

Evaluación a Escala Regional de la Vulnerabilidad del Agua Subterránea a la Contaminación en Yucatán, México

Regional-scale Assessment of the Contamination Groundwater Vulnerability in Yucatan, Mexico

Autores:

Rosela Pérez-Ceballos

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
perez@mda.cinvestav.mx

Julia Pacheco-Ávila

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería
pavila@uady.mx

Jorge Euán-Ávila

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
ewan@mda.cinvestav.mx

Resumen. El estado de Yucatán es una región de rocas carbonatadas con fracturas y fisuras por donde se filtra rápidamente el agua al acuífero, haciéndolo vulnerable a la contaminación. La metodología DRASTIC fue utilizada para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a los contaminantes por medio de un índice de vulnerabilidad intrínseca. Para calcular este índice, se estandarizaron siete parámetros hidrogeológicos con valores del 1 al 10 y se multiplicaron por un ponderador. Los mapas fueron elaborados para identificar las áreas que son más susceptibles a la contaminación del agua subterránea. Asimismo, se clasificó una imagen satelital proveniente del sensor ETM+ disponible en el proyecto CIRCA – NASA para obtener las diversas clases de cobertura y de uso de suelo. Esta clasificación se realizó de forma no supervisada y se le aplicó un filtro modal con el objetivo de homogenizar las diversas áreas. Finalmente, se obtuvieron las isolíneas correspondientes a la clasificación del índice DRASTIC y se sobrepusieron a la imagen clasificada de coberturas y uso de suelo, para relacionarlos y proveer un instrumento de ayuda en la toma de decisiones con respecto a las medidas de protección del agua subterránea.

Palabras clave: Vulnerabilidad intrínseca, agua subterránea, percepción remota, uso de suelo.

Abstract. Yucatan State is a carbonate-rock region with fractures and fissures which allow fast infiltration of rainfall to the aquifer making it vulnerable to contamination. DRASTIC methodology was used to determine the groundwater vulnerability to contaminants by means of an index of the intrinsic vulnerability values. In order to calculate this index, the seven hydrogeological parameters were standardized from 1 to 10 and multiplied by specific weights. Maps were generated to identify areas which are more susceptible to groundwater contamination. In addition, a satellite image obtained through the ETM+ sensor from the CIRCA-NASA project was classified to obtain a land cover and use map. This classification was made in a non-supervised way and applying a modal filter to obtain homogeneous areas. Finally, the isolines corresponding to the DRASTIC index were obtained and superimposed to the land cover and uses map to get an instrument which may help to make decisions regarding groundwater protection.

Key words: Intrinsic vulnerability, groundwater, remote sensing, soils use.

Introducción

El estado de Yucatán se localiza al sureste de la República Mexicana y sus coordenadas geográficas extremas son 21°38' y 19°32' de latitud norte y, 87°22' y 90°25' de longitud oeste (WGS84) (POETCY, 2006; García, E. 1981). Es una región conformada por rocas calcáreas y carece de corrientes superficiales debido a la carstificación extensa, la cual da lugar a fracturas y fisuras, por donde se filtra rápidamente el agua. La baja profundidad de los niveles freáticos y el suelo escaso, hacen que los solutos se infiltren al agua subterránea, haciéndola vulnerable a la contaminación (Doerfliger, N. et al. 1999). Es por esto, que la protección del agua subterránea en la región es incuestionable, ya que este recurso hídrico es la principal fuente de agua para uso y consumo humano. Sin embargo, es frecuente no tomar en cuenta que para una administración ambientalmente segura, la mejor práctica es la protección a través de la prevención, porque las técnicas de remediación de un acuífero suelen ser procesos muy largos, costosos y a veces prácticamente irrealizables. A nivel mundial, se sugiere la utilización de cartografía sobre la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, como un instrumento en las necesidades de protección de la calidad de las aguas subterráneas (Valcarce, O. et al. 2001). La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca de los sistemas de agua subterránea, que depende de la sensibilidad de éstos a impactos humanos y naturales. Es función de factores hidrogeológicos que determinan la inaccesibilidad de la zona saturada a los contaminantes, la capacidad de atenuación de la misma y los estratos por encima de ella. Las propiedades del medio varían de un punto a otro, lo que hace variable el potencial de un acuífero para protegerse, razón por la que algunas áreas son más vulnerables que otras (Bessouat, C. et al. 2001). Por consiguiente, la vulnerabilidad se define como el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), valores que han sido propuestos para la calidad del agua de consumo humano (Foster, S. e Hirata, R. 1991). Se distinguen dos tipos de vulnerabilidad del agua subterránea, a) la vulnerabilidad intrínseca, que es un término usado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a los contaminantes generados por actividades humanas, y que toma en cuenta las características hidrogeológicas de un área, pero es independiente de la naturaleza de los contaminantes; y b) la vulnerabilidad específica, la cual es el término utilizado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a un

contaminante particular o a un grupo de contaminantes, y que toma en cuenta las propiedades de los contaminantes y su relación con los diversos componentes de la vulnerabilidad intrínseca (Morrell, I. y Tuñón, J. 2001).

El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice y para determinarlo existen diversas metodologías como son: AVI, GOD y DRASTIC, entre otras. Este último índice, es un esquema de clasificación numérica desarrollado para evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio dado. Considerando las características de la zona y los datos disponibles, esta metodología es empleada en este trabajo.

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat, C. et al. 2001). Para elaborar estos mapas se utilizó el software TNT mips, que es una herramienta geoespacial con criterios geoestadísticos diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de cartografía digital y bases de datos con referencia espacial de una manera simultánea y automatizada. Este software, además de ser un eficiente gestor de bases de datos dispone de excepcionales capacidades gráficas y de análisis espacial. Todo ello resulta de gran utilidad para llevar a cabo la tarea de calibración y verificación de los modelos que permiten estudiar un sistema de agua subterránea. En general, los mapas de vulnerabilidad deben ser vistos como una de las herramientas principales para el manejo del ambiente y pueden ser usados con tres propósitos fundamentales (Báez, A. 2001): a) en los procesos de toma de decisiones concernientes a la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos, b) en la identificación de áreas susceptibles a la contaminación para decidir sobre las investigaciones y redes de monitoreo necesarias y, c) en la elaboración de los planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos para evitar o disminuir la contaminación del agua subterránea, insistiendo en que los acuíferos forman parte de un sistema ecológico interconectado que está siendo afectado por las actividades humanas.

Identificar las actividades humanas con efectos potenciales sobre el agua mediante mapas de uso del suelo, es fundamental en la conservación tanto del mismo suelo como de la calidad del agua subterránea, es por esto, que la falta de protección del suelo, puede tener consecuencias irreparables en la calidad del agua subterránea.

De manera general, la agricultura es una de las actividades que ha aumentado significativamente durante los últimos 30 años, incrementando potencialmente la cantidad de los contaminantes de origen agrícola en las aguas subterráneas. Un aspecto principal de la zona agrícola es la disposición de nutrientes, principalmente el nitrógeno y el fósforo, los cuales son identificados como contaminantes del agua en las regiones agrícolas (González, L. et al. 2003). De las zonas urbanas se identifican fuentes de contaminación acuífera, potenciales y activas. El tipo de industria es también un elemento importante en la diversidad de fuentes de contaminación, inclusive ciudades con actividad turística, servicios y centros comerciales son fuentes de contaminación. Los servicios urbanos pueden convertirse en fuentes de contaminación: los sistemas de drenaje de aguas residuales presentan, en la mayoría de los casos, fugas debido a la calidad de los materiales; la disposición final de residuos, tanto sólidos como líquidos, siempre ha sido un problema y los cementerios han sido considerados en últimas fechas como fuentes contaminantes. Todos estos usos del suelo dan origen a diversos contaminantes, los que potencialmente pueden llegar y afectar la calidad del agua subterránea (Rodríguez, C. y Rodríguez, V. 2004).

Por lo anterior y debido a que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento en el estado de Yucatán, es necesaria la aplicación de herramientas geoespaciales y de Sistemas de Información Geográfico (SIG), con el fin de aprovechar las bases de datos con atributos geográficos de una manera integral y sistemática de tal forma que ayuden en la toma de decisiones con respecto a la protección de este recurso. Para contribuir a ello, se plantearon dos objetivos para: 1) el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea, evaluada mediante la metodología DRASTIC, y 2) la clasificación del uso de suelo en el estado de Yucatán y presentarlo junto al índice DRASTIC en un solo mapa.

Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados, se instrumentó el índice DRASTIC y la determinación de los usos del suelo. El índice tiene como base el manejo de 7 variables hidrogeológicas: D = profundidad al agua subterránea, R = recarga neta, A = medio acuífero, S = tipo de suelo, T = topografía, I = impacto a la zona vadosa, C = conductividad hidráulica del acuífero (Armienta, H. y Rodríguez, C. 2001; Canter, L. 1997; Espinoza, C. y Ramírez, J. 2002; Martínez, M. et al. 1998; Vrba, J. y Zoporezec, A. 1994). Este índice DRASTIC, es la sumatoria de cada una de las variables estandarizadas (r), multiplicada por la puntuación de peso como se indica a continuación:

$$\text{Índice DRASTIC} = 5*Dr + 4*Rr + 3*Ar + 2*Sr + Tr + 5*Ir + 3*Cr \quad (1)$$

Donde:

Dr = Tasa asignada a la profundidad al nivel freático

Rr = Tasa asignada para los rangos de la recarga del acuífero

Ar = Tasa asignada al medio acuífero

Sr = Tasa asignada para el tipo de suelo

Tr = Tasa asignada a la pendiente topográfica

Ir = Tasa asignada a la zona vadosa

Cr = Tasa asignada para los rangos de conductividad hidráulica

Las constantes constituyen pesos que ponderan la importancia del factor y todos los parámetros son estandarizados entre 1-10.

Para el desarrollo del índice y del mapa de cobertura y usos del suelo, se requirieron cuatro etapas: 1) Realización y estandarización de los mapas de cada una de las variables, 2) Generación y clasificación del mapa del índice de la vulnerabilidad intrínseca para el estado de Yucatán, 3) Clasificación del estado de Yucatán de acuerdo al uso de suelo y 4) Integración del mapa del índice de vulnerabilidad y del uso de suelo.

De manera particular se desarrollaron los siguientes procedimientos para cada una de las etapas mencionadas:

1. Realización y estandarización de los mapas de cada una de las variables.

Para la aplicación de la metodología DRASTIC se obtuvieron los datos de profundidad al nivel freático, el medio acuífero, el tipo de suelo, el impacto a la zona vadosa de los bancos de información del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 2002). La recarga neta y la conductividad hidráulica, se tomaron de González, H. (1994), y la pendiente topográfica de INEGI (1994).

Para transformar la información a formatos digitales se realizaron los pasos siguientes: a) escaneo e importación de datos al software TNTmips, b) georeferencia al sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator, en la zona 16 N y Datum World Geodetic System 1984, y c) interpolación por medios geoestadísticos y la estandarización de los valores en un intervalo del 1 al 10 para su posterior aplicación.

2. Generación y clasificación los mapas del índice de la vulnerabilidad intrínseca para el estado de Yucatán

Para generar el índice de vulnerabilidad intrínseca, las capas corregistradas fueron multiplicadas por los factores de ponderación establecidos en la metodología y se realizó la suma algebraica de las siete capas, donde el producto final fue el índice de vulnerabilidad intrínseca en valores reales. Este índice de vulnerabilidad se clasificó de acuerdo a la Tabla 1 propuesta por la metodología DRASTIC. Estos rangos permitieron distinguir la distribución espacial de las diversas clases de vulnerabilidad para el estado de Yucatán.

Tabla 1. Clasificación de la vulnerabilidad intrínseca

Rangos del índice de vulnerabilidad	Tipo de clases
<100	Vulnerabilidad insignificante
101-119	Vulnerabilidad muy baja
120-139	Vulnerabilidad baja
140-159	Vulnerabilidad moderada
160-179	Vulnerabilidad alta
180-199	Vulnerabilidad muy alta
>200	Vulnerabilidad extrema

Fuente: Pérez, C. y Pacheco, A. 2004.

3. Clasificación del estado de Yucatán de acuerdo al uso de suelo.

Para la clasificación de las coberturas y de los usos de suelo se utilizó un mosaico proveniente del sensor Landsat ETM+, bandas 7, 4 y 2, con una resolución espacial de 14.25 m, con un ancho de 23976 píxeles por una altura de 18142 píxeles. Este mosaico se distribuye con una georeferencia en el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), perteneciente a zona 16 N y datum World Geodetic System 1984. Las imágenes del mosaico fueron adquiridas alrededor del año 2000 (Earth Satellite Corporation, 2004). Este mosaico se clasificó de forma no supervisada y se le asignaron a las clases un sistema de coberturas y de uso de suelo: selva mediana, selva baja, pastizal, zona urbana, y humedales costeros. Para homogenizar y reducir la variabilidad de las clases se aplicó un filtro modal.

4. Integración del mapa de índice de vulnerabilidad y de uso de suelo.

Para obtener este mapa se obtuvieron las isolíneas de la clasificación de vulnerabilidad intrínseca de acuerdo a la Tabla 1 y se superpusieron a los raster de clasificación de coberturas y de uso de suelo.

Resultados y discusión

Para aplicar la metodología DRASTIC se utilizaron los siete parámetros establecidos, de los cuales el medio acuífero y el impacto a la zona vadosa se consideraron como caliza cárstica para ambas variables, que resultan ser constantes para todo el estado de Yucatán (Figura 1).

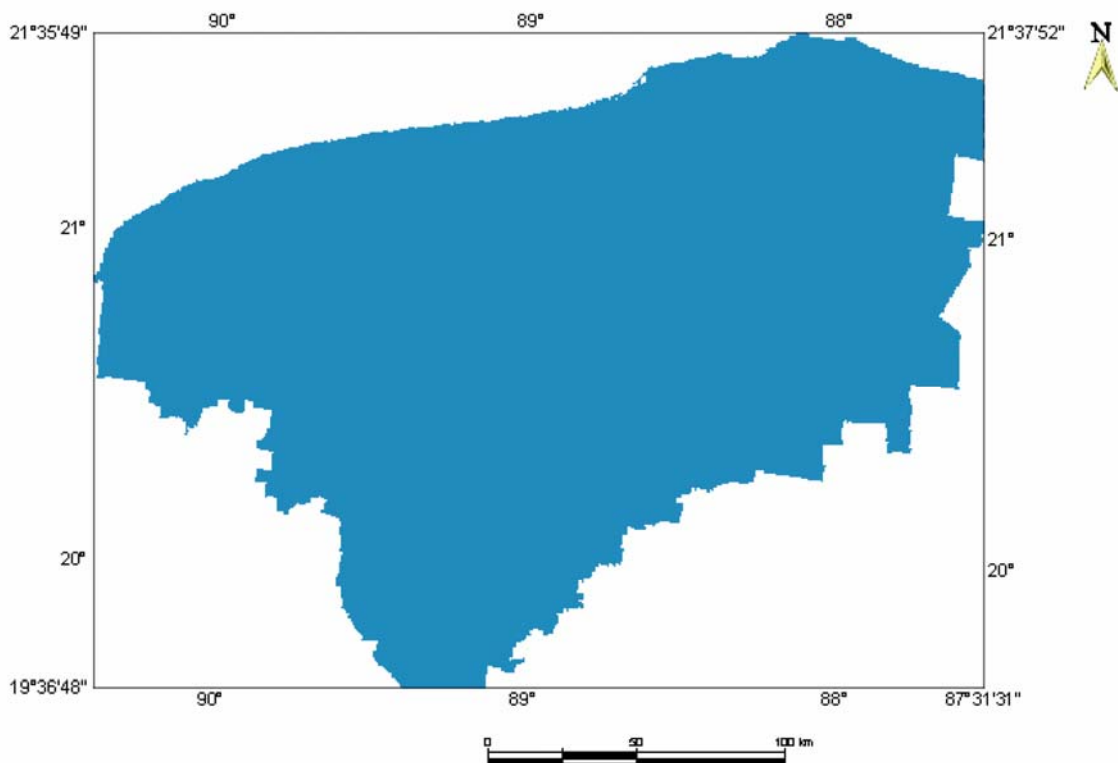


Figura 1. Distribución espacial para el medio acuífero y el impacto a la zona vadosa

La profundidad al nivel freático varió de 0 a 144 m, este raster se realizó mediante la opción Surface Modeling utilizando el método de Minimum Curvature (Figura 2).

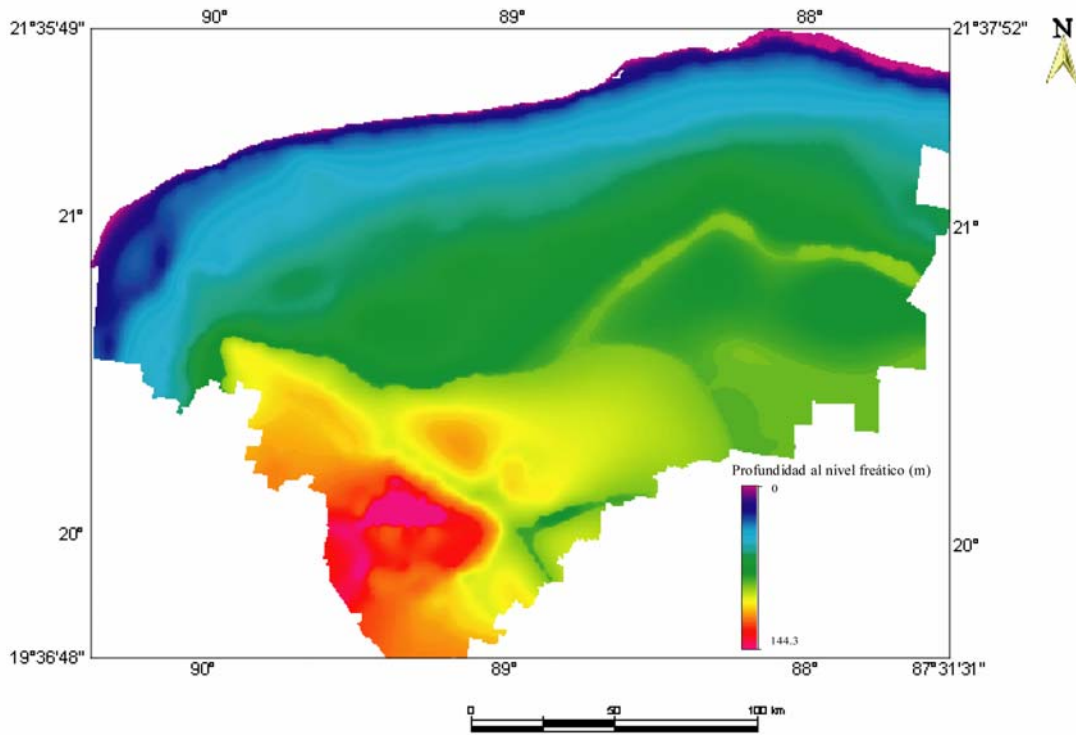


Figura 2. Distribución espacial para la profundidad al nivel freático

El raster de recarga se realizó digitalizando las isolíneas de esta variable, y se encontró que para el estado de Yucatán la recarga varió de 110 a 300 mm/ año (Figura 3).

Con respecto al tipo de suelo se pueden distinguir las clasificaciones de: ausente, arena y agregados arcillosos, y el mapa fue realizado mediante la digitalización de los polígonos (Figura 4).

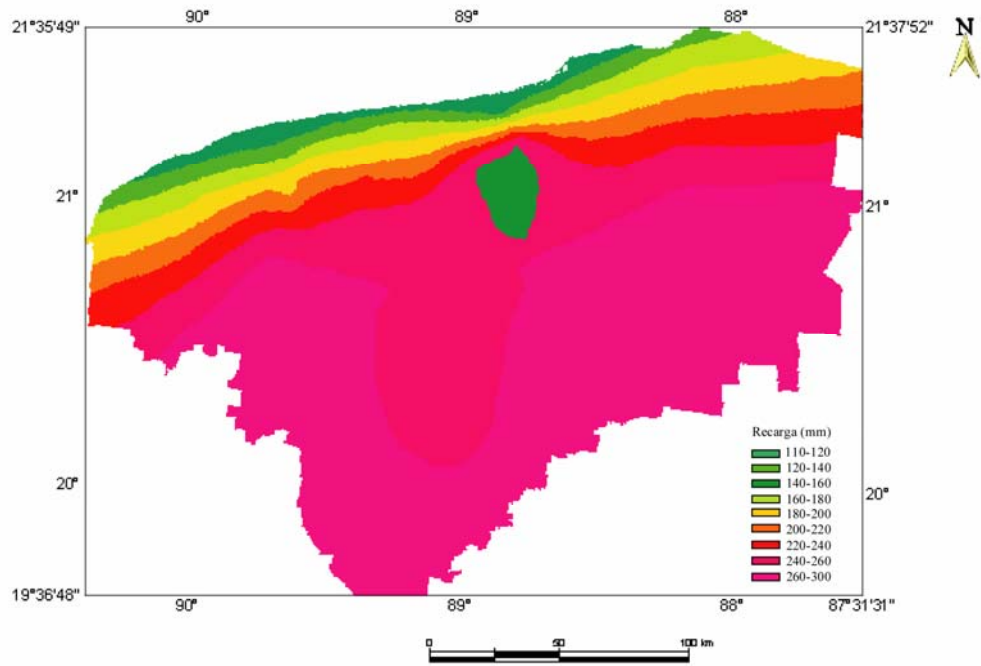


Figura 3. Distribución espacial para la recarga neta

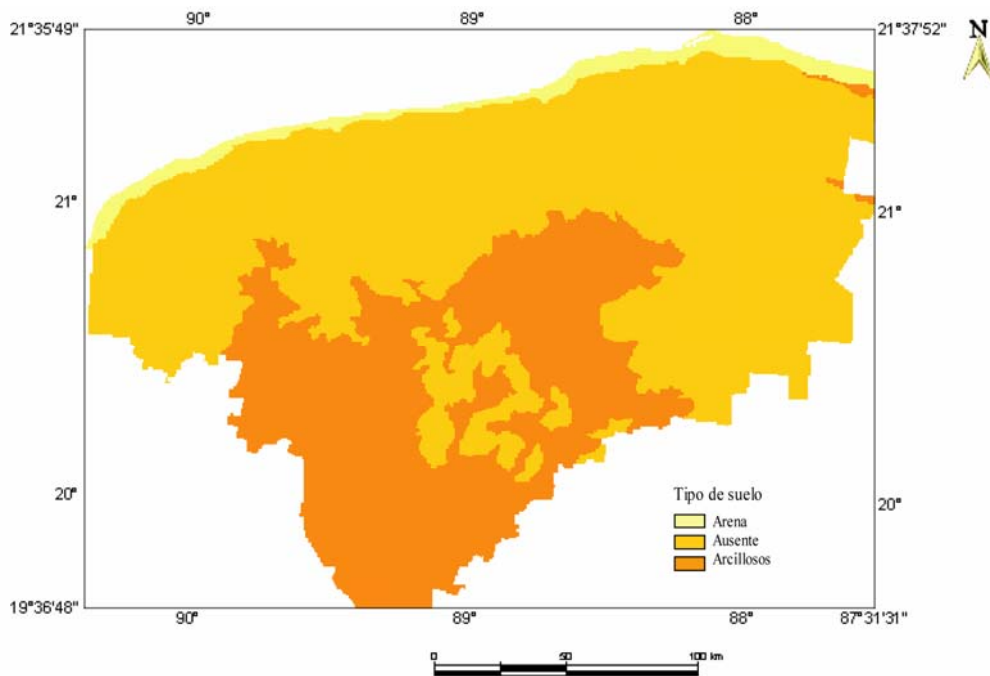


Figura 4. Distribución espacial para el tipo de suelo

La pendiente topográfica se tomó del Modelo de Altimetría del Territorio Nacional del INEGI 1994 (Figura 5) y se encontró en un intervalo entre 0 y 7.2 %.

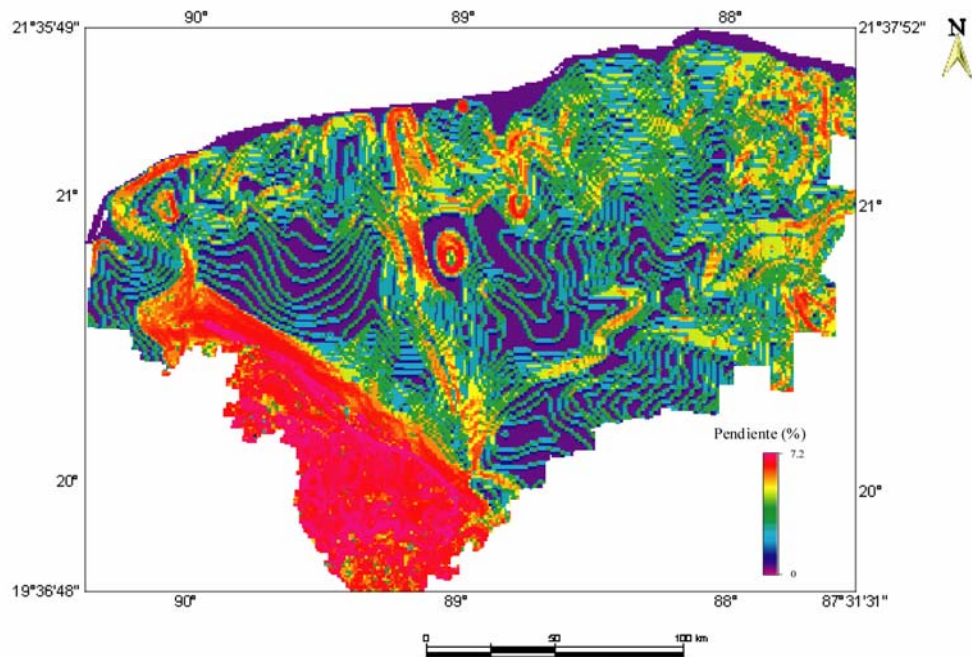


Figura 5. Distribución espacial para la pendiente topográfica

Por otro lado, para la conductividad hidráulica, se consideraron dos valores para todo el estado, 1.115 y 5.5×10^{-3} m/s, ya que corresponden a los valores extremos de acuerdo a las características hidrogeológicas del estado; esto dio como resultado, dos polígonos (Figura 6).

La estandarización de las variables entre el 1 y el 10, se realizó de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en la metodología DRASTIC, por ejemplo: el raster de profundidad al nivel freático, el de recarga, el de topografía y el de conductividad hidráulica se estandarizaron aplicando las ecuaciones matemáticas de la 2 a la 5, estas ecuaciones se obtuvieron del comportamiento de las variables establecida en la metodología DRASTIC (Tabla 2); mientras que para los rasters de tipo de suelo, medio acuífero y zona vadosa únicamente se les asignó un valor, debido a que son variables de tipo categórico. Finalmente se realizó la sumatoria de cada una de las variables, previamente multiplicada por su peso, establecido en la metodología y cuyo rango varía de 1 a 5.

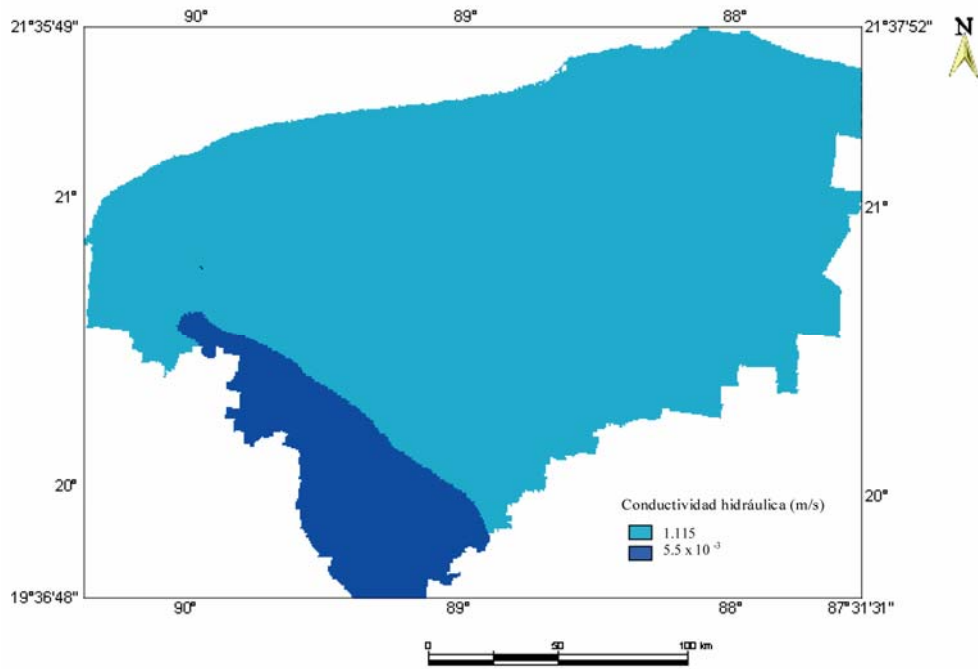


Figura 6. Distribución espacial para la conductividad hidráulica

Tabla 2. Ecuaciones matemáticas para la estandarización de los rasters

Parámetros	Ecuación Matemática
Profundidad al nivel freático	$y = 9.9083e^{-0.0741} x$ (2)
Recarga	$y = -0.0001x^2 + 0.0587x + 0.7993$ (3)
Topografía	$y = 0.0212x^2 - 0.8854x + 10.172$ (4)
Conductividad hidráulica	$y = -1E+07x^2 + 18956x + 1.1451$ (5)

Los resultados mostraron que el índice de vulnerabilidad varió entre 157.6 a 207.8 (Figura 7); estos valores del índice se clasificaron de acuerdo a la Tabla 1, dando como resultado 4 clases: moderada, alta, muy alta y extrema (Figura 8). Asimismo, los resultados indicaron que solamente un 0.2% se encuentra en la categoría de moderada, mientras que el 61% es asignado a la categoría alta, el 33.8% a la categoría muy alta y el 5% se encuentra en la categoría extrema.

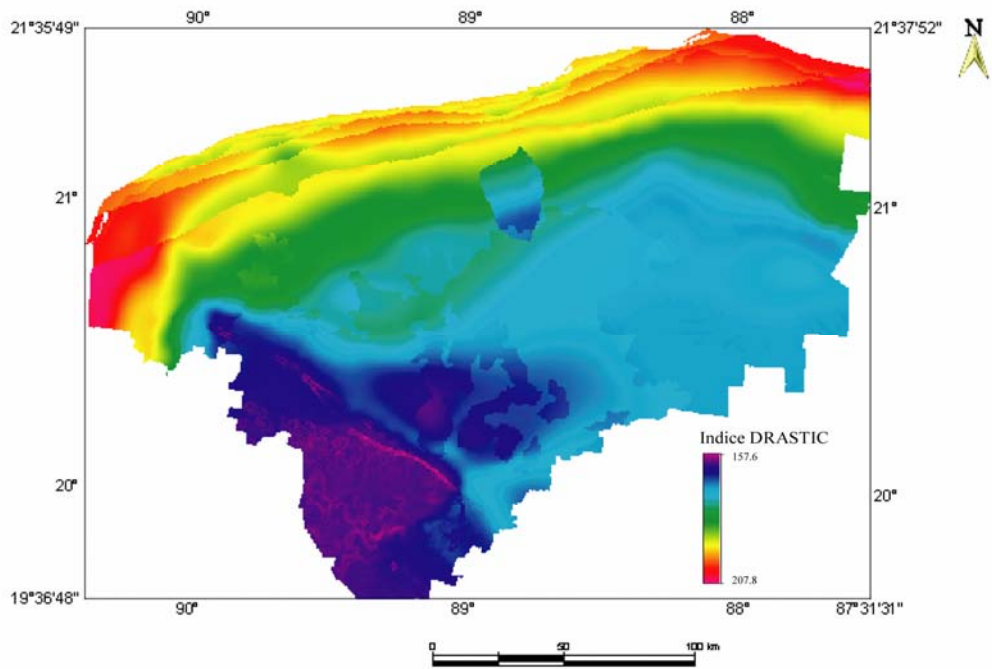


Figura 7. Distribución espacial del Índice de vulnerabilidad intrínseca

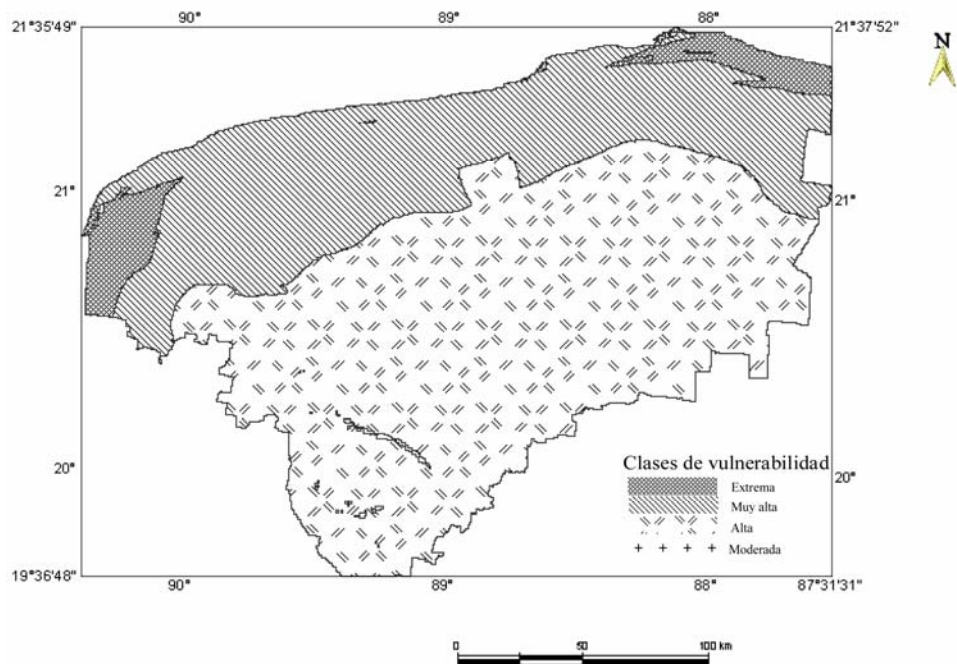


Figura 8. Distribución espacial de la clasificación del Índice de vulnerabilidad intrínseca. Como resultado de la clasificación de la imagen satelital (Figura 9), se pudieron identificar 5 clases de coberturas: pastizal, selva baja, selva media, humedales y zona urbana (Figura 10).

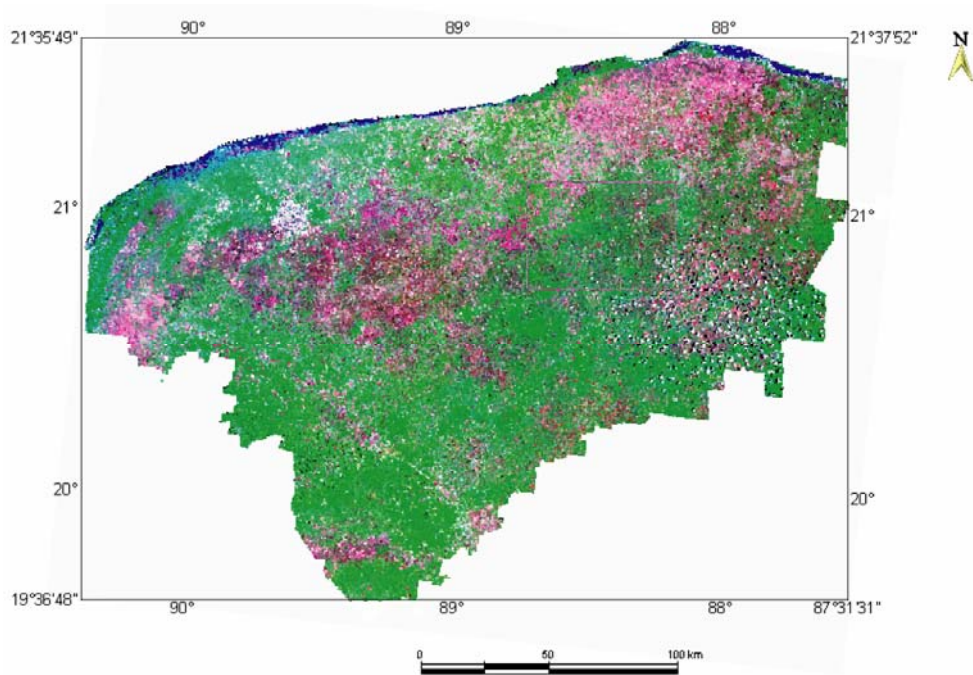


Figura 9. Imagen satelital del estado de Yucatán utilizada para la clasificación de las coberturas del suelo

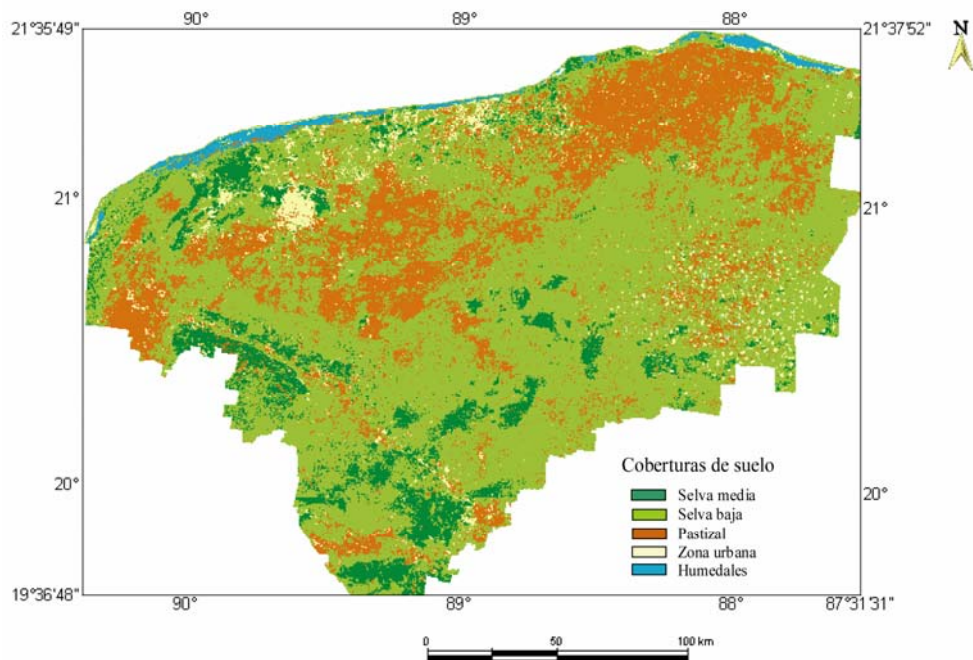


Figura 10. Cobertura de suelo en el estado de Yucatán

La cobertura dominante es la selva baja con el 62.9 %, posteriormente el pastizal con el 23.1%, la selva baja con el 8.9%, las áreas urbanas con el 3.8% y los humedales con el 1.3%.

Finalmente, se superpusieron los mapas del índice de vulnerabilidad y la clasificación de coberturas y uso de suelo, para relacionar los niveles de vulnerabilidad con las clases de usos de suelo y visualizar de manera conjunta la distribución espacial de la vulnerabilidad intrínseca y, las coberturas y usos del suelo (Figura 11). Este mapa que integra el índice de vulnerabilidad y, las coberturas y uso de suelo, muestra que la actividad ganadera asociada a los pastizales se ubica en zonas de vulnerabilidad extrema y muy alta, así como algunas de las principales zonas urbanas costeras del Estado. Por otro lado, las poblaciones rurales y la agricultura en las zonas del sur del Estado, asociadas a la clase de selva media y baja se encuentran en la categoría de alta vulnerabilidad.

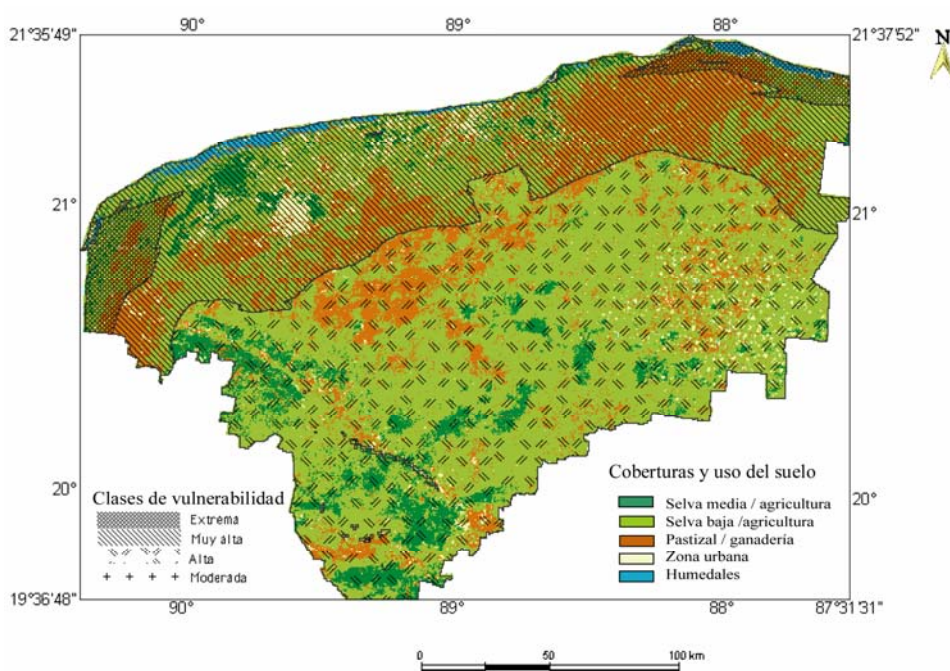


Figura 11. Mapa del índice de vulnerabilidad con las coberturas y usos de suelo en el estado de Yucatán

Conclusiones

Los datos y las herramientas geoespaciales disponibles permitieron establecer un modelo espacial de la vulnerabilidad del acuífero en Yucatán, empleado la metodología DRASTIC. Los valores obtenidos mediante esta metodología variaron de 158 hasta 208 puntos, estos valores indican que la zona se encuentra en la clasificación de vulnerabilidad de moderada a extrema, ya que no se encontraron valores en las clases insignificante, muy baja y baja. Estos valores permitieron observar que la mayor vulnerabilidad (extrema) a la contaminación del agua subterránea se presentó en los extremos Este y Oeste de la zona

costera, correspondiente al 5% de la extensión de la zona de estudio y la menor vulnerabilidad (moderada) se presentó en la zona de cerros, cubriendo el 0.2 %. Es de importancia señalar que el 94.8% restante, se encontró en las clases alta y muy alta, por lo que casi en su totalidad, el estado de Yucatán presenta la característica altamente vulnerable.

Por lo que respecta a las coberturas y usos de suelo, se encontró que la que mayor extensión fue clasificada como selva baja y agricultura con el 62.9% y la menor extensión con el 1.3% a los humedales.

La integración de ambos mapas nos muestra la necesidad de intervención inmediata en zonas ganaderas de extrema vulnerabilidad y de zonas urbanas de alta vulnerabilidad, como la ciudad de Mérida. El resultado de este trabajo es un instrumento que puede ayudar en la toma de decisiones con respecto a la prevención de la contaminación y a la protección del agua subterránea.

Agradecimientos

J. Pacheco y R. Pérez, agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado mediante el proyecto YUC-2002-C01-8721 y a través del Programa de Becas para estudios de doctorado, Clave:174819, respectivamente.

Referencias

ARMIENTA, H.M. Y RODRÍGUEZ, C.R. 2001. Contaminación y vulnerabilidad acuífera (Notas del curso taller), UNAM.

BAEZ, A. 2001. Validación de mapas de vulnerabilidad en medios urbanos, presentado en el taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología., 9 de mayo de 2002 [<http://tierra.rediris.es/hidrored/>].

BESSOUAT, C., CASTAGNINO, G., DE LOS SANTOS J., ROBANO M. 2001. Vulnerabilidad de un acuífero somero en medio poroso, presentado en el taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología., 9 de mayo de 2002 [<http://tierra.rediris.es/hidrored/>].

- CANTER, L.W.** 1997. Nitrates in groundwater. CRC Press Inc. Lewis Publisher, Boca Ratón, Florida, USA.
- DOERFLIGER, N., JEANNIN, P., ZWAHLEN, F.** 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), Environmental Geology 39 (2), December 1999, Springer Verlag., pp. 165-176.
- ESPINOZA, C. Y RAMÍREZ, J.** 2002. Análisis comparativo de técnicas de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos. Aplicación a la zona norte de la ciudad de Santiago, presentado en II Seminario-taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación: caracterización y evaluación., 2 de mayo de 2003.
- EARTH SATELLITE CORPORATION.** 2004. Landsat GeoCover 2000/ETM+; Edition Mosaics; Tile N-16-20. Sioux Falls, South Dakota: USGS.
- FOSTER, S. E HIRATA, R.** 1991. Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- GARCÍA, E.** 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3ª. Edición, México, D.F.
- GÓNZALEZ, H. R.** 1992. Evolution of Grounwater Contamination in the Yucatán Karstic Aquifer. Tesis de Maestría. University of Waterloo, Canadá.
- GONZÁLEZ, L. N., GONZÁLEZ, A., MARDONES, M.** 2003. Evaluación de la vulnerabilidad natural del acuífero freático en la cuenca del río Laja, centro-sur de Chile., 30 de noviembre de 2004. [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716-02082003000100001&script=sci_arttext&lng=es].
- INEGI.** 1994. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Geomodelos de Altimetría del Territorio Nacional (GEMA). Aguascalientes, Ags., Mex
- INEGI.** 2002. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Estudio Hidrológico del estado de Yucatán. Gobierno del estado de Yucatán. México.
- MARTÍNEZ, M., DELGADO, P., FABREGAT, V.** 1998. Aplicación el método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. Valencia. Jornadas sobre las aguas subterráneas: un problema pendiente. pp. 413-420.
- MORELL, I., TUÑÓN, J.** 2001. Vulnerabilidad de acuíferos costeros en el área Mediterránea, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología, Toluca, México.

- PÉREZ, C.R. Y PACHECO, A.J.** 2004. Vulnerabilidad al agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Ingeniería revista académica, vol 8, numero 001. Universidad Autónoma de Yucatán – Mérida, México., pp. 33-42.
- POETCY.** 2006. Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. Secretaría de Ecología.
- RODRÍGUEZ, C. Y RODRÍGUEZ, V.** 2004. Los mapas de riesgo de contaminación acuífera en zonas urbanas. IV seminario-taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: protección de la calidad del agua., 30 de noviembre de 2004. [<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/lima/08rodriguez.html>].
- VALCARCE, O.R., CARRASCO, P.H., JIMÉNEZ, H.S.** 2001. Aplicación de la metodología GOD modificada, para el estudio de la vulnerabilidad del acuífero cárstico cuenca sur de la Habana, presentado en el taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación. Metodología, Toluca, México.
- VRBA, J. Y ZOPOREZEC, A.** 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heinz Heise.

- Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida.

Apartado Postal 73 Cordemex, C.P. 97310 Mérida, Yucatán, México.

- Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería.

Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte.