



GROUNDWATER QUALITY IN A KARSTIC ZONE OF THE ISLAND OF COZUMEL, QUINTANA ROO, MEXICO †

[CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA ZONA KÁRSTICA DE LA ISLA DE COZUMEL, QUINTANA ROO, MÉXICO]

Alex Fernando Contreras-Tax*, Oscar Frausto-Martínez
and Wilbert David Uhu-Yam

*Laboratorio de observación e investigación espacial, Universidad de Quintana Roo.
Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. Calle 110 sur. Col. Maravilla, C.P. 77600,
Cozumel, Quintana Roo, México. Email. alexfe.contreras@hotmail.com*,
ofrausto@uqroo.edu.mx, 1416861@uqroo.mx
Corresponding author

SUMMARY

Background. In the Yucatan peninsula, the main source of water supply for all human activities is groundwater; however, it is highly vulnerable to pollution due to the characteristics of the karst aquifer, which allow a direct and a very susceptible infiltration to pollutant transport. The same process occurs in the islands systems of the east side of the peninsula, particularly on the islands of Holbox, Isla Mujeres and Cozumel, the latter being the most populated (almost 100 000 inhabitants) and with the existence of irregular settlements in the protection areas and water abstraction. **Objective.** In order to understand the characteristics of the groundwater quality, the aim of this study is to sample, determine and map the spatial and temporal behavior of water as a resource, as well as to determine if there are significant differences among the sampling seasons. **Methodology.** To be able to do so, the sampling sites were determined under the following premises: the number of people residing in the plot of land, the years that people have resided in the settlement, if they own an extraction well for domestic use, if they possess a water extraction pump, if they have no drainage, if they burn their garbage and if they have ever become ill from using the extracted water for bathing. Regarding the physical and chemical parameters (temperature, pH, salinity and TDS) they were analyzed *in situ* with multi-parametric instruments; while the bacteriological study was measured by means of the Millipore ® membrane filtration method and chloride were completed in the laboratory; the samplings correspond to three periods (rainy, “Nortes” and dry seasons). The shaping of the spatial pattern of distribution for each parameter was developed using IDW interpolation. Finally, the statistical analysis was conducted with the one-way ANOVA statistical test, as well as the post hoc test for those parameters that had significant differences. **Results.** Thus, eight sampling sites were selected taking into consideration the representative distribution of the territory (132 wells were recognized). In addition, the results tables of the parameters for the rainy, “Nortes” and dry seasons are presented in this document, as well as the maps of spatial distribution. **Implications.** The main limitation to carry out this research was the prohibition when taking two samples, since, for different circumstances, we were not allowed to sample in one sector of the study area. **Conclusion.** From the results of the physicochemical and bacteriological analyzes it is concluded that the water extracted from the wells is not suitable for human use and consumption, since the levels of total dissolved solids and fecal coliforms exceed the maximum permissible limits of the NOM-127-SSA1-1994.

Keywords: irregular settlement; parameters; interpolation; statistical analysis.

RESUMEN

Antecedentes. En la península de Yucatán, la fuente principal de abastecimiento de agua para todas las actividades humanas es el agua subterránea; no obstante, es altamente vulnerable a la contaminación debido a las características del acuífero kárstico, que permiten una infiltración directa y altamente susceptible al transporte de contaminantes. La misma dinámica se presenta en los sistemas insulares del oriente de la península, en específico en las islas de Holbox, Mujeres y Cozumel, siendo esta última la más poblada (casi 100 000 habitantes) y con presencia de asentamientos irregulares en las zonas de protección y captación de agua. **Objetivo.** Con el fin de comprender las características de la calidad del agua subterránea se busca muestrear, analizar y cartografiar el comportamiento espacial y temporal del recurso agua, así como determinar si existen diferencias significativas entre las temporadas de muestreo. **Metodología.** Para ello, se determinaron los sitios de muestreo a partir de las siguientes premisas: el número de personas residiendo en el lote, el número de años residiendo en el asentamiento, si cuenta con pozo de extracción para uso doméstico, si cuenta con bomba de extracción, si no tiene drenaje, si quema su basura y si en algún momento ha sufrido alguna

† Submitted May 30, 2020 – Accepted November 6, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

enfermedad por el uso de agua extraída para bañarse, en tanto, a los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, salinidad y SDT) fueron analizados *in situ* con instrumentos multiparamétricos; mientras que en el laboratorio se realizó el estudio bacteriológico (coliformes fecales) con membranas Millipore® y de cloruros; los muestreos corresponden a tres periodos (lluvias, nortes y sequía). La modelación de los patrones de distribución espacial para cada parámetro se desarrolló usando la interpolación IDW, finalmente el análisis estadístico se realizó con la prueba estadística ANOVA de una vía, así como la prueba *posthoc* para aquellos parámetros que tuvieran diferencias significativas. **Resultados.** Así, se seleccionaron ocho sitios de muestreo teniendo en consideración la distribución representativa del territorio (132 pozos reconocidos), además, se presentan las tablas de los resultados de los parámetros para la temporada de lluvias, nortes y sequía, así como los mapas de distribución espacial. **Implicaciones.** La principal limitación de esta investigación fue la prohibición de la toma de dos muestras, ya que, por distintas circunstancias no se permitió realizar el muestreo en un sector del área de estudio. **Conclusión.** A partir de los resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos se concluye que el agua extraída de los pozos no es apta para el uso y consumo humano, ya que los niveles de sólidos disueltos totales y de coliformes fecales sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.

Palabras Clave: asentamiento irregular; parámetros; interpolación; análisis estadísticos.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas kársticos son relieves estructurales con una susceptibilidad a fenómenos naturales de diverso orden, en donde la presión de las actividades humanas juega un papel central en la determinación de riesgo (Thornbush, 2017). El acuífero de la península de Yucatán es uno de los más extensos y significativos del planeta, con más de 165,000 km² y donde habitan casi 10 millones de habitantes altamente dispersos y con un significado cultural milenario producto de la cultura maya (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la minería (Foster *et al.*, 2002). México tiene una disponibilidad de agua muy variable, con un norte del país árido y con severas limitaciones de agua y un sur con menores problemas de escasez, pero con problemas de contaminación y uso ineficiente (CONAGUA, OCDE and IMTA, 2010). En la península de Yucatán el acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua para todas las actividades humanas; no obstante, es altamente vulnerable a la contaminación debido a sus características kársticas, que permiten infiltración y arrastre de contaminantes (Aguilar-Duarte *et al.*, 2016).

El Karst es un término usado para describir un especial tipo de paisaje que contiene formas singulares a diversas escalas, se caracteriza por la formación de típicas depresiones cerradas, la presencia de poco drenaje superficial debido a una alta y rápida infiltración, la abundancia de cuevas y presencia de un sistema subterráneo de agua que se desarrolla sobre rocas especialmente solubles como la caliza, el mármol y el yeso (Fragoso-Servón and Pereira-Corona, 2014). Entre los principales autores que han realizado estudios sobre la calidad del agua del acuífero kárstico en Yucatán, Quintana Roo y Cozumel, centrados en la calidad del agua subterránea, tenemos a Pacheco *et al.* (2004); Villasuso-Pino (2006); Coronado *et al.* (2011);

Sánchez *et al.* (2015); Koch *et al.* (2016) y Sánchez *et al.* (2016).

El agua subterránea es un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural y juega un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos. Con frecuencia, quienes dependen de estos recursos no han adoptado acciones significativas para asegurar la calidad natural del agua, ni han realizado esfuerzos adecuados para evaluar los peligros potenciales de contaminación (Foster *et al.*, 2002).

Dadas estas condiciones, la NOM-127-SSA1-1994, hace mención que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características microbiológicas, físicas, organolépticas, químicas y radioactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor con las condiciones óptimas para su uso.

No obstante, para impulsar la gestión adecuada del agua es fundamental contar con información necesaria sobre el estado de este recurso, pues así será posible guiar la toma de decisiones y definir acciones (Sánchez *et al.*, 2016). En este sentido, el conocimiento de la composición química y su distribución espacial a través de la calidad del agua es fundamental desde el punto de vista de su aptitud para el consumo humano, al igual que por la información que pueden aportar acerca de la dirección y extensión de los sistemas de flujo subterráneo (CCPY, 2012); más aún, puede indicar cambios estacionales y temporales en la medida que sus constituyentes químicos estén presentes en el acuífero (Kumar and James, 2013).

Finalmente, este estudio propone muestrear y analizar la calidad del agua subterránea de un asentamiento irregular, a partir del análisis de parámetros

fisicoquímicos y bacteriológicos en relación con el patrón estacional, además de cartografiar el comportamiento de seis variables de manera espacial y temporal y determinar si hay diferencias significativas entre las temporadas a partir de la prueba estadística ANOVA de una vía; con el fin de que esta información ayudará a gestionar de una mejor manera el manejo y aprovechamiento del agua subterránea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Cozumel se localiza en la zona costera sur oriental de México a 17.5 km de la costa de la ciudad de Playa del Carmen, al noreste de la Península de Yucatán y tiene una extensión total 647.33 km² lo que representa el 1.27 % del estado y constituye una planicie sin elevaciones importantes, que no llegan a más de 20 m de altura. Su clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; la temperatura media anual es de 27.6° centígrados y una precipitación media anual de 1387 milímetros (Orellana *et al.*, 2007); la vegetación predominante es la selva mediana subperennifolia y su suelo se compone de dos tipos: rendzina (82.38 %) y solonchack (17.62 %), por lo que, el tipo de roca predominante son las calizas.

El asentamiento irregular Ranchitos se encuentra ubicado en la carretera transversal entre kilómetro cuatro con coordenadas 20° 48' 53.2'' latitud norte y 86° 91' 78.4'' longitud oeste y el kilómetro seis con coordenadas 20° 47' 53.8'' latitud norte y 86°90' 59.7'' latitud oeste (figura 1); el cual está integrado de ocho calles principales, teniendo un área promedio de 21. 838.379 m² y un perímetro de 47.639 m.

Selección de los sitios de muestreo

Los datos fisicoquímicos y bacteriológicos de la calidad del agua subterránea corresponden a tres periodos de muestreo realizados durante las temporadas de lluvias, nortes y sequía, (septiembre-octubre de 2017, enero de 2018 y mayo de 2018, respectivamente). La selección de los sitios de muestreo forman parte de un estudio previo sobre la caracterización del asentamiento con base en indicadores sociales, económicos y ecológicos, es por ello, que fueron elegidos a partir del cumplimiento de ciertas premisas, tales como: el número de personas residiendo en el lote (5.8 miembros por vivienda), el número de años residiendo en el asentamiento (entre 0 y 7 años), si cuenta con pozo de extracción para uso doméstico, si cuenta con bomba de extracción, si no tiene drenaje, si quema su basura y si en algún momento ha sufrido alguna enfermedad por el uso del

agua extraída para bañarse (12.12%) (un análisis detallado de esta selección puede leerse en: Contreras and Frausto (2019).

Calidad del agua

Análisis de campo

La primera fase consistió en la medición *in situ* de los parámetros fisicoquímicos como temperatura (°C), salinidad (g/kg) y sólidos disueltos totales (mg/L) con el instrumento de medida Greisinger GLF modelo 100, mientras que el potencial de hidrógeno (pH) se midió con el instrumento Voltcraft PH-100ATC.

Análisis de laboratorio

La segunda fase consistió en el estudio de laboratorio de cloruros (mg/L) y de coliformes fecales (NMP/100 ml); las muestras se colectaron directamente del flujo de agua al momento de extraerla del pozo utilizando frascos esterilizados de 100 ml los cuales una vez tomada la muestra se pusieron en un recipiente con hielo para evitar que esté en temperatura ambiente y así conservar sus propiedades hasta el análisis de laboratorio con el método de filtración de membrana Millipore® (APHA-AWWA-WPCF, 2000); mientras que los cloruros se cuantificaron a partir del método de titulación con nitrato de plata (NMX-AA-073-SCFI-2001).

Para determinar la calidad del agua de los sitios muestreados se utilizó la NOM-127-SSA1-1994, con el objetivo de comparar los límites máximos permisibles de esta norma (tabla 1) con los resultados obtenidos de los análisis de las muestras; se seleccionaron estos parámetros, ya que se quería replicar un estudio que realizó Koch *et al.* (2016) en otro asentamiento irregular (Las Fincas) de la Isla Cozumel y comparar si existen diferencias entre las concentraciones de las variables en ambas zonas de estudio.

Tabla 1. Límite Máximo permisible de las variables.

Parámetros	Unidad	Límite máximo NOM-127-SSA1-1994
pH	Intervalo de pH	6.5 -8.5
SDT	mg/L	1000
Cloruros	mg/L	250
Coliformes	NMP/100	0
Fecales	mL	

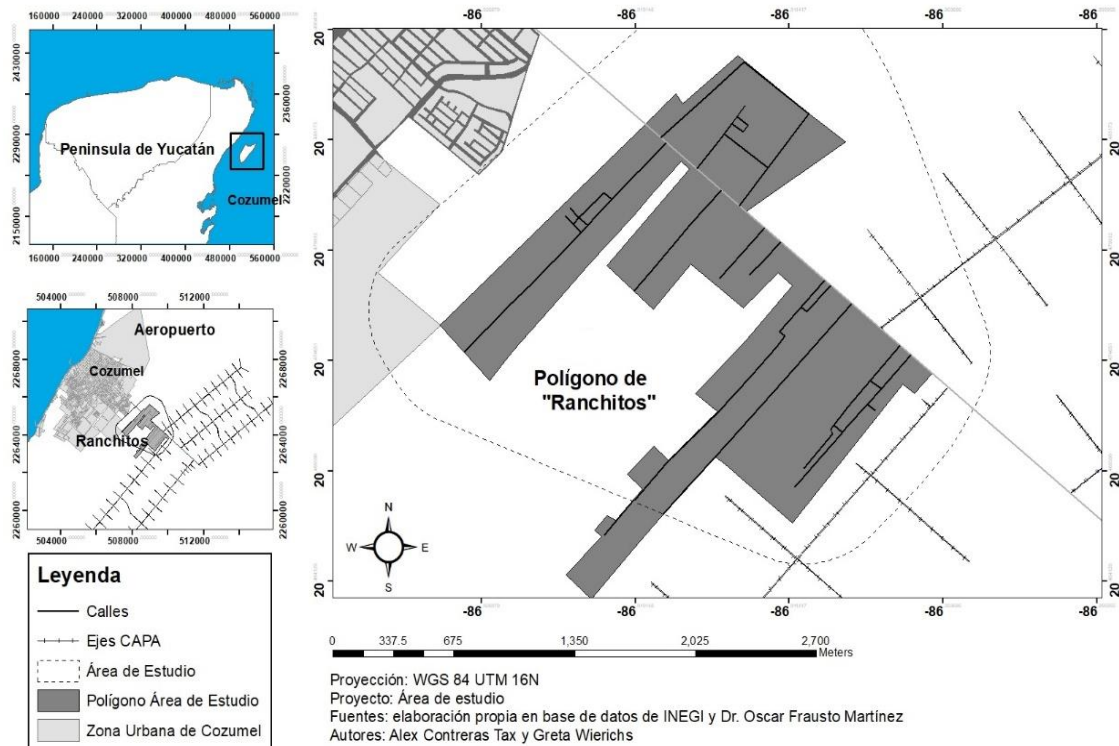


Figura 1. Ubicación geográfica del asentamiento irregular “Ranchitos” en la Isla Cozumel.

Análisis espacial

En esta investigación, la modelación de los patrones de distribución espacial para cada parámetro de la calidad del agua se desarrolló usando la interpolación IDW. A través de esta herramienta del SIG se puede estimar los valores espaciales en aquellos sitios no muestreados o en el que no se ha hecho algún tipo de medición (Sánchez *et al.*, 2016). El método IDW (ponderación de distancia inversa) determina puntos núcleos, los cuales concentran valores más altos, asignando pesos con base en la distancia entre los puntos (Villatoro *et al.*, 2008). Por estas características, se elige este método en comparación, ya que, además del número de muestreos, se ajusta a la distribución heterogénea de los sitios y que posibilita el desarrollo de mapas de distribución más finos para esta investigación.

Se seleccionaron ocho sitios de muestreos teniendo en consideración la distribución representativa del territorio (figura 2). Se presentan datos en rojo (Columna “sin muestreo”), los cuales representan un promedio obtenido con los resultados de los otros sitios de muestreo, ya que, por distintas circunstancias no se nos permitió realizar la toma de la muestra, por lo que, para no modificar de manera significativa los mapas de interpolación, se tomó esta decisión. Finalmente, se

interpretan los resultados obtenidos, así como, los mapas de distribución espacial de los parámetros con la técnica de interpolación.

Análisis estadístico

Para identificar si existían diferencias significativas entre temporadas de los parámetros analizados se usó el software estadístico IBM SPSS Statistics versión 25, donde se corrieron las pruebas de normalidad y posteriormente se decidió usar la prueba de ANOVA de una vía, ya que los datos tienen una distribución normal, por lo que, para aquellos parámetros que arrojaron diferencias significativas en la prueba, se aplicó la prueba *posthoc* para determinar entre qué temporadas existen diferencias significativas.

Interpolación de las variables fisicoquímicas y bacteriológicas

Con los resultados de los análisis de los muestreos por patrón estacional se elaboraron los mapas de distribución espacial de seis parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos (Temperatura, pH, Salinidad, SDT, Cloruros y Coliformes Fecales). Los mapas se elaboraron con el software ArcGis 10.3.

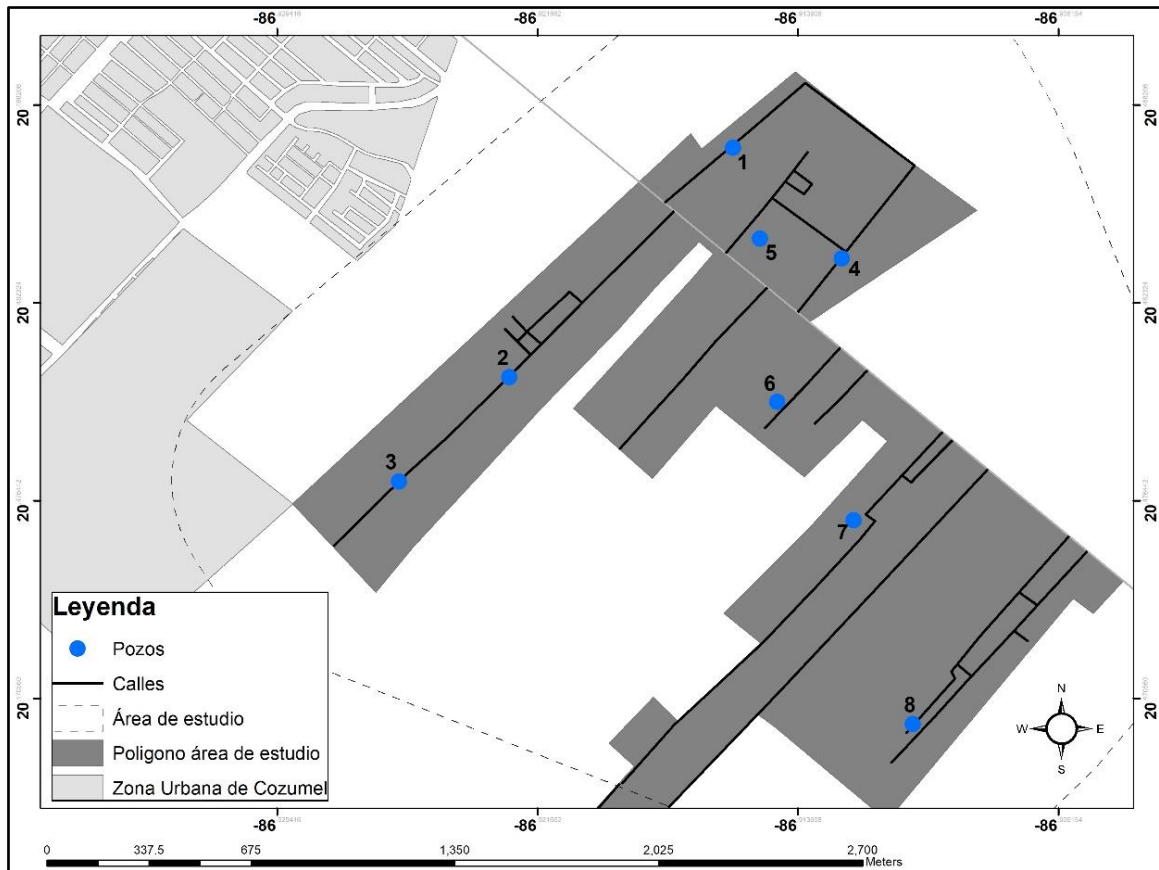


Figura 2. Distribución de los sitios muestreados dentro del polígono de “Ranchitos”.

El número de clases presentes en cada mapa se asignó conforme a los valores de cada uno de los seis parámetros, así como el mejor ajuste posible para una mejor visualización, ya que lo que se pretende identificar son los cambios que las concentraciones de estas variables presentan dentro del polígono de la zona de estudio para cada patrón estacional. Cabe resaltar que para la salinidad se usaron únicamente dos clases, sin embargo, para el potencial de hidrógeno y cloruros se usaron cinco clases, para temperatura y TSD se usaron seis clases y únicamente en coliformes fecales se usaron siete clases.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables fisicoquímicas y bacteriológicas

Los resultados obtenidos en los muestreos del agua subterránea en la temporada de lluvias, nortes y sequía de los ocho sitios de muestreo se presentan en la tabla 2.

Parámetros fisicoquímicos

Temperatura (°C)

Para lluvias, la temperatura menor corresponde a 25.9°C (sitio 4) y la mayor a 26.3°C (sitio 2 y 5); para la temporada de nortes, la temperatura menor corresponde a 24.1°C (sitio 1) y la mayor a 25.4°C (sitio 2); para la temporada de sequía, la temperatura menor corresponde a 25.1°C (sitio 3 y 4) y la mayor a 25.9°C (sitio 1) (ver figura 3); a partir de la prueba de ANOVA se detectaron diferencias significativas (ver tabla 3) entre las medias de las temporadas. Estas diferencias significativas existen entre las tres temporadas según los resultados de la prueba *posthoc* (ver anexo 1). Teniendo valores más altos en la temporada de lluvias y descendiendo en nortes, sin embargo, estas diferencias de 2°C entre la mínima y la máxima registrada no afecta en otros procesos del agua, ya que este comportamiento se debe a los patrones estacionales (Villasuso, 2006). Tal como lo describe Coronado *et al.* (2011) en su estudio “Calidad del agua en pozos de la Isla Cozumel, México” obteniendo resultados similares (alrededor de 25°C durante todo el año).

Tabla 2. Resultados de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de los sitios de muestreo.

Primer muestreo (Lluvias) Septiembre – Octubre 2017							
Pozo	Fecha	Temperatura (°C)	pH	Salinidad (g/Kg)	SDT (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
1	20/09/2017	26.1	7.51	0.4	751	108	12
2	20/09/2017	26.3	7.46	0.6	1150	116	800
3	04/10/2017	26.1	7.75	0.2	387	40	900
4	20/09/2017	25.9	7.24	0.5	920	84	256
5	20/09/2017	26.3	7.78	0.5	840	68	50
6	20/09/2017	26.2	8.06	0.2	381	40	700
7	20/09/2017	26.2	7.65	0.3	530	36	600
8	20/09/2017	26.2	7.03	0.3	593	16	450
Segundo muestreo (Nortes) Enero 2018							
1	10/01/2018	24.1	7.51	0.4	782	68	60
2	11/01/2018	25.4	6.98	0.6	1070	92	800
3	10/01/2018	25.1	7.51	0.4	672	52	600
4	10/01/2018	24.8	7.52	0.5	852	76	400
5	10/01/2018	24.9	7.74	0.5	853	76	80
6	10/01/2018	25.3	7.72	0.2	409	48	650
7	10/01/2018	25.3	7.25	0.3	552	40	700
8	sin muestreo*	24.9	7.46	0.4	741	64	470
Tercer muestreo (Sequía) Mayo 2018							
1	09/05/2018	25.9	6.85	0.4	785	72	10
2	10/05/2018	25.8	6.96	0.6	1090	128	700
3	09/05/2018	25.1	6.77	0.4	678	48	900
4	09/05/2018	25.1	6.69	0.4	748	80	280
5	09/05/2018	25.8	6.78	0.5	871	68	60
6	sin muestreo*	25.5	6.82	0.4	775	72	360
7	09/05/2018	25.5	6.84	0.3	612	48	550
8	10/05/2018	25.8	6.91	0.3	643	64	20

*Las columnas denominadas “sin muestreo” (datos en negrita) representan un promedio obtenido con los resultados de los otros sitios de muestreo, ya que por diversas circunstancias no se nos permitió coleccionar la muestra.

Tabla 3. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de temperatura.

Temperatura						
	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.	
Entre grupos	5.641	2	2.820	28.857	0.000000944	
Dentro de grupos	2.053	21	0.098			
Total	7.693	23				

Potencial de hidrógeno (pH)

Para lluvias el valor menor del pH corresponde a 7.03 (sitio 8) y el mayor a 8.06 (sitio 6), para nortes el valor menor es de 6.98 (sitio 2) y el mayor a 7.74 (sitio 5), sin embargo, para sequías el valor menor es de 6.69 (sitios 4) y el mayor a 6.96 (sitio 2). Existiendo una pequeña variación en comparación con los resultados de Koch *et al.* (2016), en su investigación de la calidad del agua del asentamiento irregular “Las Fincas”, en la cual reconocen un pH mínimo de 7.26 y un máximo de 7.98 superando este rango en lluvias en el sitio 6 de

muestreo y por debajo en el sitio 2 en nortes y durante toda la temporada de sequía (ver tabla 2), sin embargo, los resultados presentados por Koch *et al.* (2016) corresponden a el mes de marzo, por lo que se encuentran fuera de estas dos patrones estacionales. En el análisis estadístico se encontró diferencias significativas entre las medias de pH por temporadas, esto según los resultados obtenidos de la prueba de ANOVA (ver tabla 4). Estas diferencias significativas se encuentran solamente entre la temporada de lluvias-sequías y nortes-sequías según los resultados de la prueba *posthoc* (ver anexo 2). A pesar de haber

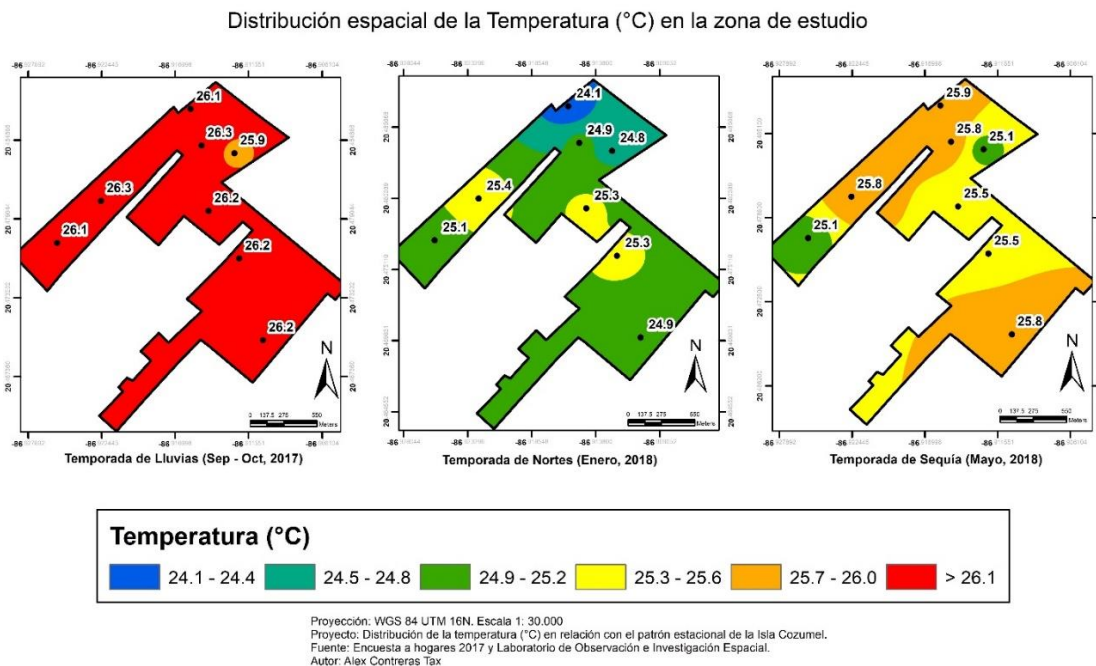


Figura 3. Distribución de la temperatura de los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

Tabla 4. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de pH.

pH						
	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.	
Entre grupos	2.528	2	1.264	21.809	0.0000075	
Dentro de grupos	1.217	21	0.058			
Total	3.745	23				

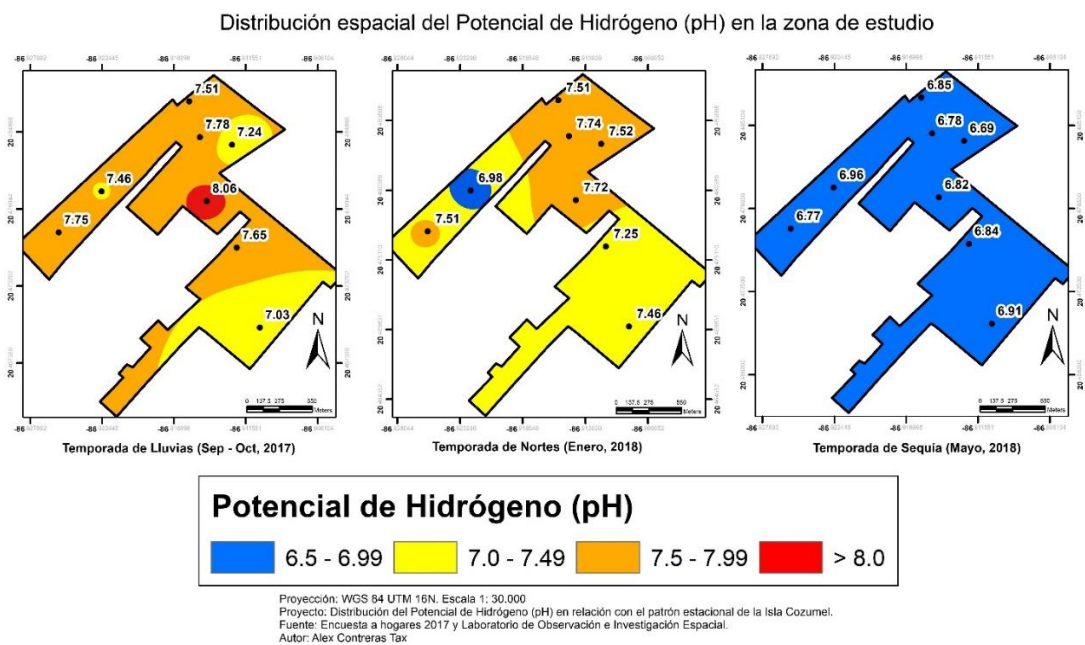


Figura 4. Distribución del potencial de hidrógeno de los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

diferencias estadísticas, estas no influyen en la calidad del agua, ya que no rebasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994. En la clasificación de rangos de pH se puede apreciar que existe una ligera diferencia entre las tres temporadas, pasando de ligeramente ácida en mayo a ligeramente alcalina en septiembre – Octubre (ver figura 4), esto posiblemente por el tipo de tratamiento aplicado, por la corriente subterránea del cual proviene (Pérez-López, 2016) o por el aumento de la recarga de agua, ya que esos meses comprenden la temporada de lluvias donde el agua comienza a ser más neutra (Coronado *et al.*, 2011) para este tipo de sistemas acuáticos.

Salinidad (g/kg)

Para lluvias, la concentración menor corresponde a 0.2 g/kg (sitio 3 y 6) y la mayor a 0.6 g/kg (sitio 2), para la temporada de nortes, la salinidad menor corresponde nuevamente a 0.2 g/kg (sitio 6) y la mayor a 0.6 g/kg (sitio 2); para la temporada de sequía, la salinidad menor corresponde a 0.3 g/kg (sitio 7 y 8) y la mayor

a 0.6 g/kg (sitio 2). Debido al amplio intervalo de concentraciones que puede experimentar un agua natural, se clasificó en función de su salinidad (VENICE SYSTEM, 1959). Clasificándose en dos tipos: aguas dulces (con valores de salinidad total <0.5 g/kg) y aguas oligohalinas (0.5 a 4 g/kg). Se determina que para la temporada de lluvias y nortes los pozos más salados tienden a tener la misma distribución (sitio 2, 4 y 5); sin embargo, para sequía únicamente los sitios 2 y 5 se mantienen como aguas oligohalinas, el resto de los sitios se mantienen como aguas dulces (ver figura 5). Relacionándose con lo que plantea Ribera (2016) en su investigación donde menciona que la concentración en sales de un agua subterránea suele ser una mezcla de orígenes diversos, tanto naturales como antrópicos, que están siempre relacionados con el comportamiento hidrodinámico del acuífero y su variación espacial y temporal. Sin embargo, a partir de la prueba de ANOVA no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las tres temporadas (ver Tabla 5).

Tabla 5. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de salinidad.

Salinidad	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.007	2	0.004	0.237	0.791
Dentro de grupos	0.333	21	0.016		
Total	0.340	23			

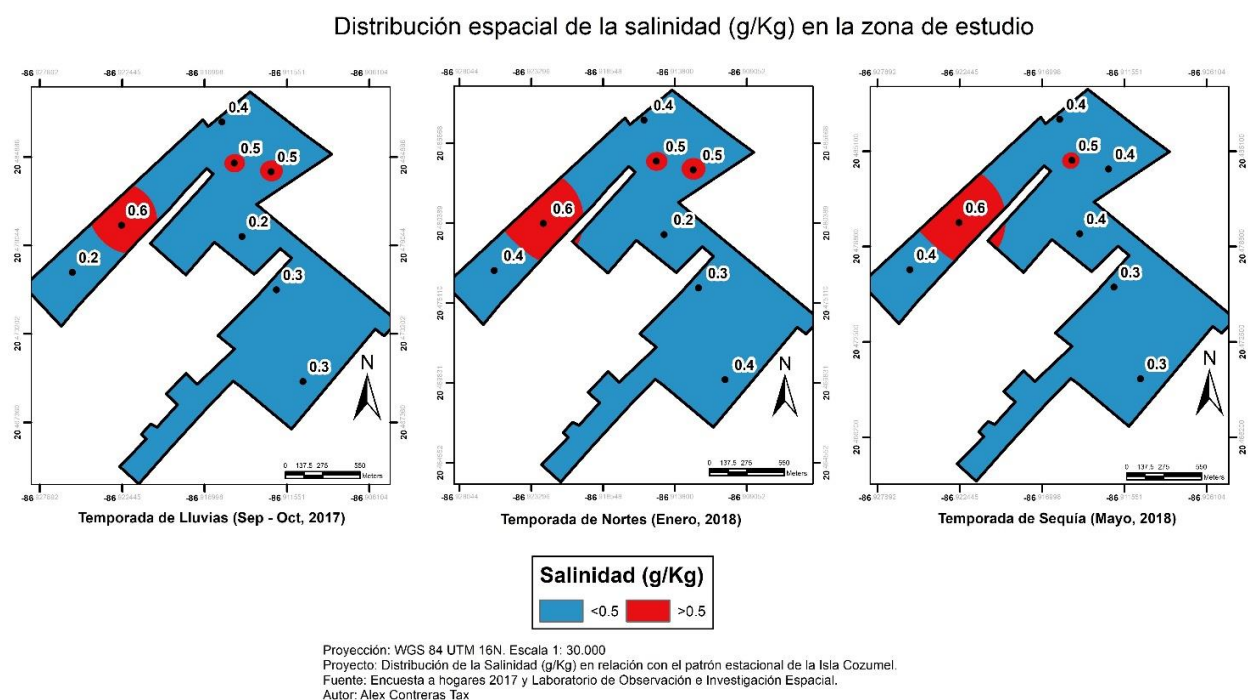


Figura 5. Distribución de la salinidad de los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

Sólidos disueltos totales (mg/L)

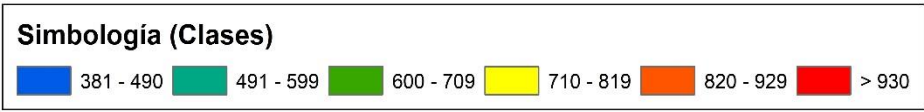
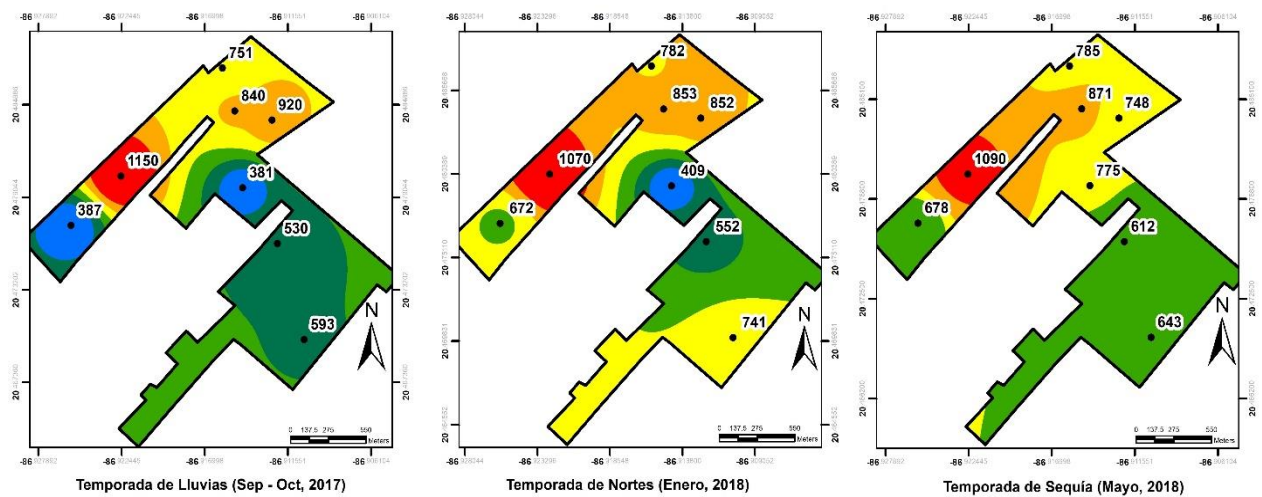
Para lluvias la concentración menor de SDT corresponde a 381 mg/L (sitio 6) y la mayor a 1150 mg/L (sitio 2), para nortes, la concentración menor es de 409 mg/L (sitio 6) y la mayor a 1070 mg/L (sitio 2), mientras que, para sequía, la concentración menor es de 612 mg/L (sitio 7) y la mayor a 1090 mg/L (sitio 2). Al realizar la prueba de ANOVA con los resultados de los muestreos no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las tres temporadas (ver tabla 6). Sin embargo, se observa que las mayores concentraciones de los sólidos disueltos totales se ubican en la zona oeste del polígono de Ranchitos,

mientras que las menores concentraciones se encuentran en el este, identificando que el sitio 2 excede los límites máximos permisibles (1000 mg/L) de la NOM-127-SSA1-1994 en las tres temporadas considerándose de forma general que no es apta para el uso y consumo humano (ver figura 6). Sánchez *et al.* (2016) reporta concentraciones de 228.2 a 2877 mg/l para el 2002 donde el 22% de las muestras rebasan estos límites y para el año 2012 el 42% de las muestras lo rebasa, obteniendo resultados entre 288.6 y 7 466.85 mg/l en temporadas de lluvias. Para los sitios que rebasaron los límites de SDT se pueden deber a intrusión de agua de mar (Koch *et al.*, 2016) e indican aguas de mala calidad (Sánchez *et al.*, 2016).

Tabla 6. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de SDT.

SDT	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	26649.250	2	13324.625	0.291	0.750
Dentro de grupos	961055.375	21	45764.542		
Total	987704.625	23			

Distribución espacial de los Sólidos Disueltos Totales (mg/L) en la zona de estudio



Proyección: WGS 84 UTM 16N. Escala 1: 30 000
 Proyecto: Distribución de los Sólidos Disueltos Totales (mg/L) en relación con el patrón estacional de la Isla Cozumel.
 Fuente: Encuesta a hogares 2017 y Laboratorio de Observación e Investigación Espacial.
 Autor: Alex Contreras Tax

Figura 6. Distribución de los sólidos disueltos totales de los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

Cloruro (mg/L)

Se identifica que, en la temporada de lluvias, la concentración menor de cloruros corresponde a 16 mg/L (sitio 8) y la mayor a 116 mg/L (sitio 2), para nortes, la menor concentración de cloruros es de 40 mg/L (sitio 7) y la mayor a 92 mg/L (sitio 2), para sequía, la menor concentración de cloruros corresponde a 48 mg/L (sitio 3 y 7) y la mayor de 128 mg/L. No obstante, al realizar la prueba de ANOVA no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las tres temporadas (ver tabla 7). Se identificó la mayor concentración entre las tres temporadas en el sitio 2 (ver figura 7), esta presencia de cloruros se puede deber al uso de tablas de cloro usada por los propietario de estos sistemas como método de desinfección (Koch *et al.*, 2016), a pesar de la presencia de cloruros ningún sitio durante las tres temporadas rebaso los límites permisibles de la NOM-

127-SSA1-1994 (250 mg/L), sin embargo, Sánchez *et al.* (2015) reporta concentraciones que rebasan los límites máximos permisibles en los pozos de abastecimiento para la parte sur del Estado de Quintana Roo.

Coliformes fecales (NMP/100 ml)

En la temporada de lluvias, la concentración menor de Coliformes fecales corresponde a 12 NMP/100 mL (sitio 1) y la mayor a 900 NMP/100 mL (sitio 2), para la temporada de nortes la concentración menor corresponde a 60 NMP/100 mL (sitio 1) y la mayor a 800 NMP/100 mL (sitio 2) y para la temporada de sequía la concentración menor corresponde a 10 NMP/100 mL (sitio 1) y la mayor a 900 NMP/100 mL (sitio 3). Todos los sitios de muestro sobrepasan los límites máximos permisibles de coliformes fecales (figura 8) según la Norma Oficial Mexicana

Tabla 7. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de cloruros.

Cloruros					
	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	389.333	2	194.667	0.259	0.774
Dentro de grupos	15786.000	21	751.714		
Total	16175.333	23			

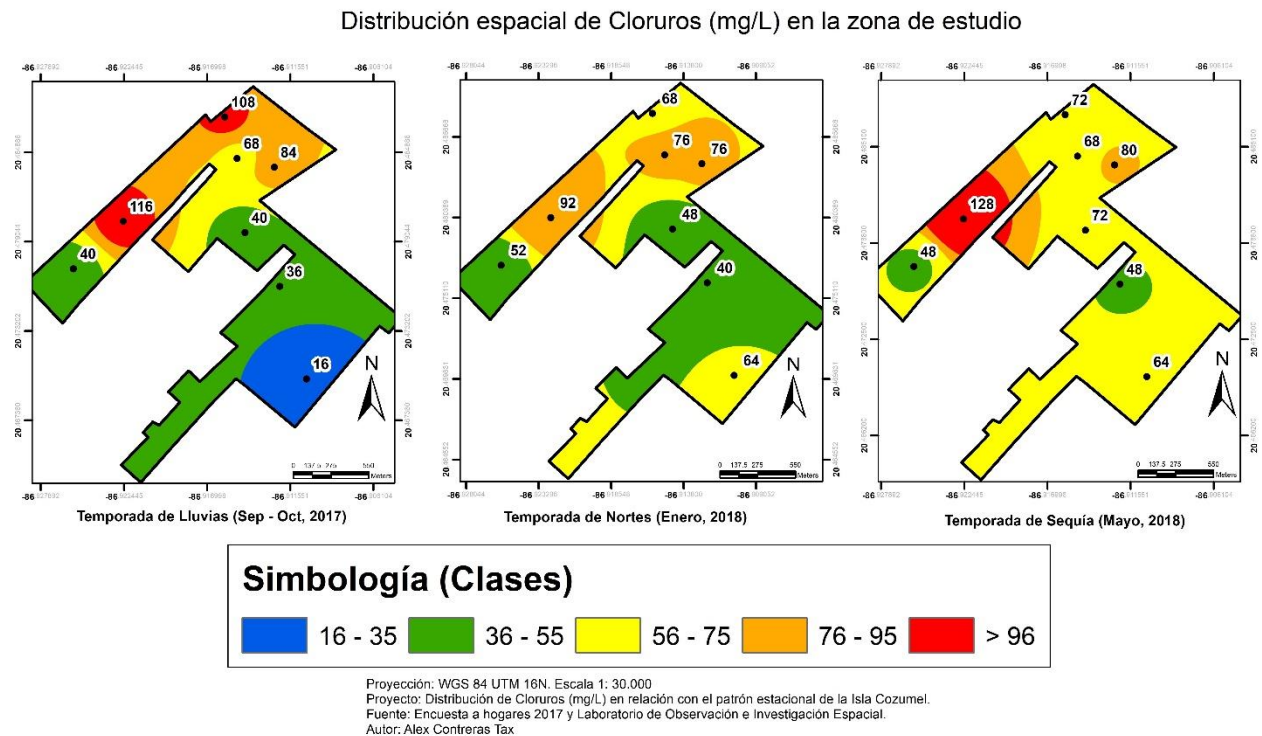
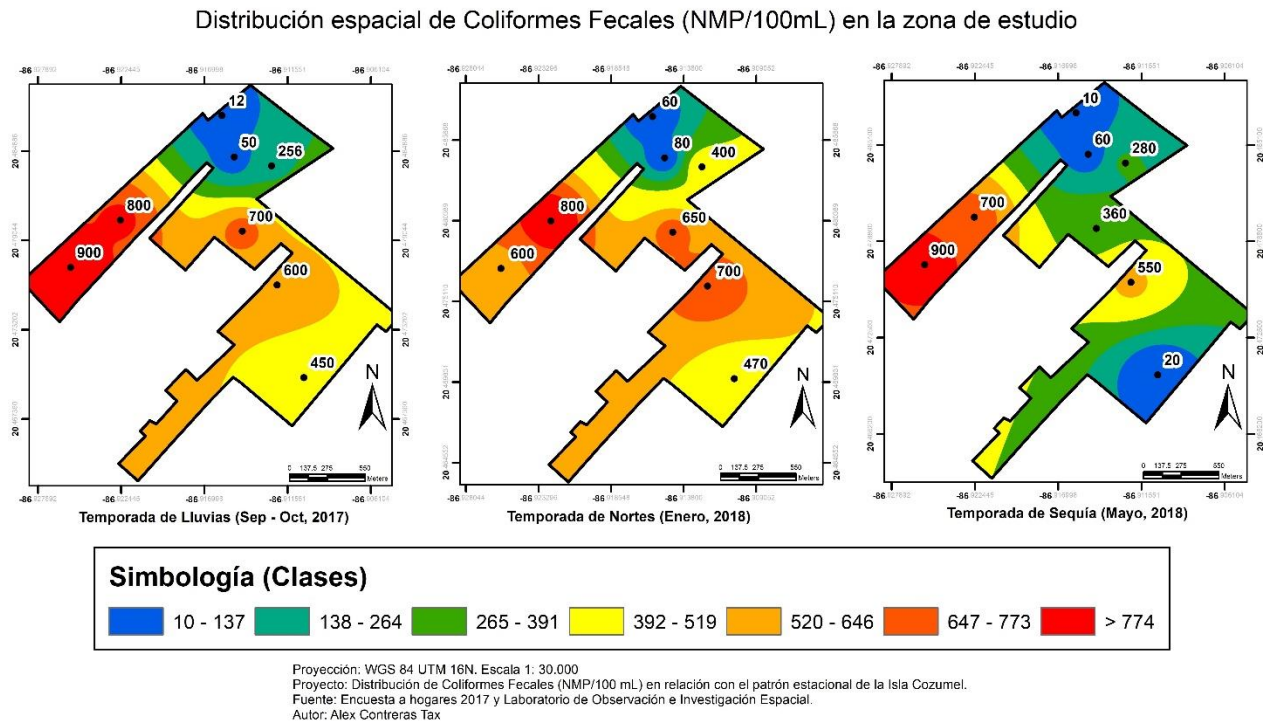


Figura 7. Distribución de los cloruros en los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

Tabla 8. Prueba estadística de ANOVA de una vía para la variable de Coliformes fecales.

Coliformes fecales					
	Suma de cuadrados	Gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	65125.333	2	32562.667	0.324	0.727
Dentro de grupos	2109952.00	21	100473.905		
Total	2175077.333	23			

**Figura 8.** Distribución de las coliformes fecales en los pozos muestreados en relación con el patrón estacional de la Isla de Cozumel.

127-SSA1-1994 que establece como valor no detectable de organismos Coliformes fecales (0 NMP/100 mL). Al igual que Koch *et al.* (2016) también registra niveles no permisibles de estos organismos en el agua subterránea en un asentamiento similar. El aumento de estos niveles en la temporada de lluvias podría explicarse por el arrastre de materia contaminada al agua subterránea, propiciada por la alta vulnerabilidad intrínseca del acuífero y la disminución de estos niveles, en algunos sitios podrían deberse al uso de pastillas de cloro, sin embargo, los altos niveles están presentes en todas las temporadas, ya que es patente en todo el acuífero e independiente de la época del año, tal y como lo afirma González *et al.* (2017); además en la prueba de ANOVA aplicada para este estudio no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las temporadas (ver tabla 8).

Por otro lado, según la guía para estimar la calidad de fuentes potenciales de agua con base en su grado de

contaminación de coliformes (LILLIBRIDGE, 2000) todos los sitios entran dentro de la clasificación de agua peligrosa a contaminada, a excepción de sitio 1 en sequía la cual se clasifica como aceptable.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos en el asentamiento irregular denominado “Ranchitos” se concluye que el agua extraída de los pozos no es apta para el uso y consumo humano, ya que los niveles de sólidos disueltos totales y de coliformes fecales sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 en todas las temporadas. Así mismo, se comprobó que la temporada climática no afecta significativamente los niveles de salinidad, sólidos disueltos totales, cloruros y coliformes fecales, sin embargo, sí se registraron estas diferencias estadísticamente significativas para la temperatura

entre las tres temporadas y para el pH entre la temporada de sequía con respecto a lluvias y nortes, pudiéndose deber a el aumento de la precipitación durante estas temporadas.

Por tal motivo, es necesario realizar estudios más puntuales sobre la fuente de origen de los coliformes fecales, ya que en algunos sitios se encontraron niveles muy altos, siendo esto de gran importancia porque la ubicación del área de estudio es colindante con la zona de captación de agua de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), la cual suministra este recurso para el uso humano en la Isla de Cozumel. Finalmente, es evidente la necesidad de plantear estrategias para el manejo y uso de estas aguas extraídas de los pozos para las personas que residen en estos asentamientos.

Agradecimientos

A los residentes de Ranchitos que me permitieron tomar muestras en sus domicilios, a la universidad de Quintana Roo por permitirme usar sus instalaciones, al Laboratorio de observación e investigación espacial por las asesorías, a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) por permitirme analizar las muestras bacteriológicas en el laboratorio de la institución, a Greta Wierichs, Gerardo Hernández y Karen Dzul por sus aportaciones y sus comentarios, así como su ayuda en la traducción del resumen.

Financiamiento. Los autores agradecen el apoyo financiero del Laboratorio de Observación e Investigación Espacial perteneciente a la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Cozumel.

Conflicto de interés. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

Cumplimiento de normas éticas. La investigación fue realizada y presentada por los autores bajo principios éticos y responsabilidad científica en el manejo de los datos.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el autor Alex Contreras Tax (alexfe.contreras@hotmail.com) por correspondencia, con previa solicitud.

REFERENCIAS

Aguilar-Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M., Frausto, O., Ihl, T. and Delgado, C., 2016. IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, pp.913–933.

APHA-AWWA-WPCF, 2000. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y*

residuales. 17th ed. Madrid, España.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, M. and Merediz-Alonso, G., 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), pp.507–524.
- CCPY, 2012. *Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos del estado de Quintana Roo*. Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán, Chetumal, México.
- CONAGUA, OCDE and IMTA, 2010. Financing water resources management in Mexico. *Water Resources Management*, p.32.
- Contreras, A. and Frausto, O., 2019. Indicadores de sustentabilidad de la calidad del agua de pozo en un asentamiento irregular en zonas kársticas. In: *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México*. Acts With Science- Asociación Mexicana de Estudios sobre Karst – Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística _ Universidad de Quintana Roo pp.155–175.
- Coronado Álvarez, L., Gutierrez Aguirre, M.A. and Cervantes Martínez, A., 2011. Water Quality in Wells From Cozumel Island, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, pp.233–241.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Delia, M. and Paris, M., 2002. *Protección de la Calidad del Agua Subterránea*. Mundi-Prensa libros, Madrid. Available at: <http://documents1.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>
- Fragoso-Servón, P. and Pereira-Corona, A., 2014. El karst de la porción este de la Península de Yucatán. XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. pp.2352–2361.
- González, R.A., Sánchez, I.A., Cervantes, A. and Osorio, J.H., 2017. Calida de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Teoría y Praxis*, 14(25), pp.69–89.
- Koch, C., Frausto, O., Giese, S., Schirmer, M. and Steenbeck, T., 2016. Impact on groundwater of a karstic aquifer in the informal settlement “Las Fincas” on Cozumel Island, Mexico. *Environmental Impact III*, 1(Eid), pp.147–158.
- Kumar, P.J.S. and James, E.J., 2013. Development of Water Quality Index (WQI) model for the

- groundwater in Tirupur district, South India. *Chinese Journal of Geochemistry*, 32(3), pp.261–268.
- Lillibridge, S., 2000. *Manejo de los aspectos de salud ambiental en los desastres: agua, excretas humanas y albergues*. [online] *Salud pública*. Available at: <<http://adolescencia.msal.gov.ar/dinesa/imagenes/stories/pdf/impacto-desastres.pdf#page=80>>.
- Orellana, R., Nava, F. and Espadas, C., 2007. El clima de Cozumel y la Riviera Maya. In: *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel*. CONABIO, México. p.422.
- Pacheco, J., Cabrera, A. and Pérez, R., 2004. Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2), pp.165–179.
- Pérez-López, E., 2016a. Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(3), p.3.
- Ribera, F., 2016b. Salinidad y aguas subterráneas. *Hidrogeología emergente. 50 Aniversario FCIHS.*, [online], pp.119-131. <https://www.fcihis.org/archivo/biblioteca-multimedia/jornadas-50-aniversario-cihs/>
- Sánchez, J.A., Álvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, J.G., González-Herrera, R.A. and Carrillo-Briebiezca, L., 2015. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), pp.62–76.
- Sánchez, J.A., Álvarez, T., Pacheco, J.G., Carrillo, L. and González, R.A., 2016. Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), pp.75–96.
- Thornbush, M., 2017. Part 1: Contemporary Challenges and Current Solutions in Sinkhole Occurrence and Mitigation. *Journal of Geology & Geophysics*, 06(03), pp.1–9.
- VENICE SYSTEM, 1959. *Final resolution of the symposium on the classification of brackish waters*. Archivio di Oceanografia e Limnologia. No. 11 (suppl.) pp.243-245.
- Villasuso-Pino, M., 2006. *Estudios geohidrológicos en los acuíferos cársticos costeros del norte de Quintana Roo*. Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. “El sistema hidrológico de Quintana Roo”. Comisión Nacional de Agua. Chetumal, México, 48 págs.
- Villatoro, M., Henríquez, C. and Sancho, F., 2008. Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 32(1), pp.95–105.

ANEXO (Material suplementario)

Anexo 1. Prueba *posthoc* para determinar las diferencias significativas entre temporadas de la variable temperatura.

Variable dependiente:						
Scheffe						
(I) Temporada		Diferencias de medias (I – J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Lluvias	Nortes	1.1875*	0.1563	0.00000094	0.776	1.599
	Sequía	.6000*	0.1563	0.0038	0.188	1.012
Nortes	Lluvias	-1.1875*	0.1563	0.00000094	-1.599	-0.776
	Sequía	-.5875*	0.1563	0.0045	-0.999	-0.176
Sequía	Lluvias	-.6000*	0.1563	0.0038	-1.012	-0.188
	Nortes	.5875*	0.1563	0.0045	0.176	0.999

Anexo 2. Prueba *posthoc* para determinar las diferencias significativas entre temporadas de la variable de pH.

Variable dependiente:						
Scheffe						
(I) Temporada		Diferencias de medias (I – J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Lluvias	Nortes	0.09875	0.12037	0.72	-0.2182	0.4157
	Sequía	.73250*	0.12037	0.000023	0.4155	1.0495
Nortes	Lluvias	-0.09875	0.12037	0.718	-0.4157	0.2182
	Sequía	.63375*	0.12037	0.00015	0.3168	0.9507
Sequía	Lluvias	-.73250*	0.12037	0.000023	-1.0495	-0.4155
	Nortes	-.63375*	0.12037	0.00015	-0.9507	-.03168