.8), debido a la presencia de mármoles altamente fracturados pero pobremente karstificados.

Los resultados encontrados permiten afirmar que el grado de vulnerabilidad está principalmente relacionado con la profundidad al nivel estático ya que este parámetro presentó un rango de valores entre 5 y 10, a diferencia de la recarga neta con valores entre 6 y 9, tipo de suelo ente 9 y 10, y medio acuífero, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica con un valor homogéneo de 10. De esta manera, las vulnerabilidades con valores de 197 a 207 correspondieron a profundidades de 4.66 m a 15.10 m, y la vulnerabilidad de 211 a 220 es el resultado de la proximidad del nivel freático (menor a tres metros). La excepción a este

comportamiento fueron los municipios de Temax y Tepakán que con profundidades de 7.04 y 9.00 m respectivamente, resultaron con vulnerabilidades de 211 como consecuencia de los valores de recarga de 276 y 264, los más altos para la región de estudio.

El nivel de peligrosidad encontrado en los municipios de Mérida y Progreso, se debe a que la infraestructura para el desarrollo en el Estado después del colapso en la producción del henequén, se concentró en la zona conurbada que abarca los municipios de Kanasín, Mérida, Progreso y Umán, siendo los municipios Mérida y Progreso los que presentan mayores grados de desarrollo poblacional, económico e industrial (Gobierno del Estado de Yucatán 2008). Por otro lado, los índices de peligrosidad clasificados como muy bajos en la región de estudio, son el resultado de un menor número (0 a 11) de FPGRP en los municipios considerados. Los niveles muy bajo y bajo de peligrosidad encontrados por Andreo *et al.* (2006) se deben a que los peligros se consideraron inofensivos; asimismo, los peligros se concentraron en áreas habitadas que albergan las actividades industriales y pequeñas granjas. De acuerdo a Minh y Golscheiner (2006), el peligro se concentró en lugares con una alta urbanización y por la presencia de un hospital, una fábrica de té, algunas estaciones de gasolina y agricultura intensiva.

La clasificación del riesgo de contaminación obtenida en la zona de estudio se debió principalmente al nivel de peligrosidad encontrado, ya que la vulnerabilidad fue relativamente homogénea. La combinación de la vulnerabilidad intrínseca y la peligrosidad, dio como resultado que los municipios con un riesgo bajo de contaminación al agua subterránea correspondan a los municipios con una peligrosidad clasificada como muy baja (de cero a 11 FPGRP), a pesar de que la vulnerabilidad en la región de estudio se clasificó como alta, muy alta y extrema. Asimismo, las ciudades de Mérida, Progreso y Dzidzantún presentaron un riesgo de contaminación muy alto derivado de la mayor cantidad de sitios potencialmente generadores de residuos peligrosos (de 176 a 1500) y de sus vulnerabilidades muy alta y extrema.

Los grados de riesgo (alto y muy alto) en-

contrados por Andreo *et al.* (2006) se deben, a diferencia del presente trabajo, al grado de vulnerabilidad encontrada ya que el peligro se clasificó como bajo y muy bajo. En general, el riesgo fue mayor en zonas fuertemente karstificadas y menor en las zonas con un karst menos desarrollado. De acuerdo a Minh y Goldscheider (2006), el riesgo extremo se presentó en pequeñas zonas donde los mayores peligros están localizados cerca de una dolina, y el riesgo no significativo se presentó en la mayor parte de las zonas montañosas donde los conglomerados y areniscas gruesas cubren el acuífero kárstico.

La gestión del recurso hídrico es de importancia para el estado de Yucatán, en especial, para el ámbito geográfico del Semicírculo de cenotes y Zona costera, ya que tienen 69 % de la población del estado de Yucatán; también destaca, la ubicación del área de recarga, transición y descarga de la Zona Metropolitana de Mérida, la cual requiere de soluciones a su problemática hídrica a través de acciones que contribuyan a la conservación y preservación de las aguas subterráneas para garantizar su disponibilidad en el futuro (CCPY 2012). Los resultados del presente estudio, como es el mapa de riesgo de contaminación al agua subterránea, son un avance en el conocimiento para la mejor toma de decisiones, aunque es recomendable que dicho mapa sea validado mediante un procedimiento de muestreo en campo, antes de ser usado como fuente de información definitiva en la toma de decisiones.

LITERATURA CITADA

- Al-Hanbali A, Kondoh A (2008) Groundwater vulnerability assessment and evaluation of human activity impact (HAI) within the Dead Sea groundwater basin, Jordan. *Hydrogeology Journal* 16: 499-510.
- Al-Kuisi M, El-Naqa A, Hammouri N (2006) Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology* 50: 651-667.
- Aller L, Bennet T, Lehr J, Petty R, Hackett G (1987) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. National Water Well Association. Dublin Ohio. EPA, Oklahoma. USA, EPA-600/2-87-035 .
- Andreo B, Goldscheider N, Vadillo I, Vías JM, Neukum C, Sinreich M (2006) Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment* 357: 54-73.
- Aranda-Cirerol N, Herrera-Silveira J, Comín FA (2006) Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68: 445-454.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad intrínseca en la región de estudio quedó establecida con base en dos de las siete variables que evalúa el método DRASTIC, que son la profundidad y la tasa de recarga, debido a que las otras variables mantienen constantes sus valores en la región de estudio.

La vulnerabilidad extrema (211-220) se localizó en los municipios más cercanos a la costa y la vulnerabilidad alta (180-199) en la parte sur de la región de estudio. Los niveles de peligrosidad en función del número de sitios potencialmente generadores de residuos peligrosos se clasificaron como alto para el municipio Progreso (157 FPGRP) y muy alto para Mérida (1882 FPGRP).

El riesgo a la contaminación del acuífero calculado a través de la vulnerabilidad y la peligrosidad tuvo la clasificación de muy alto para los municipios de Mérida, Progreso y Dzidzantún.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Mixto Conacyt-Gobierno del Estado de Yucatán por el financiamiento del proyecto Reserva Hidrogeológica para el Abastecimiento de Agua con Calidad para la Zona Metropolitana de Mérida Yucatán, Clave 108520.

- Auge M (2004) Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* (4): 85-103.
- Ayuntamiento de Mérida (2006) Atlas de Riesgos de Peligros Naturales del municipio de Mérida, Yucatán México. Ayuntamiento de Mérida-Universidad Autónoma de Yucatán . 231 p. <http://www.merida.gob.mx/finanzas/portal/pcivil/contenido/atlas.htm#calidad.pdf>. Fecha de consulta 24 de febrero de 2014.
- Batllore SE, González PJI, Díaz SJ, Febles PJI (2006). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas* 59: 74-92.
- Bauer GP, Gondwe BRN, Charvet G, Marín LE, Rebolledo VM, Merediz AG (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 19: 507-524.
- Cabañas-Vargas DD, Reza-Bacelis G, Sauri-Riancho MR, Méndez-Novelo RI, Bautista F, Manrique-Vergara W, Rodríguez-Angulo E, Balancán-Zapata A, Medina-González R (2010) Inventario de Fuentes Potenciales de Residuos Peligrosos en el Estado de Yucatán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 26(4): 269-277.
- CCPY (2012) Comité Técnico de Aguas Subterráneas para la Zona Metropolitana de Mérida. COTASMEY. Consejo de Cuenca Península de Yucatán. 31 p.
- Civita M y De Maio M (1997). SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia and automatizzazione. Pitagora Editrice, Bologna, Italia. 191 p.
- CONACYT- Gobierno del Estado de Yucatán (2011) Programa Integral de Desarrollo de la Zona Metropolitana de Mérida (PIDEM). México . 50 p. http://www.comey.yucatan.gob.mx/marco_files/l._Antecedentes_PIDEM.pdf. Fecha de consulta 24 de febrero de 2014.
- CONAGUA (2006) Mapa de profundidades de niveles estáticos. Junio 2004. Gerencia Regional de la Península de Yucatán. Subgerencia Regional Técnica.
- CONAGUA (2011) Servicio Meteorológico Nacional . <http://smn.cna.gob.mx>.
- Doerfliger N y F Zwahlen (1998) Practical guide to groundwater vulnerability mapping in karstic regions. Berne, Switzerland: A Swiss Agency for Environment, Forest Landscape Publication. Berne, Switzerland. 58 p.
- DOF-Gobierno del Estado de Yucatán (2013) Suplemento. Decreto Número 117. Decreto que establece el área natural protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes. Lunes 28 de octubre de 2013 .
- Dubey DP, Tiwari RN, Dwivedi U (2006) Evaluation of Pollution Susceptibility of Karst Aquifers of Rewa Town (Madhya Pradesh) Using DRASTIC Approach. *Journal of Environmental Science Engineering* 48(2): 113-118.
- Duch GJ (1988) La conformación territorial del Estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. 204 p.
- ESRI (2008) Environmental Systems Research Institute Inc. ArcGIS 9.3. Getting Started with ArcGIS. Redlands. <http://www.esri.com/software/cityengine/getting-started.htm>. Fecha de consulta: 20 de enero de 2012.
- Firat EA, Gültekin F (2013) DRASTIC-based methodology for assessing groundwater vulnerability in the Gümüşhacıköy and Merzifon basin (Amasya, Turkey). *Earth Science Research Journal*. 17: 33-40.
- Foster S S D y R Hirata R (1988) Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Perú. 88 p.

- Gobierno del Estado de Yucatán (2008) Plan Estatal de Desarrollo 2007-2012. Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, del 31 de enero de 2008. 152 p.
- González-Herrera RA, Sánchez-Pinto I, Gamboa-Vargas J (2002) Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal* 10: 539-552.
- Graniel CE (2010) El Estado. Contexto Físico. En: Durán G. R. y Méndez M. (Eds). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. Mérida, Yucatán. México. pp: 4-27.
- INEGI (2002) Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán. Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática. México. 92 p.
- Jiménez-Madrid A, Carrasco-Cantos F, Martínez-Navarrete (2011) Protection of groundwater intended for human consumption: a proposed methodology for defining safeguard zones.
- Lugo-Hubp J, Aceves-Quesada J, Espinosa-Pereña R (1992) Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Instituto de Geología* 10: 143-150.
- Margane A (2003) Guideline for Groundwater Vulnerability Mapping and Risk Assessment for the Susceptibility of Ground Water Resources to Contamination. Technical Cooperation. Project 1996.2189.7. Damascus, Siria?. 177 p.
- Marín LE, Steinich B, Pacheco J, Escolero OA (2000) Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. *Geofísica Internacional* 39: 359-365.
- Marín SL, Pacheco AJ, Méndez RR (2004) Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: Jiménez B, Marín L (Eds) *El agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. pp: 159-176.
- Minh-Nguyet VT, Goldscheider N (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. *Hydrogeology Journal* 14: 1666-1675.
- Pacheco ÁJ, Calderón RL, Cabrera SA (2004) Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería* 8: 7-16.
- Pérez-Ceballos R, Pacheco-Ávila J, Euán-Ávila J (2008) Evaluación a Escala Regional de la Vulnerabilidad del Agua Subterránea a la Contaminación en Yucatán, México. *Ambiente Ecológico*, ISSN 1668-3358. http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/informesEspeciales/014_InformesEspeciales_EvaluacionEscalaRegionalVulnerabilidadAguaSubterraneaContaminacionYucatanMexico.php3. Fecha de consulta 18 de abril de 2012.
- Perry E, Velazquez-Oliman, Socki R (2003) Hydrogeology of the Yucatan Peninsula. En: Fedick S, Allen M, Jimenez-Osiornio J, Gomez-Pompa A. (Eds). *The Lowland Maya Srea: Three Millennia at the Human - Wildland Interface*. CRC Press. 659 p.
- Rahman A (2008) A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography* 28: 32-53.
- SAGARPA (2010) Diagnóstico del Sector Agropecuario, Pesquero y Rural en el estado de Yucatán . pp. 30-32. <http://www.fao-evaluacion.org.mx/pagina/documentos/sistemas/eval2008/resultados2008/pdf>. Fecha de consulta 24 de febrero de 2014.
- Shahid S (2000) A study of groundwater pollution vulnerability using DRASTIC/GIS, West Bengal, India. *Journal of Environmental Hydrology* 8: 1-9. www.hydroweb.com

- Steinich B, Marín LE (1996) Hydrogeological investigations in northwestern Yucatan, Mexico, using resistivity surveys. *Ground Water* 34: 640-646.
- Valle-Levinson A, Mariño-Tapia I, Enriquez C, Waterhouse AF (2011) Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. *Limnol. Oceanogr* 56: 1213-1224.
- Van-Westen CJ (1997) Hazard, vulnerability and risk analysis. En: ILWIS 2.1 for Windows. The Integrated Land and Water Information System. Applications Guide. ILWIS Department International Institute for Aerospace Survey Earth Sciences Enschede, The Netherlands. 352 p.
- Vías JM, Andreo B, Perles MJ, Carrasco F (2005) A Comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology* 47: 586-595.
- Vías JM, Andreo B, Perles MJ, Carrasco F, Vadillo I, Jiménez P (2006) Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal* 14: 912-925.
- Villasuso PM, Sánchez y Pl, Canul MC, Casares SR, Baldazo EG, Souza CJ (2011) Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan State Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 243-260.
- Vrba J, Zaporozec (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise. Hannover. IAH International Contribution for Hydrogeology 16: 1-131.
- Wang J, He J, Chen H (2012) Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijin Plain, China. *Science of the Total Environment* 432: 216-226.