

Calidad de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México



Recibido: 02/10/17 · Aceptado: 03/11/17

Roger Amílcar González Herrera*
Ismael Abelardo Sánchez y Pinto
Universidad Autónoma de Yucatán
Adrián Cervantes Martínez
Universidad de Quintana Roo
José Humberto Osorio Rodríguez
Universidad Autónoma de Yucatán

Resumen

El municipio de Puerto Morelos es un área importante para el turismo nacional y extranjero. La inadecuada disposición de los residuos y la naturaleza vulnerable del acuífero ponen en riesgo la calidad del agua en el área. Esto representa un potencial riesgo para las personas y los ecosistemas que dependen del acuífero. En 2011 se llevaron a cabo tres campañas de muestreo con la finalidad de evaluar la calidad del agua subterránea. Se analizaron iones mayoritarios, metales pesados y coliformes. Asimismo, se determinaron las direcciones de flujo del agua subterránea. Los resultados manifiestan que las familias predominantes de aguas son las bicarbonatadas-cálcicas, aunque algunas muestras de agua tienen las características típicas del agua de mar, como se espera dada la cercanía a la costa. En cuanto a metales, se detectaron hierro, cadmio, cobre y arsénico. Aunque las concentraciones no se encuentran por arriba de los límites establecidos en la normatividad mexicana, estos elementos son un indicador de la contaminación antropogénica. Todos los pozos monitoreados presentan coliformes totales y fecales por arriba de los límites establecidos. El número de coliformes fecales incrementa en el periodo de lluvia por el arrastre de contaminantes al acuífero. La dirección de flujo preferencial en el acuífero es del noroeste hacia la costa. La presencia de metales pesados y coliformes en el acuífero evidencia una afectación a la calidad del agua. Se deberían tomar medidas de conservación y buenas pautas de gestión respecto a la calidad del agua subterránea.

PALABRAS CLAVE: Acuífero cárstico, aguas subterráneas, contaminación, dirección de flujo, Puerto Morelos.

**Correo electrónico:* roger.gonzalez@correo.uady.mx



Water quality in the aquifer of Puerto Morelos, Quintana Roo

Received: 02/10/17 · Accepted: 03/11/17

Roger Amílcar González Herrera*
Ismael Abelardo Sánchez y Pinto
Universidad Autónoma de Yucatán
Adrián Cervantes Martínez
Universidad de Quintana Roo
José Humberto Osorio Rodríguez
Universidad Autónoma de Yucatán

Abstract

The municipality of Puerto Morelos is an important area for national and international tourism. The inadequate disposition of residues and the natural vulnerability of the aquifer represent a risk for groundwater quality. This may affect the health of people and the ecosystem that depend on the aquifer. In 2011 three sampling campaigns were carried out to assess groundwater quality. Major ions, heavy metals and coliforms were analyzed in all the water samples. Groundwater flow directions were also determined. Results show that the most common water families in the study area are bicarbonate-calcium, however some samples show seawater characteristics, this was expected given that this is a coastal aquifer. The heavy metals detected in the aquifer were: iron, cadmium, copper and arsenic. Although the concentrations are below the threshold of the Mexican standards, these elements are an indication of anthropogenic pollution. All the sampled wells show the presence of fecal and total coliforms above the standards. The number of coliforms increases during the rainy season due to the flow of pollutants to the aquifer. The preferential flow path is from the northwest towards the coast. The presence of heavy metals and coliforms in the aquifer show an affectation of groundwater quality. Conservation policies and sound management practices with respect to groundwater quality should be implemented.

KEY WORDS: karstic aquifer, groundwater, pollution, flow path, Puerto Morelos.

*E-mails: roger.gonzalez@correo.uady.mx

El municipio de Puerto Morelos se localiza en el Caribe mexicano y es un área que atrae a numerosos turistas nacionales y extranjeros (Daltabuit, Vázquez, Cisneros y Ruiz, 2006, pp. 197, 217). Puerto Morelos cuenta con un acuífero cárstico somero que, aunado a la naturaleza del suelo, hace que el acuífero sea altamente vulnerable a la contaminación (Instituto Nacional de Ecología, 1992, pp. 27, 141). Resulta fundamental evaluar la calidad del agua subterránea en la zona debido a que es un recurso importante tanto para la población como para los ecosistemas que reciben las descargas del acuífero.

Puerto Morelos se ubica al norte del estado de Quintana Roo, a 35 kilómetros al sur de Cancún y a 34 kilómetros al norte de Playa del Carmen (figura 1); es una ciudad costera al colindar con el mar Caribe en su zona este, con una altura de entre tres y ocho metros sobre el nivel medio del mar. Su clima es cálido subhúmedo con una temperatura promedio anual de 26.3 °C. La precipitación promedio anual se estima en 1 041 mm (Gobierno Municipal de Benito Juárez, 2008, pp. 6, 35; Daltabuit et al., 2006, p. 195).

El norte del estado de Quintana Roo posee un acuífero cárstico poroso desarrollado en el Cenozoico (Lesser y Wedie, 1988 cit. en Gutiérrez y Cervantes, 2008, p. 14), y una de sus principales características es la ausencia de corrientes superficiales por la alta permeabilidad de la roca caliza (Villasuso y Méndez, 2000, pp. 120, 127).

La zona alberga un frágil ecosistema: el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), que se encuentra amenazado, debido a la elevada presión a la que es sometido (Instituto Nacional de Ecología, 2000, p. 13). Se ubica en la costa del mar Caribe, frente al poblado de Puerto Morelos. En el arrecife coralino y el pastizal marino habitan miles de especies de plantas, peces e invertebrados, algunas de ellas consideradas como amenazadas o sujetas a protección especial (Canul González, 2004, p. 2). Determinadas especies marinas utilizan el arrecife como lugar para la reproducción, alimentación y crianza. El PNAPM presenta una serie de zonas bien diferenciadas con respecto a su distribución (figura 2). La zona II es la laguna arrecifal, donde se localizan los ojos de agua.

A lo largo del año, el PNAPM recibe turismo, y el consiguiente impacto en el consumo de materias primas y producción de desechos de gran variedad, que da como resultado la alteración del medio ambiente.

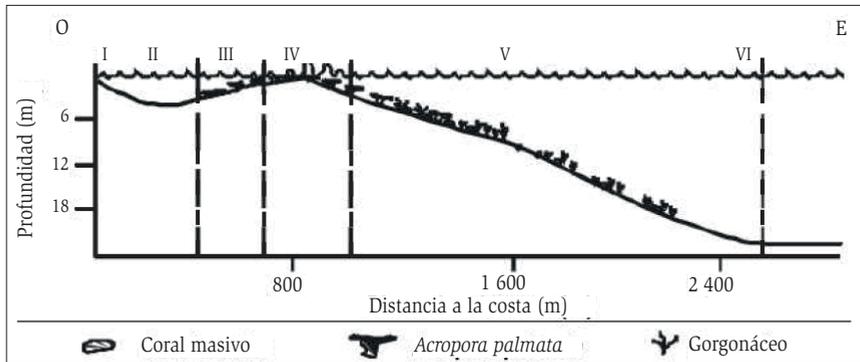


Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010).

Figura 1. Ubicación de Puerto Morelos

Fuentes de contaminación

Las principales ocupaciones de la población de Puerto Morelos son el sector turístico y la pesca (Daltabuit et al., 2006, p. 210), y por lo tanto, las principales fuentes de contaminación para el agua subterránea en la zona de estudio son: *a)* la disposición inadecuada de aguas residuales (Instituto Nacional de Ecología, 1992, p. 141; Gutiérrez y Cervantes, 2008, p. 32; Hernández-Terrones et al., 2011, p. 526) y *b)* tiraderos a cielo abierto (Daltabuit et al., 2006, p. 211). Las aguas residuales de la población de Puerto Morelos son vertidas sin tratar en fosas sépticas o en pozos someros clausurados; de esta manera, son almacenadas inadecuadamente sin ninguna medida de impermeabilización o



Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2000); modificado de Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez (1998).

Figura 2. Corte longitudinal del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos: I. Orilla; II. Laguna arrecifal; III. Zona oeste o posterior; IV. Cresta arrecifal; V. Zona este o frontal; VI. Plataforma arenosa.
O = Oeste; E = Este

de tratamiento que pueda reducir la carga de contaminantes de origen orgánico e inorgánico (Daltaubuit et al., 2006, p. 209; Instituto Nacional de Ecología, 1992, p. 141). La presencia de fosas sépticas mal construidas y el uso de pozos someros en contacto directo con el acuífero propician la contaminación del agua subterránea. Los residuos sólidos urbanos procedentes de la población, la industria y los servicios generan un problema a la hora de gestionarlos y disponer de ellos de manera adecuada y correcta (Galindo de Prince, 2007, pp. 4-5; Gobierno Municipal de Benito Juárez, 2008, p. 71). Puerto Morelos contaba con un basurero municipal que fue un tiradero a cielo abierto que recibió gran variedad de residuos y desechos, sobre una roca caliza carstificada, ausente de impermeabilización en la base y cercano al nivel freático (Daltaubuit et al., 2006, p. 211). Se tiene información de la clausura del basurero en noviembre de 2009 y la posterior retirada de los desechos al sitio de disposición de residuos sólidos urbanos en la localidad de Cancún.

Una vez en el acuífero, los contaminantes disueltos fluyen a través del laberinto de cuevas subterráneas, uno de los principales atractivos turísticos de la zona, y pueden descargar al mar, según describe Gondwe (2010) en su modelo hidrogeológico conceptual. La capacidad de dispersión de contaminantes ha

sido motivo de estudio en la zona, para la cual Carrillo Bribiezca (2008) reporta campos de velocidades superficiales, obtenidas por medio de modelación frente a la costa de Playa del Carmen, con magnitudes mayores a 1 m/s, lo cual pone de manifiesto la rapidez con que migran los contaminantes disueltos en el agua. Así, las aguas contaminadas no solo representan un serio riesgo para la salud humana, sino también para los extensos humedales costeros y los ecosistemas marinos, ya que la contaminación marina puede darse tanto a través de las aguas que fluyen directamente de los humedales, como de los manantiales que descargan de modo directo en el mar Caribe.

Estudios previos

Se han llevado a cabo estudios sobre la contaminación del acuífero local desde hace más de dos décadas, con la intención de protegerlo. El Instituto Nacional de Ecología (1992, p. 141) identifica sus fuentes principales de contaminación, atribuidas primordialmente a los desechos sólidos y aguas residuales vertidos en el suelo; estos residuos son generados por el turismo y la población. Dalta-buit, Vázquez, Cisneros y Ruiz (2006, pp. 206, 209) actualizan esta información y aportan más detalles acerca del tiradero a cielo abierto de Puerto Morelos y las condiciones de los sistemas de drenaje en la población. Mencionan que, de manera general, las viviendas cuentan con fosas sépticas que no cumplen la normatividad establecida y, en algunos casos, incluso se usan pozos antiguos para verter las aguas residuales sin tratamiento. Hernández-Terrones et al. (2011, p. 526) encuentran elevada densidad de coliformes y alta concentración de nitratos en los pozos muestreados. De hecho, se reportan coliformes en mangles y playas. Se enfatiza que la disposición de aguas residuales es inadecuada para la región. Otros estudios realizados en zonas cercanas a Puerto Morelos reportan parámetros que exceden las normas establecidas para agua potable (Gutiérrez y Cervantes, 2008, p. 32), o la presencia de productos como anfetaminas, cocaína, herbicidas, productos antibacterianos y compuestos derivados del petróleo (Metcalf et al., 2011, pp. 995-996).

El acuífero de Puerto Morelos es un sistema vulnerable que muestra ya afectaciones a la calidad del agua debido a las malas prácticas en la disposición de residuos. Estas afectaciones representan un riesgo para la población y los

ecosistemas que dependen de él. Por tal razón, el objetivo de este trabajo es conocer más a detalle el estado de la calidad del agua de Puerto Morelos, así como las direcciones de flujo preferencial en el acuífero.

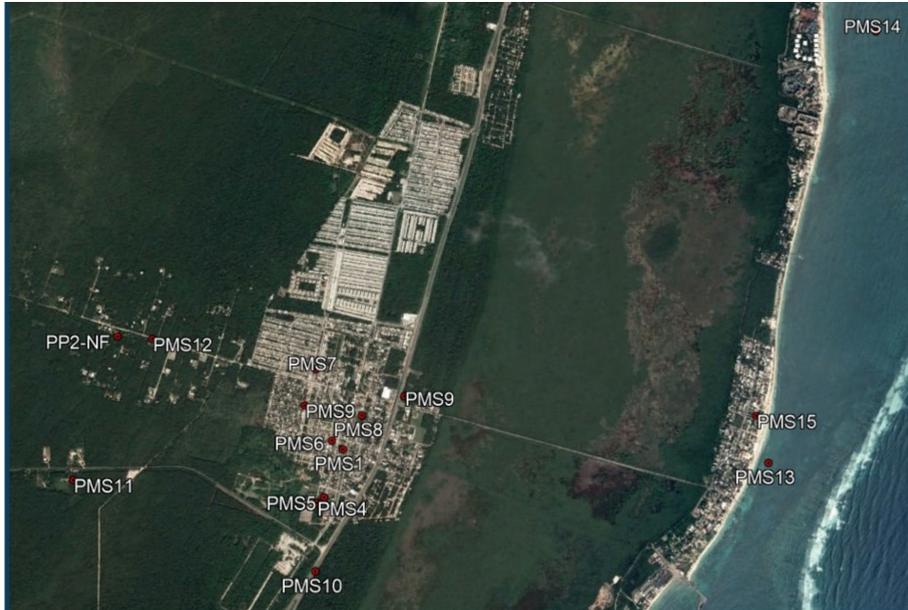
Metodología

El trabajo se enfocó en la medición de datos en campo, el nivelado de brocales de pozos y la toma de muestras de agua. Se seleccionaron pozos de predios particulares (PM), dos ojos de agua localizados en el mar (PM13 y PM14) y dos pozos de abastecimiento ubicados a 12 km de la población (Pozo Ab1 y Pozo Ab3), los cuales sirvieron para analizar las condiciones del agua subterránea. Se realizaron tres campañas de muestreo durante 2011: febrero (estación seca), junio (inicio de lluvias) y diciembre (final de lluvias).

Todos los pozos, tanto profundos como someros, están estratégicamente ubicados en el poblado de tal manera que se tienen puntos de monitoreo en toda la extensión de la zona de estudio (figura 3). Se determinó la altitud de los brocales de los pozos mediante nivelación topográfica diferencial; con la medición de las profundidades del nivel freático, respecto a los brocales, se calcularon los potenciales hidráulicos en cada punto de monitoreo. Los potenciales hidráulicos se usaron para inferir el flujo de agua en el acuífero.

Para la toma de las muestras de agua, la mayoría de los pozos seleccionados estaban equipados con bomba, la cual se puso en funcionamiento para coleccionar la muestra. En cuanto a los pozos que no contaban con bomba, se utilizó una botella de teflón o una cubeta para la colección de la muestra. En todos los casos se aseguró la representatividad de la muestra del agua subterránea del punto de monitoreo en cuestión.

Las muestras colectadas se preservaron y transportaron para su posterior análisis en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán; se determinaron alcalinidad total y a la fenoltaleína, dureza de calcio y magnesio, cloruros, sulfatos, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, demanda química de oxígeno (DQO), sodio y potasio. También se determinaron los siguientes metales: cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn), hierro (Fe), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd) y



Nota: Los pozos de abastecimiento (localizados al oeste) no se muestran en la figura.

Fuente: Google Earth (2011).

FIGURA 3. Ubicación de los puntos de monitoreo en Puerto Morelos

romo (Cr). Los análisis en el laboratorio fueron efectuados de acuerdo con el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association, 1998). Para los análisis bacteriológicos, se realizaron incubaciones de las muestras por un periodo mínimo de 24 horas para determinar la presencia de coliformes fecales y totales.

La precisión de los análisis químicos se controló por medio del balance de carga iónica, aceptando como máximo un valor de 10 %. Las muestras que rebasaron este límite no fueron consideradas para fines de interpretación. La fórmula para el cálculo del balance iónico es la siguiente (Fetter, 2001):

$$\% \text{ de error} = \frac{\Sigma \text{Cationes} - \Sigma \text{Aniones}}{\Sigma \text{Cationes} + \Sigma \text{Aniones}} \times 100$$

Una vez especificadas las muestras con un balance iónico menor a 10 %, se determinaron los tipos de aguas (diagramas de Piper) en el área de estudio, con ayuda del software AquaChem 4.0 (Waterloo Hydrogeologic, 2003). Se definió la calidad del agua para consumo humano comparando los resultados obtenidos en el laboratorio con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 2000). También se generaron mapas equipotenciales con el software PMWIN para establecer las direcciones de flujo en la costa.

Resultados y discusión

Familias de agua

Se establecieron los tipos de aguas con respecto a la clasificación que realiza el diagrama de Piper. Los resultados para ambos análisis se muestran en la figura 4 (A, B y C), donde se observa que los puntos de monitoreo someros PM7, PM11 y PM6 tienen características de aguas bicarbonatadas-cloruradas-sódicas. El PM6 cambia de un tipo de agua bicarbonatada-clorurada-sódica en febrero a bicarbonatada-clorurada-cálcica-magnésica en junio. En diciembre, la calidad del agua en los pozos PM1, PM6, PM7 y PM11 cambió a bicarbonatada-clorurada-cálcica. Mientras los restantes puntos de monitoreo PM1, PM4, PM5, PM8, PM9, PM10, PM12, PM15, PAB1 y PAB2 representan a aguas bicarbonatadas-cálcicas. PM13 y PM14 muestran características típicas de agua de mar, tipo clorurada-sódica; estos son los ojos de agua que se localizan en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. En PM10, la característica del tipo de agua es bicarbonatada-magnésica. Es importante destacar a PM11 (punto de muestreo cercano a un basurero clandestino) con tipo de agua clorurada-sódica. También cabe apreciar a PM7 con tipo bicarbonatada-clorurada-sódica, y a Pozo Ab1, Pozo Ab3 y PM1, que presentan concentraciones destacables de cloruros.



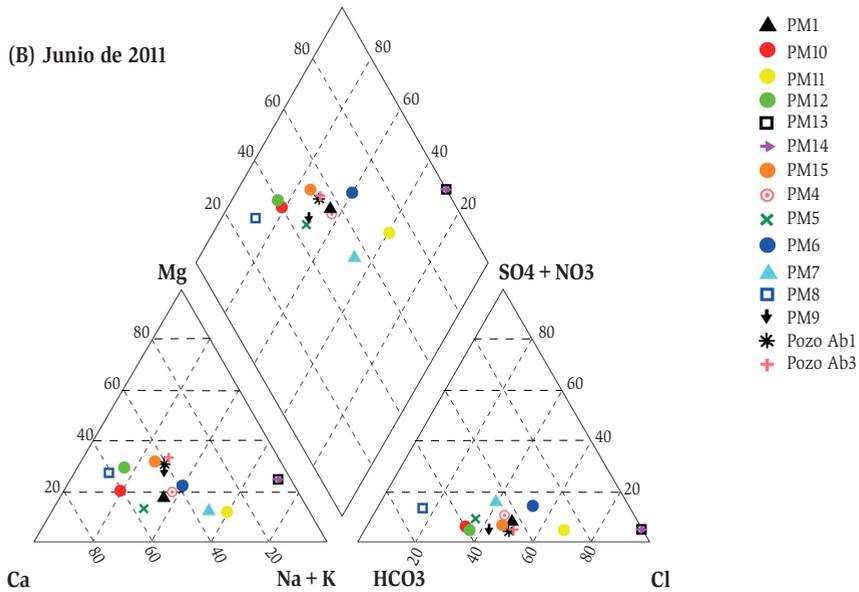
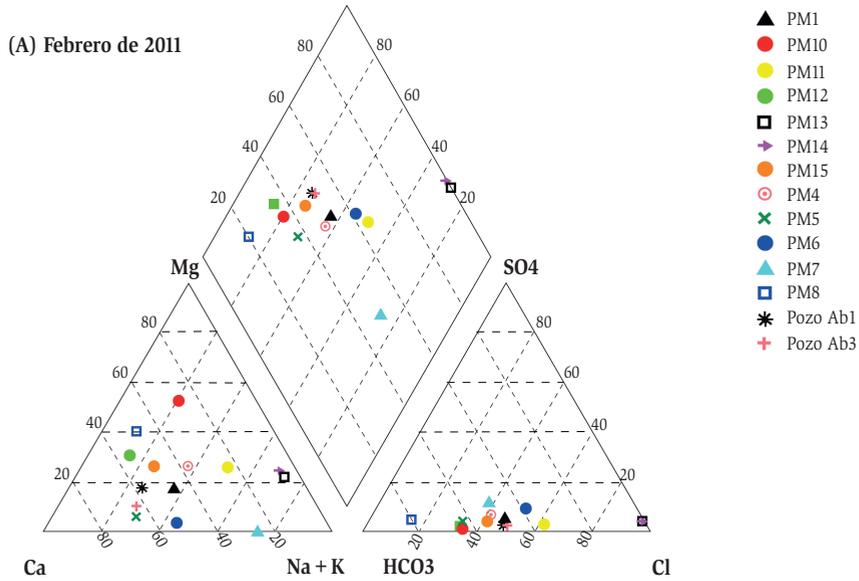


FIGURA 4a, b. Diagramas de Piper para las diferentes campañas de muestreo. (A) Febrero de 2011. (B) Junio de 2011.

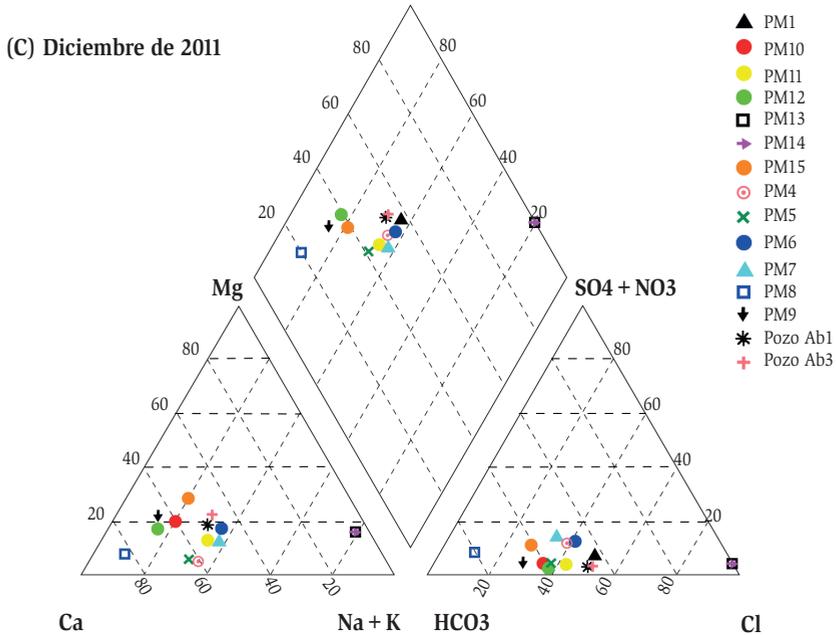


FIGURA 4c. Diagramas de Piper para las diferentes campañas de muestreo.
(C) Diciembre 2011.

Contaminación del agua subterránea

En el acuífero de Puerto Morelos, la existencia de carbón orgánico total (TOC, por sus siglas en inglés) y de la demanda química de oxígeno (DQO) en el agua de todos los pozos estudiados indica que la presencia de materia orgánica está ampliamente extendida a nivel freático (cuadro 1). La existencia de $N-NH_3$ en el agua de algunos pozos demuestra contaminación reciente debido a la infiltración del agua pluvial al inicio de la temporada de lluvias.

CUADRO 1. Parámetros sanitarios y especies nitrogenadas en pozos someros a nivel freático (junio de 2012)

Muestra	Pozos	NO ₂ (mg/l)	N-NH ₃ (mg/l)	NKT (mg/l)	N-Org. (mg/l)	TOC (mg/l)	DQO (mg/l)
PMS1	PM1	0.44	ND	ND	ND	2.82	2.00
PMS4	PM4	0.32	ND	ND	ND	2.38	4.00
PMS5	PM5	ND	5.93	5.93	ND	1.84	1.00
PMS6	PM6	1.66	ND	ND	ND	3.25	2.00
PMS7	PM7	12.78	7.28	8.40	1.12		8.00
PMS8	PM8	0.82	ND	ND	ND	1.68	1.00
PMS9	PM9	ND	ND	ND	ND	2.08	2.00
PMS10	PM10	0.19	ND	ND	ND	3.10	2.00
PMS11	PM11	ND	0.68	1.68	1.00	7.14	18.00
PMS12	PM12	1.70	0.22	0.89	0.67	2.62	
	PM13	ND	ND	ND	ND	2.11	1.00
	PM14	ND	ND	ND	ND	1.45	4.00
PMS15	PM15	6.00	0.56	0.56	ND	2.60	2.00
	PP2(NF)	ND	0.28	0.78	0.50	3.41	1.00

ND = No detectable.

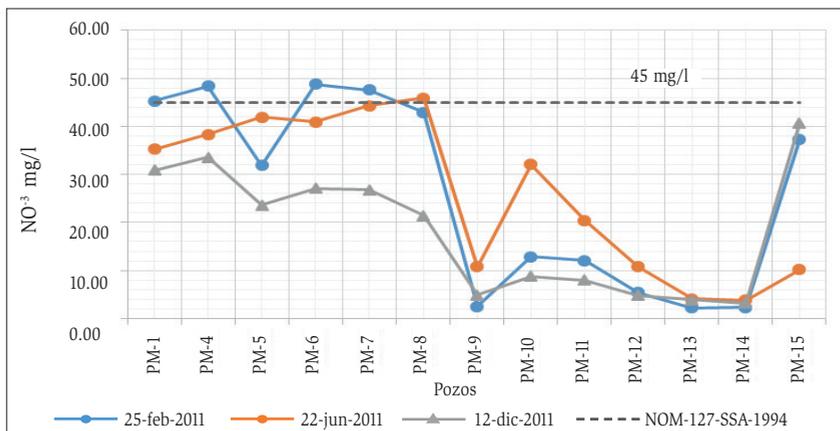


FIGURA 5. Distribución espaciotemporal del nitrato a nivel freático en el acuífero de Puerto Morelos

La figura 5 muestra que los nitratos estuvieron presentes en el acuífero durante el periodo estudiado, a mediados del estiaje (febrero), al principio del periodo lluvioso (junio) y al final del mismo (diciembre), en todos los pozos analizados a nivel freático. El límite máximo permisible de 45 mg/l establecido por la NOM-127-SSA1-1994 solo fue igualado o rebasado en cinco pozos, principalmente en el estiaje.

El nitrato, como la forma más estable del nitrógeno, es soluble en agua, por lo que puede lixiviarse fácilmente hacia el acuífero (Freeze y Cherry, 1979, p. 413). Su alta solubilidad le confiere la habilidad para permanecer en el agua subterránea sin ser adsorbido por los materiales del acuífero y sin precipitarse químicamente en forma mineral. Estas características le permiten al nitrato permanecer en el sistema subterráneo o viajar a grandes distancias (Freeze y Cherry, 1979, p. 413).

En la zona de estudio existe contaminación fecal en los pozos someros. Se puede observar que hay una elevada contaminación microbiológica a nivel freático. La figura 6 muestra los resultados de coliformes totales y fecales determinados en el área de estudio; estos se presentan en términos de unidades formadoras de colonias (UFC) por 100 ml de agua. Para el caso de coliformes totales, el límite permisible para agua potable es de 2 UFC/100ml, y los coliformes fecales deben estar ausentes o no detectables, según la NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 2000, p. 3). El comportamiento bacteriológico en el sistema fue muy variable, y al igual que reportan Hernández-Terrones et al. (2011, p. 524), se detectaron incluso coliformes en las muestras colectadas en los ojos de agua que descargan al mar (PM13 y PM14). Se encontró que la contaminación por bacterias coliformes es patente en todo el acuífero independientemente de la época del año (figura 6). Sin embargo, comparando las densidades de organismos coliformes fecales en los periodos de estiaje y lluvias, se notó un incremento de las UFC durante la época de lluvias, debido al arrastre de materia contaminada al agua subterránea, propiciada por la alta vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

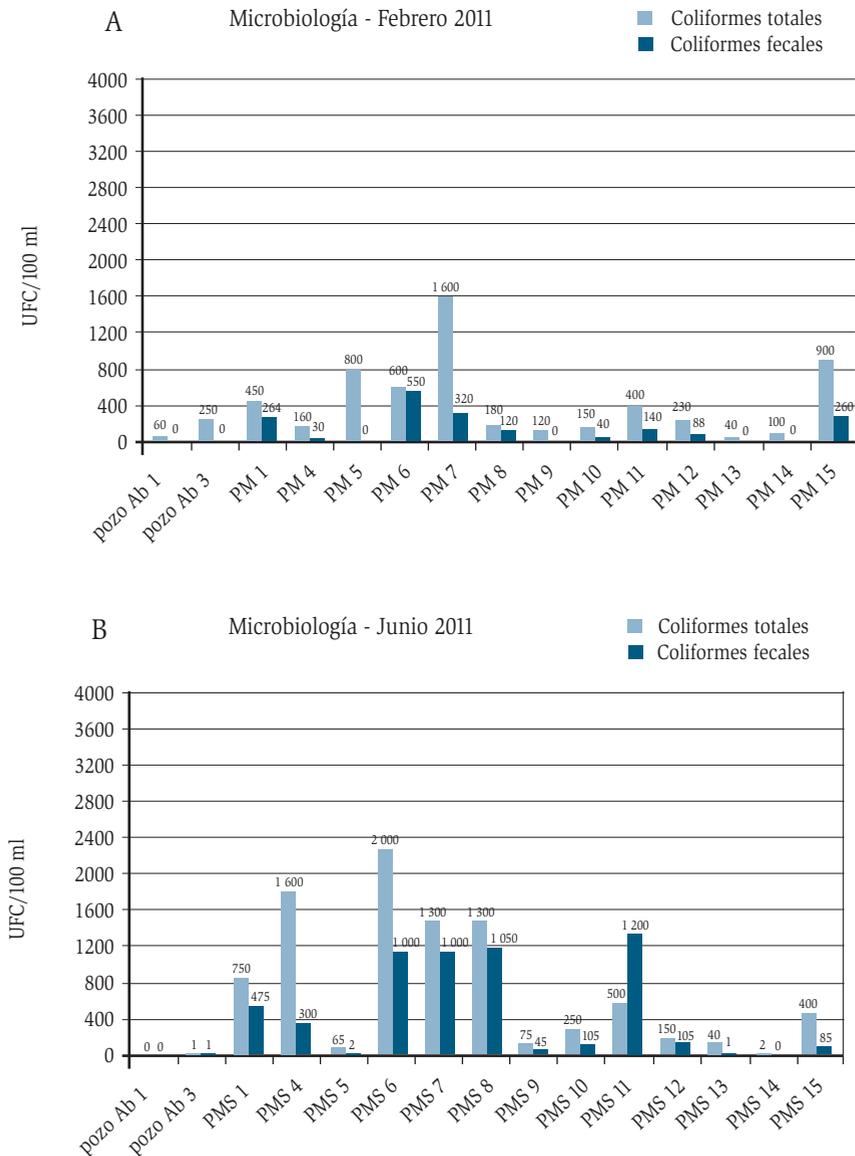


Figura 6a,b. Concentración de bacterias coliformes en el área de estudio durante las campañas de muestreo: (A) Febrero de 2011, (B) Junio de 2011

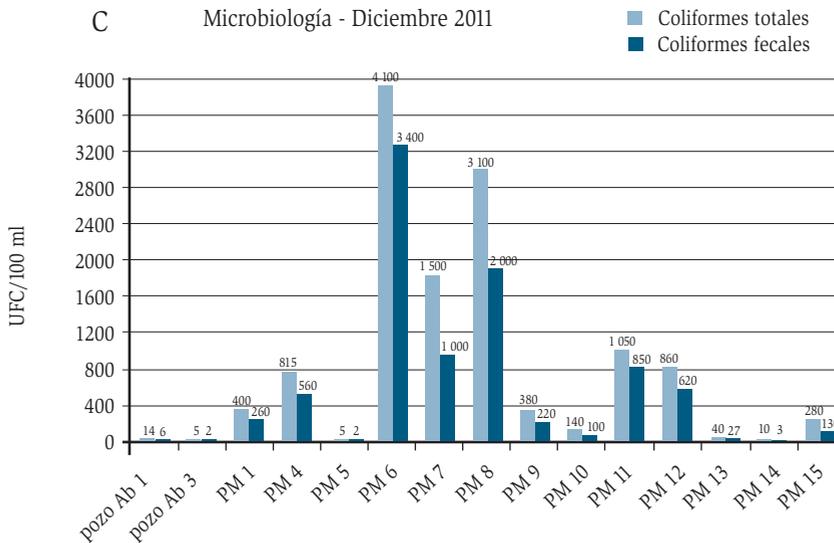


Figura 6c. Concentración de bacterias coliformes en el área de estudio durante las campañas de muestreo: (C) Diciembre de 2011

En relación con los metales determinados (Fe, Cd, Ni, Cr, Cu, Pb, Zn, As), el cuadro 2 expone únicamente aquellas muestras donde tales elementos fueron detectados. Así, solo estuvieron presentes en el acuífero Fe, Cd, Cu y As, cuyos límites de detección son 0.05 ppm, 0.1 ppm, 0.1 ppm y 0.24 ppb, respectivamente. Sin embargo, las concentraciones se encuentran por debajo de los límites permisibles para el agua potable según la NOM-127-SSA1-1994. Solamente el arsénico tiene un valor por arriba del límite propuesto para el año 2005 (modificación a la NOM-127-SSA1-1994 del año 2000) en el PM9. En los puntos de monitoreo que corresponden a los ojos de agua hay concentraciones de 6.22 y 5.99 $\mu\text{g}/\text{l}$ de As, en la campaña de diciembre de 2011. El arsénico no se presenta de manera natural en el área de estudio, debido a su naturaleza geológica, por lo que su presencia en el acuífero se debe probablemente a la lixiviación proveniente de la degradación de residuos generada por la mala práctica en la disposición de desechos; esto es un indicador de la afectación al agua subterránea, y su descarga en los ojos de agua también representa un potencial riesgo para los humedales y el arrecife de Puerto Morelos.

CUADRO 2. Metales pesados en la zona de estudio

Muestra	Fecha	Fe (µg/l) 300*	Cd (µg/l) 5*	Cu (µg/l) 2000*	As (µg/l) 25**
PM7	Febrero 2011	ND	ND	ND	12.64
PM9	Febrero 2011	ND	ND	ND	25.20
PM11	Febrero 2011	ND	ND	ND	13.81
PM11	Junio 2011	ND	ND	ND	23.55
PM7	Junio 2011	ND	ND	ND	10.10
PM9	Diciembre 2011	ND	ND	ND	14.17
PM11	Diciembre 2011	ND	ND	ND	5.57
PM13	Diciembre 2011	ND	ND	ND	6.22
PM14	Diciembre 2011	ND	ND	ND	5.90
PM15	Diciembre 2011	ND	ND	ND	6.65
PP 2 (NF)	Junio 2012	0.15	ND	ND	-
PM9	Junio 2012	0.24	ND	ND	-
PM10	Junio 2012	ND	ND	0.1	-
PM13	Junio 2012	ND	0.18	0.1	-
PM14	Junio 2012	ND	0.18	0.1	-

ND = No detectable.

*Límites permisibles según la NOM-127-SSA1-1994.

**De acuerdo con la modificación a la NOM-127-SSA1-1994 en el año 2000.

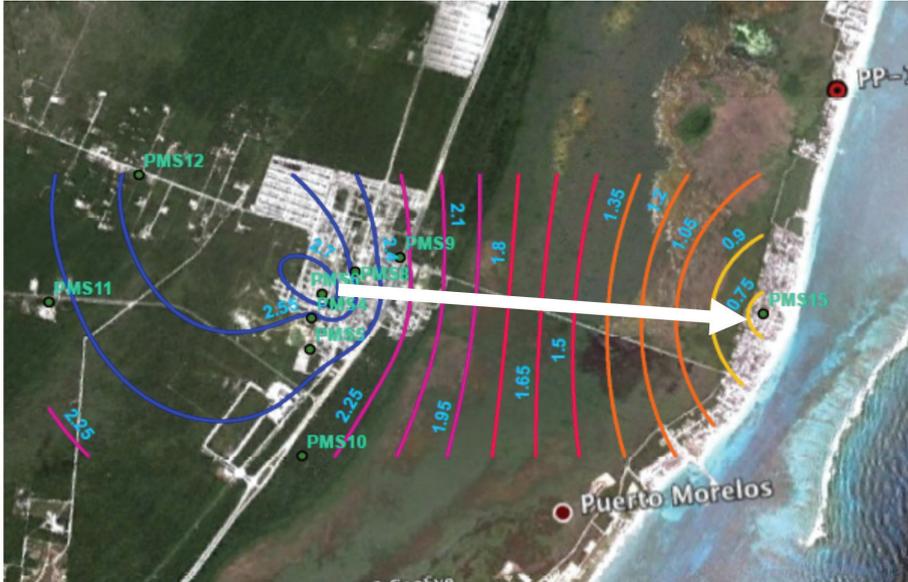
Nota: Únicamente se presentan las muestras con algún valor detectado.

El flujo regional y local de las aguas subterráneas propicia el arrastre y transporte de estos elementos, que son un foco de contaminación para el PNAPM.

Conceptualización hidrogeológica del sistema

Con los potenciales obtenidos se define una clara trayectoria del flujo del agua subterránea de la localidad de Puerto Morelos en dirección a la costa (figura 7), similar a lo reportado por Lars (2008, pp. 83-84). Con base en estudios previos en la zona (Supper et al., 2008; Ordóñez Crespo y García Rodríguez, 2010), se puede establecer, de manera general, el modelo conceptual de la siguiente forma: el agua parte de la zona norte de la población, fluyendo en dirección

noroeste-sureste hasta llegar al humedal, el cual recibe la descarga tanto de la población como de la costa, que se considera un sistema aparte trabajando como una isla; el humedal y la costa descargan al mar.



Nota: La flecha representa la dirección preferencial de flujo.

FIGURA 7. Curvas de equipotenciales para los pozos someros nivelados en el área de estudio

Se pueden esperar condiciones complejas de flujo, las cuales son difíciles de cuantificar con un grado razonable de certeza, ya que la roca caliza, a través de la cual fluye el agua, está constituida de fracturas y cavidades que incrementan su porosidad y, por ende, la conductividad hidráulica del sistema. Se espera que la porosidad secundaria domine la respuesta hidráulica en la zona de estudio y se generen patrones complejos de flujo con trayectorias tortuosas, dando como resultado una combinación de flujos laminares y turbulentos.

Las características cársticas son importantes a escala local, pues han facilitado la migración de los contaminantes disueltos en el agua subterránea; la estructura geológica es un factor fuertemente controlador en el transporte de los contaminantes en el acuífero, pero la heterogeneidad del sistema juega un papel preponderante al interpretar escenarios de contaminación realistas.

La modelación del acuífero en la zona puede ser una herramienta útil para determinar cómo se mueve el agua subterránea de la localidad y empezar a elaborar conclusiones de lo que pueda estar ocurriendo debido a la contaminación. Un modelo de flujo también puede servir para conocer cómo las descargas del acuífero afectan al arrecife, y posteriormente elaborar otros modelos incluyendo el transporte de contaminantes.

Conclusiones

La hidrodinámica resultante del comportamiento del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, está alterada por la presencia de dos periodos, uno de lluvia y otro de sequía. Observando datos de referencia de la época de sequía y comparándolos con los datos de la época de lluvia, proporcionan una evolución química del acuífero, así como la caracterización hidrogeoquímica de los tipos de aguas que se pueden encontrar en los puntos de muestreo con los cuales se determinó la calidad del agua subterránea.

Las familias de aguas predominantes en los pozos someros del área de estudio son las bicarbonatadas-cálcicas. Los ojos de agua presentan las características típicas del agua de mar al ser del tipo clorurada-sódica. Algunos sitios de muestreo exhibieron concentraciones destacables de cloruros.

La contaminación del acuífero es evidente a nivel freático; sus posibles causas son la disposición inadecuada de las aguas residuales y los tiraderos a cielo abierto. La infiltración de aguas negras y fecales propician el medio idóneo en el cual las bacterias de origen fecal se transportan a lo largo del flujo y se propagan hasta la descarga final al PNAPM. La presencia de metales pesados y bacterias es un indicador de contaminación, que podría afectar el equilibrio natural del ecosistema acuático del PNAPM, así como al turismo, la pesca y el paisaje.

La laguna arrecifal constituye el lugar idóneo en el cual se reproducen, proliferan y buscan protección numerosas especies marinas que utilizan el arrecife como hábitat que por naturaleza y evolución han adquirido a lo largo de los años. Es preciso mantenerla saludable. El crecimiento económico, poblacional y de infraestructura urbana eleva el riesgo de producir un impacto irreversible. Por lo tanto, se deberían tomar medidas de conservación y buenas pautas de gestión respecto a la calidad del agua subterránea, así como al estudio del ecosistema terrestre e hídrico.

Agradecimientos

Al Fondo Sectorial de Investigación Ambiental Semarnat-INE-Conacyt, por el apoyo otorgado a través del proyecto “Impacto de los lixiviados en el Parque Nacional de Puerto Morelos”, según convenio SEMARNAT-2008-01-108201. A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, por el apoyo durante las campañas de monitoreo realizadas; en especial a Rosa María Loreto Viruel. Al doctor Roger B. Pacheco Castro, por las horas dedicadas a la lectura y revisión del manuscrito, y por sus invaluable sugerencias y comentarios; al igual a dos revisores anónimos por sus observaciones.

Fuentes consultadas

- American Public Health Association. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20ª ed.). Washington, D. C.: Autor.
- Canul González, O. R. (2004). *Ficha informativa de los humedales de Ramsar*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Carrillo Bribiezca, L. E. (2008). *Calidad de agua y dispersión de contaminantes en la zona costera de la Riviera Maya (Playa del Carmen, Quintana Roo)*. Informe técnico final proyecto CNA-2004-C02-3. Fondo Sectorial CNA-CONACyT. El Colegio de la Frontera Sur.
- Daltabuit, G. M., Vázquez, L. M., Cisneros, H. y Ruiz, G. A. (2006). *El turismo costero en la ecorregión del Sistema Arrecifal Mesoamericano*. Cuernavaca: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (3ª ed.). Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Hemel Hempstead: Prentice-Hall International.
- Galindo de Prince, C. (2007). *Diagnóstico de las percepciones y expectativas de la comunidad de Puerto Morelos sobre el problema de la basura*. Cancún: Educación Ambiental de Amigos de la Isla Contoy.
- Gobierno Municipal de Benito Juárez. (2008). *Actualización del programa de desarrollo urbano del centro de población de Puerto Morelos, municipio de Benito Juárez, Quintana Roo 2008-2023*. Autor.
- Gondwe, B. R. N. (2010). *Exploration, Modelling and Management of Ground-*

- water-Dependent Ecosystems in Karst-The Sian Ka'an Case Study, Yucatan, Mexico* (Tesis de doctorado). Technical University of Denmark, Department of Environmental Engineering.
- Gutiérrez, A. M. y Cervantes, M. A. (2008). Estudios realizados en el acuífero norte de Quintana Roo, México. En M. A. Gutiérrez Aguirre y A. Cervantes Martínez (comps.), *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México* (pp. 10-36). México: Universidad de Quintana Roo, Unidad Cozumel/Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Hernández-Terrones, L., Reboyedo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A. y Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water Air Soil Poll.*, 218, 517-528.
- Instituto Nacional de Ecología. (1992). *Diagnóstico de la problemática de la contaminación del agua en Quintana Roo*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Delegación Quintana Roo, Subdelegación de Ecología, Departamento de Prevención y Control de la Contaminación.
- Instituto Nacional de Ecología. (2000). *Programa de manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos*. Autor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Cuentame... Información por entidad*. Autor. Recuperado de http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=23 [2013, 15 de abril].
- Jordán-Dahlgren, E. y Rodríguez-Martínez, R. E. (1998). Post-hurricane initial recovery of *Acropora palmata* in two reefs of the Yucatan Peninsula, Mexico. *B Mar Sci.*, 63, 213-228.
- Lars, M. (2008). Analysis and evaluation of groundwater and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico. En M. A. Gutiérrez Aguirre y A. Cervantes Martínez (comps.), *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México* (pp. 59-99). México: Universidad de Quintana Roo, Unidad Cozumel/Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Metcalfe, C. D., Beaddows, P. A., Gold, G., Metcalfe, T. L., Li, H. y VanLavieren, H. (2011). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the

- Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environ. Pollut.*, 159, 991-997.
- Ordóñez Crespo, I. y García Rodríguez, M. (2010). Formas kársticas comunes de los cenotes del estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medio Ambiente*, 9, 15-35.
- Secretaría de Salud. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Autor. Recuperado de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html> [2017, 9 de septiembre].
- Supper, R., Merediz, G., Motchka, K., Heidovitsch, M., Ahl, A., Bauer, P. y Neuman, B. (2008). *Estudio estratégico de las aguas subterráneas de Quintana Roo. Informe Preliminar*. Amigos de Sian Ka'an.
- Villasuso, M. y Méndez, R. R. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula. En W. Lutz, L. Prieto y W. Sanderson (eds.), *Population, Development, and Environment on the Yucatan Peninsula: From Ancient Maya to 2030* (pp. 120-139). Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Waterloo Hydrogeologic. (2003). *AquaChem User's Manual*. Autor.

