



SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MÉRIDA

**ITM**

---

---

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA (FISICOQUÍMICOS  
Y COLIFORMES FECALES) DEL ANILLO DE CENOTES  
DEL ESTADO DE YUCATÁN.**

**OPCIÓN**

**TESIS**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**RAFAEL ALFREDO CHAN CHAN**

MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

2019





**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Mérida

**Anexo III**  
Formato de liberación del proyecto para la titulación integral

**DEPENDENCIA:** DEPTO. ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

**No. DE OFICIO:** P/ 236/19

Mérida, Yucatán, **20 DE MARZO DE 2019**

**ASUNTO:** Liberación de proyecto para titulación integral

**M.C. DARVIN SAÚL PEREZ SOSA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓ DE ESTUDIOS PROFESIONALES**  
**P R E S E N T E**

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral

<b>Nombre del Estudiante</b>	RAFAEL ALFREDO CHAN CHAN
<b>Carrera</b>	ING. AMBIENTAL
<b>N° de Control</b>	E14080556
<b>Nombre del Proyecto</b>	ANALISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA (FISICOQUIMICOS Y COLIFORMES FECALES) DEL ANILLO DE CENOTES DEL ESTADO DE YUCATAN
<b>Producto</b>	TESIS

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros Egresados, este documento solo tendrá validez 6 meses a partir de su fecha de emisión.


Asesor: DR. JORGE ALBERTO RUBIO PIÑA. CED. 6189345

Revisor: DRA. SUSANA RINCON ARRIAGA. CED. 7454224

Revisor: DR. GABRIEL LIZAMA UC. CED. 7935125

Revisor: M.C. LUIS FELIPE CARRILLO LARA. CED. 4074302

**ATENTAMENTE**  
*In hoc signo vinces*

  
**DR. GABRIEL LIZAMA UC**  
**ENCARGADO DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA**  
C.p. Servicios Escolares, Apoyo a Titulación, Archivo  
Mha\*



SEP Instituto Tecnológico de Mérida, Km.5 Carretera Mérida-Progreso A.P 911  
C.P 97118 Mérida Yucatán, México, Tels. 964-50-00, Ext. 10001, 10401  
10601, 10201 e-mail:itm@itmerida.mx http://www.itmerida.mx



## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Rafael Arcángel Chan Pat y Betty María Chan Cauich por apoyarme a llegar a este punto, por su paciencia y sus ánimos.

Agradezco a mi novia Shirley Guadalupe Cedillos Pantí por ser esa personita especial que siempre estuvo motivándome, gracias por tus ánimos.

Gracias a Dios por darme paciencia y sabiduría en esos momentos turbios como universitario

De igual manera gracias al Dr. Jorge A. Rubio Piña por darme la confianza para realizar esta investigación.

## ÍNDICE

<b>I.INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II.ANTECEDENTES</b> .....	2
2.1 Formación geológica de Yucatán.....	2
2.2 Recursos Hídricos de Yucatán. Extracción y Recarga del acuífero .....	3
2.3 Formación de los cenotes .....	7
2.4 Tipos de cenotes .....	9
2.5 Vulnerabilidad hídrica .....	11
2.6 Contaminación.....	11
2.7 Contaminación microbiológica .....	13
2.8 Contaminación de origen química.....	14
2.9 Posibles efectos a la salud .....	15
2.10 Normas internacionales de calidad del agua .....	16
2.11 Normas oficiales mexicanas sobre la calidad de agua .....	17
<b>III.JUSTIFICACIÓN</b> .....	19
<b>IV.OBJETIVOS</b> .....	20
OBJETIVO GENERAL .....	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>V.PROBLEMAS A RESOLVER</b> .....	21
<b>VI.MATERIALES Y METODOS</b> .....	22
<b>6.1 ZONA DE MUESTREO</b> .....	22
<b>6.2 METODOLOGÍA DE CAMPO</b> .....	24
<b>6.3 METODOLOGÍA DE LABORATORIO</b> .....	25
6.3.2.1 Determinación de cloruros .....	26
6.3.2.2 Determinación de dureza .....	26
6.3.2.3 Determinación de DBO5 .....	27
6.3.2.4 Determinación de DQO .....	27
6.3.2.5 Determinación de Nitratos.....	28
6.3.2.6 Determinación de Nitritos .....	28
6.3.2.7 Determinación de Temperatura, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Potencial Hidrogeno, Solidos Totales Disueltos, Salinidad, Potencial Oxido/Reducción y Conductividad. ....	29
<b>VII.RESULTADOS</b> .....	29
<b>VIII.DISCUSIÓN</b> .....	52
<b>IX.CONCLUSIONES</b> .....	57
<b>X.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59

## Índice de ilustraciones

<b>Ilustración 1.</b> Municipios Muestreados. ....	23
<b>Ilustración 2.</b> Colonias de Coliformes del cenote San Ignacio del municipio de Chocholá. ....	30
<b>Ilustración 3.</b> Colonias de coliformes Fecales Cenote Yaax ha del municipio de Tixkokob ....	32
<b>Ilustración 4.</b> Medición del OD en el análisis de la DBO <sub>5</sub> .....	34
<b>Ilustración 5.</b> Digestión de cada una de las muestras a 150°C para cálculo de DQO.....	35
<b>Ilustración 6.</b> Análisis de Dureza de los Primeros 5 puntos de Muestreo .....	37
<b>Ilustración 7.</b> Análisis de Dureza de los últimos 5 puntos de muestreo .....	37
<b>Ilustración 8.</b> C1, cenote Kambul, comisaria Noc Ac, Mérida Yucatán. Medición Conductividad. .	39
<b>Ilustración 9.</b> Cenote Bebelchén en el medio el Propietario del lugar.....	40
<b>Ilustración 10.</b> Resultados de los análisis de Cloruros de los puntos C6 al C10 .....	42
<b>Ilustración 11.</b> Resultados de los análisis de Cloruros de los puntos C1 al C5 .....	42
<b>Ilustración 12.</b> Multiparametrico YSI 556 MPS calibrado antes de salir a campo.....	44
<b>Ilustración 13.</b> Cenote Sambula Motul Yucatán. ....	45
<b>Ilustración 14.</b> Cenote Yaax ha Tixkokob Yucatán.....	47
<b>Ilustración 15.</b> Viales de la marca Hach Utilizados para la determinación de Nitratos y Nitritos ....	50
<b>Ilustración 16.</b> Gradillas con viales marca Hach .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1. Normatividad en México sobre los diferentes usos del agua. ....	19
Tabla 2. Ubicación de cada uno de los 10 cenotes en grados y coordenadas UTM.....	22
Tabla 3. Calendario de toma de muestras. ....	24

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Resultados de análisis de Coliformes totales.....	30
Gráfico 2. Resultados de análisis de Coliformes fecales.....	31
Gráfico 3. Resultados de análisis de la DBO <sub>5</sub> . ....	33
Gráfico 4. Resultados de análisis de DQO. ....	35
Gráfico 5. Resultados de análisis de Dureza total como CaCO <sub>3</sub> . ....	36
Gráfico 6. Resultados de análisis de Conductividad.....	38
Gráfico 7. Resultados de análisis de Sólidos disueltos totales. ....	40
Gráfico 8. Resultados de análisis de Cloruros. ....	41
Gráfico 9. Resultados de análisis de Oxígeno disuelto. ....	43
Gráfico 10. Resultados de análisis de pH. ....	45
Gráfico 11. Resultados de análisis de Temperatura. ....	46
Gráfico 12. Resultados de análisis de salinidad. ....	48
Gráfico 13. Resultados de análisis de Nitratos. ....	49
Gráfico 14. Resultados de análisis de Nitritos. ....	49
Gráfico 15. Resultados de Potencial de oxidación/reducción.....	51

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue el análisis microbiológico y fisicoquímico de la calidad del agua de diez cenotes pertenecientes al anillo de cenotes de Yucatán, fueron seleccionados por ser de uso recreacional y por ubicarse en la periferia de la ciudad de Mérida. Los parámetros analizados E. coli (*Escherichia coli*), Coliformes totales, DBO<sub>5</sub>, DQO, OD, pH, conductividad, cloruros, dureza total, nitratos, nitritos, salinidad, sólidos disueltos totales (TDS), potencial oxidación-reducción y temperatura se compararon con los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (“Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización”) y la norma chilena oficial N° 1.333 (“Estándares para aguas destinadas a uso recreativo con contacto directo”). Las recolecciones de las muestras se realizaron en 8 municipios (Mérida, Tixkokob, Sanahcat, Cuzamá, Abalá, Umán y Chocholá) durante el mes de octubre del 2018. Se analizó parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relevantes para la salud humana, que son exigidas por las normas oficiales mexicanas y normas oficiales internacionales. Los resultados indicaron que los cenotes pertenecientes a Motul, Tixkokob y Chocholá tienen una carga demasiado alta de coliformes fecales.

## I. INTRODUCCIÓN

La mitad del planeta bebe agua insalubre o contaminada, la otra mitad derrocha y menosprecia el líquido de sus grifos. Yucatán es uno de los pocos estados de la república mexicana que no tiene problemas de abastecimiento de agua para satisfacer sus demandas, esto dado a las características de su suelo y a sus condiciones climáticas.

En Yucatán no existen corrientes superficiales (ríos o lagos), por lo que la única fuente de abastecimiento de agua para las distintas actividades antropogénicas es el agua subterránea, misma que es receptora del agua de deshecho que se genera en el estado.

Es una región que está compuesta física y químicamente de un material rocoso en disolución; es decir, está conformada principalmente de cuevas kársticas, cuya composición es favorable para la formación de cuerpos de agua debido a que su estructura es principalmente de carbonato de calcio, dolomita, yeso y cloruro de sodio o sal común.

Uno de los elementos de la estructura geológica de la Península, es el anillo de cenotes que conforma una red cavernosa muy compleja. El "anillo de cenotes" es una alineación semicircular de cuerpos de agua llamados cenotes (dzonot en lengua maya) y el número de cenotes es de aproximadamente 7 000 a 8 000, todos estos cuerpos de agua forman parte del gran acuífero subterráneo de la península.

Debido a las condiciones geológicas el acuífero de Yucatán es considerado como libre, excepto en una franja estrecha paralela a lo largo de la costa (Perry, 1995). Esta delgada capa (0.5 a 1.40 m de espesor) se extiende a lo largo de los 250 km de costo y en una franja de 2 a 20 km de ancho. Este extenso caliche costero es prácticamente impermeable con una porosidad menor a 1% y actúa como una barrera que impide el movimiento del agua subterránea hacia el mar

Sin embargo, esta gran disponibilidad de agua se ve afectada por los problemas de calidad, la permeabilidad del subsuelo hace que el acuífero sea más vulnerable



a la contaminación propiciada por la disposición de descargas de aguas residuales y fosas sépticas, aguas pluviales y otros factores como lixiviados de tiraderos de basura municipales y de lagunas de oxidación al subsuelo.

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se debe a las características del subsuelo, las cuales determinan que la lluvia se filtre rápidamente y arrastre cualquier sustancia que se encuentre en la superficie del terreno. En la mayor parte del estado, las aguas de desecho se descargan al subsuelo por medio de tanques sépticos y pozos someros abandonados, debido a la falta de un sistema de drenaje sanitario, lo que va incrementando los índices de contaminación, principalmente en la ciudad de Mérida.

## **II. ANTECEDENTES**

### 2.1 Formación geológica de Yucatán

En termino geológicos, el subsuelo de Yucatán está constituido por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino del terciario reciente (Butterlin y Bonet, 1960; Bonet y Butterlin, 1962), y ha estado bajo subsidencia lenta pero continua. El cuaternario aflora hacia las zonas costeras y corresponde a depósitos calcáreos expuestos después de una ligera emersión de la península.

Los sedimentos terciarios se encuentran prácticamente en posición horizontal o con echados muy suaves. Aproximadamente los primeros 120 m corresponden a las calizas masivas recristalizadas, cavernosas y de buena permeabilidad, las cuales se encuentran cubriendo margas y calizas prácticamente impermeables, cuyo espesor alcanza centenares de metros hacia la parte noreste de la península.

La geología superficial de Yucatán se caracteriza por la poca existencia de suelo (20 cm aproximadamente) y se compone, en su mayor parte, de una caliza muy dura formada por la solución y precipitación de carbonatos de calcio que cementa granos y fragmentos de conchas cerca de la superficie del terreno (Gonzales y otros, 1999). Las calizas en la superficie se encuentran formando una coraza calcárea o

reblandecida; en ambos casos, resultado del intemperismo químico que las ha modificado en un grosor de varios metros. La coraza calcárea, conocida localmente con los nombres de laja o chaltún, es de extrema dureza y constituye la superficie del relieve en grandes territorios.

También existen calizas blandas que llevan el nombre maya de sascab (tierra blanca). Constituyen un rasgo característico de la litología del estado, y representan una transición en la evolución de la roca dura original al reblandecimiento, para posteriormente transformarse en la cabeza calcárea; además favorecen el desarrollo de las formas cársticas subterráneas (Duch-Gary, 1991a). Este material corresponde a rocas sin consolidar. El espesor de la capa de sascab puede variar de algunos centímetros a varios metros, y su consistencia sugiere que la cristalización de aragonita a calcita, un proceso necesario para la consolidación de la roca no ocurrió. (Villasuso y Méndez, 2000).

La mayor parte del estado se compone principalmente de calizas del periodo terciario. Sin embargo, la falta de arcillas y margas del terciario superior sobre la caliza provoca que en periodos de lluvias se infiltre rápidamente el agua, disolviendo las rocas y formando un relieve denominado Karst o cárstico (CNA, 1997). Desde la superficie hasta los 220 m de profundidad se conforma de estratos casi horizontales de calizas masivas, recristalizadas y de buena permeabilidad; después de los 220 m, de capas impermeables de margas calizas cuyos espesores se extienden varios centenares de metros (Butterlin y Bonet, 1960). En consecuencia, no hay cursos de aguas superficiales; las lluvias saturan el terreno, colman el bajo relieve y se infiltran al subsuelo, dando origen a las aguas subterráneas en cavernosidades como grutas, cavernas o sumideros

## 2.2 Recursos Hídricos de Yucatán. Extracción y Recarga del acuífero

Del subsuelo yucateco se extraen actualmente por medio de 5 800 aprovechamientos alrededor de 547.01 millones de metros cúbicos al año (Mm<sup>3</sup>/año) de agua, volumen que es destinado como sigue: 271.00 Mm<sup>3</sup> para uso agrícola principalmente para riego de 30 000 hectáreas ubicadas en el sur y oriente

del estado, 240.01 Mm<sup>3</sup> son suministrados a los núcleos de población, 3 Mm<sup>3</sup> para satisfacer las necesidades de agua a la población rural, 29.00 m<sup>3</sup> son utilizados por las industrias y 4 Mm<sup>3</sup> para otros usos. La extracción apuntada representa poco más de 6.09% de la recarga del acuífero, el cual es del orden de 8 975 Mm<sup>3</sup>, que incluye tanto la infiltración de las lluvias como de los aportes subterráneos provenientes de los estados vecinos. No obstante, todo lo anterior existe el riesgo de salinización, principalmente en la zona del litoral con asentamientos urbanos o establecimientos turísticos. Como se hizo notar en el párrafo anterior, a pesar que el acuífero recibe abundante recarga su aprovechamiento intensivo está relativamente restringido por el riesgo que implique el deterioro de la calidad del agua; en efecto la presencia de la cuña de agua marina que subyace al agua dulce en los acuíferos costeros, impone severa limitación a los abatimientos permisibles en los pozos, y por tanto, a sus caudales de extracción, desaprovechándose en parte, la gran capacidad transmisora de las calizas. En general, las aguas subterráneas están analizadas con fines de potabilidad, en el que su calidad se mide en función del total de sólidos disueltos en miligramos por litro (mg/l), dependiendo de los cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) y aniones (sulfato, carbonato, bicarbonato, nitrato y cloro) que contengan y se clasifican de la siguiente manera: agua dulce la que tiene menos de 1 000 miligramos por litro (mg/l), tolerable entre 1 001 y 2 000 mg/l y salada con más de 2 000 mg/l. La calidad del agua dulce y tolerable se encuentra en la mayor parte del estado y la salada se localiza al suroeste y adyacentes a las costas. Las familias de aguas predominantes son: mixta-bicarbonatada, clorurada; mixta-clorurada, bicarbonatada y mixtabicarbonatada, clorurada con tendencia cálcica. Las profundidades de los niveles estáticos varían de acuerdo con su lejanía de las costas, pues entre éstas y Mérida tienen de 1 a 5 m; entre Mérida y el Cordón Puuc de 10 a 30 m y después de éste, de 60 a 100 m. Por ser alta la transmisibilidad y recarga del acuífero, los abatimientos cíclicos anuales que se presentan no son de consideración, son menores a un metro durante los meses del estiaje y se recuperan después de las lluvias. La dirección del flujo es regida por la compleja morfología subterránea representada por canalículos, fisuras, galerías de diversas formas y diámetros,

intersticios, planos de estratificación, etc.; que hace difícil deducirlas características normativas del escurrimiento; lo que se puede afirmar es que presenta un flujo radial a partir del sur del estado hacia las costas, en un medio cavernoso altamente complicado. A continuación, se describirán cada una de las zonas geohidrológicas propuestas en la reglamentación del acuífero de Yucatán por la Comisión Nacional del Agua (CNA)

#### Zona Costera

Corresponde a las playas de barrera y lagunas de inundación, además de una serie de bahías someras, asociadas con sistemas de fracturas; y de calizas coquiníferas de ambiente de litoral semiconsolidadas, algunas muy deleznable, en capas de 1.5 m de espesor y las otras con 3 m, su color es beige con tonos amarillo ocre, en ocasiones presenta horizontes coquiníferos. Se ubica al norte a lo largo de la costa del estado y su limitación básicamente se debe a que contiene aguas de la familia sódico-cloruradas, tiene una superficie que corresponde a 17.03% del total estatal.

En esta zona la recarga anual es de 919 Mm<sup>3</sup> ; la extracción de agua subterránea es de 47.59 Mm<sup>3</sup> , que se realiza por medio de 579 aprovechamientos, el uso al que se destina es principalmente agrícola con 29.58 Mm<sup>3</sup> , industrial 1.31 Mm<sup>3</sup> , público-urbano 16.47 Mm<sup>3</sup> y otros 0.23 Mm<sup>3</sup> ; por lo que se tiene una disponibilidad de 871.41 Mm<sup>3</sup> que nos da una condición de subexplotación, no obstante por la condición del pequeño espesor de este y las otras razones mencionadas en párrafos anteriores se le ha asignado una condición de equilibrio. Presenta una vulnerabilidad extrema a la contaminación y a la intrusión salina por los factores anteriormente señalados. En el área los suelos predominantes son Regosol, Gleysol y Solonchak, fundamentalmente salino-sódico escasamente drenados.

#### Semicírculo de Cenotes

Se ubica en la parte centro norte del estado iniciando su emplazamiento desde punta Boxcohuo al norte de Celestún, cruza el cenote de Kopomá, da la vuelta al norte de Muña y sur de Kantunil y sale a la costa nuevamente a la altura de bocas de Dzilam, la alineación de cenotes en forma circular, determinan un sistema de

fracturas, cuyo origen aún no ha sido precisado pero a últimas fechas se le relaciona con el Cráter de Chicxulub; el anillo de cenotes forma una frontera casi perfecta con cerca de 170 km de diámetro, con migración lateral de agua subterránea y gran flujo debido a la disolución y hundimiento a lo largo de las fracturas, ubicados en los bordes que forman el anillo con una amplitud de 5 a 20 km. La zona se extiende sobre un área que representa 18.04% del total estatal.

El acuífero que se presenta es de tipo libre, cuya profundidad al nivel estático varía de 5 a 10 m, con abatimientos anuales de 0.30 m, tiene una recarga anual del orden de 1 317 Mm<sup>3</sup> ; la extracción es de 294.99 Mm<sup>3</sup> que se realiza a través de 2 936 aprovechamientos y que se destinan a satisfacer los siguientes usos: 123.08 Mm<sup>3</sup> a la agricultura, 17.44 Mm<sup>3</sup> a la industria, 148.74 Mm<sup>3</sup> al público urbano, 2.83 Mm<sup>3</sup> al rural y 2.90 Mm<sup>3</sup> a otros usos; de acuerdo con esto nos queda un remanente disponible de 1 022.01 Mm<sup>3</sup> por lo que el acuífero está subexplotado. La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación se considera alta-extrema, por efecto del poco espesor de la zona no saturada y la gran permeabilidad de las rocas del subsuelo, además de ser éste la única fuente de agua, recibe también todo tipo de descargas y en esta zona se ubican las ciudades más importantes del estado como son Mérida y Progreso.

#### Planicie Interior

Se extiende hacia la porción central del estado y al norte del Cordón Puuc, presenta geoformas que van de oquedades de disolución a dolinas y cenotes, con desarrollo cárstico maduro y juvenil; colinda al norte con el semicírculo de cenotes y la región costera y al sur con la zona de cerros y valles, tiene un área que equivale a 52.30% del total estatal.

Es un acuífero libre con profundidad al nivel estático de 15 a 30 m, con abatimientos anuales de 0.70 m; la recarga anual es de 5 408 Mm<sup>3</sup> ; la extracción estimada es de 167.62 Mm<sup>3</sup> que se realiza por medio de 1 741 aprovechamientos distribuidos por uso de la siguiente manera: agrícola 86.89 Mm<sup>3</sup> , industrial 10.25 Mm<sup>3</sup> , público-urbano 69.60 Mm<sup>3</sup> , rural 0.17 Mm<sup>3</sup> y otros 0.71 Mm<sup>3</sup> ; se calcula una disponibilidad

de 5 240.38 Mm<sup>3</sup> , por lo que se considera el acuífero en estado de subexplotación, con una vulnerabilidad a la contaminación alta.

### Cerros y Valles

Se ubican al sur del estado, son la más compleja de las zonas, debido a su mayor elevación y relieve topográfico, Cordón Puuc y lomeríos, aunque se distingue también por su mayor disponibilidad de suelos, vegetación más alta y densa, y por la falla que la separa de la planicie interior, misma que se ubica desde Maxcanú hasta Oxkutzcab, y está asociada a un levantamiento diferencial y movimientos tectónicos (diapirismo); ocupa un área que representa 12.63% del total estatal.

La recarga anual es de 1 331 Mm<sup>3</sup>; el volumen de extracción es de 36.81 Mm<sup>3</sup> que se hace a través de 544 aprovechamientos, destinados de la siguiente manera: agrícola 31.45 Mm<sup>3</sup>, público urbano 5.20 Mm<sup>3</sup> y otros 0.16 Mm<sup>3</sup> , que nos da una disponibilidad potencial de 1 294.19 Mm<sup>3</sup> por lo que se ubica en una condición de subexplotado. Presenta una vulnerabilidad a la contaminación alta.

### 2.3 Formación de los cenotes

El origen de los cenotes se debe al proceso geomorfológico denominado karst, que consiste en la combinación de los mecanismos de disolución, colapso y construcción de la caliza. Estos procesos están gobernados por factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales actúan en diferentes escalas de tiempo y espacio, generando una amplia gama de formas y grados de karstificación. Los factores intrínsecos incluyen la litología, el grado de porosidad de la matriz y la fractura de la roca; los extrínsecos, el clima, la temperatura, la vegetación, la mezcla de agua dulce y salada y el tiempo de duración de la exposición al proceso en cuestión. El resultado es la disolución de rocas solubles (yeso, caliza, dolomita y halita) por corrosión química con base en las condiciones hidrológicas imperantes, que resultan en formas negativas del terreno e incremento de la permeabilidad debido al desarrollo de grandes sistemas de drenaje subterráneo. Disolución. La disolución consta de tres procesos:

1) La disolución inicial se debe a la ligera acidificación del agua de lluvia. Ésta se da en parte por la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, formando ácido carbónico; el agua de lluvia acidificada absorbe más ácido carbónico al entrar en contacto con el suelo, donde la descomposición de la materia orgánica por medio de los microorganismos produce el ácido y aumenta la agresividad del agua.

2) La mezcla del agua salada y dulce aumenta en los cambios y en la haloclina la agresividad del agua sobre la roca y es considerado el proceso más potente de disolución.

3) La disolución mediada biológicamente puede ocurrir en el suelo o dentro del sistema de flujo subterráneo, donde el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) se genera por la descomposición microbiana de la materia orgánica y disuelve la roca desde la masa de agua. Colapso: El segundo mecanismo vinculado al karst es la fluctuación del nivel del mar en los periodos glacial e interglacial. Cuando el nivel del mar ha bajado en periodos glaciares desciende el acuífero y deja una cavidad o cueva aérea tras de sí, donde secciones del techo se pueden desplomar por falta de soporte, formando una dolina o depresión (cenote). Al final del periodo glacial el mar regresa e inunda la cueva. Construcción: El tercer mecanismo del karst es el responsable de las formaciones de estructuras constructivas o de acumulación, también denominadas espeleotemas (estalactitas, estalagmitas y columnas), del material disuelto en el proceso del karst. Las cuevas secas originadas por los dos primeros mecanismos continúan recibiendo agua de lluvia acidificada que lleva en solución a los minerales de la roca disuelta. Al llegar a la cavidad aérea el CO<sub>2</sub> abandona el equilibrio acuoso y los minerales se precipitan y crean las espeleotemas. El crecimiento de las espeleotemas se detiene cuando la cueva se inunda por un incremento en el nivel del mar en un periodo interglacial. Entendiendo los mecanismos y procesos del “karst tropical” de la península podemos decir que la formación de cenotes se genera a través de una secuencia de eventos. Partiendo de un sistema de circulación horizontal (cueva inundada) se puede formar una gruta o bien un cenote tipo cántaro por derrumbe o hundimiento parcial del techo. El proceso avanza desde arriba, por infiltración pluvial, y desde abajo por circulación

subterránea. Posteriormente, la totalidad del techo se derrumba dando lugar a un cenote cilíndrico; del cenote cilíndrico se puede generar un cenote tipo aguada por azolve y por hundimiento lento de la zona adyacente. Como se mencionó anteriormente, la disolución mayor ocurre en la zona de contacto entre el agua dulce y salada o halo clina, la cual sube o baja dependiendo del nivel del mar. A lo largo de la costa del sector norte del Caribe los exploradores mexicanos y extranjeros han cartografiado más de 600 km de galerías y túneles inundados, usando técnicas de espeleobuceo y reconociendo diferentes niveles y pasajes verticales, que incluyen las cinco cuevas sumergidas más grandes del mundo, resultado de la disolución de volúmenes grandes de roca disuelta por la mezcla y haloclina. Esta disolución se asocia a las variaciones del nivel del mar a lo largo de miles de años. Los ríos subterráneos de dimensiones inmensas drenan la lluvia que cae al interior de la península. El agua transportada drena en la costa a través de caletas como Xel Ha y Xcaret y manantiales submarinos en las rías. En contraste, la zona de Mérida y la costa norte no presentan un desarrollo tan extenso de flujos subterráneos, aunque tiene el mayor número de cenotes de la península, en lo que se ha denominado el anillo de cenotes, el cual coincide con el diámetro externo del cráter Chicxulub. Los descensos en el nivel del mar durante el Holoceno obligaron tanto a humanos como a parte de la fauna a ingresar a las cuevas para acceder al acuífero, lo cual explica los registros paleontológicos y antropológicos que hoy encontramos en el subsuelo de la península. El nivel actual del mar se alcanzó hace 5 000 años aproximadamente.

## 2.4 Tipos de cenotes

La palabra cenote viene del vocablo maya ts'ono'ot o d'zonot, que significa "caverna con depósito de agua". Este término se ha generalizado para designar a la mayoría de las manifestaciones kársticas en la península de Yucatán. Los cenotes, como se describió anteriormente, son sistemas complejos y dinámicos. Por su origen se clasifican como lagos de disolución o generados por la actividad del agua sobre la roca soluble. El lago kárstico elemental es la dolina-colapso. El término cenote denota cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que esté



abierto al exterior en algún grado. Es decir, incluye toda manifestación kárstica que alcance el nivel freático. El número aproximado de cenotes en la península no se ha estimado dada la dinámica existente en su formación. El número considerado en el estado de Yucatán va de los 7 000 a los 8 000 cenotes; la cobertura de bosque ha hecho más difícil el cálculo para los estados de Campeche y Quintana Roo. Por su morfología, los cenotes se clasifican de acuerdo con la etapa del proceso de apertura que comunica el acuífero subterráneo con la selva y la luz solar en superficie como se describió en el proceso de formación. Por sus características hidrobiogeoquímicas, los cenotes se clasifican como jóvenes y viejos. Los jóvenes o lóticos –del griego lotus, “rápido, veloz” (SchmitterSoto et al., 2002)– se conectan libremente con el acuífero a través de los túneles de las cuevas. El flujo del agua es horizontal y el tiempo de residencia del agua es corto. Los cenotes más viejos o lénticos presentan un bloqueo de la conexión principal con el acuífero, debido al colapso del techo o las paredes y la sedimentación, con lo cual el intercambio con el agua subterránea es restringido y el recambio del agua es más lento. En éstos el agua acumula materia orgánica disuelta, particulada, detrito orgánico y organismos vivientes. La materia orgánica particulada y el detrito se remineralizan en nutrientes por vía microbiana, modificando las características fisicoquímicas del agua y reflejadas en el pH, la turbidez y el contenido de oxígeno disuelto, que inciden en la generación de gradientes químicos verticales marcados, por lo cual se presentan aguas anóxicas (sin oxígeno) y ácidas en el fondo. El tamaño de la apertura del cenote determina, hasta cierto grado, cuánta materia orgánica puede introducirse desde los terrenos adyacentes del suelo de la selva en épocas de lluvia. La producción de materia orgánica in situ depende, entre otros factores, de la presencia de luz. Los cenotes tipo cántaro están menos expuestos a la luz solar, los cenotes totalmente expuestos como los cilíndricos y aguadas presentan una cantidad mayor de materia orgánica: alóctona y autóctona, procedente esta última de plantas acuáticas y algas, e influyen en el tipo de vida que en ellos se encuentra.

## 2.5 Vulnerabilidad hídrica

La vulnerabilidad se define como el riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia, en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991). Uno de los principales problemas de contaminación del agua subterránea en la península de Yucatán gira en torno de las descargas de aguas residuales, por la falta de un adecuado y suficiente drenaje sanitario, así como por la poca infraestructura de tratamiento de frente al fecalismo al aire libre, con la consecuente contaminación por microorganismos patógenos, el arrastre de plaguicidas, metales pesados, fármacos, hidrocarburos, aceites de motor, chapopote de la pavimentación de calles, pinturas, productos industriales, hormonas y antibióticos, entre otros (Plan Rector del agua (PRA), 2011: 478). El REPDA (2009-2013) también señala que se disponen anualmente hacia el acuífero 702 millones de metros cúbicos de aguas residuales no municipales, de los cuales: 77% corresponden al estado de Quintana Roo, 4% a Yucatán y 19% a Campeche, lo cual equivale a la introducción de 22,264 l/s al acuífero peninsular. Dentro de estas descargas los mayores porcentajes provienen del sector agrícola (38.8%), de servicios (14.67%) y del público urbano (17.92%) (Conagua, 2013).

Los factores antropogénicos principales que afectan la calidad del agua en la península de Yucatán son las aguas residuales urbanas y los sitios de disposición a cielo abierto de los residuos sólidos, el uso de agroquímicos, las actividades porcícola y avícola, la actividad industrial, dentro del cual veremos en un apartado diferente el proceso de nixtamalización del maíz por su relevancia, así como la actividad turística.

## 2.6 Contaminación

El término contaminación se refiere a la introducción de cualquier agente químico, físico o biológico cuya presencia o acumulación tiene efectos nocivos en el entorno natural, la salud y el bienestar de las personas.

Se trata de sustancias ajenas al entorno al que se incorporan, que pueden afectar la calidad del aire, el agua y/o el suelo. La magnitud de su impacto generalmente depende de una combinación de aspectos como la cantidad, el tipo de contaminante, la vía de ingreso y el tipo de medio al que se incorporan.

Se dice que el agua está contaminada cuando los agentes contaminantes repercuten negativamente en su calidad para el consumo humano, para usos posteriores o para el bienestar de los ecosistemas. Es la contaminación que ocurre en cualquier espacio que alberga agua: ríos, lagos, acuíferos o incluso el mar.

Al ser una molécula polar, el agua tiene gran capacidad de establecer enlaces de hidrógeno con otras moléculas. Debido a esto puede diluir un gran número de sustancias por lo que es considerada el “disolvente universal”. Esta característica hace que los contaminantes, principalmente los químicos que llegan a este recurso, por vertidos o arrastre, alteren en forma significativa su calidad.

En las cuencas el ciclo del agua, las corrientes y los ciclos biogeoquímicos, participan en un proceso natural de depuración de los contaminantes en los cuerpos de agua. Ciclo de depuración de los cuerpos de agua, sin embargo, cuando su concentración o cantidad exceden ciertos niveles, la capacidad natural de autodepuración, no es suficiente para revertir las afectaciones.

La contaminación debida al arrastre de hojarasca, partículas, o por el ingreso de gases atmosféricos transportados por la lluvia, es mínima en comparación con la contaminación que se genera por las actividades humanas.

En algunos lugares, los problemas de contaminación del agua datan de siglos atrás (p. ej. el río Nilo), sin embargo, esto no había sido un problema que alcanzara las dimensiones actuales. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, dos millones de toneladas de aguas residuales junto con residuos industriales se descargan diariamente en los cuerpos de agua; de hecho, se calcula que actualmente se producen 1 500 km<sup>3</sup> de aguas residuales, un volumen seis veces mayor que el volumen total de los ríos del planeta

## 2.7 Contaminación microbiológica

Los indicadores microbiológicos de calidad del agua son organismos que tienen un comportamiento similar a microorganismos patógenos cuya procedencia, concentración, hábitat y reacción a factores externos es la de la mayoría. Su presencia determina la existencia de patógenos y permite comparar sus reacciones a cambios de pH y temperatura o aplicación de medios físicos o químicos de desinfección, con la ventaja de ser más fácilmente cultivables o identificables, y económicamente factibles. Requieren la identificación y cuantificación de microorganismos por índices de diversidad ajustados a intervalos que califican la calidad del agua y, aunque la información microbiológica obtenida a partir de su análisis no reemplaza los análisis fisicoquímicos, reduce costos y aporta información en el monitoreo de la calidad del agua. Estos indicadores deben cumplir requerimientos para ser establecidos como tal: estar ausentes en agua no contaminada y mantener una correlación de su presencia con la de los patógenos, en mayor proporción. Deben sobrevivir en el agua más tiempo y ser igual o más resistente a factores externos que los patógenos, sin ser patógenos y no deben reproducirse en animales poiquilotermos. Otra de sus características relevantes es ser de fácil, rápido y económico aislamiento, cuantificación e identificación y en lo posible tener criterios microbiológicos comunes internacionalmente. Deben hallarse de forma constante en las heces y estar asociados a aguas residuales; estar distribuidos al azar en las muestras y ser resistentes a la inhibición de su crecimiento por otras especies. Al existir diferentes grupos de patógenos que pueden ser transmitidos por el agua no hay un microorganismo único que se constituya en indicador ideal de calidad del agua. Estos grupos relacionados con las enfermedades de transmisión hídrica pueden ser de origen bacteriano, viral, parasitario y, en menor medida, micótico. Con base en los criterios mencionados los indicadores microbiológicos de contaminación del agua generalmente han sido bacterias de la flora saprófita intestinal, entre las que se encuentran *Bacteroides fragilis*, bacterias mesófilas, coliformes totales, y fecales (termotolerantes), *Escherichia coli* y estreptococos fecales. Algunas de estas, de origen animal

[generalmente de explotaciones pecuarias], representan un alto potencial zoonótico, siendo abundantes estreptococos fecales y parásitos como *Giardia intestinalis* y *Cryptosporidium* spp., que tienen una mayor resistencia a los procesos de tratamiento y desinfección del agua para consumo humano.

## 2.8 Contaminación de origen química

Los contaminantes químicos pueden ser de origen inorgánico o bien de origen orgánico.

La contaminación inorgánica consiste en el aporte de nutrientes, detergentes y metales que llegan a los cuerpos de agua. Los metales pesados son los compuestos químicos más preocupantes; el cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), son metales tóxicos y repercuten en el sistema nervioso central y en el riñón, además de que se les atribuyen alergias, intoxicación y en ocasiones un carácter cancerígeno.

A grandes rasgos, los compuestos orgánicos se subdividen en naturales y sintéticos; los primeros producen mal olor y sabor, mientras los sintéticos son de origen industrial y son tóxicos, en esta categoría se encuentran los compuestos orgánicos persistentes (COP); residuos de plaguicidas (p. ej. fumigantes, fungicidas, insecticidas y herbicidas) que junto a los disolventes producidos por las actividades industriales, tienen principal impacto en el hecho de que son persistentes, bioacumulables, se transportan largas distancias y han sido relacionados con efectos cancerígenos.

Recientemente se ha detectado la presencia de compuestos potencialmente peligrosos, denominados “emergentes” que se derivan principalmente de descargas industriales o domésticas de agua. Aún no existe información sobre su abundancia e impacto por lo que en su mayoría no están regulados, pero se estima que algunos pueden ser persistentes. Entre estos, tal vez los que suscitan mayor preocupación son los fármacos, particularmente los antibióticos y las drogas.

## 2.9 Posibles efectos a la salud

La presencia de *E. coli* en el agua es una fuerte indicación de una reciente contaminación de aguas residuales o contaminación de residuos de animales. Es importante tener en cuenta que *E. coli* y los residuos de animales/humanos pueden entrar en nuestra agua de muchas maneras diferentes. Por ejemplo, durante la lluvia y derretimiento de la nieve, *E. coli* se puede lavar en los ríos, arroyos, lagos o aguas subterráneas (Griffith et al 2003, Roslev y Bukh, 2011) de la superficie de la tierra. Otras formas son la fauna silvestre, fosas sépticas defectuosas, actividades recreativas y prácticas locales de uso del suelo (por ejemplo, estiércol utilizado como fertilizante y ganado). Las fuentes de contaminación fecales de humanos y animales representan un grave riesgo para la salud debido a la alta probabilidad de la existencia de agentes patógenos en los residuos fecales. Un patógeno es un microorganismo que puede causar enfermedades y causar enfermedades en las personas. El ganado vacuno, cerdos y gallinas también acarrean patógenos que pueden causar enfermedades y pueden transmitirse de animales a humanos. Por lo tanto, la introducción de heces de animales o humanos en el agua es de mucha preocupación. Numerosos estudios se han realizado en todo el mundo para evaluar la relación entre la calidad del agua utilizada para actividades recreacionales; y los efectos adversos en la salud de las personas que tienen contacto con el agua a través de actividades recreativas (natación, pesca, etc.). Aunque no todas las bacterias *E. coli* son patogénicas, los estudios llevados a cabo han demostrado que las concentraciones de *E. coli* son el mejor indicador de enfermedades gastrointestinales (diarrea) asociadas a la natación. Además de las enfermedades gastrointestinales (GI), infecciones de los ojos, irritaciones de la piel, oído, nariz, infecciones de garganta, y enfermedades de las vías respiratorias, son comunes en las personas que han estado en contacto con agua contaminada con heces fecales. Algunos estudios han señalado que las tasas de algunos efectos adversos a la salud, tales como los mencionados anteriormente, son más altos en los nadadores, en comparación con los no nadadores (Soller et al., 2010).

La presencia de E. coli puede ser indicativo de la contaminación con otras bacterias, virus o protozoos que pueden causar enfermedades. Salmonella es una bacteria comúnmente implicada en alimentos y agua contaminados. Salmonella puede causar enfermedades como la fiebre tifoidea por el consumo de agua contaminada y Salmonelosis por comer carne de res y pollo contaminado. Una persona que consume alimentos o agua contaminada puede experimentar náuseas, vómitos, cólicos abdominales, diarrea y fiebre. Otro patógeno común transmitido por el agua (pasa toda o la mayor parte de su vida en el agua), Cryptosporidium, un parásito protozoario que afecta el tracto gastrointestinal de humanos y animales, y se elimina en las heces en forma de ooquistes. Estos ooquistes consisten de una cáscara exterior dura que lo protege de la degradación en el medio ambiente. Cryptosporidium es muy resistente al cloro comúnmente utilizado para el tratamiento de agua potable, y se ha implicado en varias epidemias de enfermedades transmitidas por el agua en el pasado. Uno de estas epidemias tuvo lugar en Milwaukee en Abril de 1993, que infectó a más de 400,000 personas y mató a más de 100 (Gerba, 2009). Las fuertes lluvias inundaron llanos agrícolas en Wisconsin y produjeron escurrimiento al río que proporciona agua potable a la ciudad de Milwaukee.

## 2.10 Normas internacionales de calidad del agua

En Chile existen una serie de leyes importantes que regulan la utilización, el acceso y gestión del agua, siendo la principal de ellas el Código de Aguas. N. Ch 1333 de 1978 - Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Fija criterio de calidad del agua de acuerdo con requerimientos científicos, referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado.

### Norma oficial del Perú

Oficio Circular No 677-2000/SUNASS-INF. Mediante este oficio la SUNASS estableció los valores límite máximo permisibles referenciales de los parámetros de control; ello originado por la carencia de una norma nacional actualizada, ya que la vigente data del año 1946 y no considera varios parámetros, como turbiedad,

coliformes, pH, aluminio, nitratos, cadmio, mercurio, cromo, entre otros: para los cuales se ha tomado los valores guía que recomienda la Organización Mundial de la Salud, OMS.

### 2.11 Normas oficiales mexicanas sobre la calidad de agua

Las normas de control de calidad para la descarga de las aguas residuales en aguas nacionales son emitidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y exigen en las mismas una serie de técnicas que deben seguirse para comprobar la carga de contaminantes en las aguas. Las mediciones básicas para determinar la calidad del agua son: sólidos sedimentables, grasas y aceites, materia flotante, nitrógeno, total demanda bioquímica de oxígeno, fósforo total, sólidos disueltos, coliformes totales y fecales, arsénico, metales, plomo, cianuros, cadmio, mercurio, cobre, zinc, nitrógeno de nitratos y de nitritos (NOM-001-ECOL-1996 (06/01/1997)). Las normas de calidad del agua establecen los parámetros que se deben seguir sobre la presencia de contaminantes patógenos, en las aguas residuales para su descarga y reutilización. Considerando que el cuidado de los cuerpos de agua es la única forma de tener un recurso renovable, las normas mexicanas constituyen los parámetros para mantener la calidad del agua en su naturaleza química, física, organoléptica y biológica

En México se ha legislado en materia de agua desde hace más de cinco décadas. La ley actual abroga la de 1972 que tenía, como las anteriores, un carácter predominantemente normativo y administrativo. La Ley de Aguas Nacionales vigente contiene cambios sustanciales relativos a la administración del agua, el papel de la autoridad y la responsabilidad de los usuarios respecto de este recurso. Es además una ley coercitiva que establece sanciones y penalidades para los infractores.

La Comisión Nacional del Agua es una importante dependencia del sector público que hereda gran parte de las funciones que anteriormente estaban a cargo de una secretaría de estado, la Secretaría de Recursos Hidráulicos. Acorde con el rol



secundario que se ha asignado a la agricultura en el proceso de desarrollo, esta secretaría reducida al nivel de una Comisión pasó a formar parte de la Secretaría de Agricultura y Ganadería en la década de los ochenta.

Con la creación de la SEMARNAP en 1994, se integró al esquema orgánico de esa secretaría, pero con un peso e importancia destacados. Entre las importantes funciones que están a cargo de esta Comisión, está la vigilancia del cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales, proponer la elaboración de normas oficiales mexicanas y responder por su vigilancia, establecer condiciones particulares de descarga, otorgar permisos y licencias de uso y descarga de agua y aplicar la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua

Dependencia	Clave de la Norma	Nombre de la Norma	Campo de Aplicación	Indicador Coliformes	Límite Máximo Permissible
<b>SEMARNAT</b>	NOM-001-SEMARNAT-1996	Los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Descargas de aguas residuales	Fecales	<b>1,000 y 2,000 NMP/100ml en promedio mensual y diario, respectivamente</b>
<b>SEMARNAT</b>	NOM-003-SEMARNAT-1997	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público	Descargas de aguas tratadas	Fecales	<b>Servicios al público con contacto directo: 240 NMP/100ml Servicios al público con contacto indirecto u ocasional: 1,000 NMP/100ml Prom Men</b>
<b>CONAGUA</b>	NOM-015-CONAGUA-2007	Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.	Infiltración de aguas pluviales y escurrimientos superficiales al suelo y subsuelo en obras	Fecales	<b>No detectable NMP/100ml</b>
<b>Secretaría de Salud</b>	NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Agua potable de uso y consumo humano	Totales y Fecales	<b>Coliformes totales 2 NMP/100ml  Coliformes fecales 0 NMP/100ml</b>

Secretaría de Salud	NOM-245-SSA1-2010	Requisitos sanitarios y calidad de agua que deben cumplir las albercas	Albercas, clubes deportivos, balnearios, centros de enseñanza, hoteles, desarrollos turísticos, parques acuáticos o cualquiera de preste un servicio público	Fecales	<40 NMP/100ml
---------------------	-------------------	--	--	---------	---------------

Tabla 1. Normatividad en México sobre los diferentes usos del agua.

Ninguna de las normas mexicanas considera la presencia de coliformes fecales en aguas naturales de uso recreativo con contacto directo.

### III. JUSTIFICACIÓN

La calidad del agua de cenotes es importante ya que la exposición humana a aguas contaminadas con materia fecal puede tornarse en un problema de salud pública. Esto es especialmente preocupante en el sistema cárstico de Yucatán, dado que la lente de agua dulce es prácticamente fija, debido al bajo gradiente hidráulico y a que el agua sólo se renueva a través de la lluvia estacional (Kauffer y Villanueva 2012; Bautista et al. 2011; Beddows et al. 2007).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, anualmente se descargan en el acuífero de Yucatán 102.3 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales sin tratamiento adecuado debido a la insuficiencia de las 88 plantas industriales y 28 municipales (CONAGUA 2012; CONAGUA 2014).

Esta situación persiste a pesar de que se cuenta con el marco legal necesario respecto a la prevención y control de la contaminación del agua en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente (Diario Oficial 1988), el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua en el Municipio de Mérida (Diario Oficial 1994) y el Reglamento de Protección al Ambiente y del Equilibrio Ecológico del Municipio de Mérida (Diario Oficial 2005).

Existe suficiente evidencia epidemiológica que sugiere que el contacto con agua contaminada es un factor de riesgo para el desarrollo de infecciones oculares, de oído, nariz y garganta, irritaciones cutáneas, enfermedades respiratorias y enfermedades gastrointestinales (Soller et al. 2010).

En los cenotes se ha podido identificar la presencia de desechos fecales, nitratos, plaguicidas y productos de consumo humano como fármacos y estupefacientes (Kauffer y Villanueva 2012; Bautista et al. 2011; Marín et al. 1994). Adicionalmente, apoyando los hallazgos de los autores anteriormente mencionados, la Secretaría de Salud afirma que "el estado de Yucatán presenta la incidencia más alta de enfermedades gastrointestinales a escala nacional; las enfermedades parasitarias son el principal problema de salud pública de origen hídrico, a causa de altos niveles de contaminación bacteriana..." (Diario Oficial 2013).

#### **IV. OBJETIVOS**

##### **OBJETIVO GENERAL**

- Determinar las características fisicoquímicas del agua y la presencia de coliformes fecales en el acuífero subterráneo de Yucatán.

##### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Implementar la técnica para la determinación de coliformes fecales y coliformes totales en aguas naturales según el Método m-ColiBlue24 (HACH)
2. Determinar la presencia de Coliformes Fecales en cenotes pertenecientes al anillo de cenotes.
3. Implementar la técnica para la determinación de parámetros fisicoquímicos ,  $DBO_5$ , DQO, OD ,pH, conductividad, cloruros, dureza total, nitratos, nitritos, salinidad, solidos disueltos totales (TDS), potencial oxidación-reducción y temperatura.
4. Determinar la presencia de cada uno de los parámetros fisicoquímicos en cenotes pertenecientes al anillo de cenotes

## V. PROBLEMAS A RESOLVER

El tener acceso a aguas de buena calidad constituye un requisito básico para preservación de la salud humana, es por eso que esta investigación es de gran importancia debido a que gran parte de la población de la península de Yucatán desconoce la calidad microbiológica y fisicoquímica de los cuerpos de aguas. Algunos de los problemas que ocasionan la degradación de la calidad del agua son:

- Vulnerabilidad al acuífero
- Uso de Plaguicidas
- Bancos de materiales pétreos que afloran el manto freático o sascaberas, utilizados como sumideros o tiraderos de basura
- Fecalismo al aire libre en el medio rural
- Infiltración en pozos Pluviales
- Insuficiente tratamiento de las aguas residuales de la industria
- Fosas sépticas con baja eficiencia (alrededor de 130 mil en Mérida con descargas al acuífero)
- Afectación del acuífero por ingreso de sustancias contaminantes
- Intrusión salina en pozos costeros por diseño inapropiado y mala operación

Si bien existe el marco legal para la preservación del acuífero, es necesario el realizar más investigaciones de este tipo para ampliar el conocimiento sobre la información ya existente y proponer alternativas sobre el cuidado del agua.

## VI. MATERIALES Y METODOS

### 6.1 ZONA DE MUESTREO

Se seleccionaron 10 cenotes pertenecientes al denominado anillo de cenotes de Yucatán, los cuales se encuentran ubicados en los municipios de Mérida, Tixkokob, Sanahcat, Cuzamá, Abalá, Umán y Chocholá.

No.	Cenote	Localidad	Municipio	Latitud	Longitud	UTM	UTM
C1	Kambul	Noc Ac	Mérida	21°4'25.18"N	89°43'15.42"O	21.073655	-89.720962
C2	Xlakah	Dzibichaltún	Mérida	21°5'27.12"N	89°35'52.69"O	21.090871	-89.597965
C3	San Pedro	Cholul	Mérida	21°1'36.33"N	89°33'22.42"O	21.026763	-89.556229
C4	Sambula	Motul	Motul	21°5'1.60"N	89°16'57.85"O	21.083779	-89.282737
C5	Yaax ha	Tixkokob	Tixkokob	20°59'7.94"N	89°24'6.31"O	20.985537	-89.401753
C6	Bebelchén	Sanahcat	Sanahcat	20°45'13.51"N	89°12'16.68"O	20.753696	-89.20475
C7	Tzapakal	Chunkanán	Cuzamá	20°43'9.26"N	89°19'50.54"O	20.719245	-89.330704
C8	Kankirixche	Mukuyché	Abalá	20°38'13.8"N	89°37'58.8"O	20.637176	-89.633007
C9	X'batún	San Antonio Mulix	Umán	20°40'25.0"N	89°46'23.3"O	20.673619	-89.773146
C10	San Ignacio	Chocholá	Chocholá	20°45'00.5"N	89°50'03.5"O	20.750126	-89.834292

**Tabla 2.** Ubicación de cada uno de los 10 cenotes en grados y coordenadas UTM.

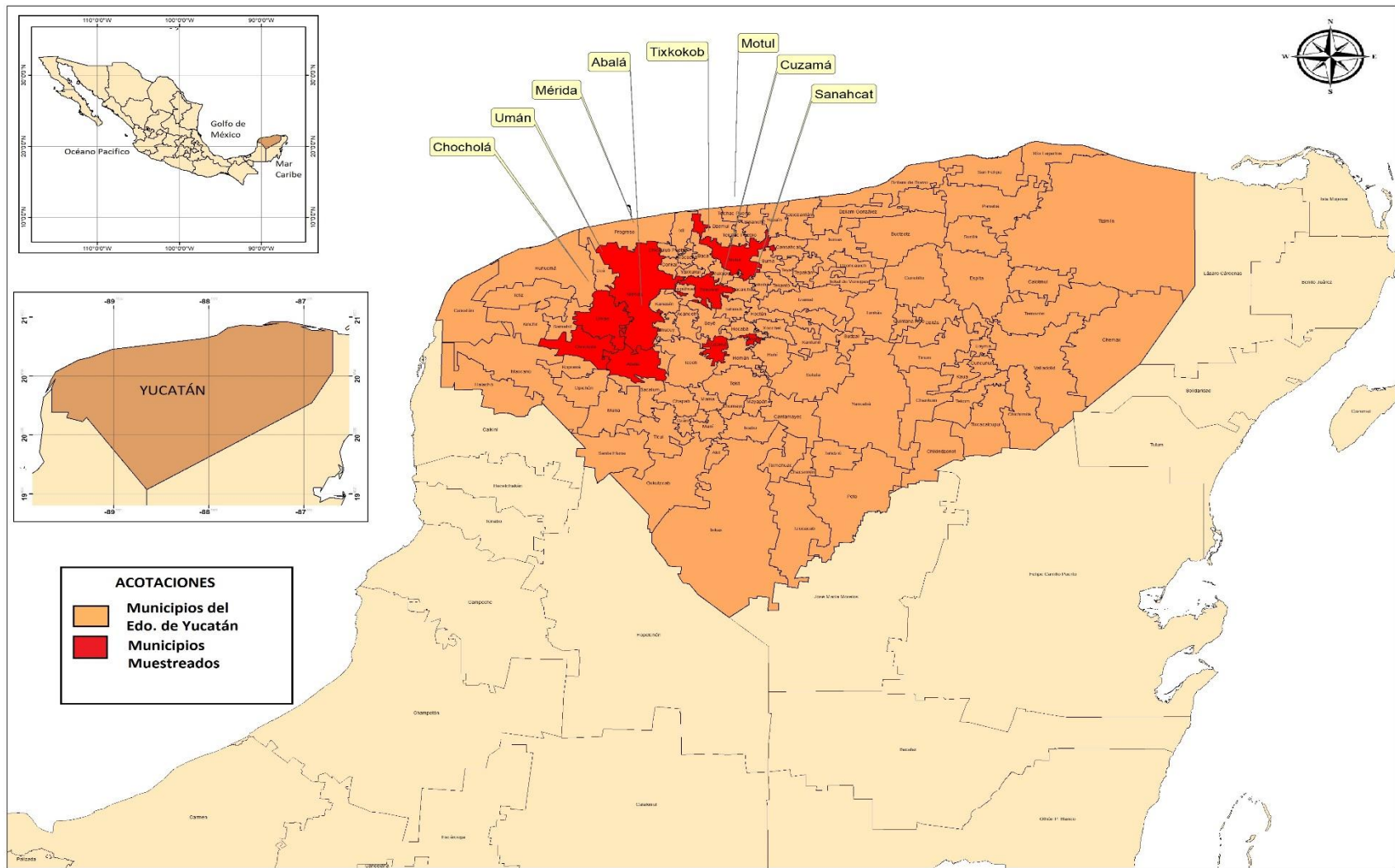


Ilustración 1. Municipios Muestreados.

## 6.2 METODOLOGÍA DE CAMPO

El estudio se realizó durante los meses de octubre y noviembre del 2018, las muestras fueron recolectadas de la siguiente manera:

MUESTRA	MUNICIPIO	FECHA
C1	Mérida	26 DE OCTUBRE DE 2018
C2	Mérida	25 DE OCTUBRE DE 2018
C3	Mérida	25 DE OCTUBRE DE 2018
C4	Motul	25 DE OCTUBRE DE 2018
C5	Tixkokob	25 DE OCTUBRE DE 2018
C6	Sanahcat	12 DE OCTUBRE DE 2018
C7	Cuzamá	12 DE OCTUBRE DE 2018
C8	Abalá	12 DE OCTUBRE DE 2018
C9	Umán	11 DE OCTUBRE DE 2018
C10	Chocholá	11 DE OCTUBRE DE 2018

**Tabla 3.** Calendario de toma de muestras.

Para obtener datos representativos se realizó lo siguiente:

1. Se tomó suficiente cantidad de muestra de agua de cada uno de los cenotes, con lo que se obtuvieron 10 puntos de muestreos, que consistieron en 2 botellas plásticas por cada punto de muestreo y 1 bolsa esterilizada por cada punto de muestreo, obteniendo un total de 30 muestras.
2. Las dos botellas plásticas que se utilizaron por punto de muestro contenían en total 2 litros de agua de cenote las cuales se utilizaron para los análisis fisicoquímicos. Mientras que en la bolsa esterilizada contenían 500mL de agua de cenote que fue utilizado para análisis microbiológicos.
3. Las muestras recolectadas fueron puestas en neveras con hielo para preservar una temperatura de 4°C y de esta manera no alterar las características cada muestra fue etiquetada con la siguiente información: fecha de toma de muestra, punto de recolección y la leyenda fisicoquímicos o microbiológicos sea era el caso, luego fueron trasladadas al laboratorio para su procesamiento respectivo.

4. Se realizaron por duplicado los análisis fisicoquímicos a excepción de la dbo5 pues esta se realizó por triplicado para un menor rango de error, posteriormente se realizó un promedio para obtener un valor final por cada punto de muestreo.
5. Para los análisis microbiológicos por la disposición del laboratorio solo se pudo realizar un análisis por punto de muestra.

## **6.3 METODOLOGÍA DE LABORATORIO**

### **6.3.1 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO**

Técnica m-ColiBlue24 Method 10029 Membrane Filtration

Para la estimación de organismos coliformes totales y coliformes fecales (*E. coli*) se utilizó la técnica de Filtración por Membrana con el medio de cultivo m-ColiBlue24 (HACH).

1. Se preparó el equipo de filtración por membrana que consistió en: matraz kitazato, soporte de vacío de acero inoxidable, embudos esterilizados y bomba al vacío.
2. Se esterilizó con alcohol etílico la superficie superior del embudo de filtración.
3. Se conectó el tubo de la bomba de vacío al matraz kitazato.
4. Con una pinza esterilizada, se colocó un filtro de membrana, con la rejilla hacia arriba, en el centro del soporte de vacío. Nota: Para esterilizar las pinzas, sumérgalas en alcohol y quémelas en el alcohol o en un mechero de Bunsen. Deje enfriar antes de utilizar las pinzas.
5. Se agitó la muestra 25 veces aproximadamente y vertió la muestra (100 mL) en el embudo.
6. Se retiró el filtro de membrana para posteriormente colocarlo en la caja petri con el medio de cultivo m-ColiBlue24.



## **6.3.2 ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS**

### **6.3.2.1 Determinación de cloruros**

Técnica NMX-AA-073-SCFI-2001

Procedimiento:

Se utilizó el método argentométrico

1. Se utilizó una muestra de 100 mL y se mezcló.
2. Se dejó sedimentar y se filtró.
3. Se Ajustó directamente las muestras a pH entre 7 y 10 (regulando con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1N o NaOH 0,1 si no estuvieran en ese rango).
4. Se añadió 1,0 mL de solución indicadora de K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>. 103.
5. Se tituló con AgNO<sub>3</sub> 0,1N previamente estandarizado hasta un punto final amarillo rosado.
6. Se estableció el valor del blanco por el método de titulación descrito anteriormente utilizando agua destilada.

### **6.3.2.2 Determinación de dureza**

Técnica NMX-AA-072-SCFI-2001

Procedimiento:

Se utilizó el método titulométrico con EDTA.

1. Se seleccionó un volumen de muestra que requirió menos de 15 mL de reactivo EDTA y se realizó la titulación en cinco minutos.
2. Se diluyó 25.0 mL de muestra hasta alrededor de 50 mL de agua destilada en erlenmeyer.
3. Se añadió entre 1 y 2 mL de solución tampón (cloruro de amonio-hidróxido de amonio. Por lo general 1 mL será suficiente para dar un pH de 10,0 a 10,1.
4. Se añadió una o dos gotas de solución indicadora de negro de eriocromo T.
5. Poco a poco, se fue añadiendo el titulante EDTA estándar, removiendo continuamente, hasta que desapareció los últimos matices rojizos. Se añadió las

últimas gotas con intervalos de 3- 5 segundos. En el punto final la coloración fue azul.

### **6.3.2.3 Determinación de DBO5**

Técnica NMX-AA-028-SCFI-2001

Procedimiento:

1. Preparación de agua para dilución. Colocar dos litros de agua destilada en un recipiente y añadir por cada litro de agua destilada 4 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos.
2. Se deja airear por 1 hora, tomando precauciones que no se contamine.
3. En un matraz aforado de litro colocamos 750 mL del agua de dilución y lo faltante con agua de cenote, por último, homogenizamos.
4. Posteriormente el resultado de esta homogenización se vierte en tres botellas Winkler de 300mL y enseguida medimos el oxígeno disuelto.
5. Se prepara un blanco en una botella Winkler de 300 mL utilizando solo agua de dilución y también medimos el oxígeno disuelto.
6. Tapamos dejando un sello de agua alrededor de la tapa de nuestras botellas Winkler, esto para evitar contaminación.
7. Se mete a la incubadora a 20° C por 5 días.
8. Esto se repite para cada uno de nuestros puntos de muestra.
9. Finalmente, después de los 5 días se vuelve a medir el oxígeno disuelto e interpretamos los datos obtenidos.

### **6.3.2.4 Determinación de DQO**

Técnica NMX-AA-030-SCFI-2001

Procedimiento:

1. Preparar solución catalítica de H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> concentrado
2. Preparar Solución de digestión de K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0.035 M.
3. En un tubo de digestión (exento de impurezas) Agregar 1.5 ml. de solución de digestión y verter cuidadosamente 3.5 ml. de solución catalítica.

4. Preparar un blanco de reactivos con agua destilada.
5. A nuestro tubo de digestión con nuestros reactivos poner 2 ml. de muestra (previamente homogeneizada). Cerrar y apretar bien el tapón de los tubos.
6. Mezclar por completo invirtiendo varias veces los tubos de digestión, antes de aplicar calor para evitar el calentamiento local del fondo del tubo y una posible reacción explosiva.
7. Digerir por 1 1/2 horas. en un termorreactor, precalentado a 150 °C.
8. Sacar los tubos del termorreactor y colocarlos en el soporte para tubos de digestión para que se enfríen. Al cabo de 10 min. agitar la cubeta por balanceo para enfriar a temperatura ambiente (tiempo de enfriamiento mínimo 30 min).
9. Leer la absorbancia en el espectrofotómetro a 420 nm para analizar los datos.

#### **6.3.2.5 Determinación de Nitratos**

Procedimiento:

Se realizó por el método Hach 10020 Test N' tube vials.

1. Se prepara el blanco, agarramos un vial el cual introducimos 1 mL de muestra de agua.
2. Cerramos el vial y agitamos 10 veces.
3. Limpiamos el vial y leemos en el espectrofotómetro.
4. ajustamos a cero para calibrar.
5. A nuestro vial le agregamos el sobre que contiene el polvo NitriVer X y cerramos.
6. Agitamos 10 veces y esperamos 5 min.
7. Finalmente leemos en el espectrofotómetro y analizamos los resultados.

#### **6.3.2.6 Determinación de Nitritos**

Procedimiento:

Se realizó por el método Hach 10019 Test N' tube vials.

1. Llenamos el vial NitriVer 3 Nitrite con 5 ml de muestra.
2. Cerramos el vial y agitamos hasta observar un color rosado.
3. Iniciamos el cronometro del espectrofotómetro (20 minutos).

4. Cuando el tiempo se haya terminado agarramos un nuevo vial para preparar el blanco, introducimos 5 mL de muestra limpiamos el vial y leemos en el espectrofotómetro y ajustamos a cero.
5. Posteriormente se lee cada una de las muestras y analizamos los datos.

### **6.3.2.7 Determinación de Temperatura, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Potencial Hidrogeno, Solidos Totales Disueltos, Salinidad, Potencial Oxido/Reducción y Conductividad.**

Procedimientos:

La medición se realizó con el multiparametrico YSI 556 MPS, previamente calibradas con soluciones amortiguadoras estándar, la recolección de los datos se obtuvo midiendo tres puntos diferentes por cada cenote, esto con el fin de obtener datos confiables.

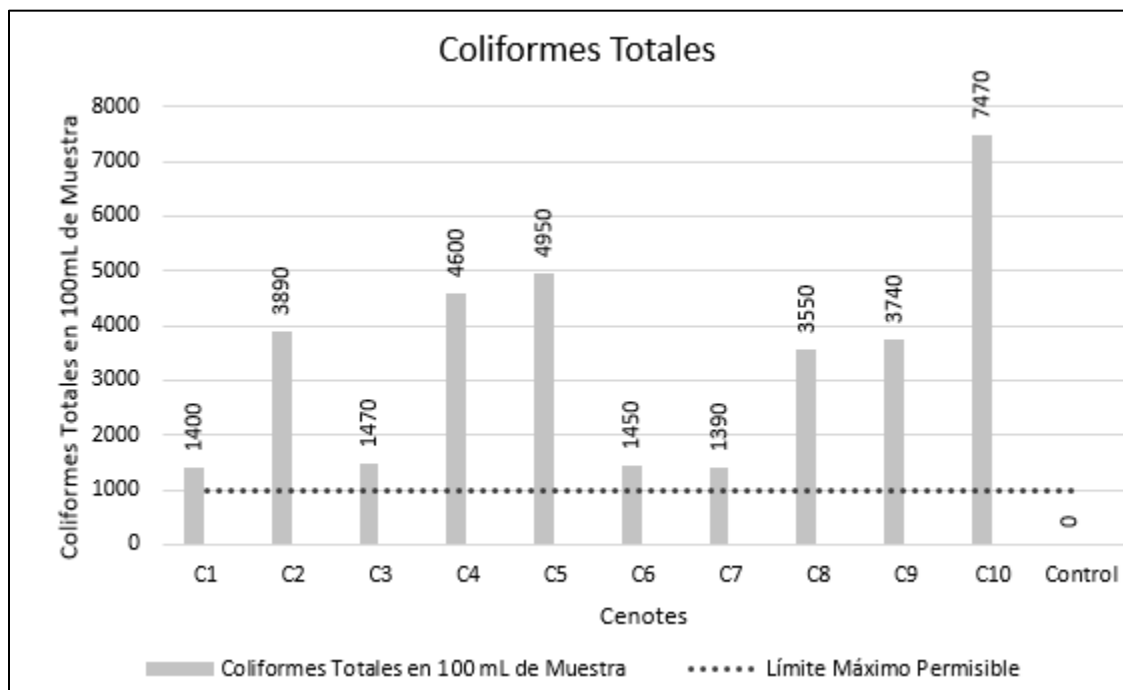
## **VII. RESULTADOS**

### **Coliformes Totales**

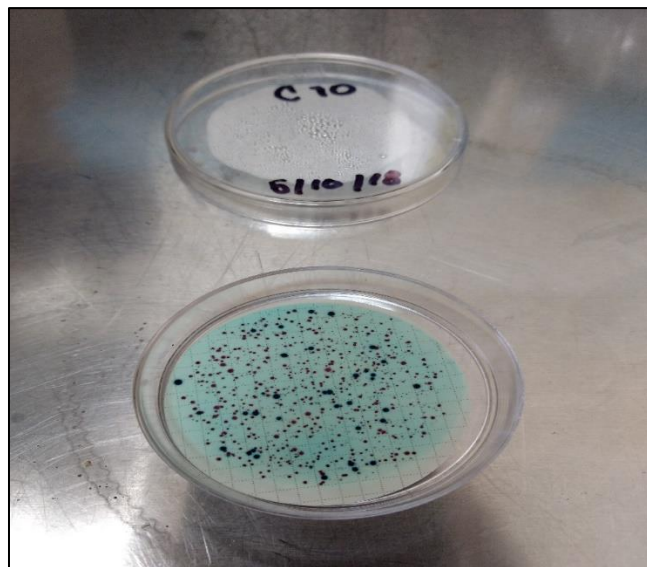
Los resultados obtenidos fueron comparados con la norma oficial chilena N° 1.333 en el apartado de aguas para uso recreacional, el cual especifica que el límite máximo permisible de coliformes totales para aguas de uso recreacional con contacto directo es de 1000 coliformes totales en 100mL de muestra. Se decidió comparar los resultados con este apartado debido a que las aguas de los cenotes en Yucatán, en su mayoría son utilizadas para uso recreacional y turístico, de igual manera este resultado fue comparado con esta norma internacional debido a que en México no se han establecido límites máximos permisibles de coliformes totales en aguas naturales o en aguas de uso recreacional.

En la siguiente tabla observamos que ninguno cumple con norma chilena N°1.333 siendo el punto C10 (Cenote San Ignacio del municipio de Chocholá) con el número

más alto, más de 7 veces el límite máximo permisible. Todas las muestras fueron contadas con Microscopio estereoscópico para mejor precisión.



**Gráfico 1.** Resultados de análisis de Coliformes totales.

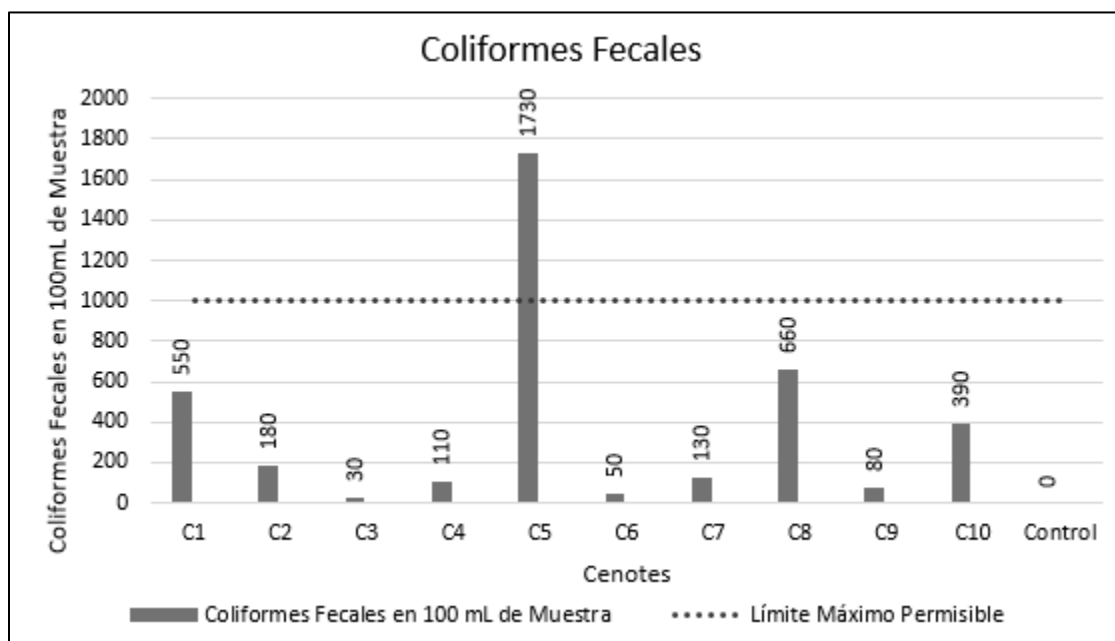


**Ilustración 2.** Colonias de Coliformes del cenote San Ignacio del municipio de Chocholá.

## Coliformes Fecales

De igual manera estos resultados fueron comparados con la norma oficial Chilena N° 1.333 pues en México tanto para los coliformes totales como para los coliformes fecales no existen límites máximos permisibles fijados para este tipo de aguas. Esta norma chilena en su apartado de aguas para uso recreacional de contacto directo especifica que el límite máximo permisible de coliformes fecales es de 1000 coliformes fecales en 100 mL de agua.

En la siguiente tabla observamos que 9 cenotes están por debajo del límite máximo permisible, siendo solo el cenote C5 (Cenote Yaax ha del municipio de Tixkokob) el que está por arriba del límite máximo permisible.



**Gráfico 2.** Resultados de análisis de Coliformes fecales.

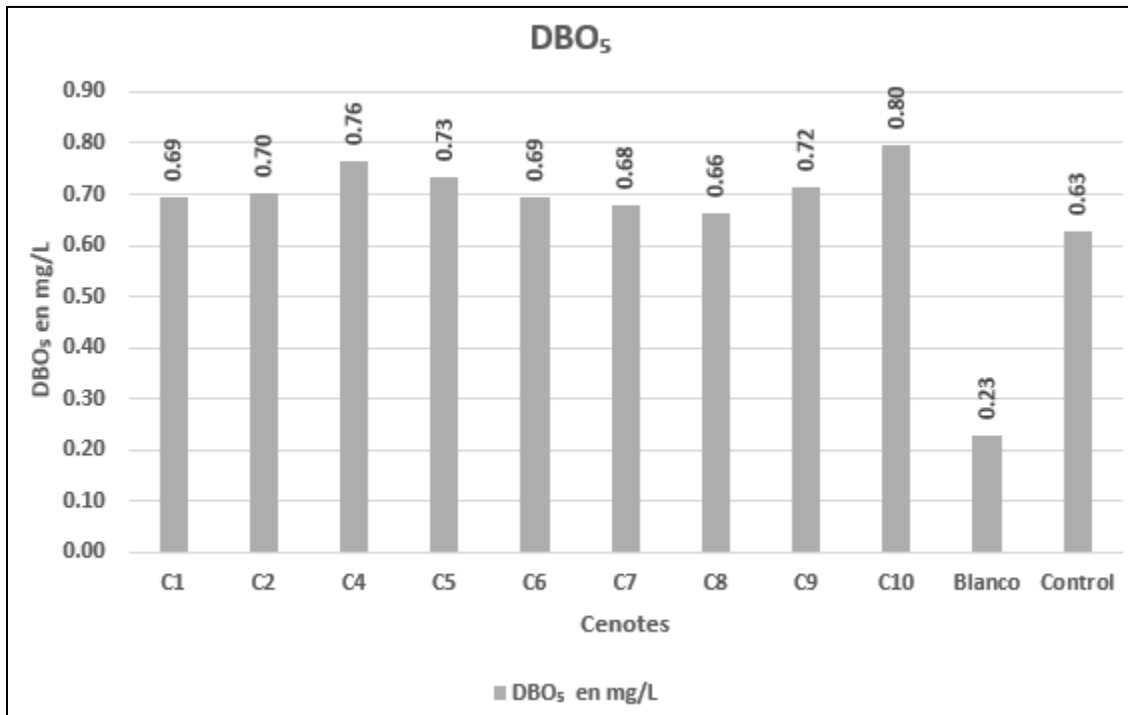


**Ilustración 3.** Colonias de coliformes Fecales Cenote Yaax ha del municipio de Tixkokob

### **DBO<sub>5</sub>**

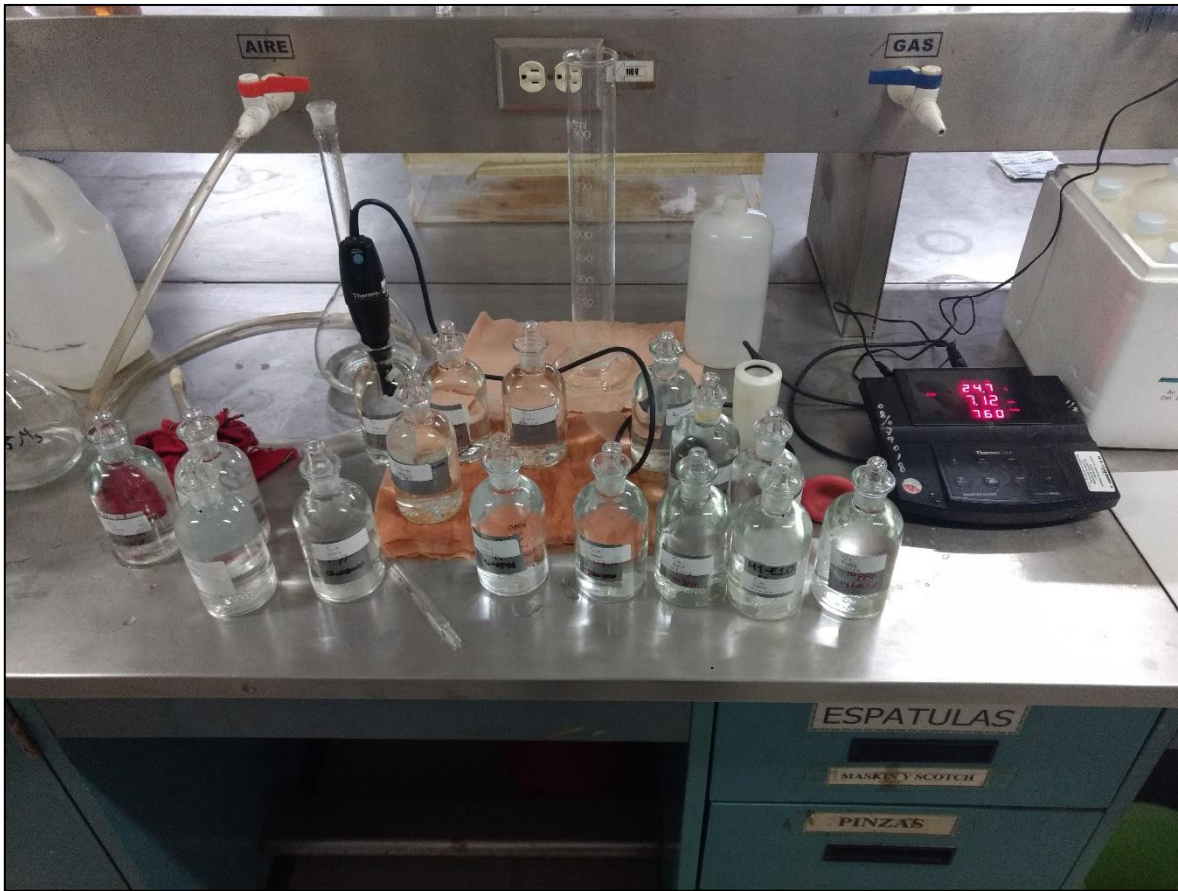
En los resultados de la DBO<sub>5</sub> no fue necesario comparar con alguna normativa, dado a que el agua de análisis es de bajo rango estos se encuentran muy lejos de los límites máximos permisibles y las Normas mexicanas, así como las normas internacionales establecen el límite máximo permisible únicamente para aguas de alto rango que son las provenientes de aguas industriales o aguas de plantas de tratamiento.

Estos resultados son de suma importancia pues nos confirman los resultados antes descritos con los coliformes, como observamos en la siguiente tabla el cenote C10 (Cenote San Ignacio municipio de Chocholá) tiene la mayor degradación de oxígeno y así corroboramos que efectivamente en este cenote existe una cantidad significativa de microorganismos, los cuales pudimos observar con anterioridad en los análisis microbiológicos.



**Gráfico 3.** Resultados de análisis de la DBO5.



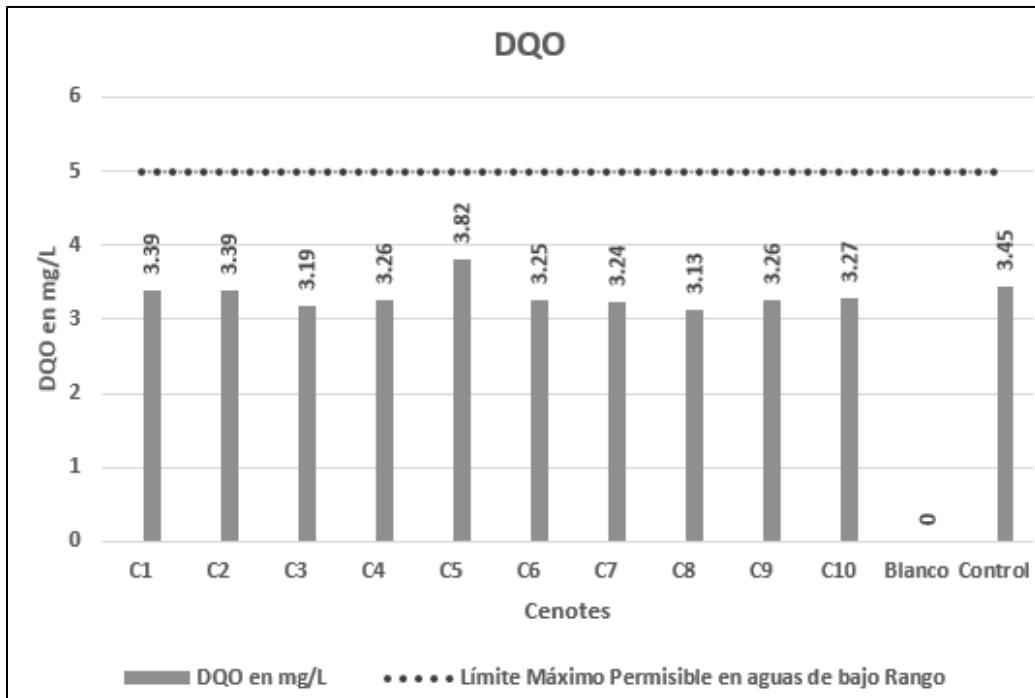


**Ilustración 4.** Medición del OD en el análisis de la DBO<sub>5</sub>

## DQO

Los resultados Obtenidos en la DQO todos están por debajo del límite máximo permisible, el valor obtenido es siempre superior a la demanda biológica de oxígeno, ya que se oxidan por este método también las sustancias no biodegradables. La relación entre los dos parámetros es indicativa de la calidad del agua.

Estos resultados son de igual importancia y es aquí cuando nos surgen nuevas interrogantes, normalmente la DQO es aproximadamente el doble de la DBO en nuestros resultados observamos que los valores obtenidos en la DQO son 3 veces más que los obtenido en la DBO, entonces esto nos quiere decir que probablemente las sustancias no biodegradables están presentes en mayor cantidad y estas pueden ser pesticidas como DDT o metales pesados como el plomo y el mercurio, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.



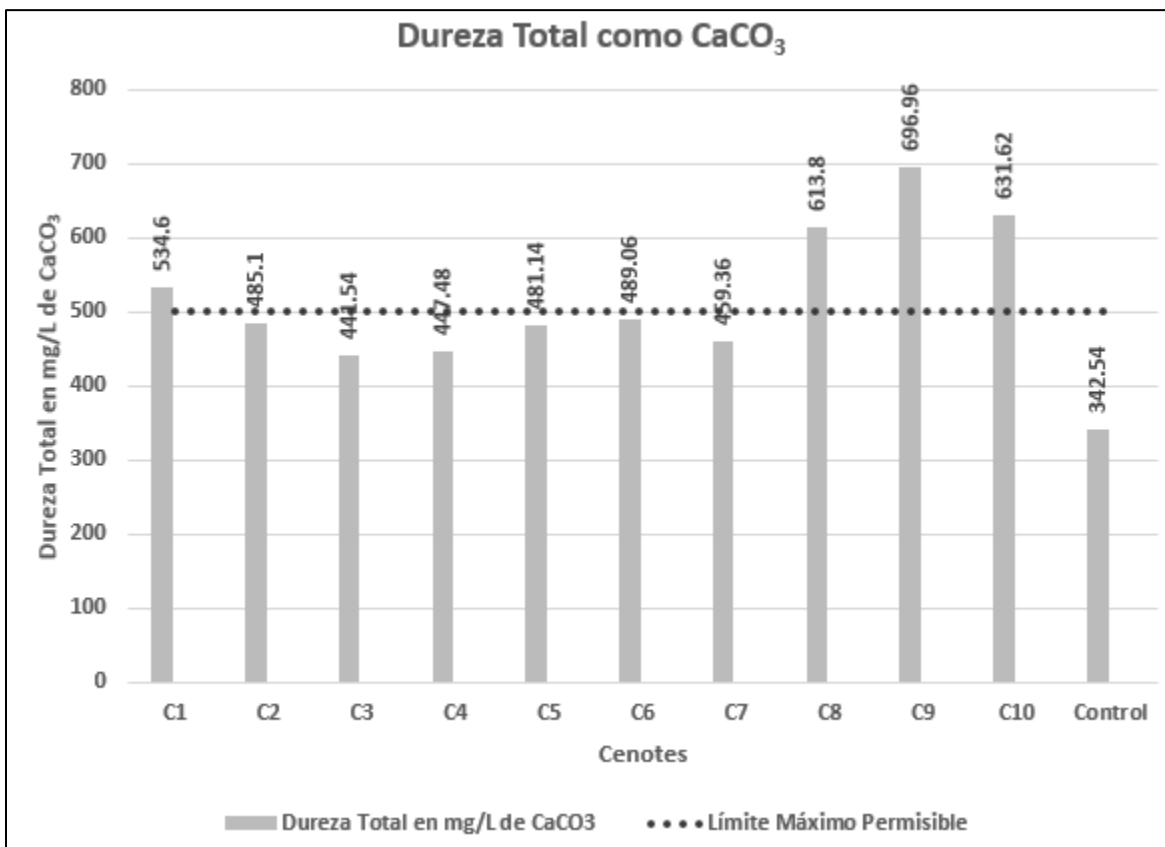
**Gráfico 4.** Resultados de análisis de DQO.



**Ilustración 5.** Digestión de cada una de las muestras a 150°C para cálculo de DQO

## Dureza Total como carbonatos de calcio

Las aguas de la península de Yucatán provienen de un acuífero Kárstico en el cual encontramos abundancia de cationes como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y aniones como el  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ . debido a la presencia de estos componentes el agua de acuífero yucateco suele ser dura, en la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos, podemos observar que cuatro puntos de muestreo están por arriba del límite máximo permisible, estos resultados fueron comparados con la NOM-127-SSA1-1994 el cual establece el límite máximo permisible en 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$



**Gráfico 5.** Resultados de análisis de Dureza total como  $\text{CaCO}_3$ .



**Ilustración 6.** Análisis de Dureza de los Primeros 5 puntos de Muestreo



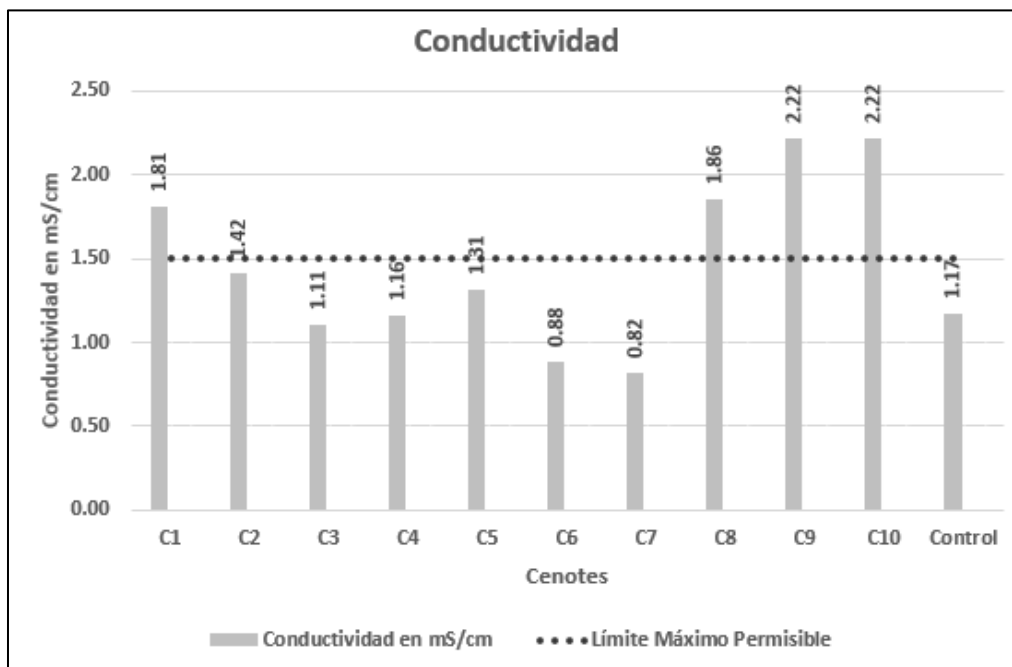
**Ilustración 7.** Análisis de Dureza de los últimos 5 puntos de muestreo

## Conductividad

Es una medida indirecta de la cantidad de sales o sólidos disueltos que tiene un agua natural. Los iones en solución tienen cargas positivas y negativas; esta propiedad hace que la resistencia del agua al flujo de corriente eléctrica tenga ciertos valores. Si el agua tiene un número grande de iones disueltos su conductividad va a ser mayor. Cuanto mayor sea la conductividad del agua, mayor es la cantidad de sólidos o sales disueltas en ella.

Una pobre conductividad nos indica que el agua es pura y que por lo tanto tiene alta resistencia al flujo eléctrico.

Estos resultados fueron comparados con la norma oficial de Perú No. 677-2000/SUNASS-INF. En el apartado de aguas para consumo humano el cual indica que el límite máximo permisible es de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  el cual convertimos a  $\text{mS}/\text{cm}$  para facilitar la interpretación. El valor convertido es de 1.5  $\text{mS}/\text{cm}$ . El resultado de nuestro análisis demostró que cuatro puntos de muestra (C1 cenote Kambul, C8 cenote Kankirixche, C9 cenote X'batún y C10 cenote san Ignacio) están por encima del límite máximo permisible como se muestra en la tabla siguiente.



**Gráfico 6.** Resultados de análisis de Conductividad.



**Ilustración 8.** C1, cenote Kambul, comisaria Noc Ac, Mérida Yucatán. Medición Conductividad.

### **Sólidos Disuelto Totales (TDS)**

Se refieren a las materias minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en agua. Esto incluye cualquier cosa presente en el agua que no sea el agua pura (H<sub>2</sub>O) molécula y sólidos en suspensión. (Sólidos en suspensión son las partículas / sustancias que no se disuelven ni se establecieron en el agua)

Los sólidos disueltos también vienen a partir de materiales inorgánicos tales como rocas y de aire que puede contener bicarbonato de calcio, de nitrógeno, de fósforo de hierro, azufre, y otros minerales, recordemos que en nuestro acuífero abundan todos estos componentes. De igual modo Muchos de estos materiales forman sales, que son compuestos que contienen tanto un metal y un no metal. Las sales usualmente se disuelven en agua formando iones.

Los niveles de TDS altos podría indicar la presencia de minerales tóxicos, el nivel máximo recomendado de la EPA de TDS en el agua para consumo humano es de 500 mg / L, en nuestros resultados obtenidos todos los cenotes analizados están por encima del límite máximo permitido por la EPA, los niveles más bajos se

registraron en el punto C6 cenote Bebelchén y en el punto C7 cenote Tzapakal como se muestra en la siguiente tabla.

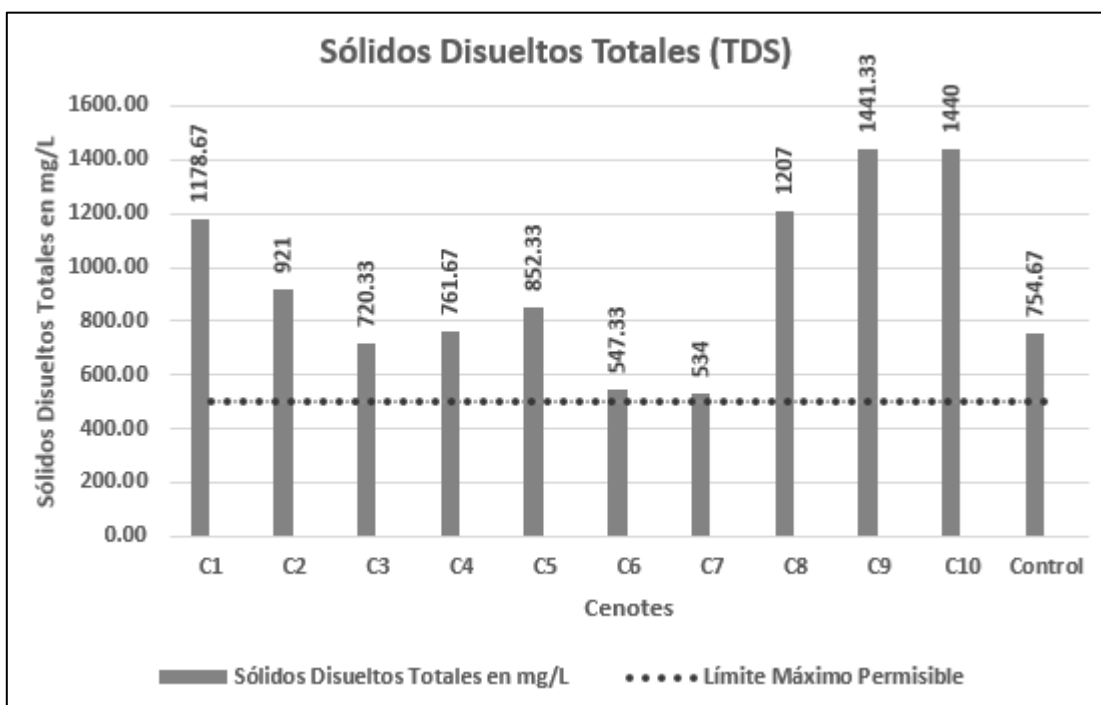


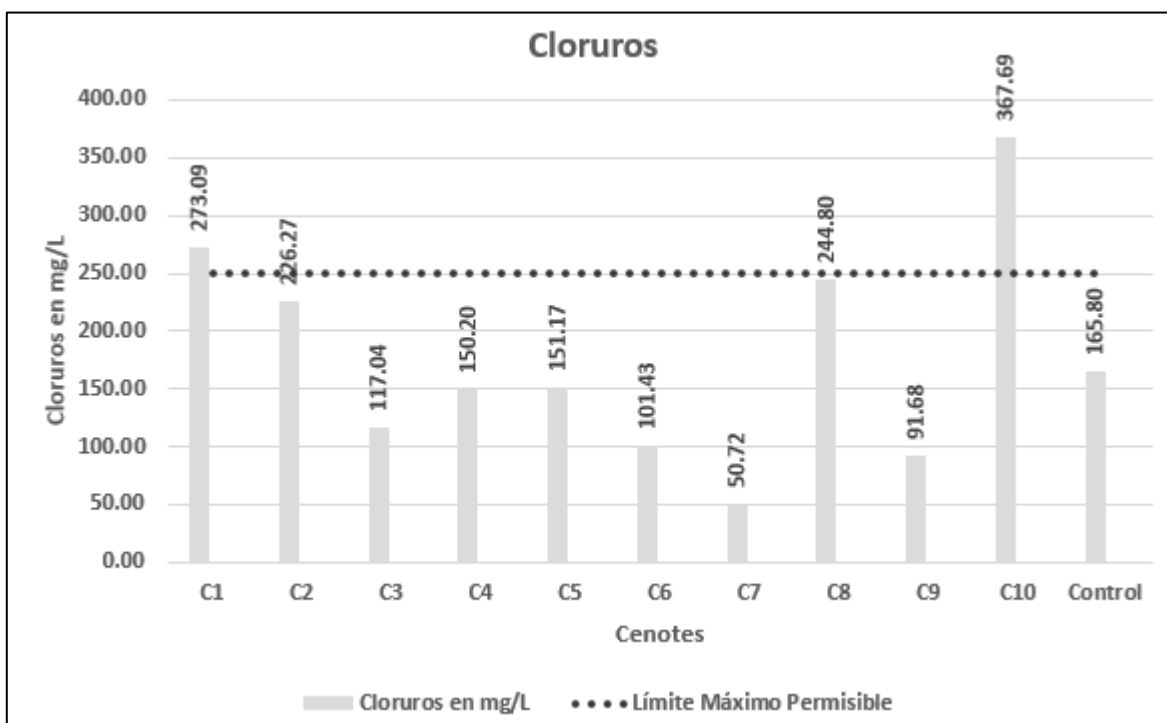
Gráfico 7. Resultados de análisis de Sólidos disueltos totales.



Ilustración 9. Cenote Bebelchén en el medio el Propietario del lugar

## Cloruros

El ión cloruro es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y el aumento de cloruros en una muestra de agua puede tener orígenes diversos. Si se trata de una zona costera puede deberse a infiltraciones de agua del mar, en el caso de una zona árida este aumento se debe al lavado de los suelos producido por fuertes lluvias y en otros casos puede deberse a la contaminación del agua por descargas de aguas residuales. Este parámetro fue comprado con la NOM-127-SSA1-1994 el cual establece el límite máximo permisible que s de 250 mg/L este límite es superado por dos puntos de muestra el C1 cenote Kambul y el C10 cenote san Ignacio como se muestra en la siguiente tabla



**Gráfico 8.** Resultados de análisis de Cloruros.





**Ilustración 10.** Resultados de los análisis de Cloruros de los puntos C6 al C10

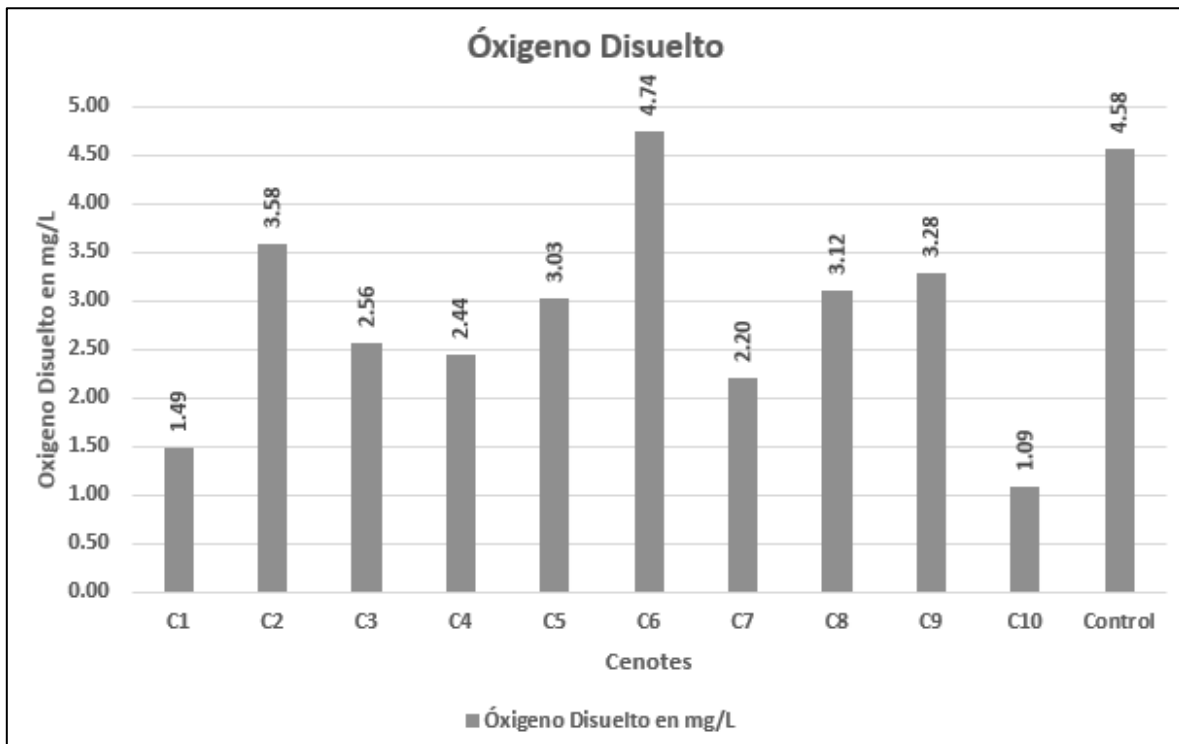


**Ilustración 11.** Resultados de los análisis de Cloruros de los puntos C1 al C5

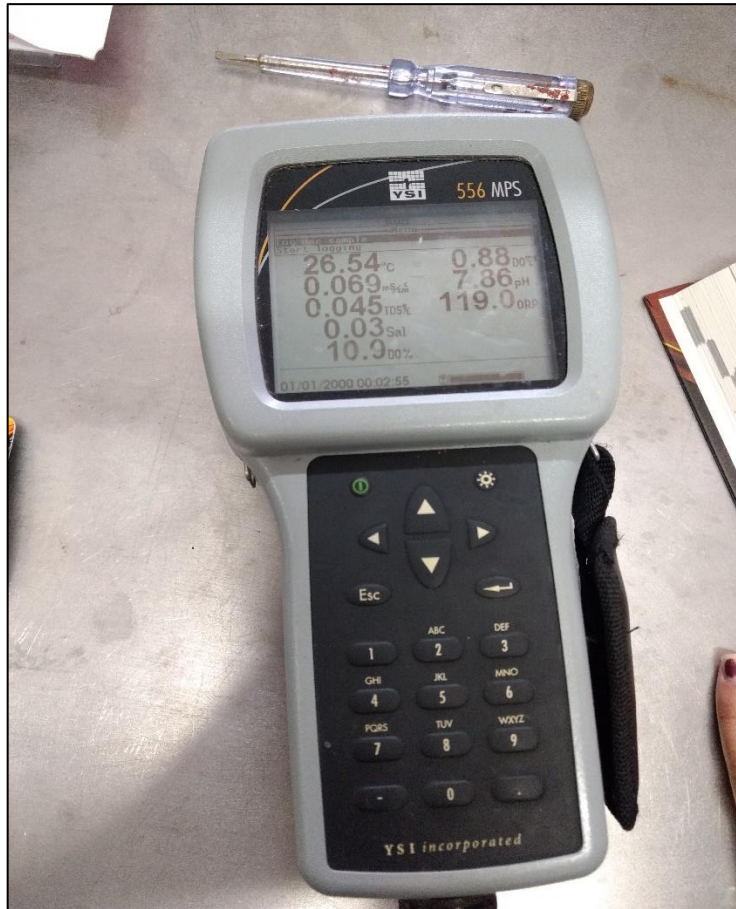
## Oxígeno Disuelto

Este puede ser indicador de que tan contaminada está el agua o que tan saludable se encuentra. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad, por lo contrario, si los niveles de oxígeno disuelto son demasiados bajos indica un agua de mala calidad y muy probablemente un nivel bajo de microorganismos. Además, la cantidad de oxígeno depende de la temperatura, en aguas más frías el oxígeno se conserva mejor que a temperaturas más cálidas.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos, en la cual podemos observar que el punto C6 el cenote Bebelchén tiene el mayor número de oxígeno disuelto, corroborando que hasta ahora es uno de los cenotes más limpios en comparación al punto C10 cenote San Ignacio resultado ser uno de con más contaminación.



**Gráfico 9.** Resultados de análisis de Oxígeno disuelto.



**Ilustración 12.** Multiparamétrico YSI 556 MPS calibrado antes de salir a campo

### **Potencial Hidrógeno (pH)**

Es un parámetro de suma importancia tanto para aguas naturales como aguas residuales. El rango de pH en el cual pueden interactuar los ecosistemas y sobrevivir las especies que lo conforman, está sumamente restringido, por lo cual, si este valor es alterado, los procesos biológicos que normalmente se llevan a cabo pueden ser perturbados o inhibidos y las consecuencias son adversas. Este parámetro fue comparado con la NOM-127-SSA1-1994 el cual establece un rango óptimo de pH que va de 6.5 a 8.5.

En la siguiente tabla podemos observar que existen 7 puntos de muestreo que están por debajo del rango óptimo según la NOM-127 el punto C1 cenote Kambul, C2

cenote Xlacah, C4 cenote Sambula, C5 cenote Yaax ha, C8 Cenote Kankirixche, C9 cenote X'batún y C10 el cenote San Ignacio

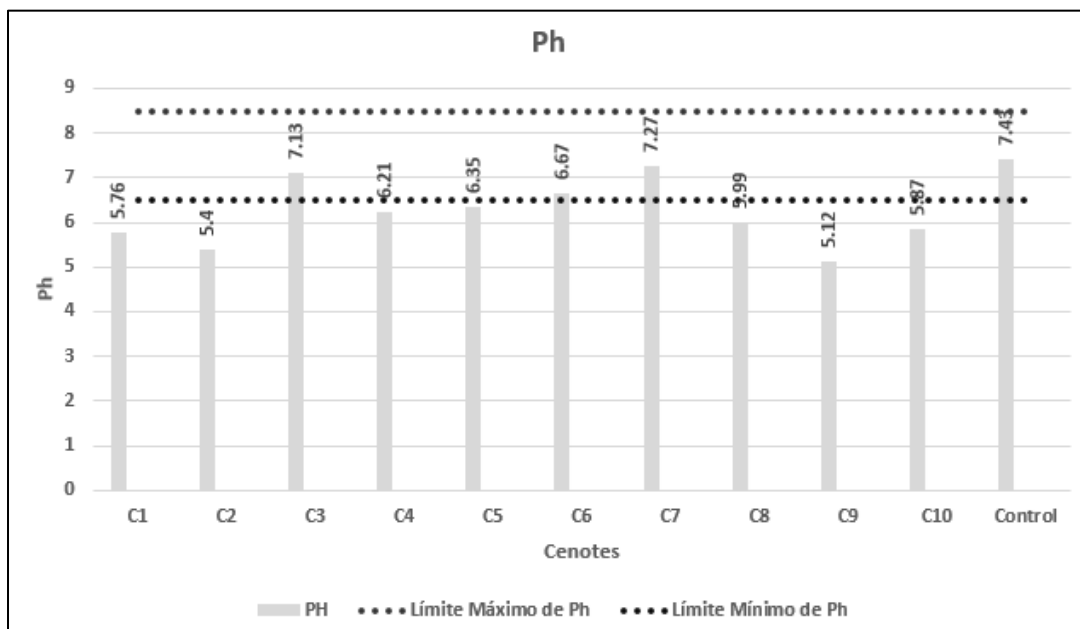


Gráfico 10. Resultados de análisis de pH.

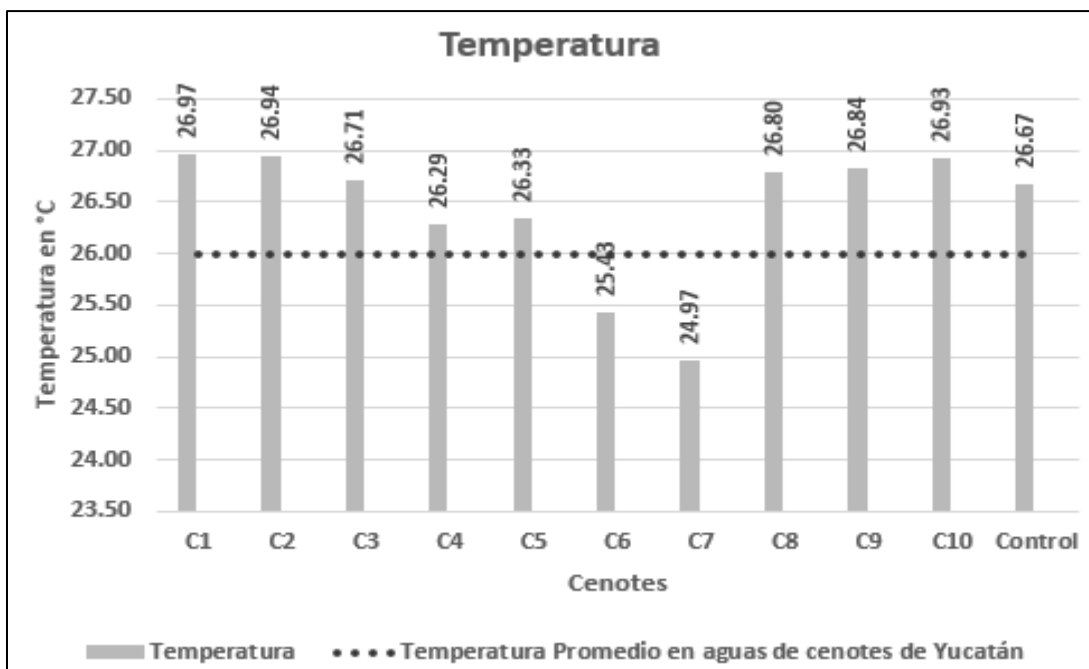


Ilustración 13. Cenote Sambula Motul Yucatán.

## Temperatura

La temperatura es un parámetro físico de suma importancia para los ecosistemas hidráulicos, aunque no es parte de las características de calidad del agua. Cuando la temperatura aumenta, disminuye la concentración de oxígeno disuelto como ya habíamos mencionado anteriormente. También, la contaminación térmica puede causar trastornos en ecosistemas acuáticos ya que en algunos casos el rango de temperatura de estos, es sumamente restringido.

La temperatura promedio para aguas de cenotes en la península de Yucatán oscila en los 26°C, en la siguiente tabla observamos los datos registrados de las temperaturas, obteniendo el valor más bajo en el punto C7 el cenote Tzapakal y el más alto en el punto C1 el cenote Kambul.



**Gráfico 11.** Resultados de análisis de Temperatura.



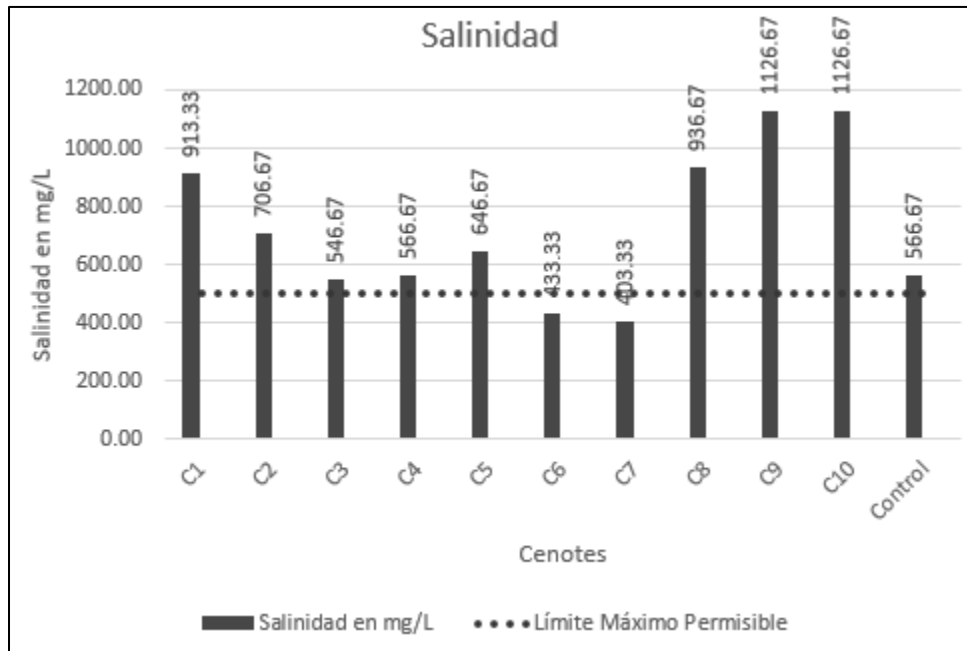
**Ilustración 14.** Cenote Yaax ha Tixkokob Yucatán

## **Salinidad**

La salinidad del agua es un parámetro secundario, La alta salinidad está ligada a altas concentraciones de cloruros, sulfatos, así como excesiva dureza por la presencia de calcio y magnesio en altas concentraciones. También a mayor salinidad, mayor es la probabilidad de presencia de contaminantes (flúor, arsénico, metales pesado etc.).

Según la Organización Mundial de la Salud el agua potable debe tener un contenido salino menor a 0,05 %, también expresado como 500 mg/L.

En la siguiente tabla observamos como el punto C9 cenote X'batún y el punto C10 San Ignacio tienen más del doble de lo establecido por OMS, por lo contrario, en punto C6 cenote Bebelchén y C7 cenote Tzapakal son los que cumplen a la perfección.



**Gráfico 12.** Resultados de análisis de salinidad.

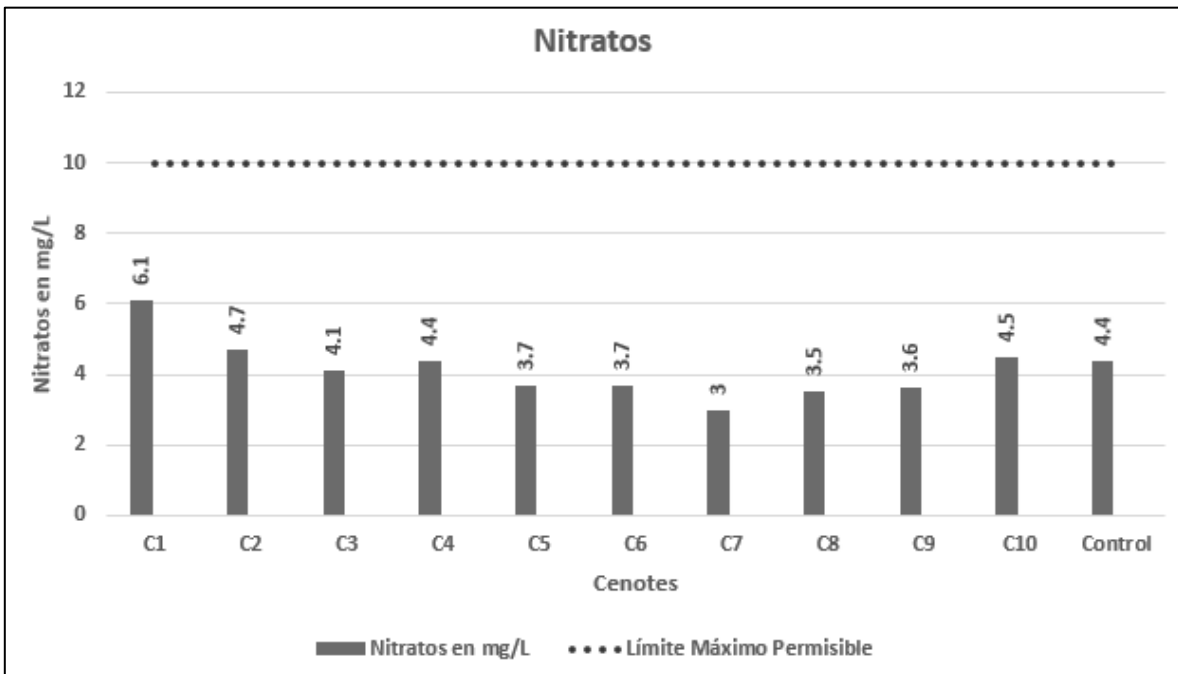
### Nitratos y Nitritos

Los nitratos en las aguas superficiales y subterráneas se derivan de la descomposición natural, por microorganismos, de materiales nitrogenados orgánicos como las proteínas de las plantas, animales y excretas de animales. El ion amonio formado se oxida a nitritos y nitratos según un proceso de oxidación biológica (nitrificación). Aunque la presencia natural de nitratos y nitritos en el medio ambiente es una consecuencia del ciclo del nitrógeno, por lo común los nitritos se encuentran en muy bajas concentraciones (OPS, OMS., 1980). En las siguientes tablas se observan los valores obtenidos para los nitratos y otra para los nitritos.

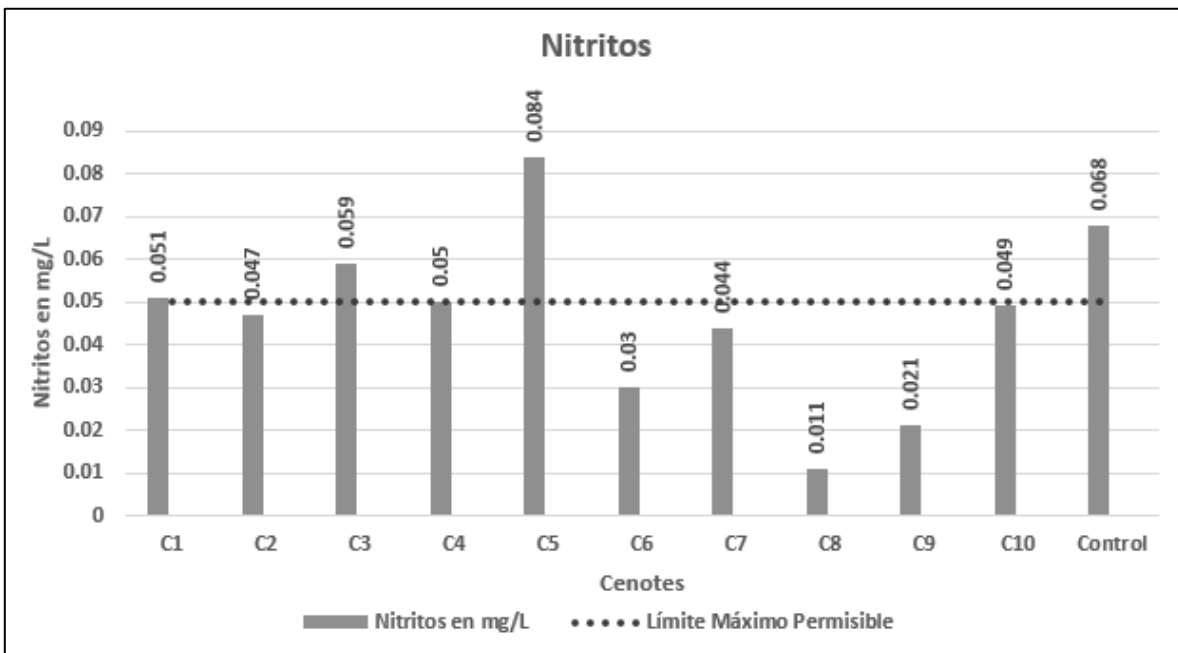
Para los nitratos NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 10mg/L en el cual todos los puntos de muestra se encuentran por debajo de este límite.

Posteriormente en la siguiente tabla encontramos a los nitritos para estos la NOM-127-SSA1-1994 establece que el límite máximo permitido es de .05 mg/L en este caso tres puntos de muestreo son los que rebasan los límites máximos permisibles el

punto C1 cenote Kambul, el punto C3 cenote San Pedro y el punto C5 cenote Yaax ha.



**Gráfico 13.** Resultados de análisis de Nitratos.



**Gráfico 14.** Resultados de análisis de Nitritos.





**Ilustración 15.** Viales de la marca Hach Utilizados para la determinación de Nitratos y Nitritos



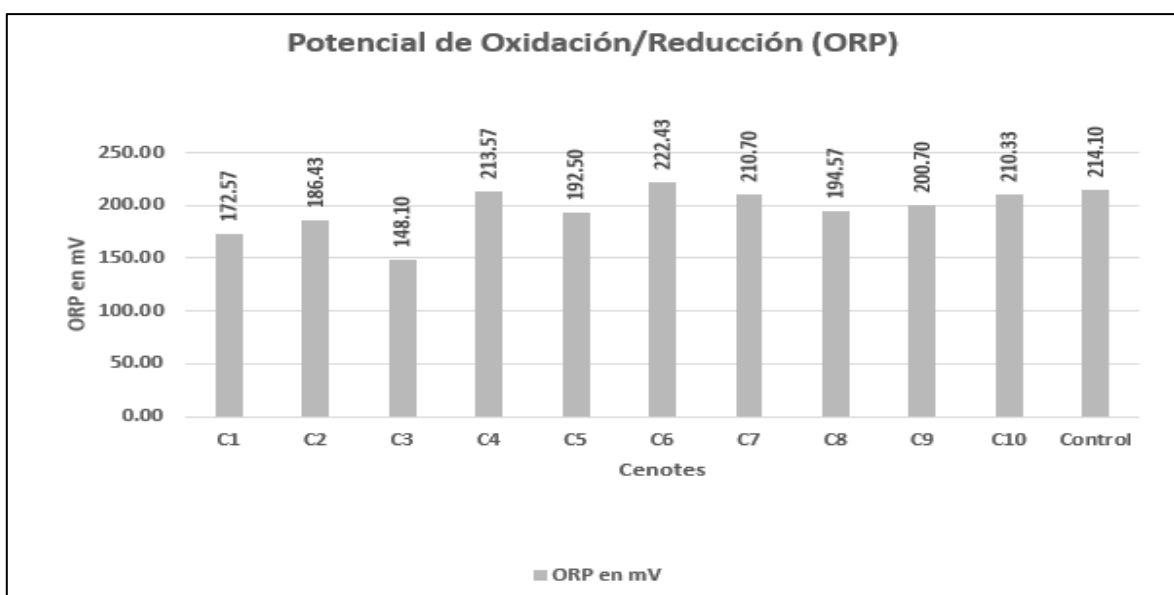
**Ilustración 16.** Gradillas con viales marca Hach

## Potencial oxidación-reducción

ORP es una medida en milivoltios (m/V) del nivel de oxidación del agua. Este índice representa la actividad del desinfectante en el agua. Elementos químicos como el cloro, el bromo, peróxido de hidrogeno, ácido peroxiacético y ozono son todos oxidantes, lo que los hace buenos desinfectantes para el agua en su habilidad de oxidar o capturar electrones de otras sustancias, porque destruyen las bacterias patógenas, las algas y los materiales orgánicos al alterar la composición química de estos.

La OMS en su publicación INTERNATIONAL STANDARDS FOR DRINKING WATER (Ginebra 1971) aceptó la medida del potencial de oxidación-reducción para el control de la eficiencia de la desinfección. un potencial redox de 650 mV (medido con un electrodo plata/cloruro de plata) como valor para garantizar la correcta desinfección.

Desde luego nuestras aguas analizadas no contienen ningún método de desinfección antes descrito por lo tanto estos valores de oxidación-reducción se debe a los iones y a la materia orgánica presente. En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos.



**Gráfico 15.** Resultados de Potencial de oxidación/reducción.

## VIII. DISCUSIÓN

### Coliformes totales y Coliformes Fecales

La población de la península de Yucatán tiene en las aguas subterráneas el principal abastecimiento de este vital líquido para satisfacer sus necesidades, incluidas sus actividades productivas. El aprovechamiento de los recursos hídricos no representa hasta ahora una amenaza seria en términos de sobreexplotación, dada su abundancia. Sin embargo, esta reserva de agua es altamente vulnerable por su ubicación en el subsuelo, en forma de un acuífero subterráneo expuesto a recibir contaminantes que provienen de la superficie, así como por el vertimiento de aguas residuales domésticas, municipales, agropecuarias e industriales.

Durante la temporada de lluvias las precipitaciones traspasan el suelo rápidamente, descienden al manto freático, viajan de manera subterránea hacia la costa, y al final de la temporada de lluvias y durante la época de “nortes” afloran a la superficie a través de manantiales que inundan las depresiones costeras, y se mezclan con el agua de mar en lagunas y ciénagas, incluidos los contaminantes que haya arrastrado a su paso. (Semarnat, Conagua, 2013: 60 y 63)

La gran carga de coliformes fecales (E. Coli) encontrados en nuestros puntos de muestreo hacen evidente el mal uso que la sociedad está dando a nuestros cuerpos de agua, esto debido a la falta de una educación ambiental.

Basta con decir que durante la recolección de muestras los cenotes visitados en su mayoría eran de carácter recreativo por lo cual los pobladores han construido palapas en los que ofrecen diferentes servicios como los servicios de comida, servicio de regaderas y servicios de baños, estos servicios obligan a los pobladores a construir a no más de 10 metros de distancia de la entrada del cenote fosas sépticas, las cuales si no se cuenta con las debidas medidas para su construcción, estas serían las responsables de una directa infiltración a estos cuerpos de agua.

En la investigación el manejo del agua a través del tiempo en el estado de Yucatán del año 2016 nos menciona que se observaron valores muy elevados de sales de nitratos que se extienden ampliamente en la zona central de la ciudad, junto con los

valores de coliformes fecales, como indicadores de escaso saneamiento, cuya presencia se encuentra asociada con el riesgo de contraer severas enfermedades por bacterias, virus y protozoarios.

Es evidente que desde años atrás existen investigaciones que señalan la presencia de coliformes totales y fecales en grandes cantidades, los cuales no parecen disminuir. Es importante hacer algo al respecto lo más pronto posible.

### DBO<sub>5</sub> y DQO

En cuanto a nuestros resultados de DBO<sub>5</sub> y DQO, estos parámetros fueron importantes para determinar la concentración de materia orgánica tanto degradable como no degradable, los cuales concuerdan, ya que en nuestros resultados los puntos de muestreo con mayor oxígeno consumido son igual a nuestros puntos de muestreo que tienen un mayor número de coliformes totales los cuales corroboran nuestros primeros resultados. En cuanto a los no degradables (DQO) están apenas por debajo del límite para aguas de bajo rango los cuales podrían señalar la presencia de otros contaminantes como metales pesados o pesticidas.

### Dureza Total

Los valores de las concentraciones para la dureza total encontradas en el agua subterránea del estado de Yucatán, los podemos agrupar en bajos, medios y altos. Los dos primeros cumplen con lo establecido en la NOM (1994) que es de 500 mg/l y el tercero, presenta valores que exceden dicho límite. (Pacheco et.al. / Ingeniería 8-2 (2004) 165-179).

En nuestra investigación de los 10 puntos de muestreo, encontramos que cuatro están por arriba de 500 mg/L de carbonato de calcio (Nom127-1994). Estos valores de dureza total que están por arriba del límite máximo permisible se deben a la presencia de minerales disueltos como los carbonatos de calcio (CaCO<sub>3</sub>), dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) y anhidrita (CaSO<sub>4</sub>)

En comparación con la investigación realizada por Pacheco (2004) podemos decir que del año 2004 al año 2018 las aguas subterráneas de Yucatán siguen presentando un valor similar en dureza total.

## Ph, Temperatura y Conductividad

Existen diferentes factores ambientales como el gradiente de precipitación, la influencia del agua marina en ambientes acuáticos cercanos a las costas y diferentes variables fisicoquímicas como la conductividad, el pH, el oxígeno disuelto, entre otros, que influyen en la diversidad de los ecosistemas acuáticos del sistema acuífero de la Península de Yucatán (Pérez et al., 2012). El sistema acuífero es un sistema donde cada sitio es característico y los parámetros fisicoquímicos están modulados por la porosidad del material cárstico, la iluminación, la profundidad de la tabla de agua y el tiempo de formación (Schmitter-Soto et al., 2002).

En el presente trabajo se registraron temperaturas en el agua de entre los 24.9°C a 26.9°C, las cuales se encuentran dentro del rango reportado previamente en diferentes ecosistemas del acuífero de la Península de Yucatán (Alcocer et al., 1998; Schmitter-Soto et al., 2002; Pérez et al., 2012). Pueden ocurrir variaciones de temperatura en sentido horizontal y vertical en las dolinas de acuerdo a la temporada del año, sin embargo, las temperaturas promedio de 24–29°C reportadas (Schmitter-Soto et al., 2002), coinciden con las temperaturas obtenidas en la presente investigación, donde se tomaron muestras en la superficie.

En cuanto a los valores de Ph Hall (1936) y Schmitter-Soto et al., (2002) reportan valores básicos para las superficies de los cenotes y valores alcalinos de Ph de hasta 8.6. En el presente trabajo, se reportaron valores muy parecidos de entre Ph 5.12 a Ph 7.27.

Los valores de conductividad eléctrica del agua de los puntos de muestreo se presentaron en un rango de entre .82 mS/cm a 2.32 mS/cm. Estos valores se encuentran en los rangos reportados previamente para diferentes cenotes de agua dulce, de .425 a 7.390 mS/cm (Schmitter-Soto et al., 2002). Se ha reportado que entre más se alejan los cuerpos de agua de la costa los valores de conductividad eléctrica se reducen significativamente y la conductividad hidráulica del acuífero puede ser mucho menor (Bauer-Gottwein et al., 2011).

## Sólidos Disueltos Totales

La concentración de los sólidos disueltos totales (TDS) tienen una concentración uniforme típica de agua dulce (<3 g/l) (Schmitter-Soto et al., 2002); los valores obtenidos en nuestros puntos de muestreo fueron de 534 mg/L a 1441.33 mg/L, estos valores convertidos a g/L se encuentran dentro del rango de Schmitter, pero no así dentro los límites máximos permisibles establecidos por la EPA. Los parámetros fisicoquímicos, concuerdan con lo reportado previamente para el sistema acuífero (Schmitter- Soto et. al., 2002; Pérez et al., 2012)

La distribución espacial de los cloruros en el agua subterránea en el estado de Yucatán, mostró que, en los municipios ubicados en las porciones noreste, sur y noroeste del Estado, se tuvieron concentraciones que excedieron a 250 mg/L que es el límite máximo permisible por la Norma (NOM, 1994). Una de las cabeceras municipales que reportaron los mayores valores que excedieron el valor de la norma fueron Chocholá con 404 mg/L. (Pacheco et. al. / Ingeniería 8-2 (2004) 165-179)

En nuestra investigación el ion cloruro estuvo presente en un rango de 50.72 mg/L a 367.69 mg/L y al igual que en la investigación realizada por Pacheco (2004) nuestro resultado más alto fue el muestreo registrado en el municipio de Chocholá. Estos resultados, puede estar asociada con la presencia de rocas evaporitas en el subsuelo, por el uso de fertilizantes clorurados (como el cloruro de amonio) y por el efecto de la intrusión marina.

## Nitratos

La presencia de nitratos en el agua subterránea puede tener diversos orígenes relacionados con actividades humanas como la agricultura y la disposición de los desechos de humanos y de actividades porcícola. Las concentraciones de nitratos en el agua subterránea del área de estudio pueden clasificarse en un 89% por debajo del límite establecido en la norma y el 11% restante con valores que exceden dicho límite, alcanzando concentraciones de hasta 96 mg/l (Pacheco et. al. / Ingeniería 8-2 (2004) 165-179)

Algo muy similar al trabajo de investigación presentado por Pacheco (2004) en donde el 89% de la población de muestreo están por debajo del límite máximo permisible, nuestra investigación arroja que los diez puntos de muestreo oscilan entre los 3 mg/L a 6.1 mg/L de nitratos los cuales están por debajo de lo establecido en la Nom 127, a diferencia de Pacheco nuestros resultados representan un 100% lo que nos indica que la calidad del agua en cuanto a nitritos se ha mantenido constante al paso de los años

### Nitritos

La presencia de nitritos en el agua es un indicativo de contaminación de carácter fecal reciente (Catalán L. et al., 1971; Catalán A., 1981; Metcalf y Eddy, 1998). En aguas superficiales, bien oxigenadas, el nivel del nitrito no suele superar 0.1 mg/l (Stumm y Morgan, 1981; Marín, 1995). Asimismo, cabe resaltar que el nitrito se halla en un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco y el nitrato. Los nitritos en concentraciones elevadas reaccionan dentro el organismo con aminas y amidas secundarias y terciarias formando nitrosaminas de alto poder cancerígeno y tóxico (OMS, 1980, 1985; Guang-wei, 1981; Russo, 1995; Gray, 1996; Marín, 1996). Según Erikson (1985) valores entre 0.1 y 0.9 mg/l pueden presentar problemas de toxicidad dependiendo del pH, asimismo valores por encima de 1.0 mg/l son totalmente tóxicos y representan un impedimento para el desarrollo de la vida piscícola y el establecimiento de un ecosistema fluvial en buenas condiciones (Prat et al., 1996). En general, la concentración de nitritos en el agua superficial es muy baja, pero puede aparecer ocasionalmente en concentraciones inesperadamente altas debido a la contaminación industrial y de aguas residuales domésticas (Albert, 1990; Gray, 1996; Pardo y Marañón, 1997; Prat et al., 1999).

Los datos obtenidos en nuestra investigación oscilan entre .011 mg/L y .084 mg/L los cuales 5 puntos de muestreo se encuentran por encima de los establecido en la Nom 127 la cual señala como límite máximo permisible .05 mg/L de Nitritos.

## Oxígeno Disuelto Potencial Oxidación reducción

Las condiciones hidrogeológicas (acuífero libre y cársico) que prevalecen dentro de la zona, favorecen la presencia de cantidades variables de oxígeno en el agua subterránea. En todas las muestras se detectó la presencia de oxígeno disuelto en concentraciones que oscilaron entre 6 y 0.1 mg/l. El potencial de óxido reducción, se calculó con base en la concentración de oxígeno disuelto, obteniéndose valores de alrededor de +200 mV en todas las muestras. (Graniel Castro E. et al., Hidrogeoquímica en el acuífero calcáreo de Mérida Yucatán)

En esta investigación el oxígeno disuelto oscila entre 1.9 mg/L a 4.58 mg/L el cual es similar al trabajo de investigación de Graniel (1999), mientras que para el potencial oxido reducción se detectaron variables que oscilan entre 148.10 mV a 222.43 mV, este parámetro también es muy similar al registrado en el trabajo de investigación de Graniel (1999)

## **IX. CONCLUSIONES**

Puedo concluir que para este trabajo de investigación la calidad bacteriológica del agua de los 10 puntos de muestreo de nuestra investigación rebasa el límite máximo permisible, para este parámetro fue necesario la comparación de los resultados con la norma oficial chilena N°1.333 en el apartado de aguas para uso recreacional de contacto directo el cual señala un límite máximo permisible de 1000 colonias de coliformes en 100 mL, se tomó como referencia mencionada norma para una mejor interpretación de datos, debido a que las normas oficiales mexicanas no establecen un límite máximo permisible de colonias de coliformes totales para aguas de uso recreacional; en donde los cenotes cumplen con la característica de ser un cuerpo de agua recreacional turístico.

De igual manera la presencia de *Escherichia coli* (Coliformes fecales) fue comprada con la norma oficial chilena N°1.333, en el mismo apartado que para los coliformes totales, el cual señala un límite máximo permisible de 1000 colonias de coliformes fecales en 100mL. Este parámetro nos indica que el punto C5 es el que está por encima del límite máximo permisible, por lo contrario, el punto C3, C6 y C9 son los



que presentan una cantidad menor a las 1000 colonias de coliformes fecales en 100mL.

Cabe destacar que los cenotes que rebasan dicha norma citada son por una mala ubicación de sanitarios los cuales fueron encontrados en una distancia menor a 10 metros con respecto al cuerpo de agua o en algunos sitios el cenote se encuentra debajo de restaurantes los cuales incluyen sanitarios, y también por un erróneo manejo en cuanto a sus fosas sépticas ya que no han tenido alguna limpieza desde que fueron construidas.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos un dato importante que se puede apreciar dentro de los niveles de Sólidos disueltos totales (TDS) es que en altas cantidades podría indicar la presencia de minerales tóxicos, la EPA considera como el nivel máximo recomendado de TDS en el agua para consumo humano de 500 mg / L en donde todos los cenotes monitoreados indicaron sobrepasar dicho límite establecido, pero el Cenote X´batún ubicado en el municipio de Umán con 1441.33 mg/L. Este tema es importante conocer porque al presentar estos resultados se puede notar que nos da un indicio de un alto contenido de contaminantes del cual desconocemos lo que se encuentran presentes, así también se desconoce la fuente de procedencia de estos; por lo tanto, puede quedar abierta la posibilidad de alguna investigación más exhaustiva para resolver dichas dudas.

Dentro de mis recomendaciones al culminar este proyecto de investigación es que estos datos ya analizados sean expuestos ante la población que se encuentra encargada de cuidar los cenotes, esto con el fin de poder mostrarles que una inadecuada acción puede provocar que la fuente principal de abastecimiento hídrico quede inutilizable por contaminantes presentes, así como también de mostrarles que esto puede ser productos de causa de enfermedades a la población en donde los más vulnerables siempre son los niños y ancianos.

Otra punto importante que no puede ser pasado por alto es que el estado de Yucatán debería de encontrarse obligado a regular más la calidad de agua de sus cenotes usados como una fuente turística; empezando por tratar de crear

parámetros con un límite máximo permisible, como lo son las coliformes totales y fecales que no presentan ninguna información con la cual comparar y reportar, teniendo que recurrir a normas internacionales que al encontrarse en otra situación geológica, hidrológica, etc. no presenta las mismas características y por lo tanto es un poco difícil compararlas, pero sirven como una base para observar que tan estrictos son en cuanto a mantener lo menos contaminadas sus aguas con un uso recreativo.

## **X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Aguilar-Duarte, Y., F. Bautista, M. E. Mendoza, O. Frausto, T. Ihl, y C. Delgado, (2016). IVAKY: Índice De La Vulnerabilidad Del Acuífero Kárstico Yucateco a la Contaminación. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 15(3), 913-933.
- Alcocer, J., L.E. Marín y E. Escobar, (1998). Geochemical evaluation of five cenotes for use as potential drinking water supplies in northeastern Yucatan, Mexico. Hydrogeology Journal, 6, pp. 293-301.
- AGUA MINERAL NATURAL. 2002. Pliego de condiciones para la calidad certificada. España.
- AGURTO S., T.; A., GUERRA. 2004. Microbiología básica. Universidad Ricardo Palma. Imprenta Unión de la Universidad la Unión. Lima- Perú.
- Hoogesteijn Reul, Almira L., Febles-Patrón, José Luis, Nava-Galindo, Violeta Amapola, La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. Ingeniería [en línea] 2015, 19 [Fecha de consulta: 5 de octubre de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750926004>> ISSN 1665-529X

- APHA-AWWA-WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, “Biochemical Oxygen Demand (BOD)”, Washington, D.C., 19th Edition.
- APHA-AWWA-WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Método 5220-C. “Chemical Oxygen Demand” “Closed
- Comité de estudio sobre la acumulación de nitratos. 1972. Accumulation of Nitrate. Washington, D.C., Academia Nacional de Ciencias. pp. 48.
- APHA-AWWA-WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, D.C., 19th Edition.
- Ciencia y Biología (2011). El pH. Disponible en: <http://www.cienciaybiologia.com/ecologia/ph.htm> [citado 7 noviembre 2011]
- García, R.M., García, M.M. y Cañas, P.R. 1994. Nitratos, Nitritos y compuestos de N-nitroso. Centro panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la salud. Organización Mundial de la Salud. Serie Vigilancia 13. pp. 19-27.
- HACH. 2000. Manual de análisis de agua. Tercera edición. Hach Company. Loveland, Colorado, EE.UU.
- OPS, OMS., 1980. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. Nitratos, nitritos y compuestos de N-nitroso. Criterios de salud ambiental 5. pp. 21-25.
- NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana. Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

- Lillibridge, S.R, 2000, Manejo de los aspectos de salud ambiental en los desastres: agua, excretas humanas y albergues. En: Impacto de los desastres en la salud pública (Ed. Noji E.K.).
- Núñez, R.T., 1991, Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la región N-NW del estado de Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Pacheco, A.J., 2003, Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los pozos de extracción de agua potable y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento de las cabeceras municipales del estado de Yucatán. Informe Final del proyecto
- Reflux, Colorimetric Method”, Washington, D.C., 19th Edition, pp. 5-12, 5-16.
- Secretaría de Economía, 2001. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas Naturales. Residuales y Residuales Tratadas. Norma Oficial Mexicana: NMX-AA-030-SCFI-2001. México, D.F.
- Secretaría de Economía, 2001. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Naturales. Residuales (DBO<sub>5</sub>) y Residuales Tratadas. Norma Oficial Mexicana: NMX-AA-028-SCFI-2001. México, D.F
- NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método de Prueba.
- Secretaría de Economía, 2001.- Análisis de agua - Determinación de Dureza Total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Norma oficial mexicana: NMX-AA-072-SCFI-2001
- INEGI (2011). Territorio, Cuéntame, Sobreexplotación y contaminación Agua contaminada con

<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/sobreexplota.aspx?tema=T#>. [Acceso 25 enero 2018]

- INEGI (2014). Minimonografía, Quintana Roo, Censos económicos. Censos económicos. [http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/doc/minimonografias/mqroo\\_ ce2014.pdf](http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/doc/minimonografias/mqroo_ ce2014.pdf).
- INEGI. (2015a). “Estadísticas a propósito del... día mundial del turismo (27 de septiembre)” datos nacionales. México. <http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2015/turismo0.pdf>.
- Pérez-Ceballos R, J. Pacheco-Ávila, J. Euán-Ávila, H. Hernández-Arana, (2012) Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of Cenotes, Yucatan, Mexico, Journal of Cave and Karst Studies 2012 vol: 74 (1) pp: 90-102
- Perry E.J, J. Swift, J. Gamboa, G. A. Reeve, R. Sanborn, L. Marín, y M. Villasuso (1989). Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast Yucatán, México. *Geology*.;17(9):818.
- Perry, E., G. Velazquez-Oliman y L. Marin, (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), 191-221.
- Perry E., A. Paytan, B. Pedersen y G.O. Velazquez (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 27–40. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.026>

- Petric M., (1995). Caliciviruses, astroviruses and other diarrheic viruses. In: Murray, P. R., E. J. Baron, M. A. Pfaller, F. C. Tenover & R. H. Tenover (Eds.). Manual of Clinical Microbiology. ASM Press. Washington, DC. pp 1017-1024
- Schmitter-Soto J. J., F. A. Comín, E. Escobar-Briones, J. Herrera-Silveira, J. Alcocer, E. Suárez- Morales, M. Elías-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L. E. Marín y B. Steinich (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467(1–3), 215–228.
- Schmitter-Soto, J. J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, y L.
- M. Marín, (2002). Los cenotes de la Península de Yucatán. De la Lanza-Espino, G. y J. L. García-Calderón (Comps.). *Lagos y Presas de México*. AGT. México, 337-381.
- Villasuso M., Graniel E., 1997, Estudio de la contaminación del acuífero de la ciudad de Mérida y sus medidas de remedio. "Ingeniería. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán", 1 (1), 57-67.
- VARÓ G., P.; M. F. CHILLÓN ARIAS y D., PRAT R. 2004. Características fisicoquímicas de las aguas blandadas, nueva normativa española del agua de consumo humano. Alicante España.
- VIDAL D., J.; A., CONSUEGRAS S. y LUTY GOMESCASERES P. 2009. Evaluación de la calidad microbiológica del agua envasada en bolsas producida en Sincelejo – Colombia. Montería - Colombia