

# Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I, en la ciudad de Mérida, Yucatán, México

Julia Pacheco Ávila<sup>1</sup>, Lorena Calderón Rocher<sup>2</sup>, Armando Cabrera Sansores

## RESUMEN

La principal fuente de abastecimiento de agua para la Península de Yucatán, es la subterránea y el principal campo de pozos para el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Mérida, es la planta Mérida I, localizada al sur de la ciudad con un total de 25 pozos de extracción con una profundidad aproximada de 40 metros. Las características cársticas de la Península 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. En los alrededores de la planta Mérida I, el uso del suelo es principalmente agrícola y pecuario, por lo que el uso no controlado de agroquímicos y la disposición inadecuada de los desechos pecuarios son los potenciales orígenes de la contaminación del agua subterránea.

Como parámetros representativos de la contaminación, se consideraron los nitratos y los coliformes fecales; también, se determinaron las direcciones preferenciales del flujo subterráneo en el área de estudio y las áreas de influencia de los pozos de la planta Mérida I, calculadas por medio del programa Wellhead Protection Area, para un período de un año. La delimitación de una zona de protección para el campo de pozos de extracción de la planta Mérida I, tiene la función de preservar la calidad del agua subterránea que se utiliza para consumo humano y la delimitación de esta zona aunada a un Programa de manejo, se sugiere como una opción para proteger la principal fuente de abastecimiento para la ciudad de Mérida, Yucatán.

**Palabras clave:** protección de acuíferos, contaminación del agua subterránea, nitratos, bacterias fecales, karst

## ABSTRACT

Groundwater is the only source of potable water in Yucatan Peninsula. The main field wells for Merida Yucatan City, is located in the southern part of the city, it has 25 deep wells which are approximately 40 m deep. This field wells is named Merida I. The karstic characteristics of the Yucatan Peninsula, are the responsible for the vulnerable conditions of the aquifer, due to presence of fractures, caverns and dissolution channels that permit the rapid infiltration of rainwater and all contaminants over the land surface. Around Merida I, the land use is mainly for agricultural and animal farm activities. In this activities, is common the use of agrochemicals and the inadequate disposal of solid and liquid wastes, which can be two important sources for groundwater contamination.

Nitrate and fecal coliforms were considered representative of contaminated groundwater. The preferential groundwater flow in the study area was determined.

Wellhead Protection Areas Program from the Environmental Protection Agency was used to determine the delimitation areas for Merida I field wells. These areas were calculated for 1 year and for the maximum and

<sup>1</sup> Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UADY. E-mail: pavila@tunku.uady.mx

<sup>2</sup> Estudiante de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la FIUADY

<sup>3</sup> Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Ingeniería Ambiental de la FIUADY

minimum values for hydraulic gradient, in order to know the worst case for public safety, the hydrogeological zone reserve delimitation is very important in order to preserve the groundwater quality for human use and consumption. The regulations of a Management Plan for this zone would protect the only source of potable water for Merida Yucatan.

## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Mérida, cuenta con un sistema de abastecimiento de agua potable totalmente dependiente del agua subterránea, debido a la falta de corrientes superficiales. Sin tener fuentes alternativas, la pérdida de pozos de abastecimiento por la contaminación, podría acarrear un impacto inmediato a la economía y bienestar social; además de que, los contaminantes no detectados a tiempo, representan un problema de salud pública.

El agua subterránea que sirve de abastecimiento para la ciudad de Mérida, se extrae de diferentes campos de pozos que se encuentran alrededor y dentro de los límites de la ciudad. Actualmente, la ciudad dispone para su abastecimiento de tres campos de pozos, la Mérida I, la Mérida II y la Mérida III, además de algunos otros pozos individuales localizados en la periferia de la ciudad. La principal zona de extracción del agua subterránea con fines de abastecimiento es la planta Mérida I, de la cual se extraen 42.3 Mm<sup>3</sup> al año, cantidad que representa el 47.8% de la extracción total (BGS, FIUADY, CNA, 1995).

Miller (1996), realizó un trabajo comparativo acerca de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea y su protección, entre los acuíferos de Florida y Yucatán. Los resultados de su estudio, los mostró por medio de la aplicación del modelo semi-analítico de computadora denominado Wellhead Protection Area (WHPA, 1993). Asimismo, se han propuesto algunos planes de acción para establecer una zona de reserva hidrogeológica para el acuífero de Yucatán, basados en las Leyes y Regulaciones de Aguas Nacionales. En este trabajo, se menciona que la Comisión Nacional del Agua, establecida en 1989 como el organismo federal responsable de la administración del uso del agua en México, divide al país en 23 Consejos de Cuencas, de las cuales, la denominada Cuenca XXIII correspondiente a la Península de Yucatán, es considerada como altamente vulnerable y su manejo debe de ser cuidadoso (CNA, 1997).

El objetivo de este trabajo, es la delimitación de una zona de reserva hidrogeológica en el principal campo de pozos de extracción para el agua potable

abastecida en la ciudad de Mérida (Mérida I), mediante la utilización de los nitratos y los organismos coliformes fecales como indicadores de contaminación y de las direcciones preferenciales del agua subterránea en el área de estudio.

## METODOLOGÍA

### Determinación del área de estudio

Se seleccionó un área de aproximadamente 10 kilómetros alrededor de la planta Mérida I, la cual abastece a la mayor parte de la población de la ciudad de Mérida, Yucatán. En esta área, se ubicaron mediante reconocimientos de campo 42 pozos entre someros y profundos (Figura 1), en los cuales, se llevó a cabo el muestreo general, en el que se midieron las profundidades al nivel freático y las características de calidad química y bacteriológica; considerando para la primera, la concentración de los nitratos y para la segunda, el número de organismos coliformes fecales.

### Selección de pozos para los muestreos

A partir de la realización del muestreo general, se descartaron algunos pozos debido principalmente a la dificultad de acceso, al abandono y a la presencia de agentes externos, tales como basura y aceite.

### Determinación de la dirección preferencial del flujo subterráneo

Se llevó a cabo la nivelación topográfica del área de estudio mediante un distanciómetro electrónico, con mediciones de un error máximo de 3 mm, utilizando como bancos de nivel los más cercanos al área, los cuales fueron proporcionados por el INEGI. Asimismo, se realizaron mediciones de las profundidades al nivel freático con un piezómetro electrónico, indicando si la medición fue hecha en régimen estático o dinámico. Para el caso de los pozos de extracción de la planta Mérida I, cabe mencionar que no en todos los pozos se hicieron estas mediciones, debido a que no se tenían los pozos de muestreo piezométrico o a la presencia de aceite, y desde luego, todos los niveles medidos fueron dinámicos.

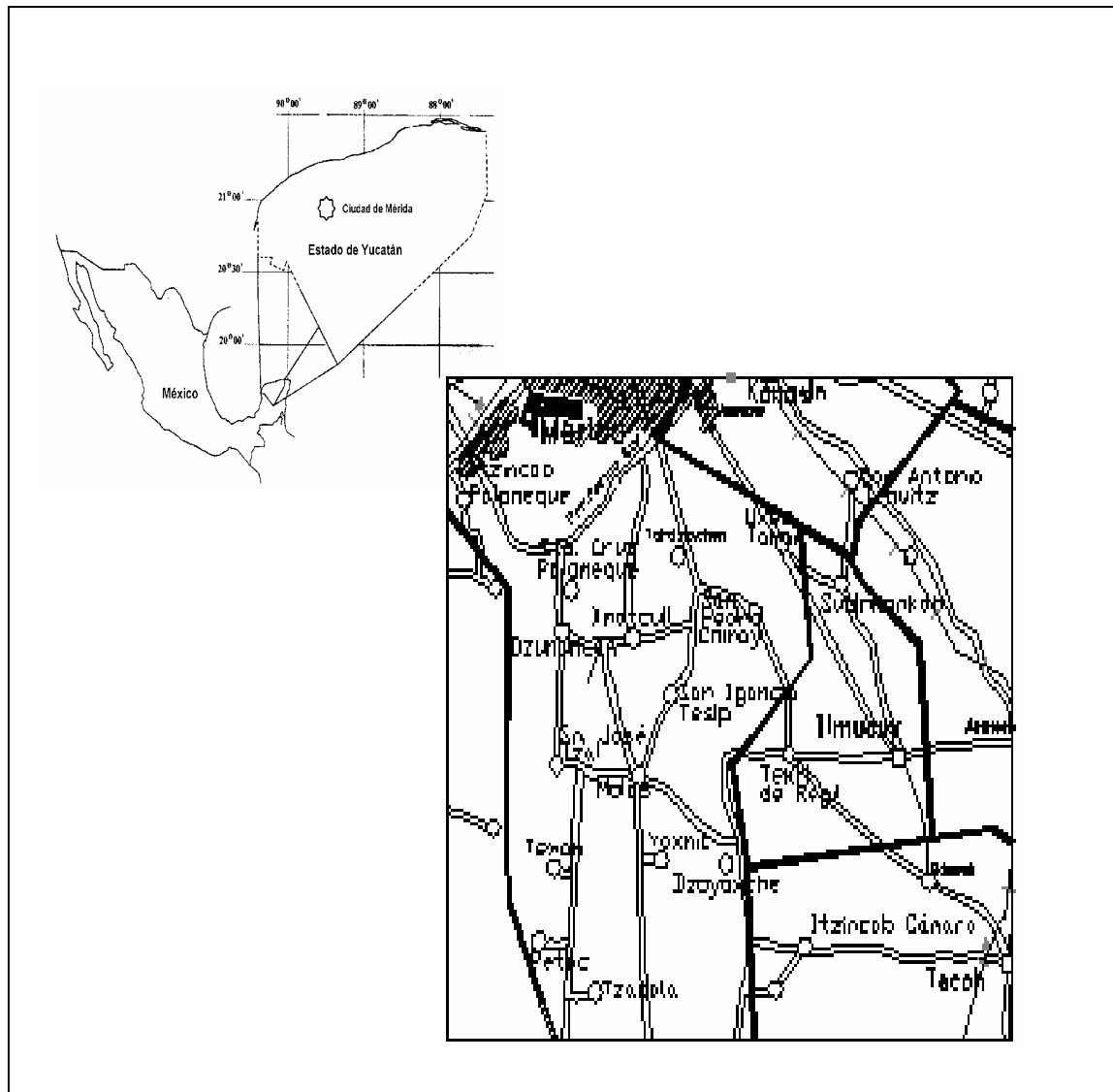


Figura 1. Localización del área de estudio

### Obtención de los potenciales

Se obtuvieron a partir de la diferencia de la cota del nivel topográfico y la lectura del nivel piezométrico en régimen estático.

### Calidad del agua subterránea en los pozos muestreados

Nitratos. Se utilizó la técnica de espectrofotometría de luz ultravioleta. La concentración de nitratos en una muestra de agua se determina midiendo la absorbancia o transmitancia en

el ámbito ultravioleta a 220 nm y comparando las lecturas con las obtenidas de una curva de calibración (APHA, AWWA, WEF, 1992).

### Coliformes fecales

Los análisis bacteriológicos se realizaron por medio del filtro de membrana en una incubadora portátil. El volumen de la muestra de agua, varió en función de su profundidad, ya que la mayoría de los pozos someros tienen una concentración de organismos coliformes fecales mayor que la encontrada para pozos profundos.

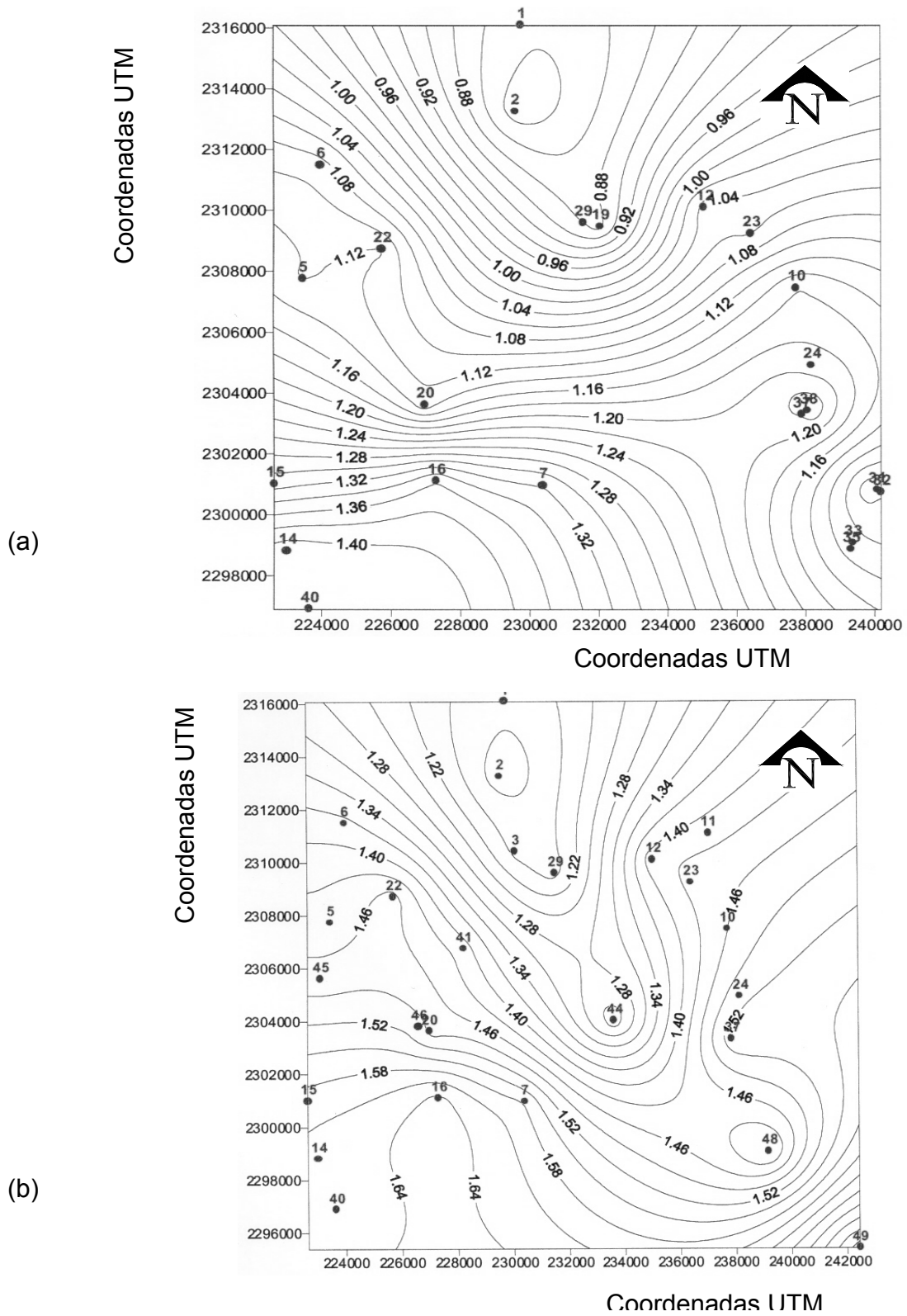


Figura 2. Dirección preferencial del flujo subterráneo en estiaje (a) y lluvia (b).

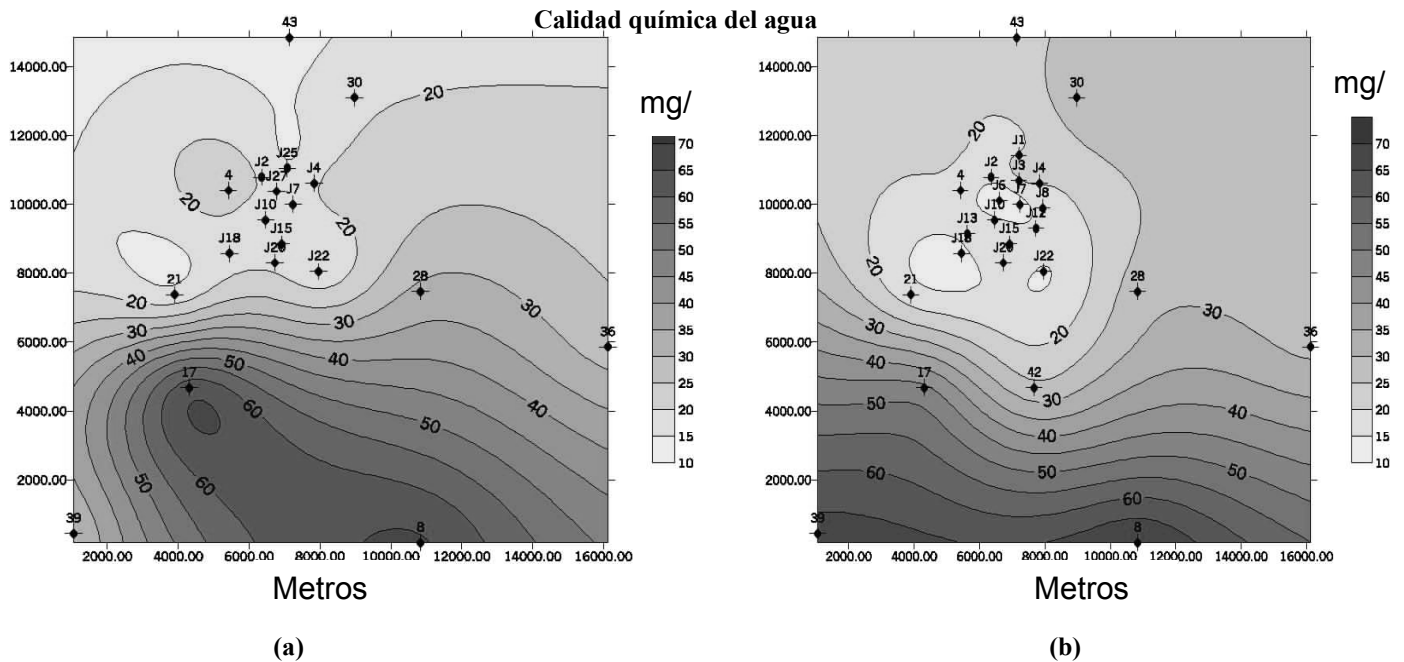


Figura 3. Isoconcentraciones de nitratos (mg/l) para pozos profundos en estiaje (a) y lluvia (b).

### Delimitación de la zona de reserva hidrogeológica

Se utilizó el programa computacional de la Environmental Protection Agency (EPA) denominado Wellhead Protection Area (WHPA), el cual es un programa semi-analítico de simulación del flujo del agua subterránea y es usado para la delimitación de las zonas de captación en un área de protección para campos de pozos. Se puede aplicar para evaluar múltiples tipos de acuíferos (confinados, semi-confinados y libres). El modelo es capaz de simular barreras o condiciones de líneas de corriente que existan en toda la profundidad del acuífero. El WHPA se puede representar para múltiples pozos de bombeo y de inyección y puede evaluar cuantitativamente los efectos de la entrada de parámetros de incertidumbre en la delimitación de la zona de captación. El programa consiste de cuatro módulos (RESSQC, MWCAP, GPTRAC, MONTEC), para nuestro caso, se utilizó el módulo GPTRAC debido a que es el aplicable según las características del acuífero de Yucatán.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### Dirección preferencial del flujo subterráneo

Se tuvieron dos direcciones preferenciales del flujo en el área de estudio; la primera, de SW – NE en época de estiaje (Figura 2) y la segunda, de SE – NW en época de lluvias (Figura 3).

Se observó que para algunos pozos someros, se reportaron niveles bajos en casi todas las mediciones, lo que podría deberse a la localización del pozo en una zona de material poco permeable, ya que tarda en recuperarse; además de que cerca de estos pozos, puede encontrarse un pozo de extracción que lo afecte de manera directa. Asimismo, algunos pozos mostraron comportamientos anómalos debido a afectaciones puntuales y temporales, como el hecho de que al llegar y hacer la medición, el pozo aún se estaba recuperando de algún tiempo de extracción.

Se observó que el agua proveniente de la mayoría de los pozos, cumple con el valor establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) en cuanto a la concentración de nitratos, presentándose las mayores concentraciones en las aguas a nivel freático durante la temporada de estiaje y las más bajas en los pozos de extracción de agua de la planta Mérida (Figura 3).

### Calidad bacteriológica del agua

En el área de estudio, existe contaminación fecal en pozos someros y en algunos pozos profundos

de las poblaciones ubicadas alrededor de la planta Mérida I, esto, antes de pasar por los sistemas de cloración. Comparando las temporadas de estiaje y lluvias, se notó un incremento de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC), debido al arrastre de materia contaminada al acuífero

**Delimitación de la zona de reserva hidrogeológica.**

Para aplicar el programa de la Environmental Protection Agency, el Wellhead Protection Area, se requiere la información mostrada en las Tablas 1 al 4.

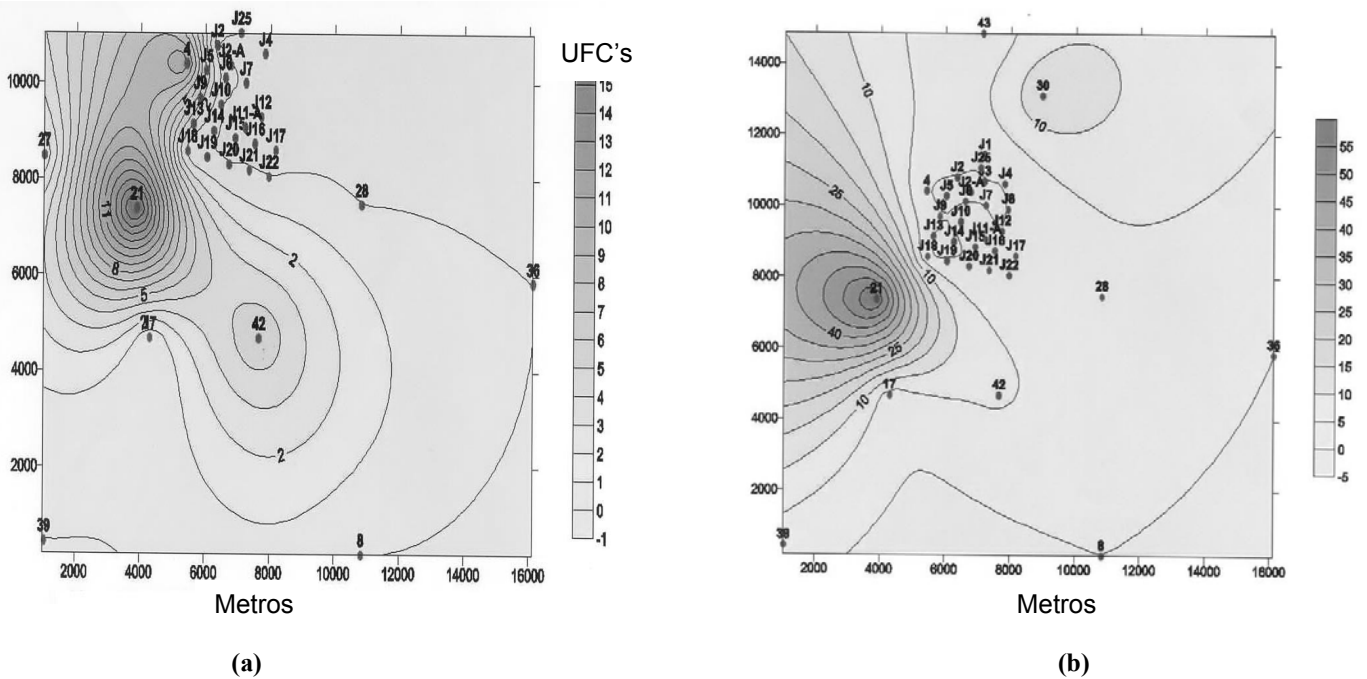


Figura 4. Isoniveles de Coliformes Fecales en pozos profundos en estiaje (a) y en lluvia (b)

Tabla 1. Unidades usadas para la implementación del Programa WHPA

Variable	Descripción
Tipo de acuífero	Libre
Unidades	Metros y días
Número de pozos de extracción	25
Número de pozos de inyección	0
Coordenada mínima en X del área de estudio	m
Coordenada máxima en X del área de estudio	m
Coordenada mínima en Y del área de estudio	m
Coordenada máxima en Y del área de estudio	m
Transmisividad del acuífero	m <sup>2</sup> / d
Gradiente hidráulico regional	m / m
Angulo del flujo del agua subterránea	0 – 360°
Porosidad del acuífero	Adimensional
Espesor saturado del acuífero	m
Tasa de recarga	m / d
Período de tiempo para ejecutar el WHPA	Días

Tabla 2. Unidades para cada pozo de extracción

Variable	Descripción
Coordenada en X del pozo	m
Coordenada en Y del pozo	m
Tasa de recarga del pozo	m <sup>3</sup> / d

Tabla 3. Gasto en los pozos de extracción de la planta Mérida I

Pozo	Gasto (l/s)	Pozo	Gasto (l/s)	Pozo	Gasto (l/s)
1	55	9	55	17	60
2	55	10	55	18	70
2-A	55	11	80	19	70
3	55	11-A	55	20	55
4	55	12	55	21	55
5	55	13	55	22	55
6	55	14	55	25	80
7	70	15	75		
8	55	16	55		

Fuente: JAPAY (2000). Comm. Pers. Ing. Espejo.

Los valores reportados para las características hidrogeológicas del acuífero, no son homogéneos debido a la naturaleza cárstica del medio. Por lo que para implementar el programa, se realizaron varias pruebas, las que mostraron que el gradiente hidráulico fue la única característica a la que el Programa se mostró sensible; por lo tanto, se

realizaron de manera formal dos pruebas con valores que han sido usados en trabajos previos, variando únicamente los valores para el gradiente hidráulico. Los ángulos de flujo se determinaron de los gráficos obtenidos en el SURFER para los potenciales hidráulicos, tanto en sequía como en lluvia.

Tabla 4. Parámetros de ingreso al Programa WHPA, para cada una de las pruebas

Parámetro	
Transmisividad	800000 m <sup>2</sup> /d
Porosidad	20%
Espesor saturado	50 metros
Gradiente hidráulico	0.00003 / 0.00015 km / km
Angulo de flujo	65° / 120°
Tasa de recarga	0.00027 m/d

Los valores de la Tabla 4, están reportados en diferentes estudios entre los que se mencionan: SARH, 1988; Marín, 1990; Villasuso, 1992; BGS, FIUADY, CNA, 1995; Steinich y Marín, 1996; Graniel et al. , 1999; entre otros.

Para delinear el área de protección para los pozos de extracción ubicados en la Planta Mérida I en función de los parámetros de calidad considerados, se sobrepusieron los gráficos de las áreas obtenidas a los diagramas de las isoconcentraciones de nitratos y de coliformes fecales en las épocas de estiaje y lluvia, respectivamente (Figuras 5 y 6).

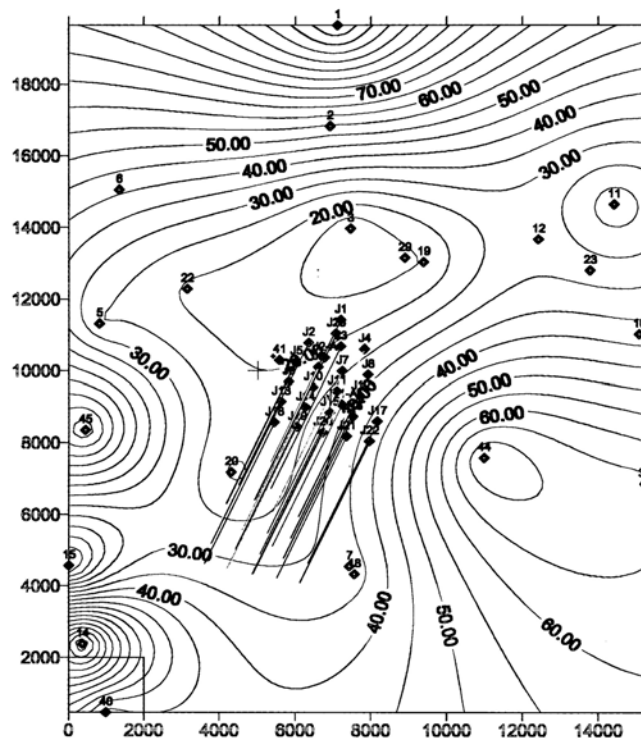
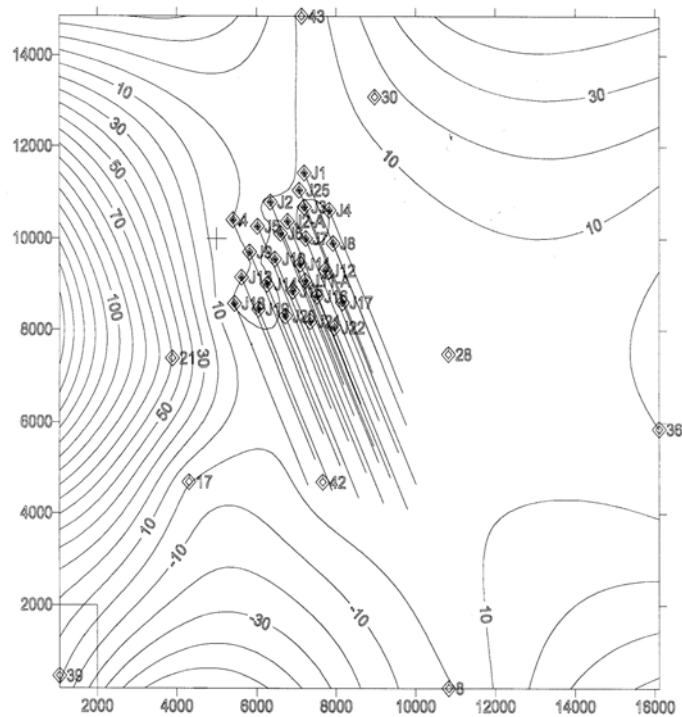


Figura 5. Delineación del área de protección y concentraciones de nitratos en el período de estiaje





**Figura 6. Delineación del área de protección y densidades de Coliformes fecales en el período de lluvias****CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados de los potenciales hidráulicos, se tienen dos comportamientos, uno que va de SW a NE en el estiaje y el otro, que va de SE hacia el NW en época de lluvia.

La calidad química y bacteriológica de las aguas de los pozos, es de menor calidad en los pozos someros y durante la época de estiaje; en comparación con lo establecido en la NOM-94.

La delimitación de la zona de reserva hidrogeológica del campo de pozos de extracción de la planta Mérida I, fue la resultante de utilizar un gradiente hidráulico de 0.00015 km / km, ya que se obtuvo una distancia de 4374.99 metros considerando un período de un año; y con el gradiente de 0.00003 km / km, se obtuvo una distancia promedio de 806.70 metros; ambas distancias, representan el lugar desde donde el pozo está extrayendo el agua.

De la condición más desfavorable elegida, se realizó el montaje de las WHPA y las calidades química y bacteriológica, se pudo observar que la contaminación por coliformes fecales podría afectar la calidad del agua subterránea del campo de pozos a corto plazo, considerando que las condiciones de

vulnerabilidad de los acuíferos cársticos no han podido ser descritas por los modelos analíticos y numéricos conocidos.

En cuanto a la contaminación por nitratos, ésta es menos severa al nivel profundo (cumpliendo con el valor establecido en la Norma), por lo que podría considerarse actualmente como "sin riesgos".

**RECOMENDACIONES**

Realizar otras pruebas con el Programa WHPA, variando los valores de las características geohidrológicas del acuífero, con la finalidad de obtener la condición más desfavorable que permita hacer sugerencias precisas para la preservación del recurso, que es la única fuente de abastecimiento.

Asimismo, se sugiere la elaboración y puesta en marcha de un esquema de manejo para la zona de protección delimitada, con fines de preservación de la calidad del agua para uso y consumo humano.

**AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue financiado por el Sistema de Investigación Regional Justo Sierra del CONACYT (SISIERRA), según convenio de investigación No. 980607.

**REFERENCIAS**

- APHA, AWWA, WEF. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18 th. edition. Clesveri L.S., Eaton A.D. y A.E. Greenberg (Eds.) Washington, D.C. USA.
- BGS, FIUADY, CNA. (1995). British Geological Survey, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, Comisión Nacional del Agua. Impact of urbanisation on groundwater in Mérida, Mexico. Final Report. NCR. Nothingham, UK.
- CNA. (1997). Comisión Nacional del Agua. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. México.
- Grael C.E., Morris B.L., Carrillo-Rivera J.J. (1999). Effects of urbanization on groundwater resources of Merida Yucatan. Environmental Geology 37 (4) 303:311.
- INEGI. (1992). Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática. Anuario Estadístico del Estado de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. México.
- JAPAY. (2000). Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Yucatán. Planta Mérida I. Comunicación personal con el Ing. William Espejo, Jefe de la planta.
- Miller J. (1996). Comparación de los acuíferos floridano y yucateco. En Memorias del 3er. Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Zacatecas, México.

- Marín L.E. (1990). Field investigation and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico. PhD Thesis Northern University of Illinois, USA.
- NOM-127-SSA1. (1994). Norma Oficial Mexicana. Secretaría de Salubridad y Asistencia. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano – límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe de someterse el agua para su potabilización.
- SARH. (1988). Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. "Sinopsis Hidrogeológica de la Península de Yucatán". México.
- Steinich B., Marín L.E. (1996), Hydrogeological investigation in Northwest Yucatan Mexico using resistivity surveys. *Groundwater* 34 (4) 640:646
- Villasuso P.M. (1992). Geohidrología e hidrogeoquímica del acuífero de la Península de Yucatán. Mecanismos de contaminación. Seminario de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- WHPA. (1993). Wellhead Protection Areas. Addendum to the WHPA code ver 2.0 User Guide. Environmental Protection Agency. USA.