



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

TÍTULO

**“Interacción agua-roca en cenotes del Estado de Yucatán,
México: enfoque geoquímico”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Ingeniero Geólogo Ambiental

Presenta:

Jennyfer Yuliana Mora Mora

Director de tesis:

M. en C. Misael E. Cruz Sánchez

Mineral de la Reforma, Hidalgo

Julio de 2019

Mineral del Monte, Hgo., a 5 de Junio de 2019

CONSTANCIA

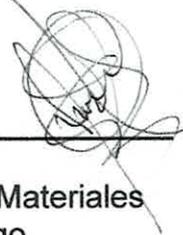
Por este medio **HAGO CONSTAR** que la presente tesis de licenciatura titulada: **“Interacción agua-roca en cenotes del Estado de Yucatán, México: enfoque geoquímico”**, presentada por Jennyfer Yuliana Mora Mora ha sido realizada durante el periodo de Agosto 2017 - Junio 2019 bajo la dirección del M. en C. Misael Eduardo Cruz Sánchez. Este trabajo no ha sido creado a partir de otro anteriormente presentado o que forme parte de otra tesis o trabajo alguno.

Atentamente

M. en C. Misael Eduardo Cruz Sánchez

Director de la Tesis

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo





Mineral de la Reforma, Hgo., a 30 de mayo de 2019

Número de control: ICBI-D/693/2019
 Asunto: Autorización de tesis.

**M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
 DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA
 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado a la pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental **Jennyfer Yuliana Mora Mora**, quien presenta el trabajo de **“Interacción agua-roca en cenotes del Estado de Yucatán, México: enfoque geoquímico”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

- PRESIDENTE: Dr. Kinardo Flores Castro
- PRIMER VOCAL: M. en C. Misael Eduardo Cruz Sánchez
- SEGUNDO VOCAL: M. en C. Alberto Arenas Flores
- TERCER VOCAL: Dr. Julián Núñez Benítez
- SECRETARIO: Dra. Yolanda Marmolejo Santillán
- PRIMER SUPLENTE: Dr. Màrius Ramírez Cardona
- SEGUNDO SUPLENTE: Dra. María Isabel Reyes Valderrama

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente,
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo
 Director del ICBI



ORSC/IVL

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia
 Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
 México. C.P. 42184
 Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 2270,2280
 Fax 2109
 aactym_icbi@uaeh.edu.mx

www.uaeh.edu.mx





ARTÍCULOS PUBLICADOS

Parte de esta tesis está publicada en los siguientes artículos.

Cruz, M., Mora, J., Salcedo, L. y Girón, P. (2018). Caracterización mineralógica de cenotes del Estado de Yucatán, México. *Colección de memorias de los congresos de la Sociedad Química de México*, 559-562. ISSN 2448-914X

Cruz, M., Mora, J., Girón, P. y Salcedo, L. (2018). Caracterización hidroquímica de cenotes del Estado de Yucatán, México. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 183-193. ISSN 2448-6663



AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Misael Eduardo Cruz Sánchez, por haberme brindado la oportunidad de trabajar con él, por permitirme ser parte de los proyectos en los que hemos participado y de los cuales he aprendido muchas cosas, por su paciencia, por su accesibilidad, por su tiempo brindado, por transmitirme sus conocimientos y por sus sinceros consejos. Gracias, muchas gracias.

Al Dr. Julián Núñez Benítez por sus sugerencias e invaluable aportación lo cual hizo que mi tesis se enriqueciera.

A la Q. Cecilia Salcedo Luna de la Unidad de Servicio y Apoyo a la Investigación (USAI), Facultad de Química, UNAM, por su asesoría para la identificación de fases cristalinas por difracción de rayos X (método de polvos).

A la Q. Verónica García Hernández del Laboratorio de Espectrometría ICP y AA, AACTyM, UAEH, por su apoyo para la determinación de metales en soluciones acuosas mediante espectrometría de emisión en plasma acoplado inductivamente (ICP).

A la Q. Patricia Girón García del Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, Instituto de Geología, UNAM, por su apoyo en la realización de los análisis químicos de las muestras de roca de los cenotes que se emplearon en esta investigación.

Al Lic. José Antonio Ruiz Silva del Departamento de Manejo de sistemas kársticos de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA), por la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales en su lugar de trabajo.

Al Lic. Erik Torres por ser tan atento conmigo durante mi estancia en SEDUMA y por ayudarme en la toma de muestras de agua y de roca de los cenotes que se analizaron en esta investigación.



Al Lic. Erick Sosa Rodríguez por ayudarme con el significado de los nombres de los cenotes.

Al Biol. Manuel Bojórquez Acevedo porque siempre mostró interés en el proyecto y me apoyo con información sobre flora y fauna de la zona.

A la Secretaría de Educación Pública por otorgarme la Beca para iniciar la titulación (BECANET 2018).

A la Sociedad Química de México (SQM) por la beca que me brindó para presentar el trabajo: *Caracterización mineralógica de cenotes del Estado de Yucatán, México*, en el 53° Congreso Mexicano de Química y 37° Congreso de Educación Química.

A todos mis sinodales por sus sugerencias.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a mi compañero Jorge Cazares que me hizo ameno y divertido el trabajo en laboratorio.

A mi casa de estudios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.



DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres, **Guadalupe Mora** y **Julio Mora**, por su paciencia, esfuerzo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes logré cumplir un sueño más.

A mi hermano **Steven Mora**, porque es mi principal motivación, pues su inteligencia, dedicación y su gran corazón, me llevan a admirarlo cada día más.

A mi **Consen**, por sus consejos y enseñanzas, nunca las olvidaré.

A mi **Angelito**, por impulsarme a realizar y culminar este proyecto.

Los quiero.



“Escribir tiene su encanto: me asombra ver cómo las letras al unirse forman palabras y salen cosas que no pensábamos decir. Además, lo que no se escribe se olvida”

Extracto de “El principio del placer” de José Emilio Pacheco, 1997.

“La vida es oscuridad cuando no hay un impulso. Y todo impulso es ciego cuando no hay conocimiento. Y todo saber es vano cuando no hay trabajo. Y todo trabajo es vacío cuando no hay amor. Cuando trabajas con amor estrechas los lazos contigo mismo, con los otros y con Dios.

Extracto de “El profeta” de Gibran Kahlil, 1923.



ÍNDICE

	Página
Lista de tablas	i
Lista de figuras	ii
Resumen	v
Introducción	vi
Justificación	viii
Objetivos	ix
Capítulo 1. Agua subterránea	1
1.1. Situación de los recursos hídricos en México	1
1.2. Factores que influyen en la disponibilidad del agua dulce	3
1.3. El agua subterránea	5
1.3.1. Contaminación del agua subterránea	9
Capítulo 2. El karst	12
2.1. Definición de Karst	12
2.2. Proceso de karstificación	12
2.3. El paisaje kárstico	13
2.3.1. Cenotes	15
2.4. Los depósitos kársticos	16
2.5. Perturbación de las regiones kársticas por factores antropogénicos	17
Capítulo 3. Descripción del Estado de Yucatán	19
3.1. Localización y vías de acceso	19
3.2. Clima	20
3.3. Fisiografía y geomorfología	21
3.4. Geología	23
3.5. Uso de suelo y vegetación	27
3.6. Situación del acuífero del Estado de Yucatán	29
Capítulo 4. Desarrollo experimental	34
4.1. Toma de muestras de roca y agua	34



4.2. Caracterización de muestras de roca	39
4.2.1. Color y textura de las rocas	40
4.2.2. Porosidad	40
4.2.3. Caracterización por difracción de rayos X (método de polvos)	40
4.2.4. Análisis químico elemental (ICP)	41
4.2.5. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)	41
4.3. Caracterización de muestras de agua	42
4.4. Evaluación hidroquímica	45
4.5. Parámetros de calidad para irrigación	46
4.5.1. pH	46
4.5.2. Conductividad eléctrica	46
4.5.3. Parámetros de salinidad	46
4.6. Parámetros de calidad para agua de consumo humano	48
Capítulo 5. Resultados y discusión	49
5.1. Caracterización de las muestras de roca de los cenotes	49
5.1.1. Descripción megascópica	49
5.1.2. Caracterización mineralógica por difracción de rayos X	54
5.1.3. Composición química mediante análisis elemental (ICP)	55
5.2. Características fisicoquímicas del agua	57
5.3. Evaluación hidroquímica	61
5.3.1. Diagrama de Piper	61
5.3.2. Diagrama de van Wirdum	61
5.3.3. Diagrama de Gibbs	62
5.3.4. Diagrama de Mifflin	63
5.4. Índice de saturación	65
5.5. Parámetros de calidad del agua para irrigación	67
5.5.1. Relación de adsorción de sodio, RAS	68



5.5.2. Porcentaje de sodio, PS	69
5.5.3. Carbonato de sodio residual, CSR	70
5.5.4. Índice de permeabilidad, IP	71
5.6. Calidad del agua para consumo humano	71
Conclusiones	76
Referencias	77
Glosario	84

**LISTA DE TABLAS**

	Página
Tabla 4.1. Clave, nombre y descripción de las muestras de roca en base a su posición en el cenote.	36
Tabla 4.2. Clave, nombre, municipio y coordenadas geográficas de los cenotes muestreados.	37
Tabla 5.1. Descripción megascópica de las muestras de roca de los cenotes.	49
Tabla 5.2. Abundancia relativa de calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en las diferentes muestras.	55
Tabla 5.3. Composición química de las muestras de cenotes.	56
Tabla 5.4. Valores máximos (Máx.), mínimo (Mín.), promedio (Prom.) y desviación estándar (D. E.) para la composición química de las diferentes muestras de los cenotes.	57
Tabla 5.5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua de cenotes del Estado de Yucatán.	58
Tabla 5.6. Valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua provenientes de los cenotes.	60
Tabla 5.7. Índices de salinidad para las muestras de agua de los cenotes.	68
Tabla 5.8. Límites máximos permisibles de algunos parámetros fisicoquímicos en aguas de consumo humano.	73

**LISTA DE FIGURAS**

	Página
Figura 1.1. Distribución del agua en el mundo (CONAGUA, 2017).	1
Figura 1.2. Componentes del ciclo hidrológico: (1) evaporación, (2) condensación, (3) precipitación, (4) escurrimiento superficial, (5) infiltración y (6) escurrimiento subterráneo. Obtenido de http://ciclodevida.net/del-agua .	2
Figura 1.3. Volumen de agua dulce concesionado para usos consuntivos en México (CONAGUA, 2017).	3
Figura 1.4. Zonas más vulnerables a la sequía en México para el año 2012 (CONAGUA, 2017).	4
Figura 1.5. Tipos de acuíferos en función de sus características geológicas e hidrostáticas (Departamento General de Irrigación, 2016).	7
Figura 1.6. Volumen de agua subterránea destinado para usos consuntivos en México (CONAGUA, 2017).	9
Figura 1.7. Porcentaje de acuíferos de México, sobreexplotados, con intrusión marina y bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2017).	11
Figura 2.1. Esquema en el que se muestran los procesos de formación del karst. El agua de lluvia se infiltra en el suelo, donde se carga en CO ₂ . Posteriormente, atraviesa la roca, disolviendo las rocas solubles (caliza/dolomía). Al llegar a la cueva, el CO ₂ se escapa, y precipitan los minerales que forman los espeleotemas (Alonso <i>et al.</i> , 2015).	13
Figura 2.2. Esquema de las principales morfologías kársticas (Andreu <i>et al.</i> , 2016).	14
Figura 2.3. Evolución geológica en la formación de los cenotes y tipos de cenotes. a) Cueva inundada, b) cenote tipo cántaro o lótico, c) cenote de paredes verticales, d) cenote tipo léntico, e) azolve y hundimiento de paredes, f) cenote tipo aguada (Beddows <i>et al.</i> , 2007).	15
Figura 2.4. Formas kársticas: (1) estalactitas, (2) estalagmitas, (3) columnas, (4) terrazas traverníticas y gours, (5) cortinas, (6) discos, (7) conducto de disolución, (8) bloques desprendidos y (9) depósitos de decantación (Crespo y Rodríguez, 2010).	17



Figura 3.1. Principal vía de acceso al Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI, 2000).	19
Figura 3.2. Tipos de clima de Yucatán (POETY,2007).	20
Figura 3.3. Datos de Temperatura y Precipitación media mensual del Estado de Yucatán durante el año 2017 (SMN, 2019).	21
Figura 3.4. Geomorfología del Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI, 2000).	22
Figura 3.5. Características geológicas de la Península de Yucatán (García y Graniel, 2010).	26
Figura 3.6. Uso de suelo y vegetación del Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI, 2000).	28
Figura 3.7. (a) K'axixkooch (b) Yaxché (c) chaká (SEDUMA, 2018).	28
Figura 3.8. Dirección del flujo del agua en el Estado de Yucatán, modificada de Bauer <i>et al.</i> (2011).	30
Figura 3.9. Intrusión marina en el acuífero kárstico y costero de Mérida, Yucatán, modificada de Marín <i>et.al.</i> (2000).	32
Figura 3.10. Modelo conceptual del sistema de aguas subterráneas situado bajo Mérida (Foster <i>et.al</i> , 2001).	33
Figura 4.1. Localización de los cenotes muestreados.	35
Figura 4.2. Fotografía de la toma de muestra de roca del cenote Manuel Carrera.	38
Figura 4.3. Fotografía de la toma de muestra de agua del cenote Bebelchen.	38
Figura 4.4. Diagrama de flujo empleado para la caracterización de las muestras de roca de los cenotes.	39
Figura 4.5. Diagrama de flujo de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua.	42
Figura 4.6. Determinación de Cl ⁻ por titulación volumétrica.	44
Figura 4.7. Determinación de nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺) por espectrofotometría de absorción de radiación visible.	44



Figura 5.1. Difractogramas indicando las principales fases cristalinas en las muestras de los cenotes, C corresponde a calcita (CaCO_3) y D a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).	54
Figura 5.2. Clasificación de las muestras de agua de los cenotes con el diagrama de Piper (1944).	61
Figura 5.3. Clasificación de las muestras de agua en el diagrama de van Wirdum (1980): <i>At</i> , atmosférica, <i>Li</i> , litotrófica y <i>Ta</i> , talasotrófica.	62
Figura 5.4a. Clasificación de las muestras de acuerdo a los diagramas de Gibbs (1970), empleando los sólidos totales disueltos y la proporción entre los cationes Na, K y Ca.	62
Figura 5.4b. Clasificación de las muestras en el diagrama de Gibbs (1970), empleando los sólidos totales disueltos y la proporción entre los aniones Cl y HCO_3 .	63
Figura 5.5. Clasificación del tipo de flujo para las muestras de agua de los cenotes empleando el diagrama de Mifflin (1988).	64
Figura 5.6. Índices de saturación calculados para las diferentes fases minerales.	66
Figura 5.7. Clasificación de las muestras de acuerdo a USSL (1954).	69
Figura 5.8. Clasificación de las muestras de acuerdo al diagrama de Wilcox (1948).	70
Figura 5.9. Clasificación de las muestras de agua en función de la dureza y los sólidos totales disueltos (Li et al., 2014).	72
Figura 5.10. Distribución de la conductividad eléctrica en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.	74
Figura 5.11. Distribución de la dureza en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.	74
Figura 5.12. Distribución de arsénico en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.	75
Figura 5.13. Distribución de amonio en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.	75



RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se evaluaron 17 cenotes del Estado de Yucatán, estableciendo sus características mediante una serie de análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua y de roca, integrando los datos obtenidos en diagramas hidrogeoquímicos. También se evaluó la calidad del agua para propósitos de irrigación y consumo humano.

El análisis mineralógico de las muestras de roca de los 17 cenotes, permitió establecer que se encuentran constituidas por calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) o una mezcla de ambas fases, como lo indican los patrones de difracción de rayos (DRX). La mineralogía se complementó mediante el análisis elemental por espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (ICP), destacando CaO con una abundancia relativa que varía desde 34.38 hasta 56.42 % y MgO con una abundancia relativa en el intervalo de 0.29 a 19.30 %. En los componentes traza, destacó la presencia de As_2O_3 y PbO que podrían constituir un factor de riesgo, considerando que la disolución de las rocas incorporaría As^{3+} y Pb^{2+} al ciclo del agua.

El agua de los cenotes analizados presenta una facie dominante de Ca-Mg- HCO_3 como resultado de la disolución de minerales como calcita, aragonita y dolomita; es decir, la naturaleza de la composición química de los cenotes está relacionada a la interacción agua-roca. De acuerdo a su calidad para propósitos de irrigación se consideró que es adecuada para emplearse en cultivos salino tolerantes. Desafortunadamente, su calidad como agua de consumo humano no es favorable, al presentar valores de salinidad que variaron entre 688 y 3723 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos totales disueltos desde 515.77 a 2381 mg/L, dureza de 285.05 a 693.46 mg/L, amonio de 0.05 a 0.48 mg/L y arsénico de 0.00 a 0.17 mg/L, algunas de estas sustancias con valores superiores a los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA-1994 y la WHO (2011).



INTRODUCCIÓN

Los acuíferos kársticos son particularmente susceptibles a la contaminación por actividades humanas, debido que sus características favorecen el desplazamiento de contaminantes a través de grietas y fisuras en las rocas, incorporándose al acuífero y modificando su calidad.

Las aguas subterráneas revisten una importancia fundamental en el suministro a las redes de agua potable debido a su costo relativamente bajo y a su calidad generalmente alta, para explotarla para usos privados, domésticos e industriales. Puesto que gran parte de la población mundial (hasta un 25%) consume agua de los acuíferos kársticos, existe un incentivo importante para comprender y desarrollar regulaciones sobre el uso de la tierra en zonas kársticas para prevenir la contaminación del agua subterránea (Fleury,2009).

Desafortunadamente la urbanización y la industrialización tienen un efecto profundo en los recursos de aguas subterráneas, que están vinculados permanentemente al uso de la tierra y las prácticas de disposición de desechos. Generalmente se ignoran los problemas relacionados con el karst particularmente en las zonas urbanas, como el caso de la ciudad de Mérida, que no tiene alcantarillado entubado y cuya descarga de sus aguas residuales se realiza directamente a través de tanques sépticos, sumideros y pozos negros que suelen situarse de uno a tres metros por encima del nivel freático.

Al carecer de cuerpos de agua superficiales la única fuente de abastecimiento de agua dulce para la ciudad de Mérida lo constituye el agua subterránea. Debido a la porosidad y a la permeabilidad del terreno, los microorganismos patógenos pasan rápidamente al agua subterránea ocasionando que el acuífero este muy contaminado con coliformes fecales (CF), de entre 1 000 y 4 000/100 ml (Foster, 2001), un valor alto en comparación con la concentración permitida en el agua potable de <1/100 ml (DOF, 2000).



Por lo tanto, los controles reglamentarios deben basarse en un marco hidrogeológico sólido, ya que en su defecto las consecuencias serían el agotamiento del acuífero, la intrusión salina, las subsidencias y la contaminación generalizada de las aguas subterráneas, así como un aumento de los costos para el abastecimiento de agua a largo plazo (Foster, 2001).



Justificación

La vulnerabilidad y fragilidad del acuífero kárstico del Estado de Yucatán, motiva a la búsqueda de estrategias para su evaluación mediante el uso de técnicas geoquímicas que promuevan incorporar no solo las características inherentes a las propiedades fisicoquímicas del agua, sino también su interrelación con las rocas y unidades litológicas en contacto con ella, para definir su origen, naturaleza, evolución y desde luego, su calidad.

La urbanización, industrialización y las actividades agrícolas de la región promueven la incorporación de diversos residuos hacia la única alternativa de descarga: el acuífero del Estado de Yucatán, en la zona de intrusión salina, asumiendo su desplazamiento hacia el mar. Desafortunadamente, las características geológicas de la región imposibilitan otras alternativas de descarga de los residuos municipales.

La evaluación de la calidad del agua en el anillo de cenotes, considerados como sitios protegidos y por ende, libres de afectaciones antropogénicas, permite establecer un sitio indicador de la calidad del acuífero. De esta manera, su evaluación periódica facilitará la toma de decisiones para el desarrollo sostenible del Estado de Yucatán.



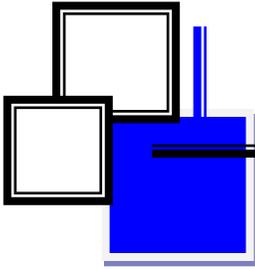
OBJETIVOS

Objetivo general

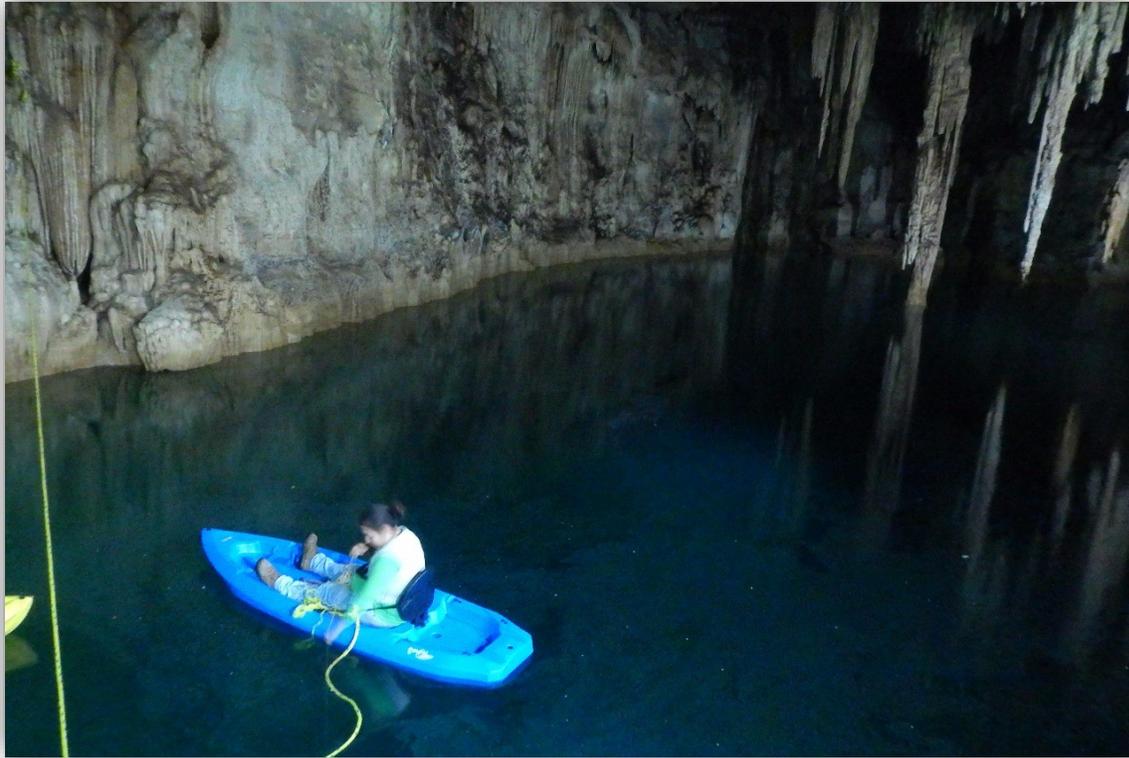
Conocer la interacción agua-roca en cenotes del Estado de Yucatán mediante la caracterización de 17 muestras de agua y de rocas, para establecer la interrelación de las propiedades fisicoquímicas del acuífero kárstico en la región bajo estudio.

Objetivos particulares

1. Identificar las principales fases minerales y la composición química de un grupo de muestras de cenotes del Estado de Yucatán mediante difracción de rayos X (DRX) y análisis químico elemental por espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (ICP).
2. Evaluar las características hidroquímicas de un grupo de cenotes del Estado de Yucatán para establecer la naturaleza de su composición química y su calidad para propósitos de irrigación y consumo humano.



CAPÍTULO 1: AGUA SUBTERRÁNEA



Cenote Bebelchen, Sanahcat, Yucatán, México.



1.1. Situación de los recursos hídricos en México

Uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta es el agua, ya que dependemos de ella no solo para el uso doméstico, sino también para las actividades agrícolas e industriales. En el planeta existen alrededor de 1 400 millones de km³ de agua y sólo el 2.5 % es agua dulce (figura 1.1), la cual se distribuye de la siguiente manera: el 69.5 % está congelada en los glaciares, la nieve, el hielo y el permafrost, el 30 % restante corresponde al agua subterránea y únicamente alrededor del 0.5 % se encuentra en las aguas superficiales y en la atmósfera (CONAGUA, 2017).

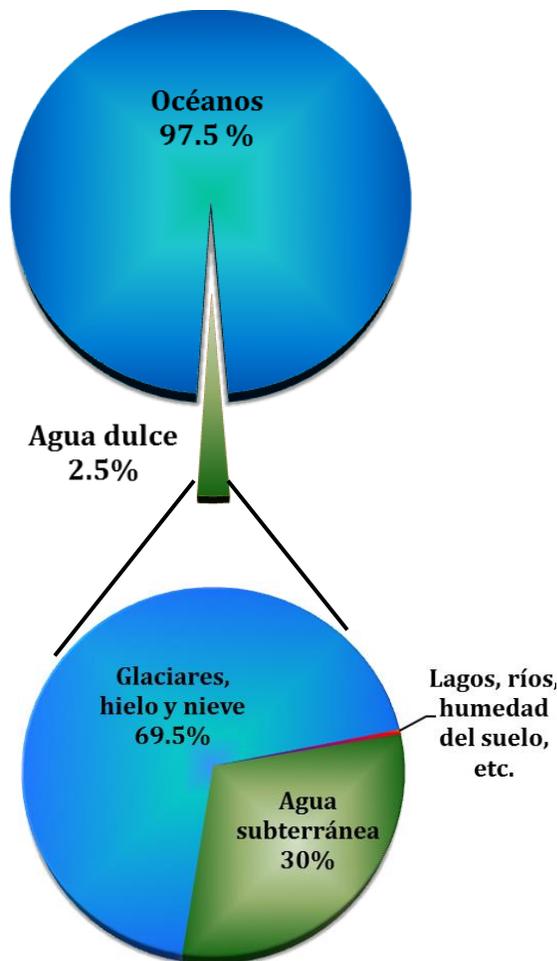


Figura 1.1. Distribución del agua en el mundo (CONAGUA, 2017).

El agua que existe en la Tierra tiene origen en el ciclo hidrológico (figura 1.2), proceso mediante el cual el agua de los océanos y mares se evapora hacia la atmósfera, posteriormente precipita en forma de lluvia, una proporción de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por corrientes y cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos, glaciares); o bien se infiltra al subsuelo para ser parte de las aguas subterráneas (CONAGUA, 2017).

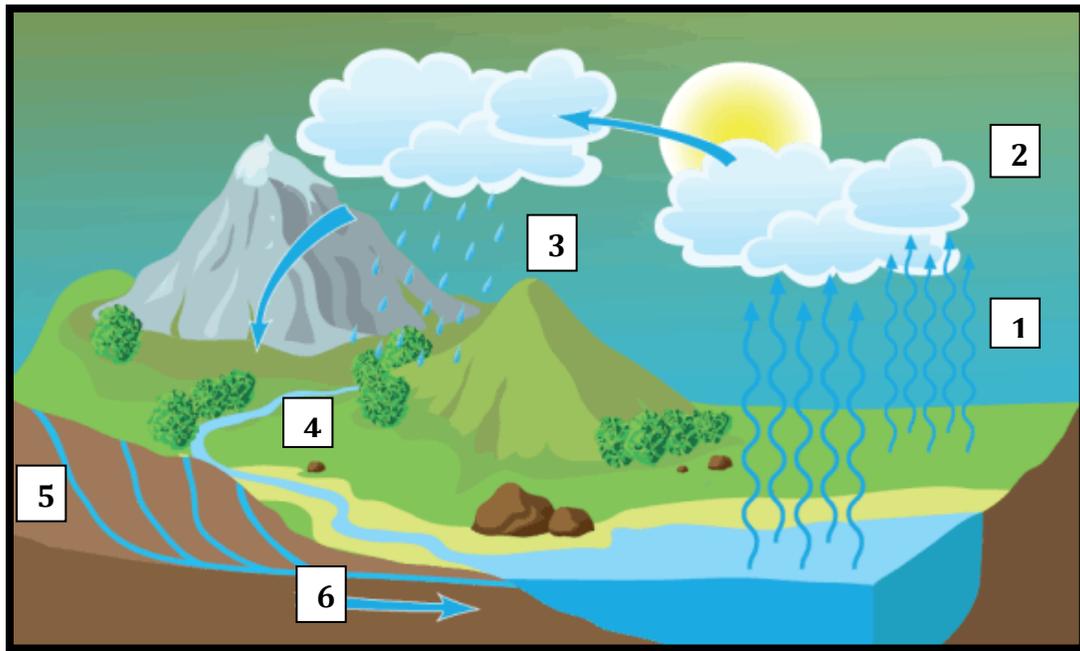


Figura 1.2. Componentes del ciclo hidrológico: (1) evaporación, (2) condensación, (3) precipitación, (4) escurrimiento superficial, (5) infiltración y (6) escurrimiento subterráneo. Obtenido de <http://ciclodevida.net/del-agua>.

México recibe aproximadamente 1.5×10^6 millones de m^3 de agua en forma de precipitación. Se estima que el 72.2 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.5 % escurre por los ríos o arroyos y el 6.3 % restante se infiltra al subsuelo recargando los acuíferos. De esta manera, el país cuenta anualmente con 450 828 millones de m^3 de agua dulce renovable (CONAGUA, 2017).

Del total de agua dulce renovable 269 289 millones de m³ se encuentran concesionados para usos consuntivos, el 60.9 % proviene de fuentes superficiales y el 39.1 % de fuentes subterráneas. El mayor volumen concesionado para usos consuntivos lo representa el sector agrícola, principalmente para riego, como se observa en la figura 1.3.

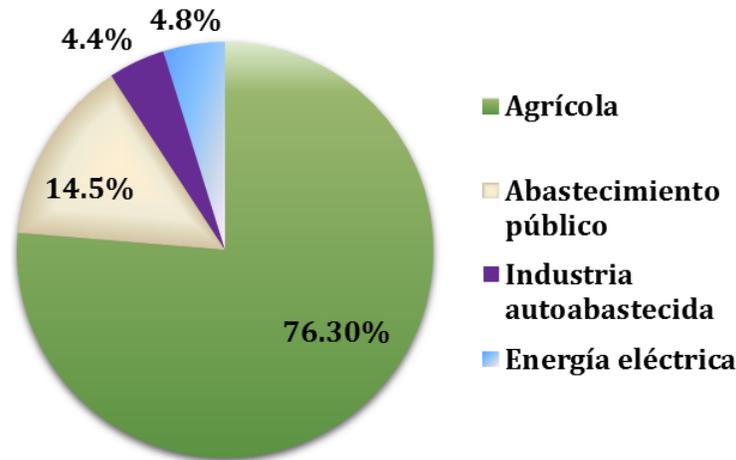


Figura 1.3. Volumen de agua dulce concesionado para usos consuntivos en México (CONAGUA, 2017).

1.2. Factores que influyen en la disponibilidad del agua dulce

Los principales factores que influyen en el ciclo hidrológico y en la disponibilidad del agua son los climáticos (la temperatura, la intensidad de los vientos, la humedad relativa, la insolación, etc.), así como el tipo y densidad de la cobertura vegetal (Collazo y Montaña, 2012). Además de factores antropogénicos tales como: el aumento de la población mundial, la demanda de alimentos y el desarrollo económico, que conducen a su sobreexplotación y contaminación (Durán y Torres, 2006). Desafortunadamente, existen procesos tanto naturales como antropogénicos que de manera combinada tienen un profundo impacto tanto en la distribución como en la disponibilidad de este importante recurso: la sequía, la desertificación y la degradación del suelo.

Actualmente, 3 600 millones de personas en el mundo no tienen acceso al agua potable al menos durante un mes al año (WWAP, 2018). Para atender esta difícil situación, México colabora con Estados Unidos y Canadá, en el *Monitor de Sequía de América del Norte* (MSAN), que analiza las condiciones climáticas para monitorearla, definiendo cinco categorías de sequía: anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4). En el año 2012 la CONAGUA realizó una identificación espacial de las zonas del país que presentan mayor vulnerabilidad ante las sequías (figura 1.4).

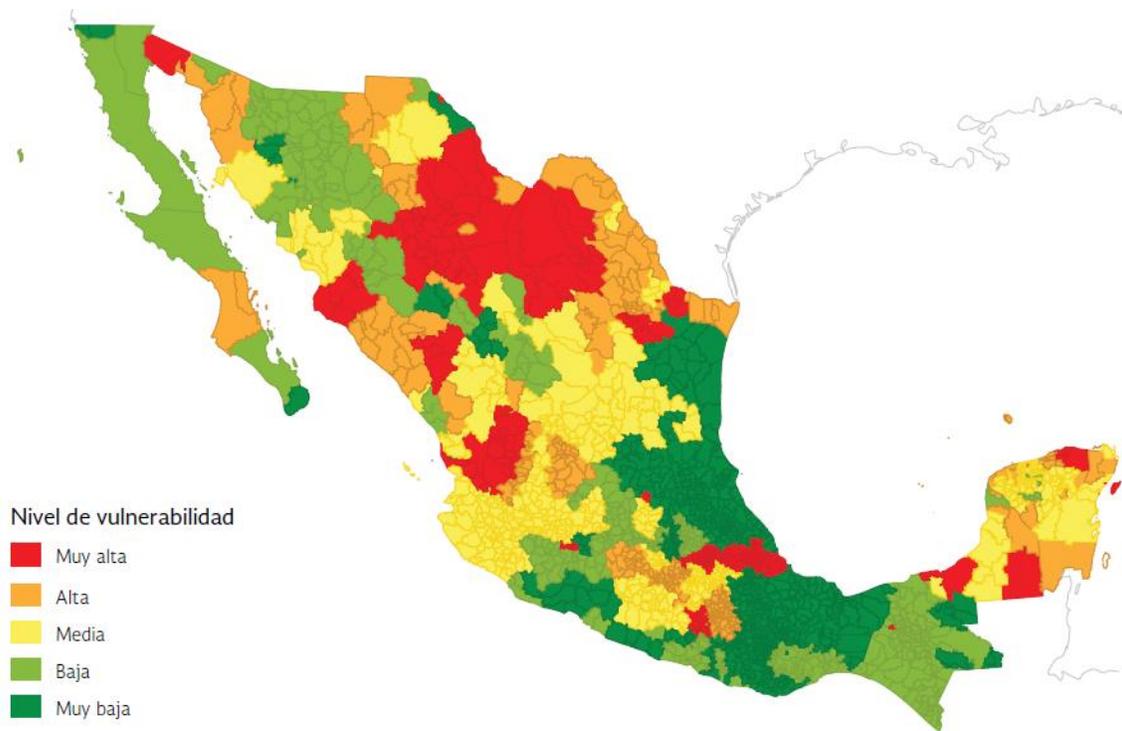


Figura 1.4. Zonas más vulnerables a la sequía en México en el año 2012 (CONAGUA, 2017).



En relación a la desertificación, se estima que entre el 71 y el 75 % de las tierras secas del mundo están desertificadas. En el caso particular de México, alrededor del 92.4 % de la superficie nacional de tierras secas (64 % del territorio nacional) presenta algún grado de desertificación. El 40.1 % se encuentra con grado de desertificación severo; 9.9 % con grado extremo y 42.4 % con ligero y moderado (WWAP, 2018).

Las consecuencias más importantes de los efectos de la sequía, la degradación del suelo y la desertificación van desde la disminución en la producción alimentaria, infertilidad y salinización del suelo, reducción de la capacidad de recuperación natural de la tierra, incremento de las inundaciones en las partes bajas de las cuencas, escasez de agua, sedimentación de cuerpos de agua, agravamiento de problemas de salud debido al polvo transportado por el viento y alteración de los ciclos biológicos, hasta la pérdida de los medios de subsistencia de las sociedades, lo cual puede contribuir a estimular la migración (SEMARNAT, 2012).

Se estima que la población actualmente afectada por la degradación de la tierra, desertificación y la sequía asciende a 1 800 millones de personas, convirtiéndola en la categoría más significativa de desastre natural basándose en la mortalidad y el impacto socioeconómico.

1.3. El agua subterránea

El agua subterránea es aquella que se encuentra y circula en el subsuelo, saturando los poros y/o fisuras del terreno, conformando los acuíferos. Un acuífero es una unidad geológica de material poroso y permeable capaz de almacenar y permitir la circulación del agua, que es factible extraer mediante obras de captación tales como pozos.

En función de las características de las rocas, un acuífero se puede clasificar en:



- (a) Acuicludos, los cuales contienen una cantidad significativa de agua, pero no permiten la circulación de ésta ya que el material de la unidad geológica (por ejemplo, las margas) es altamente poroso y prácticamente impermeable (figura 1.5).
- (b) Acuitardos, donde el agua circula con dificultad debido a que las rocas como las pizarras son materiales porosos, pero poco permeables y
- (c) Acuífugos, que no contienen agua en cantidad significativa, dado que el material de la unidad geológica como el granito no es poroso y es impermeable (Sánchez, 2017).

En función de la presión hidrostática los acuíferos se clasifican en:

- (a) Acuíferos libres, aquellos donde el piso es impermeable y el techo se encuentra a presión atmosférica. Por lo tanto, son los más afectados por la sequía, en virtud de que el nivel freático oscila con los factores climáticos.
- (b) Los semiconfinados, donde el techo, el piso o ambos, no son totalmente impermeables, sino que permiten la circulación del agua.
- (c) Los confinados, que en su parte superior se encuentran limitados por una formación de muy baja permeabilidad (Collazo y Montaña, 2012).



Figura 1.5. Tipos de acuíferos en función de sus características geológicas e hidrostáticas (Departamento General de Irrigación, 2016).

En función de las características litológicas un acuífero se clasifica en:

- (a) Detrítico, compuestos fundamentalmente por materiales sueltos o semiconsolidados, tales como gravas, arenas, limos y arcillas procedentes de la erosión y transporte de los relieves adyacentes.
- (b) Carbonatado, están constituidos por materiales calizos y dolomíticos, varían en densidad, porosidad y permeabilidad.

En función del tipo de huecos:

- (a) Poroso, está constituido por rocas que presentan porosidad primaria, el agua circula a través de sus poros o espacios existentes entre granos.



- (b) Kárstico, asociados a formaciones carbonatadas afectadas por fisuración y disolución (karstificación), este tipo de acuífero es sumamente vulnerable ante la contaminación (Pendas, 1993).
- (c) Fisurado, son acuíferos formados por rocas que no tienen porosidad primaria, presentan exclusivamente porosidad secundaria.

Por su situación geográfica:

- (a) Costeros, son los que están en contacto con el mar y presentan una zona invadida por el agua salada.
- (b) Continentales, los que no tienen ningún contacto con el mar y que podrían estar relacionados con ríos.

El agua subterránea abastece de agua potable aproximadamente al 50 % de la población mundial y representan el 43 % de toda el agua utilizada para el riego. A nivel mundial, 2 500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de las aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas.

En México, el agua subterránea es de suma importancia en el crecimiento socioeconómico del país, dado que el 39 % del volumen concesionado para usos consuntivos procede de éste recurso. Los 33.81 hm³ de agua subterránea destinados para usos consuntivos se distribuyen en los siguientes sectores: 23.84 hm³ para el sector agrícola, ocupando el mayor porcentaje, 7.36 hm³ para abastecimiento público, 2.16 hm³ para la industria autoabastecida y 0.45 hm³ para la energía eléctrica (figura 1.6).

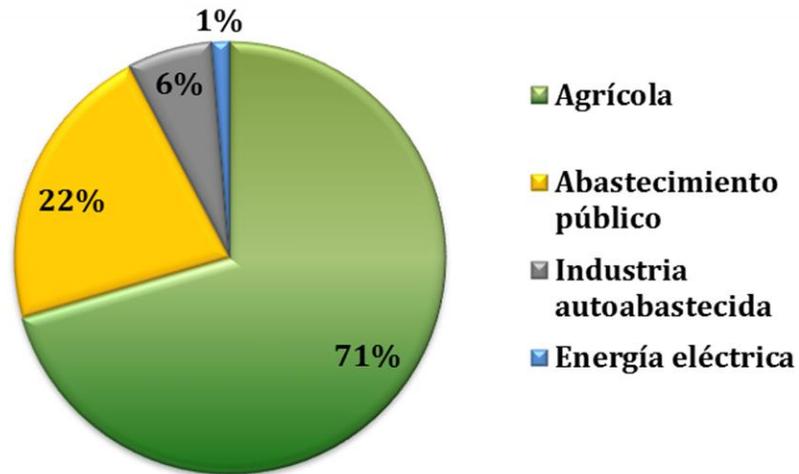


Figura 1.6. Volumen de agua subterránea destinado para usos consuntivos en México (CONAGUA, 2017).

1.3.1. Contaminación del agua subterránea

El agua subterránea puede contaminarse debido a causas naturales o por actividades antropogénicas. Entre las causas naturales se incluyen las sustancias presentes en el suelo o las rocas, tales como el hierro, el manganeso, el arsénico, los cloruros, los fluoruros y los sulfatos, que pueden incorporarse al agua afectando su calidad. Algunas sustancias pueden representar una amenaza para la salud si se consumen en cantidades excesivas; otras pueden producir un olor, sabor o color desagradable, limitando su uso como agua potable, a menos que se someta a tratamiento (EPA, 1993).

Las actividades antropogénicas que contaminan los acuíferos se pueden agrupar de la siguiente manera (Sánchez, 2017):

- (a) Deposición de residuos sólidos urbanos
- (b) Incorporación de aguas residuales
- (c) Actividades agrícolas: fertilizantes y plaguicidas



- (d) Actividades ganaderas
- (e) Actividades industriales y mineras
- (f) Actividades nucleares

Es muy complicado distinguir si la causa de la contaminación es natural o antropogénica, por ejemplo, una actividad no contaminante como la extracción del agua mediante el uso de bombas, podría modificar el equilibrio de un sistema si se realiza de manera excesiva, es decir, si se sobreexplota el acuífero, lo que generaría graves consecuencias como la subsidencia, escasez e incluso, favorecería la intrusión de agua salina. A nivel mundial se estima que el 20 % de los acuíferos están siendo sobreexplotados (Sánchez, 2017).

En los acuíferos costeros el agua marina (más densa) tiende a introducirse por debajo del agua dulce (menos densa) formando una cuña de agua salada que se extiende tierra adentro. Entre el agua dulce y el agua salada se desarrolla una interfase de agua salobre. En un acuífero costero, la mezcla de agua marina con el agua dulce constituye una manera de contaminación frecuente y muy difícil de controlar.

En México existen acuíferos sobreexplotados, con intrusión salina y bajo el fenómeno de salinización de suelos, así como aguas subterráneas salobres. La salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres se producen como resultado de altos índices de evaporación en zonas con niveles someros de agua subterránea, disolución de minerales evaporíticos y presencia de agua de elevada salinidad.

Las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas, someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico produce su enriquecimiento en sales (CONAGUA, 2017).

A nivel nacional, de los 653 acuíferos identificados en el territorio, 105 presentan sobreexplotación, 32 presentan afectación por suelos salinos y agua salobre, mientras que 18 presentan intrusión salina en acuíferos costeros (figura 1.7).

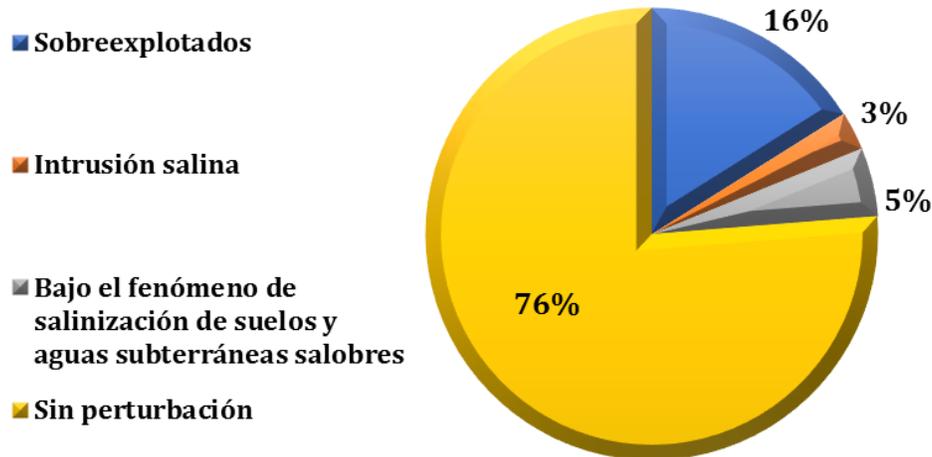


Figura 1.7. Porcentaje de acuíferos de México, sobreexplotados, con intrusión marina y bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2017).

A nivel mundial el consumo de agua se ha incrementado durante el último siglo debido al crecimiento demográfico, que asociado a la distribución heterogénea del recurso, influye en el déficit de agua de un país. De esta manera, la demanda total continuará aumentando y satisfacerla será cada vez más difícil debido a los elevados costos de obtención y a la contaminación del agua subterránea (Marschoff, 2012).

CAPÍTULO 2: EL KARST



Cenote Manuel Carrera, Tizimin, Yucatán, México.





2.1. Definición de karst

El término karst es la forma germanizada de la palabra indo-europea Kar o karra, que significa roca y es el nombre de una antigua plataforma caliza que se extiende por los montes Dinaricos en la actual Eslovenia.

Dicho término se ha definido de diversas maneras en la literatura, correspondiendo a un paisaje, un sistema hidrogeológico o una facie diagenética asociada a rocas solubles (Andreu *et al.*, 2016). Sin embargo, el USGS (s.f.) define el karst como:

“Un terreno con características geomorfológicas e hidrológicas distintivas creadas a partir de la disolución de rocas solubles, principalmente caliza y dolomía. El terreno kárstico se caracteriza por manantiales, cuevas, sumideros y una hidrogeología única que resulta en acuíferos que son altamente productivos, pero extremadamente vulnerables a la contaminación”.

2.2. Proceso de karstificación

Para comprender el proceso de karstificación, de acuerdo con Andreu *et al.* (2016) se deben tener en cuenta los mecanismos y factores que controlan la interacción agua-roca, los cuales a su vez dependen de factores internos (tipo de litología, estructura, estratificación) y externos (clima, relieve, tiempo).

Uno de los factores más importantes durante la karstificación en rocas carbonatadas es la presencia de CO₂ en el agua. Inicialmente, el agua se enriquece con CO₂ cuando atraviesa el suelo, volviéndose agresiva frente a los carbonatos y promoviendo el proceso de disolución o karstificación, el cual origina la ruptura de la red cristalina de los minerales carbonatados (calcita y/o dolomita, principalmente), generando grietas, fisuras y microcavidades que continuarán evolucionando a lo largo del tiempo (figura 2.1).

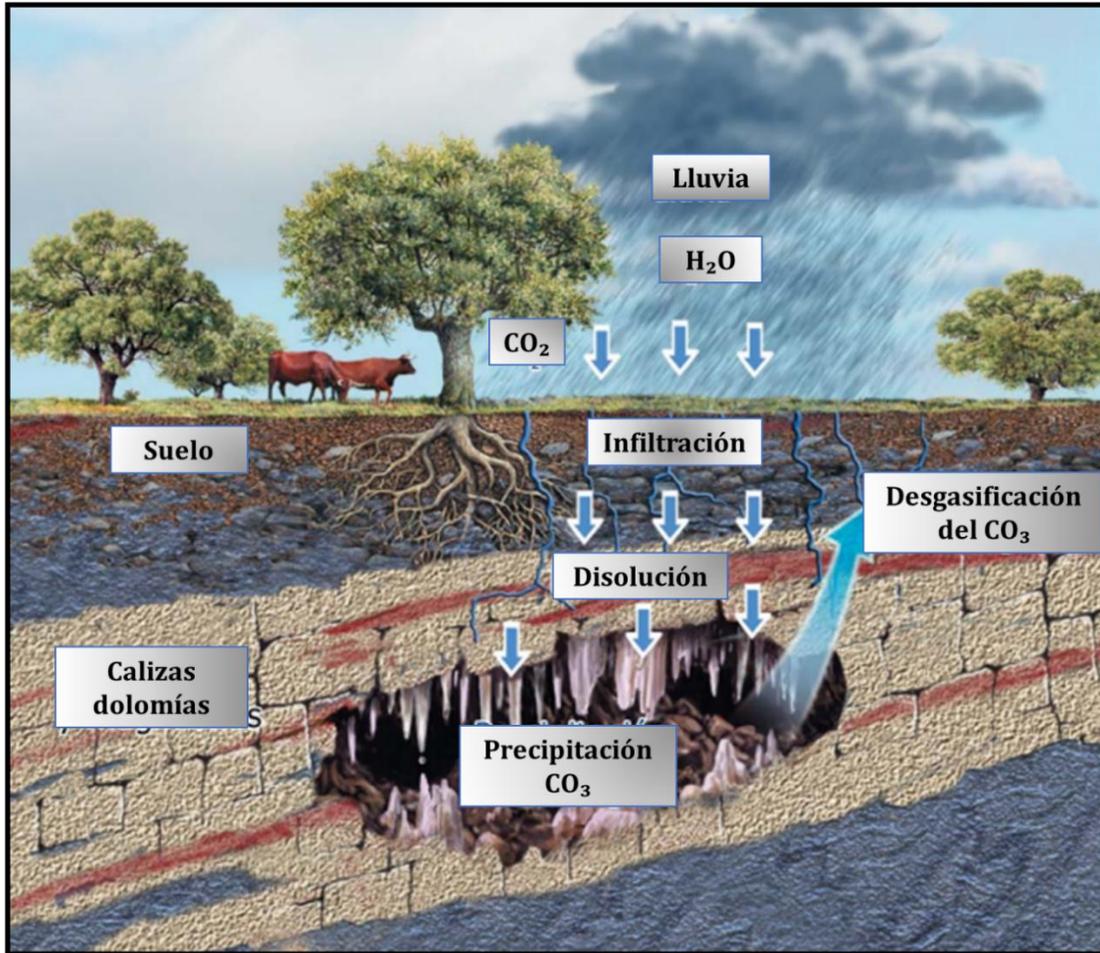


Figura 2.1. Esquema en el que se muestran los procesos de formación del karst. El agua de lluvia se infiltra en el suelo, donde se carga en CO₂. Posteriormente, atraviesa la roca, disolviendo las rocas solubles (caliza/dolomía). Al llegar a la cueva, el CO₂ se escapa y precipitan los minerales que forman los espeleotemas (Alonso *et al.*, 2015).

2.3. El paisaje kárstico

El paisaje kárstico se divide en **exokarst** que corresponde a la morfología superficial y **endokarst** que está relacionado con la morfología subterránea (Andreu *et al.*, 2016).

El **exokarst** agrupa las siguientes categorías:

- (a) Lapiaz, formado por morfologías de pequeñas dimensiones desarrolladas sobre la roca, resultado de la acción directa de la disolución del agua.
- (b) Dolinas, depresión de pequeño o mediano tamaño, de morfología circular o

elíptica por donde el agua se introduce en el interior del karst. Formada por disolución, hundimiento o colapso.

- (c) Uvalas, conjunción de dos o más dolinas.
- (d) Poljes, depresión de mayor tamaño de morfología ovalada.
- (e) Valles kársticos, morfología de incisión fluvial, cuyo funcionamiento se localiza en parte bajo la superficie.
- (f) Cañones, morfología de incisión fluvial, estrechos y con paredes verticales.

El **endokarst** se relaciona principalmente con las cuevas o grutas que son conductos formados por disolución, de un tamaño mayor de 15 mm de diámetro, que se extiende de forma continua desde los puntos de entrada de agua subterránea a los puntos de salida (figura 2.2).

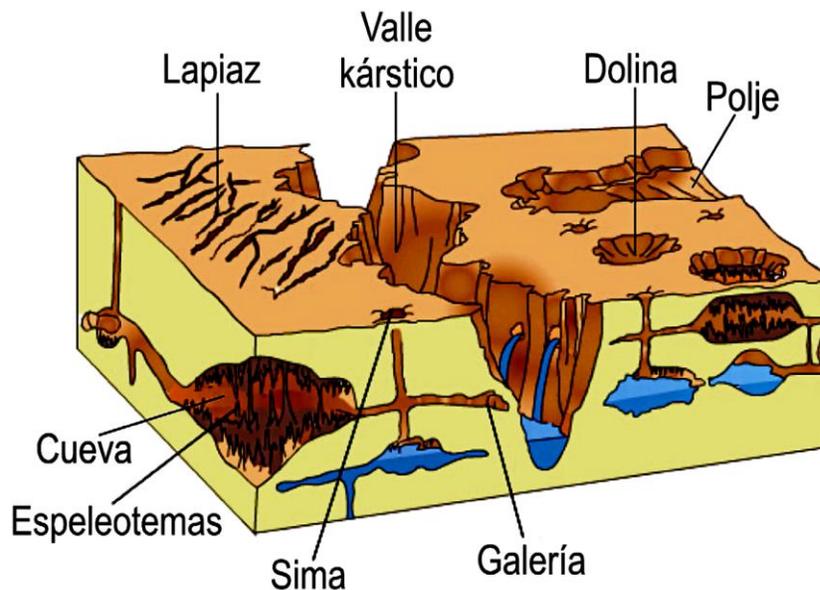


Figura 2.2. Esquema de las principales morfologías kársticas (Andreu *et al.*, 2016).

Los paisajes kársticos abarcan cerca del 20 % de la superficie terrestre en el mundo. Algunos tienen más probabilidad de aparecer en ciertos lugares que en otros debido a las condiciones climáticas y geográficas locales (Aguilar *et al.*, 2013). En México los paisajes kársticos abarcan aproximadamente el 15 % del territorio nacional, se localizan principalmente en Tamaulipas, Chiapas y la Península de Yucatán.

2.3.1. Cenotes

La palabra cenote viene del vocablo maya ts'ono'ot o d'zonot, que significa "caverna con depósito de agua". Este término se utiliza para designar a la mayoría de las manifestaciones kársticas en la Península de Yucatán (Beddows *et al.*, 2007).

La formación de cenotes se genera a través de una serie de eventos (figura 2.3). Partiendo de un sistema de circulación horizontal (cueva inundada) del cual se puede formar una gruta o bien un cenote tipo cántaro o lótico por derrumbe o hundimiento parcial del techo. El proceso continúa a partir de la parte superior, por infiltración pluvial y por la parte inferior por circulación subterránea originando un cenote de paredes verticales. Posteriormente, la totalidad del techo se derrumba dando lugar a un cenote cilíndrico o tipo léntico; a partir del cual se puede generar un cenote por azolve y por hundimiento lento de la zona adyacente o un cenote tipo aguada (SDS, s.f.).

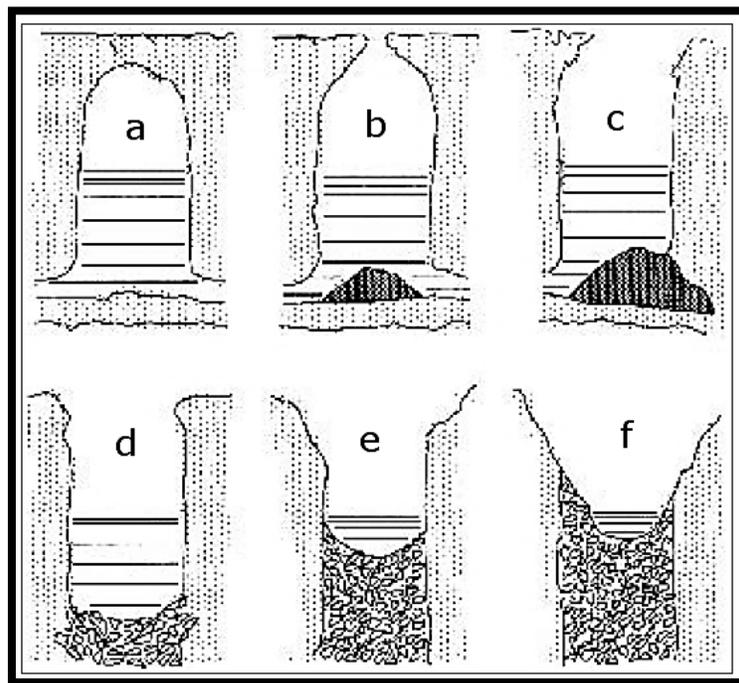


Figura 2.3. Evolución geológica en la formación de los cenotes y tipos de cenotes. a) Cueva inundada, b) cenote tipo cántaro o lótico, c) cenote de paredes verticales, d) cenote tipo léntico, e) azolve y hundimiento de paredes, f) cenote tipo aguada (Beddows *et al.*, 2007).

2.4. Los depósitos kársticos

En el karst se pueden encontrar diferentes morfologías asociadas a la acreción o acumulación de materiales como los depósitos de precipitación química en el interior de las cuevas (Andreu *et al.*, 2016), denominados espeleotemas (*del griego spelaion, cueva, y thema, depósito*), es decir, son las formaciones minerales de las cuevas. Los ejemplos más conocidos son las estalactitas y las estalagmitas, pero existen otros tipos de espeleotemas, que poseen diferentes formas (Alonso *et al.*, 2015).

Existe una amplia variedad de grupos de minerales que precipitan en el medio subterráneo, tales como carbonatos, sulfatos, nitratos, fosfatos, silicatos, siendo la calcita el mineral más importante desde el punto de vista cuantitativo (Andreu *et al.*, 2016). El proceso es el siguiente: cuando la concentración de carbonato de calcio disuelto en el agua llega a un punto crucial, las moléculas de carbonato se separan del agua y se depositan en forma sólida. El primer punto en donde esto sucede es en el techo de las cuevas; así se forman las conocidas estalactitas, éstas pueden aún contener cantidades considerables de bicarbonato de calcio disuelto, por lo que al caer al suelo de la cueva, la calcita puede también depositarse, originando a las estalagmitas (Bernal y Uruchurtu, 2011).

En función de su morfología o de su posición dentro de la cavidad, los espeleotemas reciben diferentes denominaciones:

- (a) Cenitales, que son aquellos que se localizan en el techo de la cueva,
- (b) Parietales, localizados en la parte lateral y
- (c) Pavimentarias desarrollados en la parte inferior de la cavidad (figura 2.4).

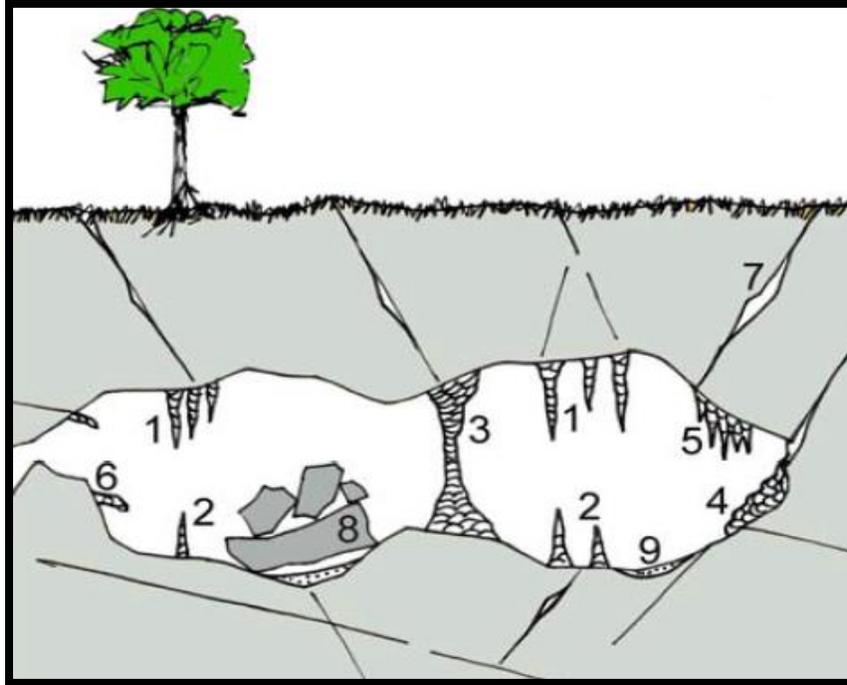


Figura 2.4. Formas kársticas: (1) estalactitas, (2) estalagmitas, (3) columnas, (4) terrazas travertínicas y gours, (5) cortinas, (6) discos, (7) conducto de disolución, (8) bloques desprendidos y (9) depósitos de decantación (Crespo y Rodríguez, 2010).

2.5. Perturbación de las regiones kársticas por factores antropogénicos

Las características físicas de los paisajes kársticos los hacen extremadamente susceptibles a la contaminación y afectaciones antropogénicas. Las ciudades, pueblos y empresas ubicadas en las proximidades de los sistemas kársticos a menudo alteran las condiciones necesarias para el equilibrio en esos sistemas, induciendo la degradación de las cuevas, la contaminación del agua subterránea y la subsidencia de la tierra en dichas regiones (Fleury, 2009).

Toda actividad antropogénica, como la sobreexplotación de aguas subterráneas, la deforestación, la agricultura, la minería, los rellenos sanitarios, etc., se convierten en una amenaza de contaminación debido a la rápida infiltración de los residuos hacia los acuíferos kársticos (Aguilar *et al.*, 2013). Un acuífero kárstico presenta, en general:

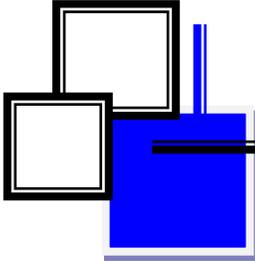


- (a) Zonas de drenaje (red de conductos), que transmiten rápidamente el contaminante, sin modificación alguna y
- (b) Zonas de almacenamiento aisladas de las zonas de drenaje, que mantienen el contaminante durante un tiempo largo, junto con el agua ahí almacenada.

La contaminación será puntual o difusa según el lugar y modo por donde el contaminante entre al acuífero kárstico. Por tanto, para la protección de los recursos hídricos en el karst es necesario un estudio detallado, determinando la posición de las zonas más vulnerables a la contaminación (Fernández *et al.*, 2003).

Los acuíferos kársticos frecuentemente se utilizan como fuentes de agua potable, no solo para las personas que viven en el karst sino también para las que viven cerca y carecen de otras fuentes de agua. Se estima que el 25 % de todos los seres humanos obtienen agua de los acuíferos kársticos (Ford y Williams 2007), la cual también se utiliza a menudo para fines industriales y agrícolas, por lo que es un insumo importante para las economías locales o regionales.

Una razón adicional para desarrollar regulaciones sobre el uso de la tierra en zonas kársticas, particularmente en las cuevas, es que ofrecen una gran cantidad de información para una amplia gama de disciplinas científicas tales como la arqueología, la geología, la geomorfología, la biología, la climatología, etc. (Fleury, 2009).



CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE YUCATÁN



Cenote Hoka, Abala, Yucatán, México.



3.1. Localización y vías de acceso

El Estado de Yucatán se ubica en el sureste de la República Mexicana, entre los paralelos $21^{\circ} 36'$ y $19^{\circ} 30'$ de latitud norte y entre los meridianos $87^{\circ} 32'$ y $90^{\circ} 25'$ de longitud oeste. Limita al suroeste con el Estado de Campeche, al sureste con el Estado de Quintana Roo y al norte con el Golfo de México, cubriendo un área de $39,524 \text{ km}^2$, lo integran 106 municipios y su capital es Mérida (Gobierno del Estado de Yucatán, 2018).

La principal vía de acceso para llegar a Yucatán es por la carretera federal No. 180 (carretera costera del Golfo) Heroica Matamoros, Tamaulipas - Cancún, Quintana Roo. (figura 3.1.)



Figura 3.1. Principal vía de acceso al Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI ,2000).

3.2. Clima

De acuerdo al Diario Oficial de la Federación, DOF (2013) y datos vectoriales de la bitácora ambiental del Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de Yucatán, POETY (2007), en general el 84.5 % de la superficie del Estado de Yucatán presenta clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw), en la porción norte del Estado el 13.8 % presenta clima semiseco muy cálido (BS1) y el 1.7 % clima seco muy cálido (BS0) (figura 3.2).

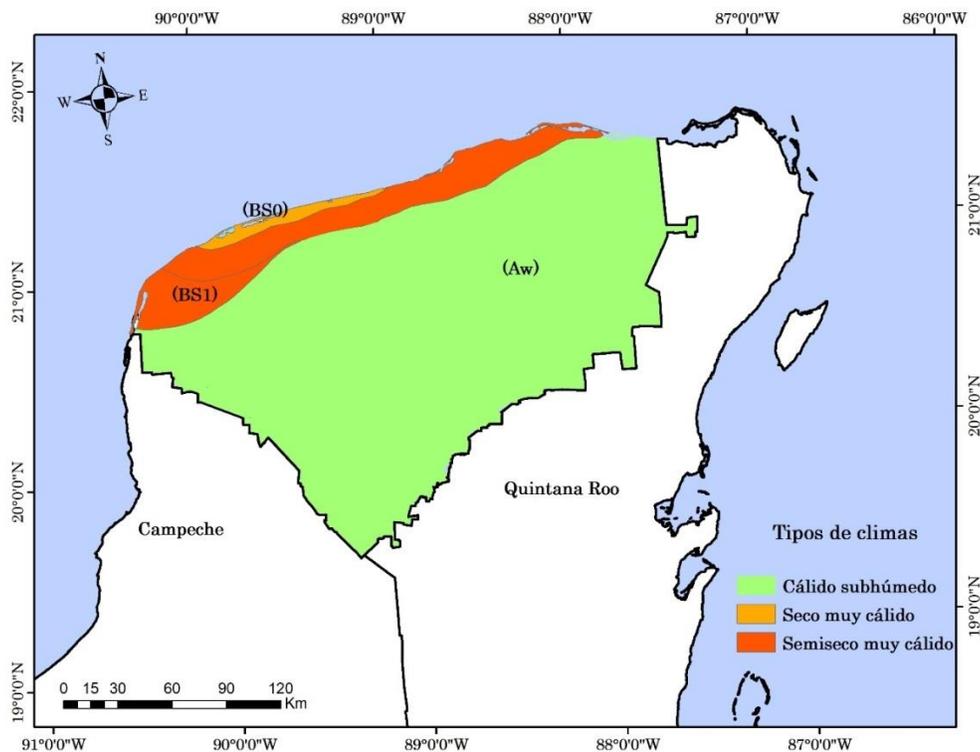


Figura 3.2. Tipos de clima de Yucatán (POETY, 2007).

Como el Estado de Yucatán se encuentra dentro del área del cinturón de huracanes del Océano Atlántico, está expuesto a tormentas tropicales cuya temporada abarca desde Junio hasta Noviembre. La temperatura media anual del Estado es de 26 °C, la mínima promedio es de 16 °C y se presenta en Enero (DOF, 2013). El tipo principal de precipitación es convectivo debido a la ausencia de obstáculos orográficos, ésta varía

entre 444 y 1 227.3 mm anuales siendo mayor de norte a sur y de oeste a este. La temporada de lluvias inicia a finales del mes de Mayo y termina en Octubre (figura 3.3), siendo Septiembre el mes más lluvioso (INEGI, 2002).

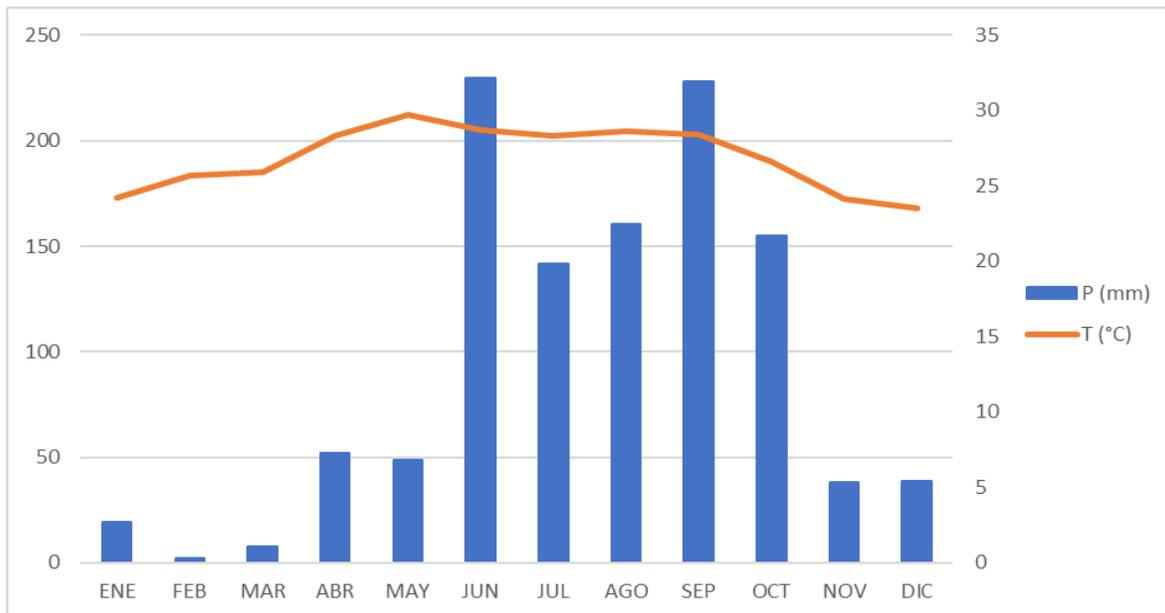


Figura 3.3. Datos de temperatura y precipitación media mensual del Estado de Yucatán durante el año 2017. Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2019).

3.3. Fisiografía y geomorfología

El Estado de Yucatán está comprendido dentro de la provincia fisiográfica Península de Yucatán, que conforma la Plataforma Calcárea de Yucatán, que se caracteriza por ser una superficie plana, principalmente en la porción norte de la Península y lomeríos prolongados hacia el sur. La altitud de la Península es en general inferior a los 100 metros sobre el nivel del mar (DOF, 2013).

El relieve del Estado de Yucatán es principalmente planicie, ésta cubre más del 90 % de la superficie estatal (figura 3.4). Las dos cadenas paralelas de lomeríos existentes en el suroeste, son conocidas como la Sierrita de Ticul que alcanza los 275 msnm y tiene una longitud de 110 km (García y Graniel, 2010).

En la parte central y hacia el sur del Estado de Yucatán, el agua procedente de la alta precipitación pluvial se infiltra rápidamente y da lugar al proceso hidrodinámico de la disolución de la roca caliza que origina el típico paisaje kárstico y el sistema hidrogeológico de la Península con una variedad de formaciones kársticas que caracterizan la superficie (exokarst y endokarst), es decir, cenotes o aguadas y grutas o cuevas (Ruiz *et al.*, 2007).

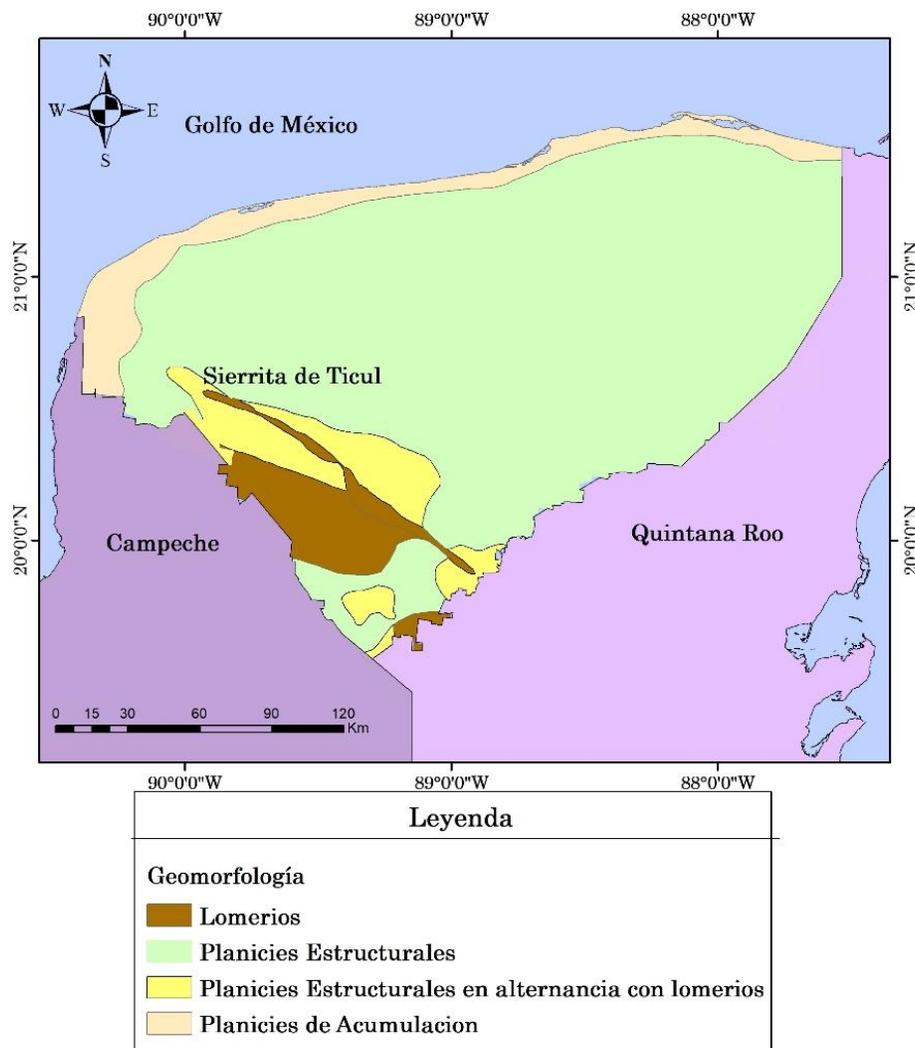


Figura 3.4. Geomorfología del Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI, 2000).



3.4. Geología

El Bloque Yucatán se separó del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México, dicho bloque posee un basamento metamórfico del Paleozoico, es decir, de origen pangeico (Beddows *et al.*, 2007). Sobre este basamento se acumularon gruesas capas de sedimentos marinos del Paleozoico tardío, seguido por sedimentación continental en el Jurásico, que a su vez subyacen a un depósito extenso de evaporitas que conforman la extensa plataforma carbonatada de la Península de Yucatán de aproximadamente 165 000 km² (Bauer *et al.*, 2011). El Estado de Yucatán está compuesto principalmente por rocas calcáreas de origen marino del Cretácico (hace 144 a 165 millones de años) y Cuaternario (65 millones de años hasta el presente).

El Cretácico se encuentra registrado en toda la Península, principalmente por la formación de evaporitas y carbonatos que dieron origen a las calizas, dolomías y yeso. Al final del Cretácico, un asteroide golpeó la Península de Yucatán originando el cráter de impacto Chicxulub con una dimensión de aproximadamente 200 km al oeste, cuyo centro está ubicado en el Golfo de México (Bauer *et al.*, 2011).

Las unidades litológicas que conforman la Península son:

- (a) **Caliza-Yeso Tpal (cz-y)**. Data del Paleoceno, 71 - 59 Millones de años (Ma) (Paleógeno), también conocida como formación Icaiché, es una secuencia constituida por calizas y yesos, los horizontes de arcilla comúnmente contienen concreciones de sílice.

- (b) **Caliza-Marga Te (cz-mg)**. Secuencia litológica del Eoceno, 59 - 37 Ma (Paleógeno), constituida por rocas interestratificadas de capas medianas a gruesas de calizas y margas; esta última es de colores blanco, gris y crema con intercalaciones de arcillas del mismo color, así como calizas gris crema compacta; esta secuencia se conoce como formación Chichén Itzá.



- (c) **Caliza-Coquina Te(cz-cq)**. Unidad litológica de edad del Eoceno, 59 - 37 Ma- (Paleógeno), está representada por rocas carbonatadas de diferente textura (mudstone, grainstone y budstone), son de colores crema y blanco, es clara la exposición de macrofósiles, principalmente de pelecípodos y fragmentos coralinos.
- (d) **Caliza-Dolomía Tm(cz-do)**. Rocas del Mioceno, 28 - 7 Ma- (Neógeno) que comprenden una alternancia de calizas y dolomías; esta unidad litológica se identifica como Formación Estero Franco.
- (e) **Caliza Tm (cz)**. Data del Mioceno 28 - 7 Ma (Neógeno), es un cambio de facies lateral de la unidad Tm (czdo) hacia una carbonatación dominante que dio lugar a la roca caliza, a esta unidad se le conoce como formación Bacalar.
- (f) **Caliza-Coquina Tmpl (cz-cq)**. Unidad del Mioceno 28 - 4 Ma- (Neógeno) formada por roca caliza con variantes de brecha calcárea, se tienen variaciones en sus texturas, con la que se identifican boundstone, packstone, grainstone y wackestone constituye la Formación Carrillo Puerto, que sobreyace a la formación Chichén Itzá, es la unidad litológica más extensa.
- (g) **Qpt? (cq-ar) (Cuaternario)**. De 4 - 0.126 Ma, la unidad está conformada por depósitos indiferenciados asignados al Pleistoceno por su relación estratigráfica con la unidad pliocénica Tmpl (cz-cq); la litología está constituida por coquina y arenisca, esta última mal consolidada y de madurez textural de media a baja, los componentes clásticos son de calcita; la arenisca presenta lentes irregulares de conchas dispuestas de forma caótica, con poca cohesión.
- (h) **Qt? (ar)**. Unidad litológica poco consolidada y está constituida por arenisca cuyos componentes son bioclastos donde predominan restos de pelecípodos y gasterópodos.



- (i) **Arenisca-Caliza Qpt (ar-cz).** Secuencia litológica del Pleistoceno, es la unidad consolidada más reciente, formada por arenisca oolítica bien cementada, en tanto los materiales carbonatados son representados por texturas tipo grainstone y boundstone.

- (j) **Lagunar Qho (la).** Unidad del Holoceno, 0.126 a 0.01 Ma antes del presente, está formada por arenas de grano fino a mediano, limo, arcilla, arcillas calcáreas y carbonatadas mezcladas con materia orgánica.

- (k) **Litoral Qho (li).** Unidad litológica formada a lo largo de la línea de costa con influencia de condiciones eólicas, está conformada principalmente por bioclastos con variedad de organismos.

- (l) **Aluvión Qho (al).** Consiste de material clástico no consolidado formado por materiales arcillosos y limosos, arenas finas y escasos elementos gruesos como gravas (INEGI, 2016).

La estratificación de los sedimentos terciarios en su extensión mayor es horizontal (figura 3.5) y aproximadamente los primeros 120 m están compuestos por roca caliza masiva recristalizada que presenta un alto nivel de fractura. Los depósitos cuaternarios a lo largo de la costa norte consisten en caliza con moluscos, están altamente compactados y contribuyen al confinamiento del acuífero (García y Graniel, 2010).

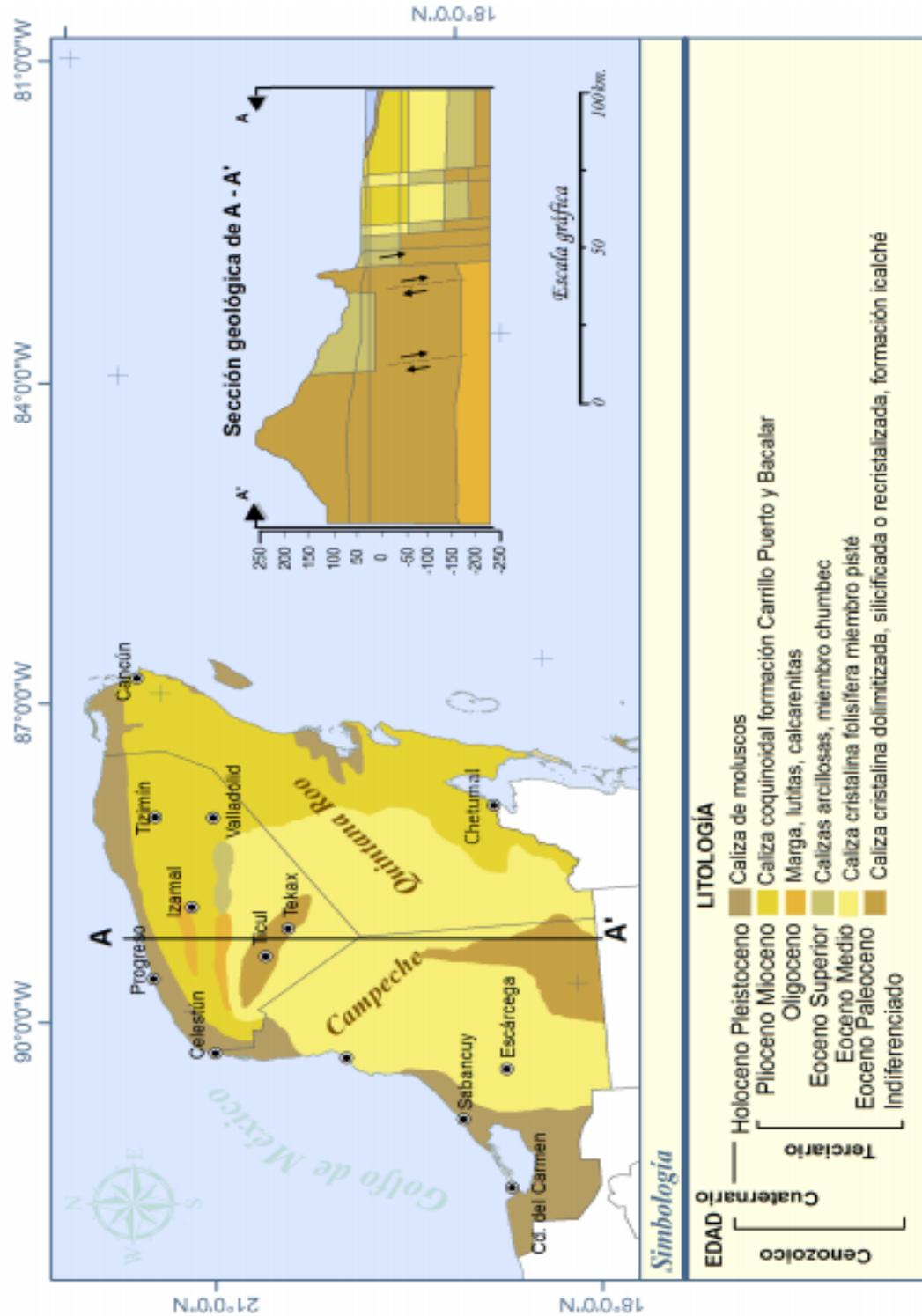


Figura 3.5. Características geológicas de la Península de Yucatán (García y Granjel, 2010).



3.5. Uso de suelo y vegetación

En el Estado de Yucatán existe una capa delgada de suelos poco desarrollados. Los tipos de suelos dominantes que cubren la superficie del Estado son los Leptosoles (Bautista, 2011), en muchas clasificaciones de suelos, Rendzina y Litosol se manejan como subtipos de los Leptosoles, utilizados para indicar suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo (SEMARNAT, 2012).

También se pueden localizar Luvisoles que se encuentran dentro de los suelos más fértiles por lo que su uso agrícola es muy elevado y en la costa se puede encontrar una banda estrecha cubierta por Regosol que son suelos poco desarrollados, constituidos de material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica.

El Estado de Yucatán se presentan diversos tipos de vegetación (figura 3.6 y 3.7). A lo largo del litoral costero se extienden dunas al igual que manglares (Flores *et al.*, 2010). Las regiones adyacentes en la parte central norte están dominadas por selva baja caducifolia y subcaducifolia, así como por plantaciones agrícolas; de acuerdo a Valderrama *et al.* (2017) casi el 25 % de la superficie del Estado de Yucatán se usa para prácticas agrícolas, mientras que, en la parte central, S-SE prevalece la selva mediana subcaducifolia y subperenifolia (Bautista *et al.*, 2005). En general y debido al poco espesor de los suelos del Estado de Yucatán se produce una rápida infiltración del agua en superficie hacia el acuífero (Bautista, 2011).

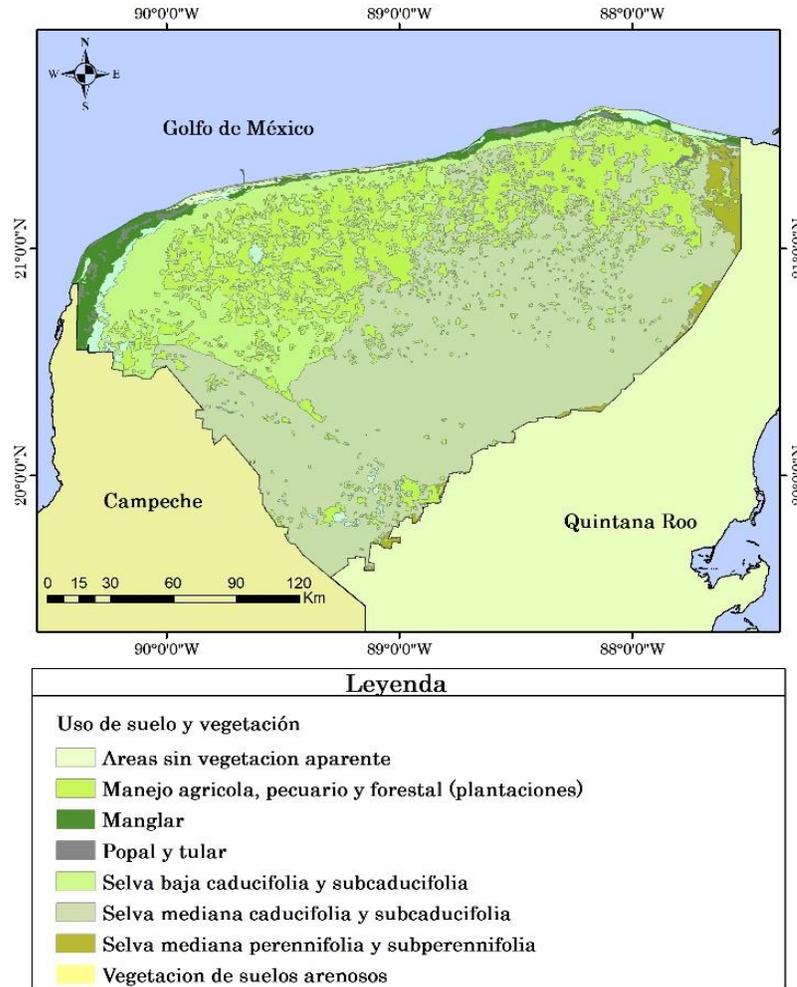


Figura 3.6. Uso de suelo y vegetación del Estado de Yucatán (Datos vectoriales INEGI, 2000).

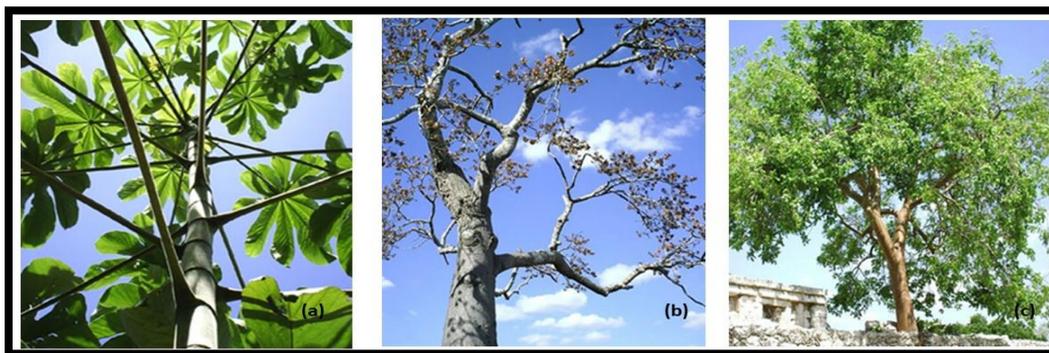


Figura 3.7. (a) K'axixkooch (b) Yaxché (c) chaká (SEDUMA, 2018).

3.6. Situación del acuífero del Estado de Yucatán

El país cuenta con 653 acuíferos administrativos organizados junto con las cuencas hidrográficas en 37 regiones hidrológicas agrupadas en 13 regiones hidrológico-administrativas. La región hidrológico-administrativa XII *Península de Yucatán* posee 4 acuíferos administrativos, Cerros y Valles e Isla de Cozumel en el Estado de Quintana Roo, Xpujil en Campeche y Península de Yucatán, que comprende gran parte del Estado de Yucatán (CONAGUA, 2017).

El acuífero Península de Yucatán con clave 3105, se sitúa en la RH 32 y en la RHA XII; es de tipo libre, costero, kárstico, hidráulicamente heterogéneo y de permeabilidad elevada. El acuífero presenta dos tipos de porosidad, una primaria y otra secundaria. Se distingue una elevada porosidad primaria derivada de la sedimentación y litificación de fragmentos de organismos tales como conchas y esqueletos, sin embargo, se observa una baja porosidad primaria en estratos de caliza masiva. La porosidad secundaria se ha generado a través de largos periodos de tiempo, donde los procesos de disolución, fragmentación y fracturamiento han permitido el desarrollo de canales, grietas, cuevas, grutas, dolinas y cenotes con una distribución irregular tanto en sentido vertical como horizontal (DOF, 2013).

En la figura 3.8 se aprecia la dirección del flujo del agua, la cual está determinada por la compleja morfología subterránea que presenta grietas, galerías de diferentes formas y diámetros, interespacios y niveles de estratificación. Sin embargo, de manera general se considera que el flujo de agua es radial, comenzando desde el sur del Estado hacia la costa con dirección preferencial SE-NW en un entorno cavernoso muy complejo (INEGI, 2002).

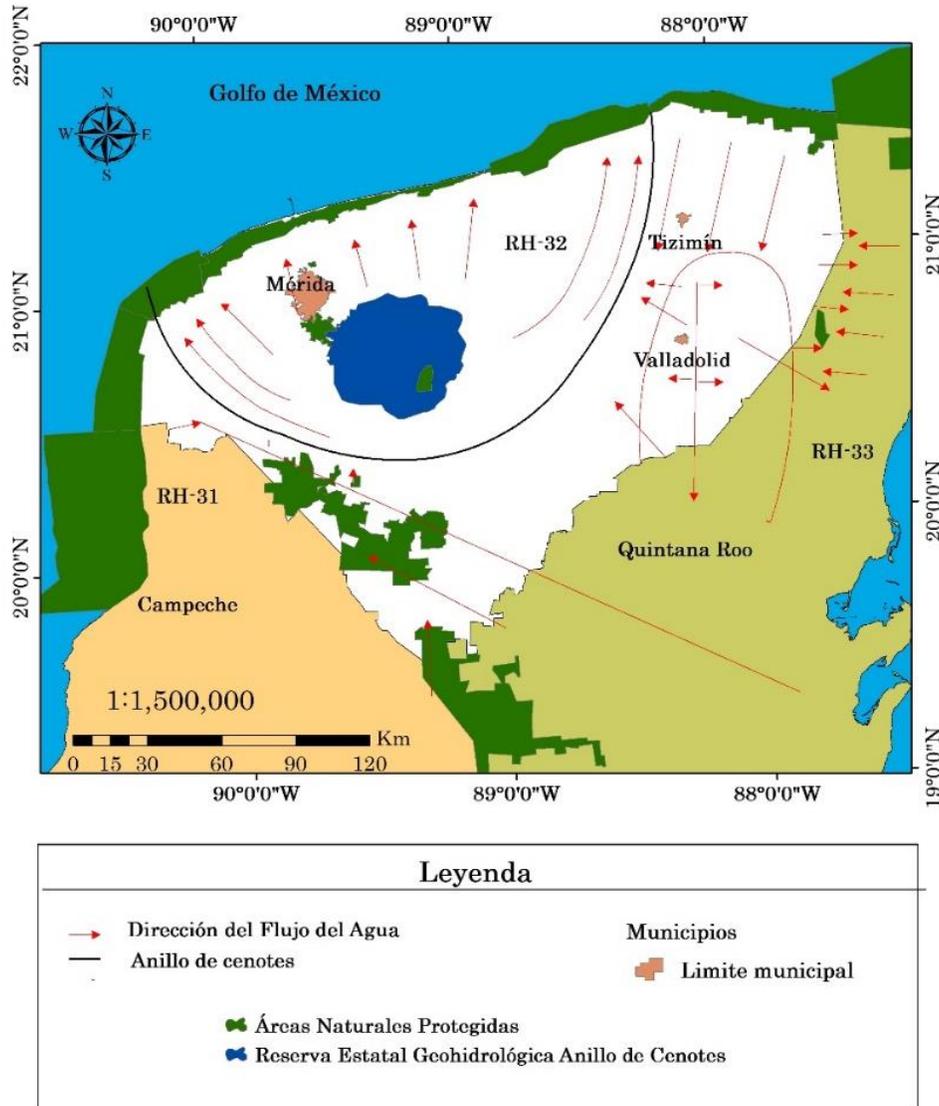


Figura 3.8. Dirección del flujo del agua en el Estado de Yucatán, modificada de Bauer *et al.* (2011).

La principal fuente de recarga del acuífero lo constituye la elevada precipitación pluvial, misma que se infiltra casi en su totalidad en las llanuras y en menor proporción en los lomeríos. La elevada porosidad y permeabilidad del suelo, así como la pendiente topográfica favorecen significativamente este proceso. En contraparte, las principales descargas naturales lo constituyen la transpiración vegetal, la evaporación del agua freática y la descarga hacia el mar.

De acuerdo al DOF (2013) para la región hidrológico-administrativa XII el agua de este



acuífero representa el único recurso para la población (la población total del Estado de Yucatán es 1 955 577 habitantes) dado que la región carece de fuentes superficiales, por tanto, del total de 1 313.3 millones de m³ extraídos, el 62.1 % se destinan para uso agrícola, 32.9 % para uso público urbano, 4 % para uso industrial y 1 % para uso doméstico y de abrevadero.

El principal desafío para el agua subterránea en el Estado de Yucatán es su calidad debido a dos factores principales (Bauer *et al.*, 2011):

- (a) la mezcla del agua subterránea con agua de origen marino (figura 3.9) (Steinich y Marín, 1996; Marín, *et al.*, 2000) y
- (b) actividades antropogénicas (fugas de fosas sépticas, construcción inadecuada de vertederos y residuos industriales o agrícolas) (Pacheco y Cabrera, 1997; Graniel *et al.*, 1999; Marín *et al.*, 2000).

En Mérida, la ciudad más grande de la Península de Yucatán, con una población de 830 732 habitantes en 2010 (INEGI, 2012), no existe un sistema de recolección y drenaje de aguas residuales; los desechos domésticos, las actividades porcícolas y avícolas, industriales (proceso de nixtamalización del maíz), médicos y el uso de agroquímicos se descargan sin tratamiento directamente en el acuífero (figura 3.10). Sólo en algunas regiones se utilizan tanques sépticos, letrinas y en algunos nuevos fraccionamientos, existen redes de alcantarillado sanitario conectadas a pozos profundos a través de los cuales se inyectan los desechos al manto salino que subyace al agua dulce y otros más cuentan con plantas de tratamiento doméstico (Batllori, 2016).

El cuerpo de agua dulce debajo de la ciudad y las afueras de Mérida se utiliza como receptor de aguas residuales, los 20 m superiores de la lente de agua dulce no son aptos para el consumo humano debido a la contaminación por las actividades antes mencionadas (Marín *et al.*, 2003).

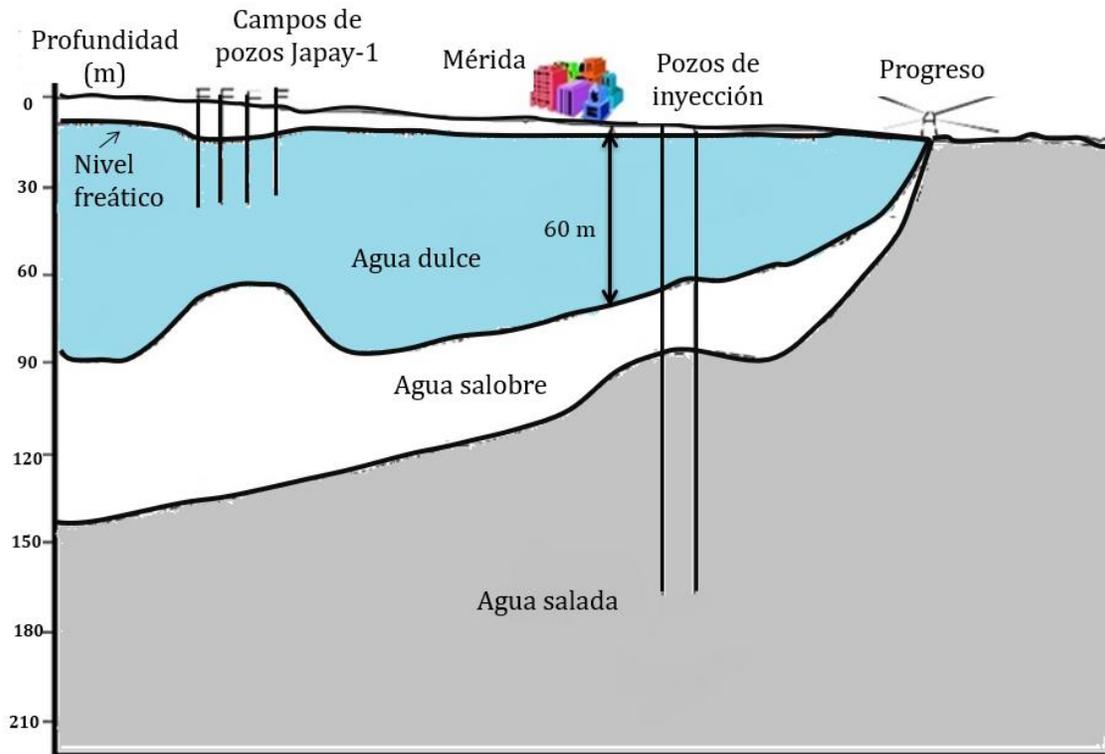


Figura 3.9. Intrusión marina en el acuífero kárstico y costero de Mérida, Yucatán, modificada de Marín *et al.* (2000).

El aumento demográfico y el turismo ejercen una presión adicional sobre el desarrollo sostenible de los recursos hídricos y constituyen un desafío para la infraestructura del suministro de agua potable, el sistema de alcantarillado y el tratamiento de aguas residuales de la región (Heise, 2013).

Al ser el acuífero la única fuente de agua potable de la región, resulta alarmante encontrarlo perturbado (Marín *et al.*, 2000). El aumento de la temperatura media del aire y el aumento de la evapotranspiración, conducen a la disminución de la precipitación, en consecuencia, hacen que se reduzca la recarga de las aguas subterráneas, provocando una disminución de los flujos de descarga al océano y un aumento de la intrusión salina, lo que indica la importancia de realizar más investigaciones sobre la zona de mezcla de agua subterránea y agua marina, así como la dinámica de los acuíferos (Bautista, 2011).

Figura 3.10. Modelo conceptual del sistema de aguas subterráneas situado bajo Mérida (Foster *et al.*, 2001).

CAPÍTULO 4: DESARROLLO EXPERIMENTAL



Cenote Saac Ha, Chemax, Yucatán, México.





4.1. Toma de muestras de roca y agua

En el mes de Junio de 2017 se muestrearon 17 cenotes localizados en 7 municipios del Estado de Yucatán (figura 4.1). Los cenotes corresponden al programa *Monitoreo de cenotes* que realiza la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS). Debido a las restricciones impuestas para la conservación y cuidado del Anillo de Cenotes, las muestras de roca corresponden a fragmentos libres asociados a diferentes posiciones dentro de las estructuras de las cavernas, dolinas y grutas que constituyen los cenotes. En relación a las muestras de agua, solo se tomaron donde fue permitido, evitando siempre inducir alguna perturbación a los sistemas.

Para el presente trabajo de investigación se colectaron 18 muestras de roca, mismas que se depositaron en bolsas de polietileno etiquetadas con el nombre del cenote, fecha y posición a la que corresponde (tablas 4.1 y 4.2, figura 4.2). Posteriormente se transportaron en el interior de una caja de cartón para su tratamiento y análisis en el laboratorio de Geología Ambiental de la UAEH.

En los mismos cenotes donde se colectaron las rocas, se realizó la toma de 17 muestras de agua empleando botellas de polietileno con capacidad de 2 L (tabla 4.2, figura 4.3). Las botellas fueron lavadas previamente con un detergente libre de fosfatos, seguido de un tratamiento con HCl diluido y enjuague con agua desionizada, llevándolas a sequedad al aire, evitando así la alteración de las muestras y de los sistemas. Una vez colectadas las muestras, se colocaron en una hielera para conservarlas a una temperatura aproximada de 4 °C para su traslado al laboratorio, procurando no exceder de 72 h para su acondicionamiento y análisis fisicoquímico.

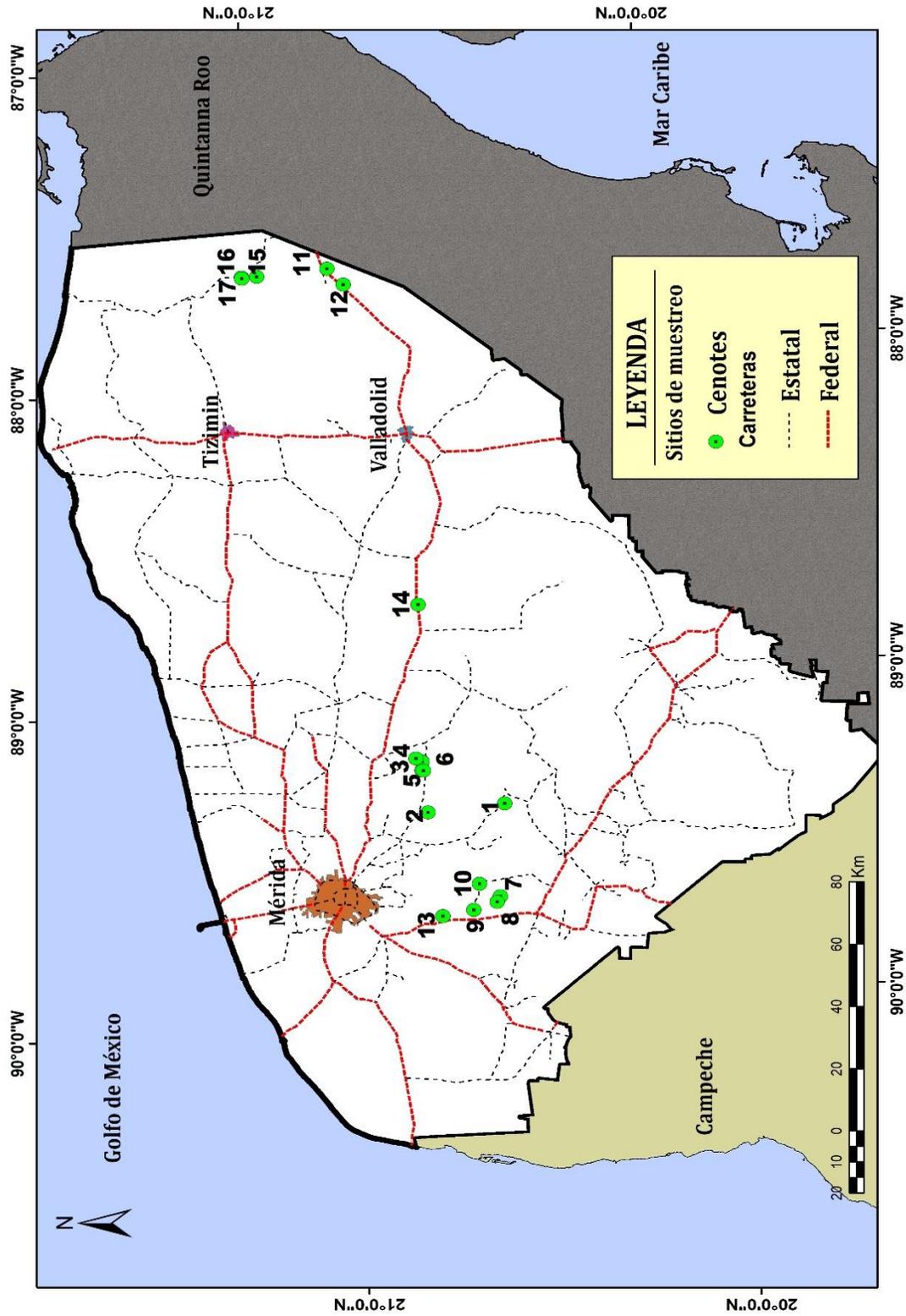


Figura 4.1. Localización de los cenotes muestreados.



Tabla 4.1. Clave, nombre y descripción de las muestras de roca en base a su posición en el cenote.

Clave	Nombre	Descripción
PK	Papakal	Pavimentaria
ST	Subinteh	Pavimentaria
BE	Bebelchen	Parietal
HP1	Huolpoch	Pavimentaria
HP2	Huolpoch 2	Parietal
CL	Chulul	Pavimentaria
CL2	Chulul 2	Pavimentaria
HK	Hoka	Pavimentaria
AM	Aymil	Pavimentaria
YH	Yoha	Pavimentaria
YU	Yaal Utzil	Parietal
SH	Saac-Ha	Cenital
CJ	Choj-Ha	Cenital
SM	Sambulá	Pavimentaria
YO	Yokdzonot	Pavimentaria
MC	Manuel Carrera	Pavimentaria
M1	Montecristo 1	Parietal
M2	Montecristo 2	Parietal



Tabla 4.2. Clave, nombre, municipio y coordenadas geográficas de los cenotes muestreados.

No.	Clave	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud
1	XK	Xpakay	Tekit	20°32'20.61"N	89°21'53.87"O
2	PK	Papakal	Homun	20°44'11.86"N	89°22'26.70"O
3	ST	Subinteh	Cuzama	20°44'20.44"N	89°12'57.71"O
4	BE	Bebelchen	Sanahcat	20°45'12.16"N	89°12'15.87"O
5	HP	Huolpoch	Homun	20°44'27.79"N	89°14'33.80"O
6	CL	Chulul	Homun	20°44'14.99"N	89°14'40.38"O
7	HK	Hoka	Abala	20°34'23.05"N	89°38'59.72"O
8	AM	Aymil	Abala	20°34'58.16"N	89°39'57.45"O
9	YH	Yoha	Abala	20°38'39.27"N	89°41' 7.68"O
10	YU	Yaal Utzil	Abala	20°37'26.00"N	89°36'24.00"O
11	SH	Saac-Ha	Chemax	20°50' 42.6"N	87°40'14.11"O
12	CJ	Choj-Ha	Chemax	20°48' 31.5"N	87°43' 26.1"O
13	SM	Sambulá	Abala	20°43'28.00"N	89°41'52.00"O
14	YO	Yokdzonot	Yaxcaba	20°42'24.95"N	88°43'51.48"O
15	MC	Manuel Carrera	Tizimin	21°01'37.2"N	87°40'34.9"O
16	M1	Montecristo 1	Tizimin	21°03'56.4"N	87°40'47.3"O
17	M2	Montecristo 2	Tizimin	21°03'54.9"N	87°40'27.8"O



Figura 4.2. Fotografía de la toma de muestra de roca del cenote Manuel Carrera.



Figura 4.3. Fotografía de la toma de muestra de agua del cenote Bebelchen.

4.2. Caracterización de muestras de roca

Las diferentes técnicas empleadas para la caracterización de las muestras de roca de los cenotes se resumen en el diagrama de flujo de la figura 4.4.

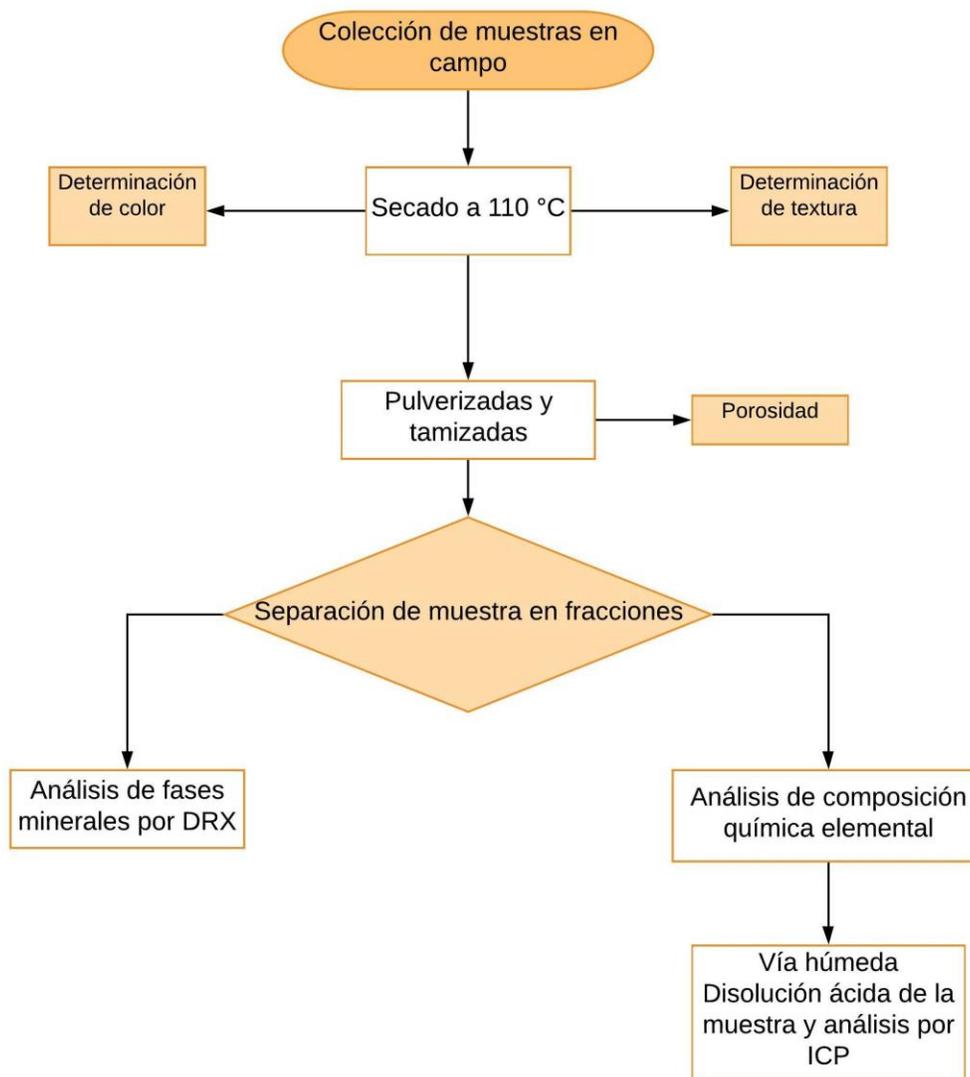


Figura 4.4. Diagrama de flujo empleado para la caracterización de las muestras de roca de los cenotes.

4.2.1. Color y textura de las rocas

Inicialmente las muestras de roca fueron secadas a 110 °C durante 2 h en una estufa marca Riossa, para determinar su color en seco mediante el empleo de las tablas Munsell (2009). Posteriormente se determinó su textura de acuerdo a la clasificación de Dunham (1962) utilizando un microscopio estereográfico marca Leitz Wetzlar en ampliificaciones 10X y luz reflejada.

4.2.2. Porosidad

Para determinar la porosidad se determinaron la densidad aparente con el método de la probeta y la densidad real con el método del picnómetro, utilizando partículas del orden de 1mm de diámetro (entre las mallas No. 18 y 20). Una vez conocidas tanto la densidad aparente como la densidad real se empleó la ecuación 4.1

$$\emptyset = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} * 100 \quad (4.1)$$

Donde:

\emptyset = porosidad

ρ_r = densidad real

ρ_a = densidad aparente

4.2.3. Caracterización por difracción de rayos X (método de polvos)

Las principales fases cristalinas que constituyen las muestras de los cenotes se identificaron en muestras pulverizadas y tamizadas a un tamaño de partícula de aproximadamente 150 μm de diámetro, previamente secadas a 110 °C durante 2h. Utilizando un difractómetro de rayos X marca Bruker, modelo D8 Advance, con radiación Cu K α 1.5406 Å monocromada con filtro de Ni, con rendija de divergencia de 0.681 mm, rendija de antidispersión de 5 mm, rendija del detector de 0.1 mm y detector lineal Lynx Eye con apertura de tres grados.



Los patrones de difracción se registraron a temperatura ambiente (18 ± 2 °C) en el intervalo de $3^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ empleando un tamaño de paso de 0.020° . Las condiciones de operación del tubo de rayos X fueron de 40 kV y 40 mA. La identificación de las fases cristalinas se realizó empleando el método Hanawalt y el programa Diffrac. EVA versión 4.1.1. El análisis semicuantitativo de fases se llevó a cabo mediante la metodología RIR (Langford y Louer, 1996) con el programa MATCH! Versión 1.11e (2011).

4.2.4. Análisis químico elemental (ICP)

Para determinar los elementos que constituyen las rocas, se emplearon muestras secadas previamente a 110°C durante 2 h y con un tamaño promedio de partícula de $150\ \mu\text{m}$ de diámetro. Éstas se disolvieron en una solución de HCl 3M en relación 0.1 g: 5 mL. La mayoría de las muestras se disolvieron en su totalidad a temperatura ambiente, sin embargo, aquellas que presentaron cantidades variables de dolomita se llevaron a calentamiento en un baño María para promover su disolución total. Una vez que las muestras fueron disueltas, se filtraron, aforaron y analizaron mediante un espectrofotómetro de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (ICP) marca Perkin-Elmer, modelo Óptima 8300, utilizando curvas de calibración para cada elemento en el intervalo de concentración de 0-25 mg/L, realizando diluciones siempre que fue necesario.

Una vez determinadas las concentraciones de los elementos, se transformaron en sus correspondientes óxidos y se complementó la información incluyendo las pérdidas por calcinación (PPC) a 950°C durante 2h.

4.2.5. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)

Para validar la calidad de los análisis químicos elementales, se analizaron algunas muestras mediante fluorescencia de rayos X en un espectrofotómetro marca Rigaku, modelo ZSX Primus II (tubo de Rh y ventana de Be), calibrado con muestras

internacionales de referencia geoquímica. De esta manera se estableció la exactitud y la precisión de los análisis químicos elementales, siendo de manera general $< 5 \%$.

4.3. Caracterización de muestras de agua

Las muestras de agua provenientes de los cenotes fueron transportadas al laboratorio en botellas de polietileno de 2 L y conservadas en refrigeración a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta el momento de su análisis. Inicialmente las muestras fueron filtradas empleando membranas de nylon con poros de $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro y separadas en tres fracciones para ser analizadas por diferentes técnicas como se indica en la figura 4.5. Una fracción de agua se aciduló con HNO_3 hasta pH 3, otra se aciduló con H_2SO_4 hasta pH 2 y la tercera fracción se conservó con su pH original.

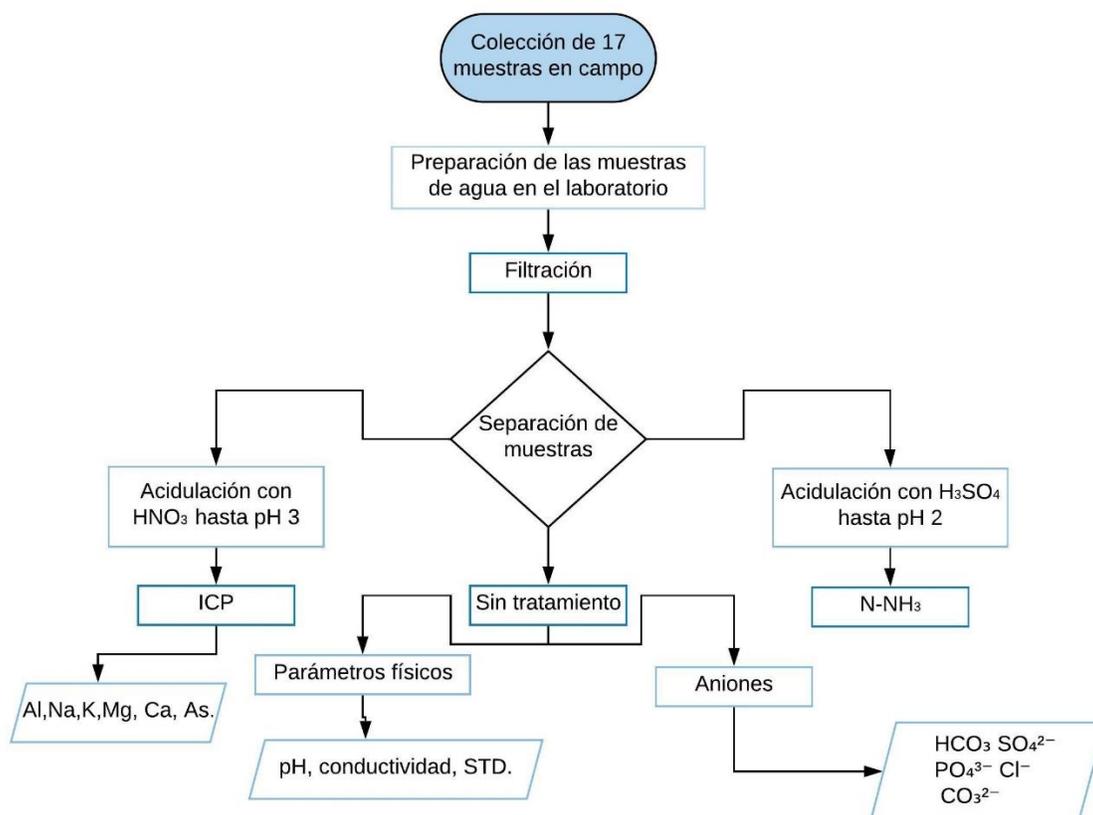


Figura 4.5. Diagrama de flujo de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua.



La fracción de agua que no se aciduló fue utilizada para determinar el pH (potenciometría), conductividad eléctrica CE (conductivimetría), sólidos totales disueltos STD (evaporación y sequedad a 105 °C), Cl⁻ (titulación) (figura 4.6), CO₃²⁻ y HCO₃⁻ (titulación), PO₄³⁻ (espectrofotometría) y SO₄²⁻ (espectrofotometría), de acuerdo a las técnicas descritas por Sadzawka (2006).

La fracción de agua acidulada con HNO₃ se utilizó para el análisis elemental por espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (ICP) en un equipo Perkin Elmer modelo Óptima 8300, empleando curvas de calibración estándar en el intervalo de concentración de 0 a 25 mg/L para cada elemento (Na, K, Mg, Ca, Si, Al y As).

La fracción de agua acidulada con H₂SO₄ fue empleada para cuantificar nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) por espectrofotometría de absorción de radiación visible (figura 4.7) mediante su complejación con reactivo de Nessler y análisis a 410 nm empleando curvas de calibración estándar (Welcher, 1995).

Cada análisis se realizó por triplicado, evaluando la calidad total de los análisis químicos mediante el error de balance de cargas iónicas % E (ecuación 4.2), el cual fue < ± 5 % en todos los casos (APHA, 1999).

$$\%E = \left[\frac{\sum \text{cationes} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) - \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right)}{\sum \text{cationes} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) + \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right)} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

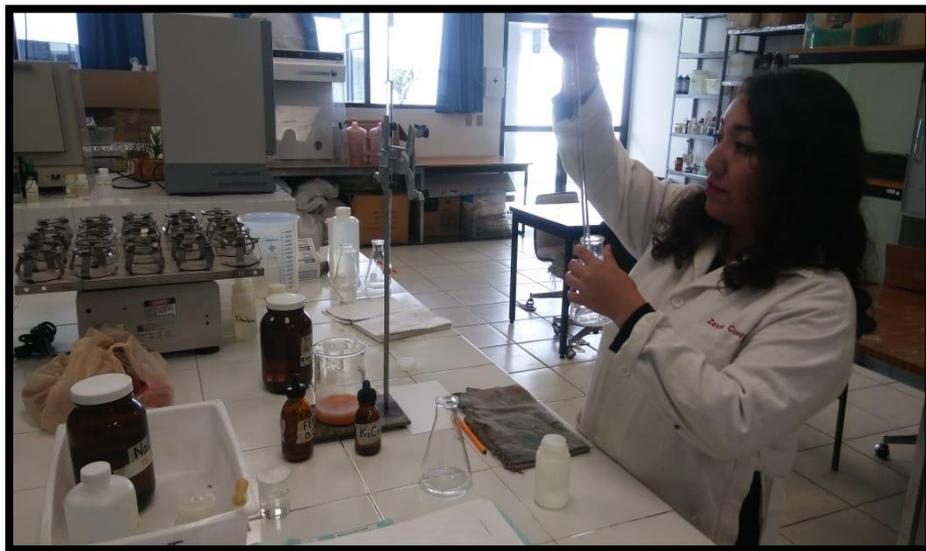


Figura 4.6. Determinación de Cl⁻ por titulación volumétrica.



Figura 4.7. Determinación de nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) por espectrofotometría de absorción de radiación visible.



4.4. Evaluación hidroquímica

Las características hidroquímicas de los cenotes fueron definidas a partir de la composición química de las muestras de agua, empleando los siguientes diagramas geoquímicos:

- (a) Diagrama de Piper (1944), en el cual se representa en un triángulo el % de Equivalentes/L de los cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}+\text{K}$) y en otro triángulo el % Equivalentes/L de los aniones mayores (CO_3^{2+} , HCO_3^- , Cl^- + SO_4^{2-}), integrando la información de ambos triángulos en un diamante para definir la facie hidroquímica (Drever, 1997).
- (b) Diagrama de Van Wirdum (1980), en éste se grafica la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) contra la relación iónica $\text{Ca}^{2+}/(\text{Ca}^{2+} + \text{Cl}^-)$ en unidades de concentración de miliequivalentes/L, para establecer la naturaleza de la composición química del agua.
- (c) Diagrama de Gibbs (1970), en este diagrama se grafica la relación iónica $(\text{Na}^{++}\text{K}^+)/(\text{Na}^{++}\text{K}^++\text{Ca}^{2+})$ en unidades de miliequivalentes/L contra la concentración de sólidos totales disueltos (STD) en mg/L, o bien la relación iónica $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$ contra STD para establecer el mecanismo que gobierna la química del agua subterránea.
- (d) Diagrama de Mifflin (1988), aquí se grafica la relación iónica $(\text{Cl}^-+\text{SO}_4^{2-})$ contra $(\text{Na}^{++}\text{K}^+)$ en unidades de miliequivalentes/L para determinar el flujo local, intermedio o regional del agua subterránea.

Además, se calculó el índice de saturación (IS) para las principales fases cristalinas disueltas en el sistema, empleando el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) y la ecuación 4.3.



$$IS = \log (PAI/Kps) \quad (4.3)$$

donde:

IS, índice de saturación

PAI, producto de la actividad iónica de los iones en solución

Kps, constante del producto de solubilidad del mineral

4.5. Parámetros de calidad para irrigación

4.5.1. pH

Los valores apropiados del pH en el agua de riego garantizan la asimilación de micronutrientes y evitan reacciones colaterales de los plaguicidas, así como la precipitación de los fertilizantes.

4.5.2. Conductividad eléctrica

Este parámetro se relaciona con la concentración total de sales disueltas en el agua. De manera general, la cantidad de corriente eléctrica que pasa por una solución en condiciones estandarizadas aumenta con la concentración y la ionización de sales.

4.5.3. Parámetros de salinidad

(a) **Sólidos totales disueltos**, la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) en una muestra de agua filtrada se considera como su salinidad total. Uno de los principales problemas generados por la presencia de sales solubles en el suelo es el incremento del potencial osmótico, haciendo más difícil el aprovechamiento del agua por la planta, en consecuencia, las plantas mueren por estrés hídrico, aún cuando el suelo presente una disponibilidad de agua apropiada.

(b) **Contenido de sodio**, cuando el agua de riego presenta altas concentraciones de sodio, éste se acumula gradualmente hasta saturar la solución del suelo.



Bajo estas condiciones, el suelo pierde su estructura y porosidad debido a la disgregación (defloculación) de las partículas, disminuyendo la permeabilidad y por lo tanto, la capacidad de infiltración del agua, modificándose el desarrollo de los cultivos.

(c) **Relación de adsorción de sodio (RAS)**, éste es uno de los parámetros más importantes para conocer el riesgo de sodificación del suelo por efecto de las sales disueltas en el agua de riego. En el cálculo de la RAS se relaciona el contenido de Na^+ con el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Mientras mayor sea su valor, se presentará un mayor riesgo de sodificación del suelo. La RAS se calculó con la ecuación 4.4.

$$\text{RAS} = [\text{Na}^+] / ([\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] / 2)^{1/2} \quad (4.4)$$

La clasificación de las muestras respecto de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) se realizó mediante los criterios de Richards (1954) y la gráfica de USSL (1954).

(d) **Carbonato de sodio residual (CSR)**, cuando en el agua de riego el contenido de CO_3^{2-} y HCO_3^- es mayor que el de Ca^{2+} y Mg^{2+} , existe la posibilidad de que se forme Na_2CO_3 . De esta manera, el ion Na^+ puede desplazar al Ca^{2+} y al Mg^{2+} del complejo de intercambio debido a la elevada solubilidad del ion sodio, promoviendo la defloculación del suelo.

El CSR se calculó utilizando la ecuación 4.5, empleando las concentraciones de los iones en miliequivalentes/L. Posteriormente las muestras se clasificaron de acuerdo a las categorías de Lloyd y Heathcote (1985).

$$\text{CSR} = [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] \quad (4.5)$$



(e) **Porcentaje de sodio (PS)**, corresponde a la cantidad del ion Na^+ disuelto en la solución del suelo posterior a la precipitación de especies de baja solubilidad como CaCO_3 , MgCO_3 y CaSO_4 . Este parámetro se calculó con la ecuación 4.6. Posteriormente se graficaron la CE contra % Na para cada muestra, clasificándose de acuerdo a las categorías propuestas por Wilcox (1948).

$$\% \text{Na} = \left[\frac{[\text{Na} + \text{K}]}{[\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}]} \right] \times 100 \quad (4.6)$$

(f) **Índice de permeabilidad (IP)**, este parámetro permite establecer un criterio de calidad del agua de riego basado en la permeabilidad (Donnen, 1962), calculándose a través de la ecuación 4.7. La concentración de todos los iones se expresa en miliequivalentes/L.

$$\text{IP} = [(\text{Na} + (\text{HCO}_3))^{0.5} / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na})] \times 100 \quad (4.7)$$

4.6. Parámetros de calidad para agua de consumo humano

La calidad del agua para consumo humano fue evaluada mediante la comparación de la composición química con los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) y la NOM-1994 modificada (DOF, 1996). La clasificación de la dureza se realizó con el diagrama de Li *et al.* (2014), utilizando los valores de los sólidos totales disueltos (STD) y la dureza total (mg/L) estimada mediante las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Weiner, 2013).

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Cenote Papakal, Homun, Yucatán, México.



5.1. Caracterización de las muestras de roca de los cenotes

5.1.1. Descripción megascópica

Las características megascópicas de las muestras de los cenotes se indican en la tabla 5.1. De manera general se destacan por sus colores claros y una textura deposicional no reconocible o cristalina. Las muestras de los cenotes Papakal (PK), Huolpoch 2 (HP2), Chulul 2 (CL2) y Sambulá (SM) presentan fósiles y una textura que varía de wackestone a packstone (Dunham, 1962). La densidad de las muestras se encuentra entre 2.7 y 2.84 g/cm³, los valores más bajos de densidad son característicos de las muestras con una mayor abundancia de calcita, en tanto que los valores mayores corresponden a aquellas muestras más ricas en dolomita. La porosidad presenta valores desde 36.16 % hasta 47.75 %, permitiendo clasificar a las muestras como de porosidad muy alta (Archie, 1952; Sander, 1967).

Tabla 5.1. Descripción megascópica de las muestras de roca de los cenotes.

Núm.	Clave	Muestra	Imagen 10X	Descripción
1	PK			Roca heterogénea de color verde amarillento grisáceo, (5GY 7/2) con presencia de fósiles y textura grano-sostenida tipo Packstone. Densidad 2.78 g/cm ³ y porosidad 36.16 %.
2	ST			Roca homogénea de color amarillo grisáceo (5Y 8/4), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 34.39 %.

Tabla 5.1. *Continuación.*

3	BE			Roca homogénea de color amarillo oscuro (5Y 6/4), presenta hábito estalactítico, textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 39.43 %.
4	HP			Roca homogénea de color amarillo verde pálido (10Y 8/2), espeleotema tipo bandera, textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 31.71 %.
5	HP2			Roca heterogénea de color gris amarillento (5Y 8/1), con presencia de fósiles y textura lodo- sostenida tipo Wackstone. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 36.72 %.
6	CL			Roca homogénea de color amarillo grisáceo (5Y 8/4), con textura deposicional no reconocible o cristalina Densidad 2.75 g/cm ³ y porosidad 42.16 %.

Tabla 5.1. *Continuación.*

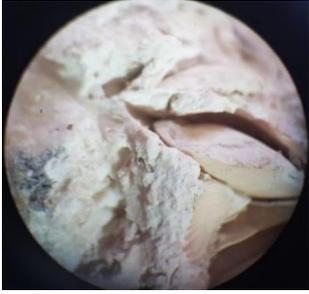
7	CL2			Roca heterogénea de color gris amarillento (5Y 8/1), con presencia de fósiles y textura lodo-sostenida tipo Packstone. Densidad 2.83 g/cm ³ y porosidad 39.68 %.
8	HK			Roca homogénea de color amarillo verde pálido (10Y 8/2), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 47.24 %
9	AM			Roca homogénea de color amarillo verde pálido (10Y 8/2), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 43.38 %.
10	YH			Roca heterogénea de color amarillo verde pálido (10Y 8/2), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 47.75 %.

Tabla 5.1. *Continuación.*

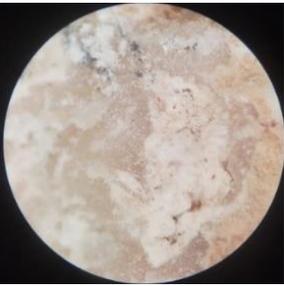
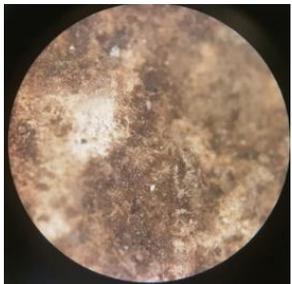
11	YU			Roca homogénea de color olivo pálido, (10Y 6/2), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.84 g/cm ³ y porosidad 34.16 %.
12	SH			Roca homogénea de color verde amarillo oscuro (5GY 5/2), hábito estalactítico y textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 34.73 %.
13	CJ			Roca homogénea de color café moderadamente olivo (5Y 4/4) hábito estalactítico y textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 39.63 %.
14	SM			Roca heterogénea de color café moderadamente olivo (5Y 4/4), con presencia de fósiles y textura lodo-sostenida tipo Wackestone. Densidad 2.78 g/cm ³ y porosidad 38.45 %.

Tabla 5.1. Continuación.

15	YO			Roca homogénea de color gris amarillento (5Y 8/1), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 42.83 %.
16	MC			Roca homogénea de color café amarillo oscuro (10YR 4/2), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.72 g/cm ³ y porosidad 37.76 %.
17	M1			Roca homogénea de color café moderadamente olivo (5Y 4/4), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.71 g/cm ³ y porosidad 39.86 %.
18	M2			Roca homogénea de color amarillo grisáceo (5Y 8/4), textura deposicional no reconocible o cristalina. Densidad 2.70 g/cm ³ y porosidad 44.70 %.

5.1.2. Caracterización mineralógica por difracción de rayos X

Las principales fases cristalinas identificadas mediante difracción de rayos X en las diferentes muestras de roca de los cenotes corresponden a calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), con archivos de datos JCPDS-ICDD 72-1937 y 74-1687, respectivamente (figura 5.1).

El 75 % de las muestras contienen únicamente calcita (ST, BE, HP, HP2, HK, AM, YH, SH, CJ, YO Y M2), el 6.25 % exclusivamente dolomita (YU) y el 18.75 % de las muestras presentan una mezcla de calcita y dolomita (PK, CL, CL2, SM, MC Y M1), en diferentes proporciones (tabla 5.2).

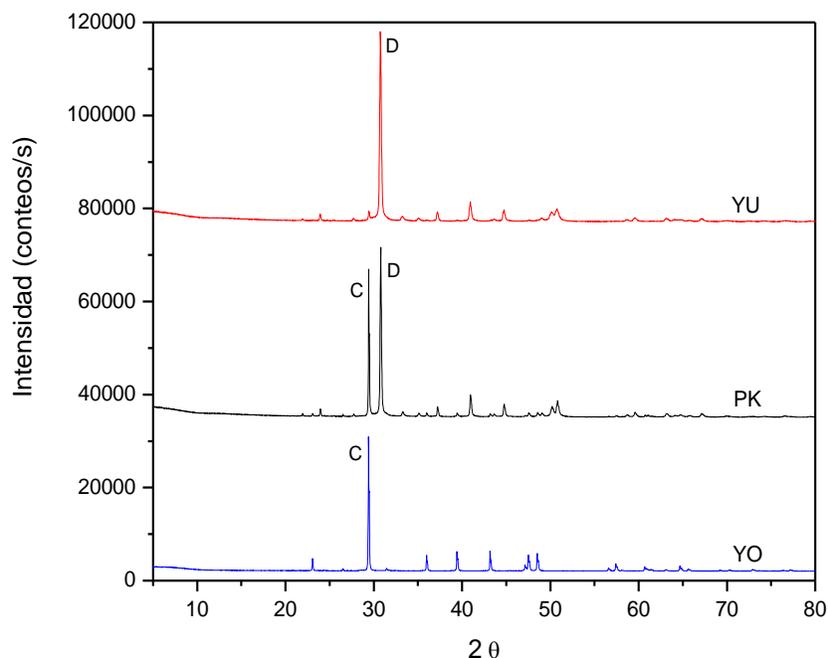


Figura 5.1. Difractogramas indicando las principales fases cristalinas en las muestras de los cenotes, C corresponde a calcita CaCO_3 y D a dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Tabla 5.2. Abundancia relativa de calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) en las diferentes muestras.

No.	Clave	% Calcita (CaCO_3)	% Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)
1	PK	40	60
2	ST	100	-
3	BE	100	-
4	HP	100	-
5	HP2	100	-
6	CL	62	38
7	CL2	4	96
8	HK	100	-
9	AM	100	-
10	YH	100	-
11	YU	-	100
12	SH	100	-
13	CJ	100	-
14	SM	38	62
15	YO	100	-
16	MC	82	18
17	M1	93	7
18	M2	100	-

5.1.3. Composición química mediante análisis elemental (ICP)

La composición química de las muestras de roca de los cenotes, definida mediante análisis elemental por ICP y su posterior conversión a óxidos, se presenta en las tablas 5.3 y 5.4. De acuerdo a los valores obtenidos, destaca CaO que va desde 34.38 % hasta 56.42 % y MgO que va desde 0.29 % hasta 19.30 %, lo cual es congruente con la mineralogía observada. El resto de los componentes se encontraron en proporciones inferiores al 1 % en peso, exceptuando las pérdidas por calcinación (PPC) que corresponden principalmente al CO_2 liberado a la atmósfera mediante la descomposición térmica a 950 °C tanto de CaCO_3 como de $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.



Tabla 5.3. Composición química de las muestras de cenotes.

Óxido	PK	ST	BE	HP1	HP2	CL	CL2	HK	AM	YH
Na ₂ O	0.35	0.42	0.38	0.32	0.33	0.38	0.36	0.37	0.36	0.34
K ₂ O	0.09	0.08	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.09	0.09	0.07
MgO	14.26	0.92	2.14	0.48	0.32	9.37	13.73	0.29	0.60	1.21
CaO	40.34	56.00	54.83	52.53	56.11	46.50	37.48	55.59	54.20	52.20
SO ₂	0.11	ND	ND	ND	ND	0.09	ND	0.03	0.11	0.13
Al ₂ O ₃	0.09	0.08	0.12	0.13	0.07	0.09	0.10	0.12	0.08	0.14
Fe ₂ O ₃	0.014	ND	0.006							
As ₂ O ₃	0.009	0.02	0.02	0.10	0.02	0.007	0.10	0.10	0.10	0.01
PbO	ND	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	0.003	ND	ND
P ₂ O ₃	0.32	0.09	0.22	0.10	0.07	0.12	0.28	0.11	0.09	0.20
PPC*	44.18	42.52	43.55	47.08	43.41	44.35	48.97	43.56	44.99	45.54
Total	99.76	100.13	101.32	100.81	100.34	100.94	101.08	100.26	100.62	99.84

*PPC pérdidas por calcinación, ND no determinado.

Tabla 5.3. Continuación.

Óxido	YU	SH	CJ	SM	YO	MC	M1	M2
Na ₂ O	0.38	0.36	0.39	0.09	0.24	0.06	0.07	0.04
K ₂ O	0.10	0.07	0.07	0.001	ND	0.002	ND	ND
MgO	19.30	1.14	0.44	13.35	0.39	5.48	1.96	0.34
CaO	34.38	54.71	56.42	40.89	55.29	48.34	53.56	56.11
SO ₂	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Al ₂ O ₃	0.09	0.07	0.07	0.15	ND	0.50	0.009	ND
Fe ₂ O ₃	ND	ND	ND	0.083	ND	0.24	0.038	ND
As ₂ O ₃	0.02	0.003	0.003	ND	ND	ND	ND	ND
PbO	ND	ND	0.006	0.003	0.004	0.003	0.003	0.003
P ₂ O ₃	0.05	0.16	0.15	0.11	0.023	0.058	0.04	0.02
PPC*	46.51	43.76	43.34	45.23	44.28	44.09	44.41	43.41
Total	100.86	100.27	100.89	99.91	100.22	98.77	100.09	99.92

*PPC pérdidas por calcinación, ND no determinado.

Tabla 5.4. Valores máximos (Máx.), mínimo (Mín.), promedio (Prom.) y desviación estándar (D. E.) para la composición química de las diferentes muestras de los cenotes.

Valor	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	As ₂ O ₃	PbO	P ₂ O ₃	PPC
Máx.	0.42	0.10	19.30	56.42	0.13	0.50	0.24	0.10	0.006	0.32	47.08
Mín.	0.04	0.00	0.29	34.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	42.52
Prom.	0.284	0.053	4.4479	50.743	0.031	0.108	0.023	0.024	0.002	0.115	44.425
D.E.	0.136	0.038	6.132	6.769	0.048	0.114	0.061	0.038	0.002	0.079	1.199

Es importante mencionar que se detectó la presencia de As₂O₃ y PbO como componentes traza, lo cual puede constituir un problema de perturbación natural al acuífero del Estado de Yucatán, toda vez que la disolución de las rocas que confinan el acuífero aportarían no solo Ca²⁺, Mg²⁺ y HCO₃⁻; sino también bajas concentraciones de As³⁺ y Pb²⁺ en alguna forma soluble bajo las condiciones de pH características de estos sistemas (usualmente entre 6 y 8).

5.2. Características fisicoquímicas del agua

De acuerdo a los análisis fisicoquímicos realizados a las diferentes muestras de agua provenientes de los cenotes del Estado de Yucatán, se observó que el pH varió de 6.92 a 7.70, predominando una condición ligeramente alcalina. Los valores de la conductividad eléctrica se encontraron en el intervalo de 688 hasta 3 723 μ S/cm, mientras que los sólidos totales disueltos estuvieron presentes en concentraciones desde 515.77 hasta 2 381 mg/L. La dureza presentó valores desde 258.05 hasta 693.46 mg/L (tabla 5.5).

La concentración de Na⁺ presentó un valor mínimo de 23.43 mg /L y un máximo de 461.20 mg/L, mientras que Ca²⁺ varió desde 78.81 hasta 201 mg/L, siendo estos dos cationes los más abundantes en las muestras. Respecto de los aniones, el ión HCO₃⁻ fue el más abundante con un máximo de 895.97 mg/L, seguido de Cl⁻ con una concentración máxima de 419.61 mg/L. Destaca la presencia de componentes traza como Al³⁺, As³⁺, NH₄⁺ y PO₄³⁻ (tablas 5.5. y 5.6).



Tabla 5.5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua de cenotes del Estado de Yucatán.

PARÁMETROS	XK	PK	ST	BE	HP	CL	HK	AM	YH
FISICOS									
Temperatura (°C)	28	22	24	23	25	25	24	24	23
pH	7.00	7.56	7.58	7.65	7.40	7.38	6.92	7.51	7.36
CE (μS/cm)	1 876.43	1 810.14	1 575.30	1 472.0	1 210.0	1 169.0	3 723.0	1 868.50	2 150.0
STD (mg/L)	1 397.25	1 354.18	1 180.60	1 103.36	904.53	874.53	2 381.0	1 396.19	1 608.95
Dureza (mg/L)	675.31	664.34	556.91	530.14	543.06	482.10	683.24	600.67	555.11
COMPONENTES MAYORES (mg/L)									
Na ⁺	84.53	90.22	88.02	63.18	23.43	25.37	461.20	134.30	229.60
K ⁺	3.89	4.40	3.29	1.90	0.78	1.34	14.43	6.25	9.89
Mg ²⁺	52.40	55.74	51.97	44.62	38.48	24.89	64.03	57.14	51.11
Ca ²⁺	184.00	174.1	137.30	138.70	154.00	152.00	168.00	146.30	138.0
SiO ₂ (ac)	7.73	2.67	2.04	ND	0.15	ND	19.19	5.94	9.24
HCO ₃ ⁻	864.41	845.30	776.41	763.75	689.97	656.42	767.08	706.19	876.85
Cl ⁻	127.05	130.20	119.21	69.02	29.80	32.94	419.61	149.80	210.51
SO ₄ ²⁻	52.76	23.82	19.10	12.98	4.96	7.23	338.94	158.72	150.14
COMPONENTES TRAZA (mg/L)									
Al ³⁺	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.26	0.27	0.27	0.27
As ³⁺	0.17	0.03	ND	0.06	0.04	0.02	0.10	0.10	0.11
NH ₄ ⁺	0.29	0.13	0.12	0.21	0.15	0.14	0.48	0.21	0.30
PO ₄ ³⁻	1.47	1.73	2.05	2.18	2.87	1.57	1.90	2.59	1.10
%E	-4.34	-2.05	-4.66	-4.86	-1.71	-4.75	3.98	-3.05	-4.65

Tabla 5.5. *Continuación.*

PARÁMETROS	YU	SH	CJ	SM	YO	MC	M1	M2
FISICOS								
Temperatura (°C)	24	20	20	24	20	22	24	24
pH	7.16	7.58	6.93	7.40	7.65	7.70	7.45	7.55
CE (µS/cm)	2 236.50	1 287.0	1 859.0	1 476.0	893.0	688.0	988.0	1 045.0
STD (mg/L)	1 675.55	953.99	1 384.53	1 075.52	664.81	515.77	739.38	778.05
Dureza (mg/L)	570.25	442.98	693.46	365.72	305.53	258.05	358.81	350.35
COMPONENTES MAYORES (mg/L)								
Na ⁺	236.60	77.53	96.82	198.60	65.67	31.20	67.97	80.09
K ⁺	30.10	2.69	3.31	8.93	5.52	2.50	5.96	3.30
Mg ²⁺	50.60	28.55	46.50	28.71	20.31	14.87	27.76	28.15
Ca ²⁺	144.90	130.30	201.00	99.10	88.85	78.81	97.90	93.87
SiO _{2(ac)}	8.51	ND	ND	1.01	2.38	ND	ND	ND
HCO ₃ ⁻	870.63	651.08	895.97	468.15	401.69	372.78	462.38	485.49
Cl ⁻	206.08	85.68	134.90	293.61	97.67	37.07	98.95	116.50
SO ₄ ²⁻	166.56	17.68	25.78	ND	ND	ND	ND	ND
COMPONENTES TRAZA (mg/L)								
Al ³⁺	0.27	0.26	0.25	0.36	0.36	0.35	0.36	0.35
As ³⁺	0.07	0.05	0.04	ND	ND	ND	ND	ND
NH ₄ ⁺	0.46	0.18	0.08	0.22	0.41	0.05	0.28	0.17
PO ₄ ³⁻	2.15	1.66	2.41	ND	3.55	ND	ND	ND
%E	-2.39	-4.54	-2.45	0.84	-1.53	-3.89	-0.17	-2.86



Tabla 5.6. Valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua provenientes de los cenotes.

PARÁMETROS	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Físicos				
Temperatura (°C)	20	28	23.29	2.05
pH	6.92	7.70	7.39	0.25
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	688.0	3 723.0	1 607.46	705.15
STD (mg/L)	515.77	2 381.0	1 175.78	456.69
Dureza (mg/L)	258.05	693.46	508.00	139.65
Componentes mayores (mg/l)				
Na ⁺	23.43	461.20	120.84	109.13
K ⁺	0.78	30.10	6.38	7.03
Mg ²⁺	14.87	64.03	40.33	14.82
Ca ²⁺	78.81	201.00	136.89	32.25
SiO ₂	0.00	19.19	3.46	5.22
HCO ₃ ⁻	372.78	895.97	679.68	178.72
Cl ⁻	29.80	419.61	138.74	99.41
SO ₄ ²⁻	0.00	338.94	57.56	93.19
Componentes traza (mg/l)				
Al ³⁺	0.25	0.36	0.28	0.04
As ³⁺	0.00	0.17	0.04	0.05
NH ₄ ⁺	0.05	0.48	0.23	0.13
PO ₄ ³⁻	0.00	3.55	1.60	1.08
E %	-4.86	3.98	-2.53	2.37

5.3. Evaluación hidroquímica

5.3.1. Diagrama de Piper

La clasificación de las facies hidroquímicas mediante el diagrama de Piper (1944) permitió observar que la mayoría de las muestras presentan una facie bicarbonatada cálcica Ca-HCO_3 , las muestras Yaal Utzil (YU) y Yoha (YH) se distinguen por una facie mixta bicarbonatada sódica - bicarbonatada cálcica Ca-Na-HCO_3 , mientras que las muestras de los cenotes Hoka (HK) y Sambulá (SM) se caracterizan por presentar una facie clorurada sódica Na-Cl (figura 5.2).

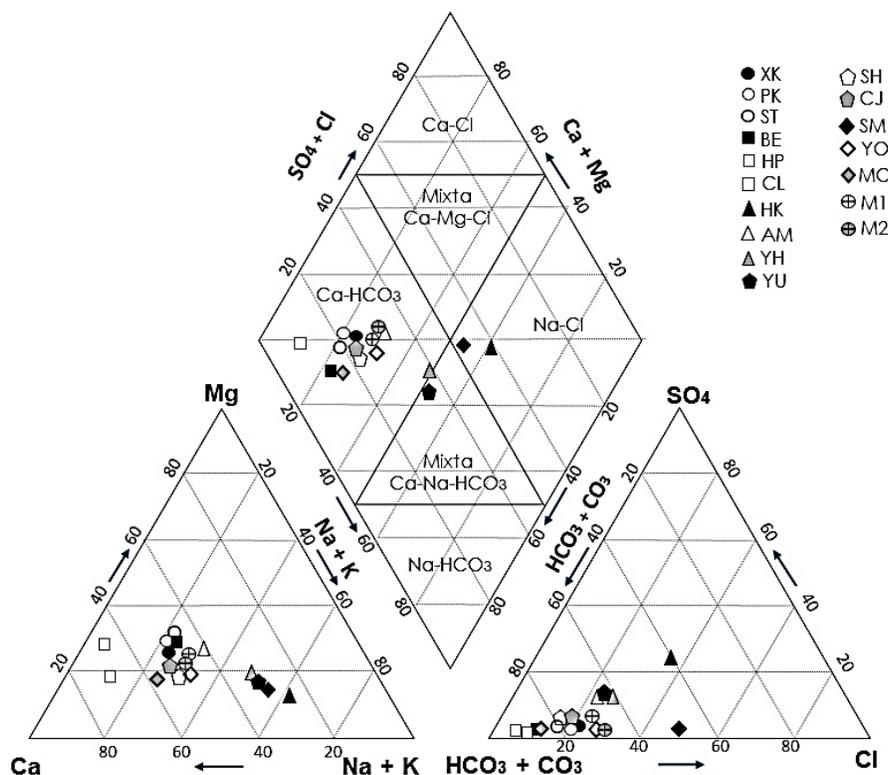


Figura 5.2. Clasificación de las muestras de agua de los cenotes con el diagrama de Piper (1944).

5.3.2. Diagrama de van Wirdum

La clasificación de las muestras de agua de acuerdo al diagrama de van Wirdum (1980) permitió definir su naturaleza como atmosférica-litotrófica principalmente (figura 5.3), donde el agua proveniente de la lluvia interactúa con las rocas disolviéndolas e incorporando parte de sus iones al acuífero.

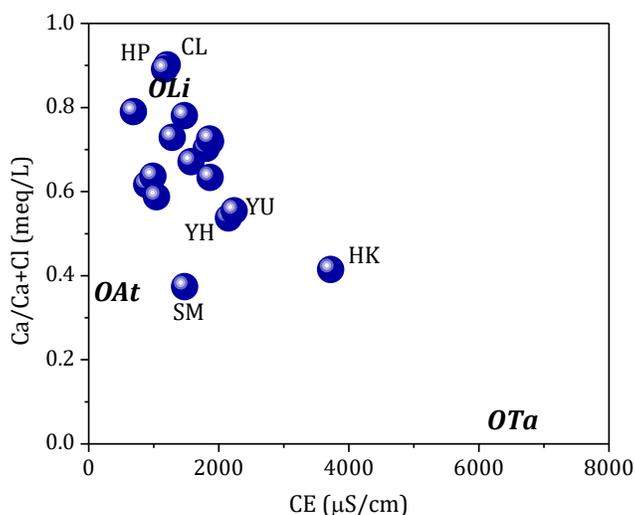


Figura 5.3. Clasificación de las muestras de agua en el diagrama de van Wirdum (1980): *At*, atmosférica, *Li*, litotrófica y *Ta*, talasotrófica.

5.3.3. Diagrama de Gibbs

La clasificación de las muestras de agua empleando los diagramas de Gibbs (1970), demostró que uno de los principales factores que influyen en la química del agua es la interacción roca-agua (figuras 5.4a y 5.4b), validando las observaciones realizadas mediante la clasificación de van Wirdum.

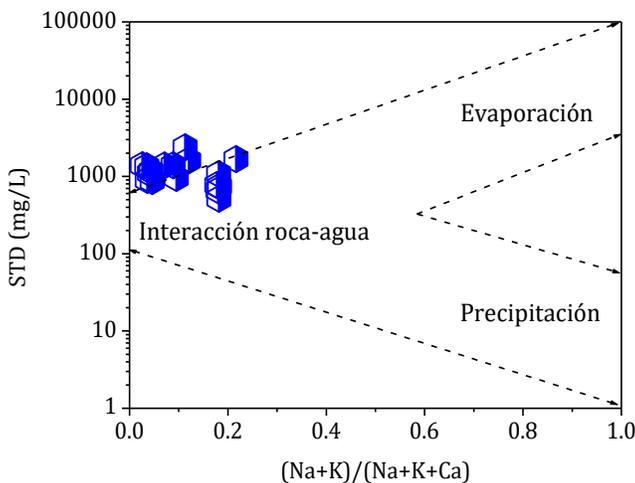


Figura 5.4a. Clasificación de las muestras en el diagrama de Gibbs (1970), empleando los sólidos totales disueltos y la proporción entre los cationes Na, K y Ca.

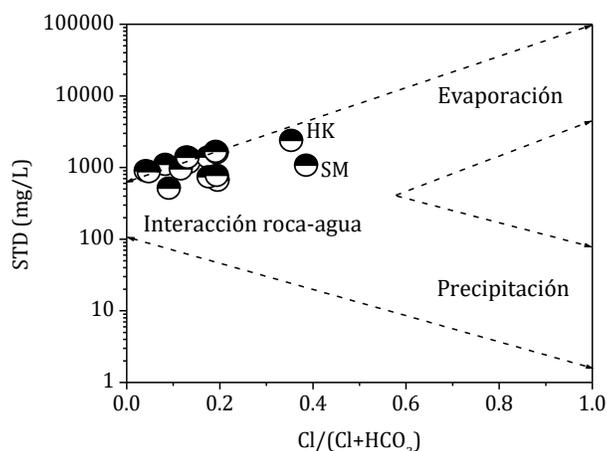


Figura 5.4b. Clasificación de las muestras en el diagrama de Gibbs (1970), empleando los sólidos totales disueltos y la proporción entre los aniones Cl y HCO₃.

5.3.4. Diagrama de Mifflin

El diagrama de Mifflin (1988) tiene sus antecedentes en la secuencia de evolución química del agua definida por Chebotarev (1955), donde se explica que en función del tiempo de contacto del agua con los minerales presentes en las rocas, así como de la velocidad de flujo, se pueden desarrollar diferentes facies hidroquímicas, siendo la facie bicarbonatada (HCO₃⁻) la correspondiente a menores tiempos de residencia, la facie sulfatada (SO₄²⁻) característica para tiempos de residencia intermedios y la facie clorurada (Cl⁻) para tiempos de residencia muy prolongados. En relación al orden de enriquecimiento de cationes, la serie presentaría una evolución Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ de manera congruente.

De acuerdo a Mifflin (1988), las facies hidroquímicas son consecuencia de los diferentes tipos de flujo en las grandes cuencas sedimentarias, distinguiéndose tres categorías: (a) flujo local, donde el tiempo de residencia del agua varía de algunos años hasta decenas de años, éste corresponde a un flujo activo con facies bicarbonatadas con baja salinidad, (b) flujo intermedio, con tiempos de residencia de decenas a miles de años, presenta un flujo menos activo con facies sulfatadas y salinidad intermedia y (c) flujo regional, con tiempos de residencia de miles a millones

de años, con flujo muy lento y facies cloruradas con elevada salinidad. En relación a la profundidad se considera que el flujo local se localiza en una zona superior, el flujo intermedio en una zona de profundidad intermedia y el flujo regional en una zona muy profunda. Esta característica habilita la posibilidad de que en una misma región se extraiga agua con diferentes facies, aún bajo una litología homogénea.

La clasificación de las muestras de agua de los cenotes en el diagrama de Mifflin permitió apreciar tres categorías de flujo (figura 5.5). Las muestras de los cenotes Huolpoch (HP), Chulul (C) y Manuel Carrera (MC) corresponden a un flujo local, mientras que las muestras Hoka (HK), Yoha (YH), Yaal Utzil (YU), Sambulá (SM) y Aymil (AM) a un flujo regional, el resto de las muestras se clasificaron con un flujo intermedio.

Es importante destacar que las facies determinadas con el diagrama de Piper para las diferentes muestras (figura 5.2) no presentan una correlación directa con la naturaleza del flujo establecida con el diagrama de Mifflin, lo cual indica que la evolución química es altamente dependiente de la mineralogía de las rocas presentes en el acuífero y particularmente en los cenotes.

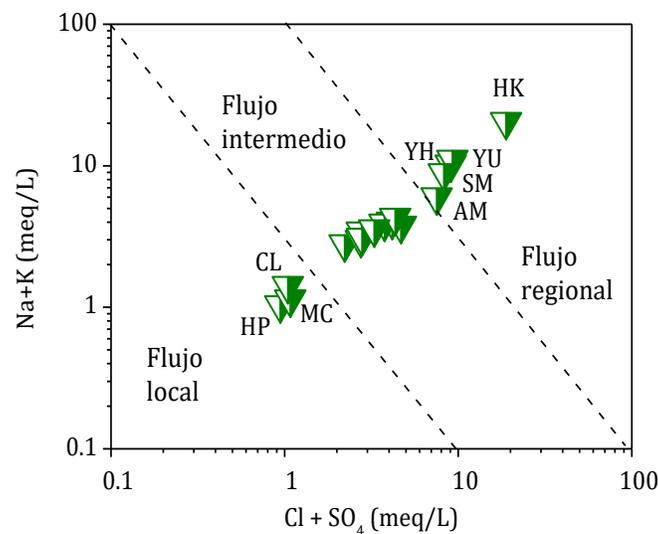


Figura 5.5. Clasificación del tipo de flujo para las muestras de agua de los cenotes empleando el diagrama de Mifflin (1988).



5.4. Índice de saturación

Como se ha mencionado anteriormente, la química de las muestras de agua está definida por la interacción agua-roca, por ello se evaluó el índice de saturación para diferentes minerales que podrían participar en el enriquecimiento de ciertos componentes en el agua. El índice de saturación (IS) se calculó a partir de las actividades de los iones en solución y las constantes del producto de solubilidad (Kps) para albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), anhidrita (CaSO_4), aragonita (CaCO_3), calcita (CaCO_3), calcedonia (SiO_2), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl), cuarzo (SiO_2) y talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Un valor del IS negativo indica que el sistema no está saturado respecto de una fase propuesta; es positivo cuando el sistema está sobresaturado y adquiere el valor de cero cuando el acuífero está en equilibrio con una fase cristalina en particular (Drever, 2002).

De acuerdo a los valores del IS calculados para las muestras de agua, se observaron valores positivos para calcita, aragonita y dolomita, lo cual indica que se encuentran sobresaturadas con estas fases. Adicionalmente se presentaron pequeños valores positivos del IS para cuarzo en las muestras provenientes de los cenotes Xpakay (XK), Hoka (HK), Yoha (YH) y Yaal Utzil (YU), indicando saturación con esta fase cristalina; para el resto de los minerales propuestos se obtuvieron valores del IS negativos, asumiendo una condición de insaturación (figura 5.6).

El mecanismo de incorporación de iones al acuífero se podría explicar mediante la disolución de la roca y particularmente mediante la disolución de calcita, aragonita, dolomita, halita (la cual presenta una elevada solubilidad y por ello no se encuentra en condiciones sobresaturadas) y posiblemente caolinita (como precursor de aluminio y silicio en bajas concentraciones) presente en algunos estratos de la región (CONAGUA, 2002).

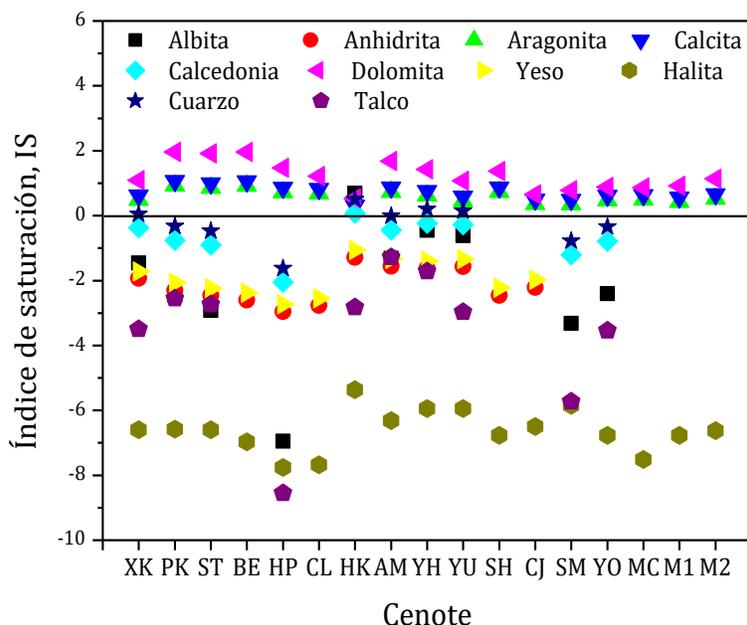


Figura 5.6. Índices de saturación calculados para las diferentes fases minerales.

Inicialmente se considera que la reacción entre el CO_2 presente en el aire y el agua de lluvia, produce pequeñas cantidades de H_2CO_3 (debido a que la solubilidad del CO_2 es relativamente baja y del orden de 1×10^{-5} M en equilibrio con una presión del orden de $1 \times 10^{-3.5}$ atm del gas en el aire) de acuerdo a la siguiente reacción:



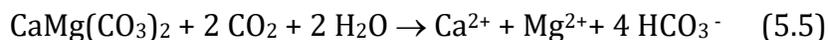
y posteriormente:



El diagrama de distribución de especies en soluciones acuosas para este caso indica que por encima de pH 10.3 el ión CO_3^{2-} es la especie dominante; debajo de pH 6.3 el CO_2 disuelto es la especie dominante y para valores de pH comprendidos entre 6.3 y 10.3 la especie dominante es el ion HCO_3^- (Weiner, 2013).

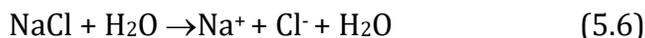


Considerando que la disolución de calcita y/o aragonita sea promovida por la reacción 5.4 y la disolución de dolomita por la reacción 5.5, en ambos casos los productos obtenidos son similares:

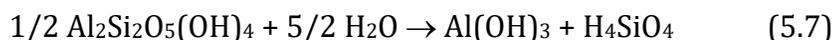


Aquí es importante mencionar que la dinámica entre la disolución y precipitación de calcita, aragonita y dolomita es cíclica, dependiendo de que se alcance la sobresaturación del sistema con estas fases (Langmuir, 1997).

Para el caso de halita:



y para caolinita:



Congruentemente, las reacciones químicas anteriores permiten comprender la naturaleza de las muestras de agua de los cenotes y del acuífero, no solo respecto del pH, cationes y aniones dominantes, sino también la presencia de Al y Si, bajo la dinámica de la interacción agua-roca.

5.5. Parámetros de calidad del agua para irrigación

Los índices de salinidad evaluados, considerando el agua para propósitos de irrigación, se indican en la tabla 5.7. Los valores para la relación de adsorción de sodio (RAS) fueron desde 0.438 hasta 7.681, en tanto que el porcentaje de sodio (PS) presentó un valor mínimo de 90.079 y un máximo de 98.065. El carbonato de sodio

residual (CSR) varió desde -1.057 hasta 3.299 y el índice de permeabilidad (IP) presentó un valor mínimo de 16.95 y un valor máximo de 41.96.

Tabla 5.7. Índices de salinidad para las muestras de agua de los cenotes.

INDICE	XK	PK	ST	BE	HP	CL	HK	AM	YH	YU
RAS	1.416	1.524	1.624	1.194	0.438	0.503	7.681	2.385	4.242	4.313
PS	96.951	97.038	97.682	97.853	97.299	90.079	98.065	97.146	97.370	92.823
CSR	0.694	0.601	1.617	1.942	0.472	1.136	-1.057	-0.407	3.299	2.895
IP	24.62	24.54	27.24	29.32	29.61	32.10	16.95	23.41	23.43	22.87

Tabla 5.7. Continuación.

INDICE	SH	CJ	SM	YO	MC	M1	M2
RAS	1.603	1.600	4.520	1.635	0.845	1.562	1.862
PS	97.716	97.927	97.289	94.569	95.312	94.621	97.376
CSR	1.831	0.847	0.376	0.487	0.950	0.419	0.967
IP	30.68	24.08	25.34	34.31	41.96	32.08	32.30

5.5.1. Relación de adsorción de sodio, RAS

La clasificación de las muestras respecto de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) se realizó mediante los criterios de Richards (1954) y la gráfica de USSL (1954), identificando tres categorías (figura 5.7). El 6 % de las muestras se clasificó como C2S1, salinidad media y riesgo de sodicidad bajo; 6 % como C4S2, salinidad muy alta y riesgo de sodicidad medio y el 88 % restante como C3S1, elevada salinidad y riesgo de sodicidad bajo. Con este diagnóstico las muestras con categorías C2S1 y C3S1 pueden ser empleadas para riego en cultivos salino tolerantes o salino semitolerantes (algodón, cebada, remolacha azucarera, entre otros) bajo condiciones de drenaje suficientemente buenas, para evitar la deposición de sales y la reducción de la permeabilidad de los suelos. Sin embargo, la muestra del cenote Hoka (HK) con categoría C4S2 no es apta para este propósito.

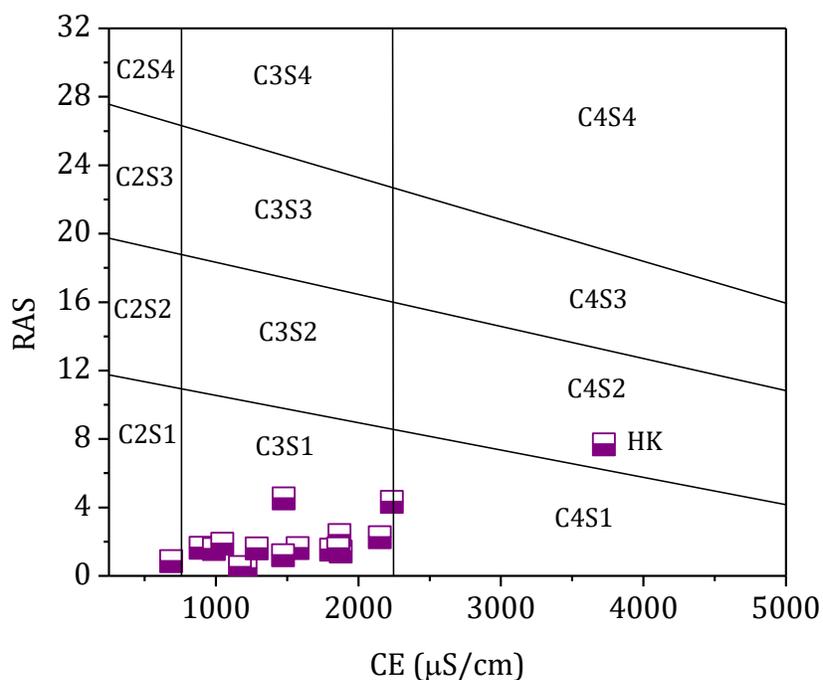


Figura 5.7. Clasificación de las muestras de acuerdo a USSL (1954).

5.5.2. Porcentaje de sodio, PS

La representación gráfica del porcentaje de sodio respecto de la conductividad eléctrica para cada muestra permitió identificar dos categorías de acuerdo a la clasificación de Wilcox (1948). El 23.5 % de las muestras poseen una calidad para la irrigación que va de dudosa a desfavorable (muestras MC, YO, M1 y M2), mientras que el 76.5 % de las muestras se clasifican como desfavorables para esta actividad (figura 5.8).

Las elevadas concentraciones de sodio en el agua favorecen la defloculación y pérdida de la estructura del suelo, modificando sensiblemente la porosidad y la permeabilidad del mismo, afectando el desarrollo normal de los cultivos.

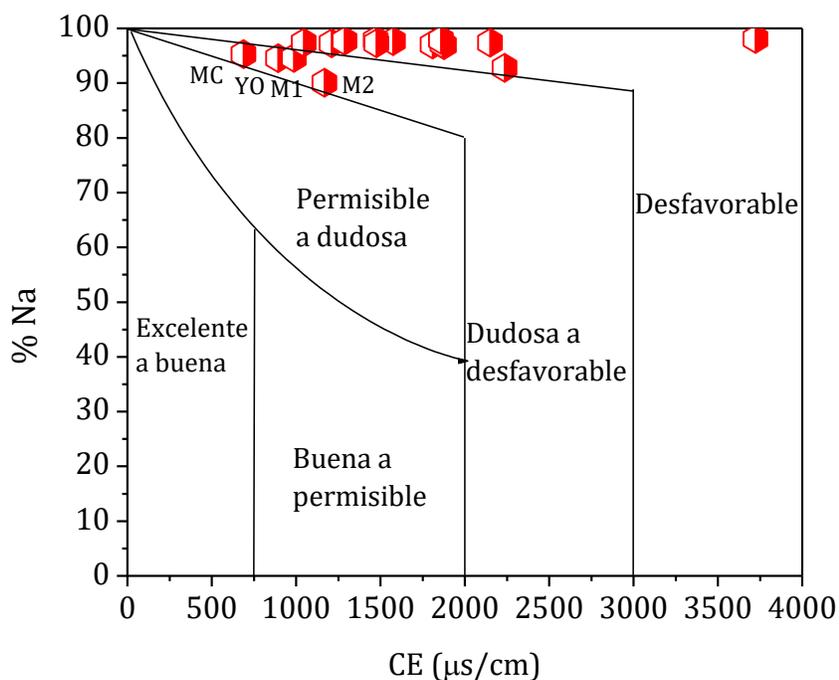


Figura 5.8. Clasificación de las muestras de acuerdo al diagrama de Wilcox (1948).

5.5.3. Carbonato de sodio residual, CSR

Lloyd y Heathcote (1985), clasificaron el contenido de carbonato de sodio residual en aguas de riego en tres categorías: favorables ($CSR < 1.25$); marginales ($1.25 \leq CSR \leq 2.5$) y desfavorables ($CSR > 2.5$). En esta clasificación se considera que la elevada concentración de carbonatos y bicarbonatos en el agua promueven la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} , conservándose en la solución el Na_2CO_3 o el $NaHCO_3$ cuya solubilidad es mayor. En esta situación el Na^+ puede desplazar al Ca^{2+} y al Mg^{2+} del complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo. De acuerdo a esta evaluación el 70.6 % de las muestras se clasificó como favorable, el 17.6 % como marginales y el 11.8 % como desfavorables para la irrigación.

5.5.4. Índice de permeabilidad (IP)

El índice de permeabilidad (IP), respecto de los criterios de Doneen (1962), permite clasificar la calidad del agua para irrigación en tres clases: excelente ($IP > 75$), buena ($25 < IP < 75$) e insatisfactoria ($IP < 25$). De acuerdo con los valores de IP para las muestras, el 41.2 % se clasificaron con calidad insatisfactoria y el 58.8 % con buena calidad.

Es importante destacar que uno de los mayores efectos adversos para los cultivos es la presencia del ión sodio en el agua de riego, ya sea como ion libre, en forma de bicarbonatos o de carbonatos. Esta condición se puede sobreponer si existe un buen drenaje en el suelo o si este elemento se infiltra rápidamente hacia los estratos profundos, lo cual dependerá de la porosidad de los mismos. En el caso del acuífero kártico del Estado de Yucatán, la elevada porosidad de las rocas habilita el uso del agua con fines agrícolas, siempre y cuando se considere el desarrollo de cultivos salino tolerantes o salinos semitolerantes.

5.6. Calidad del agua para consumo humano

La comparación de la composición química de las muestras de agua de los cenotes respecto de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) y de la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1996) para aguas de consumo humano (tabla 5.8), permitieron establecer que el 47 % de las muestras poseen valores de conductividad eléctrica (salinidad) superiores a los límites máximos permitidos. Respecto de la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) y la dureza, el 58.8 % de las muestras superan los valores máximos recomendados.

La representación gráfica de los sólidos totales disueltos contra la dureza de las muestras (figura 5.9), permitió clasificarlas en cuatro categorías (Li et al., 2014): agua dulce-moderadamente dura (5.88 % de las muestras), agua dulce-dura (35.29 %), agua salobre-dura (23.53 %) y agua salobre-muy dura (35.30 %). La Organización Mundial de la Salud ha considerado que el incremento en la salinidad, en la

concentración de los sólidos totales disueltos STD y en la dureza de las aguas para consumo humano, modifican sus propiedades organolépticas, sin embargo, no se han observado repercusiones importantes en la salud (WHO, 2011).

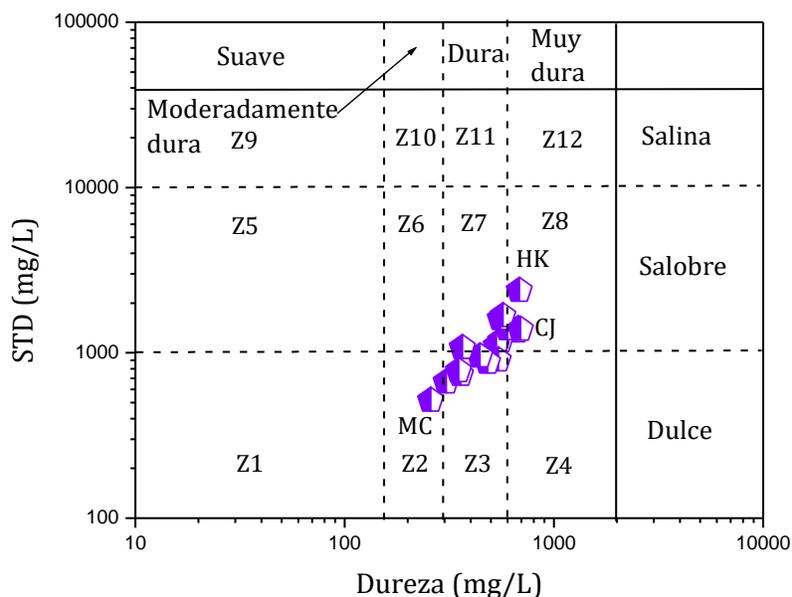


Figura 5.9. Clasificación de las muestras de agua en función de la dureza y los sólidos totales disueltos (Li et al., 2014).

Otros componentes químicos sobrepasan los valores establecidos en las normas, siendo para sodio el 17.6 % de las muestras, para los bicarbonatos el 70.6 % y en el caso de los cloruros el 11.8 % de las muestras. Respecto de los componentes traza, el 100 % de las muestras supera los límites máximos permisibles para aluminio, el 58.8 % respecto de arsénico y el 52.9 % para amonio (WHO, 2011), el resto de los componentes presentan valores permisibles. Adicionalmente se ha evidenciado la presencia de fosfatos en el 82.35 % de las muestras.

La representación gráfica de la distribución de los valores de la conductividad eléctrica, la dureza, arsénico y amonio en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados se presenta en las figuras 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 (construcción propia

apoyada por el programa Surfer V8). De acuerdo a la distribución de las especies, se puede apreciar que los valores máximos de la conductividad eléctrica (lo cual incluye a todas las especies iónicas), la dureza y el arsénico (así como amonio) se encuentran localizados directamente en los cenotes, haciendo referencia a que estos componentes son originados de manera puntual, es decir generados naturalmente por la interacción agua-roca, tal como se ha descrito previamente en la sección 5.4 (ver la composición química de las rocas en la sección 5.1.3). En el caso del amonio, éste podría derivarse de la descomposición de las plantas y organismos en las proximidades de los cenotes.

Es importante mencionar que aún cuando los componentes químicos presentes en el agua pueden tener un origen natural, no debe descartarse la posibilidad de una perturbación antropogénica, problemática que enfrenta el acuífero debido a sus características hidrogeológicas (DOF, 2013).

Tabla 5.8. Límites máximos permisibles de algunos parámetros fisicoquímicos en aguas de consumo humano.

PARÁMETROS	Límite máximo permisible México, NOM-127-SSA1-1994	Límite máximo permisible WHO (2011)
Físicos		
pH	6.5-8.5	6.5-8.5
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	*	1500
STD (mg/L)	1000	1000
Dureza (mg/L)	500	500
Componentes mayores (mg/l)		
Na ⁺	200	200
K ⁺	*	*
Mg ²⁺	*	150
Ca ²⁺	*	200
HCO ₃ ⁻	*	600
Cl ⁻	250	250
SO ₄ ²⁻	400	500
Componentes traza (mg/l)		
Al ³⁺	0.20	0.20
As ³⁺	0.025	0.01
NH ₄ ⁺	0.50	0.20

*Sin referencia

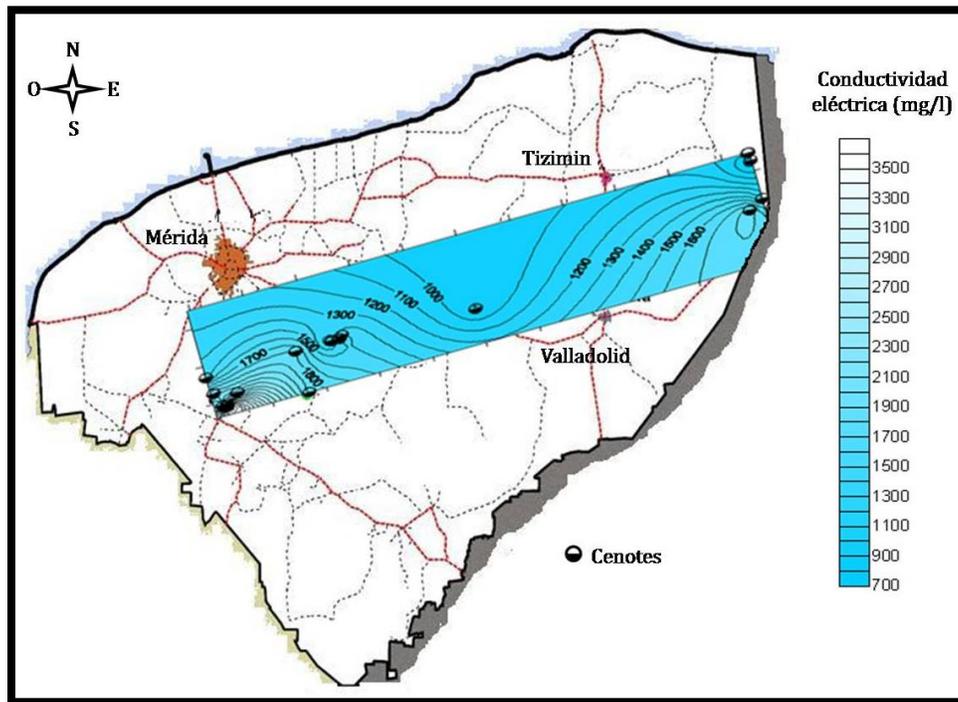


Figura 5.10. Distribución de la conductividad eléctrica en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.

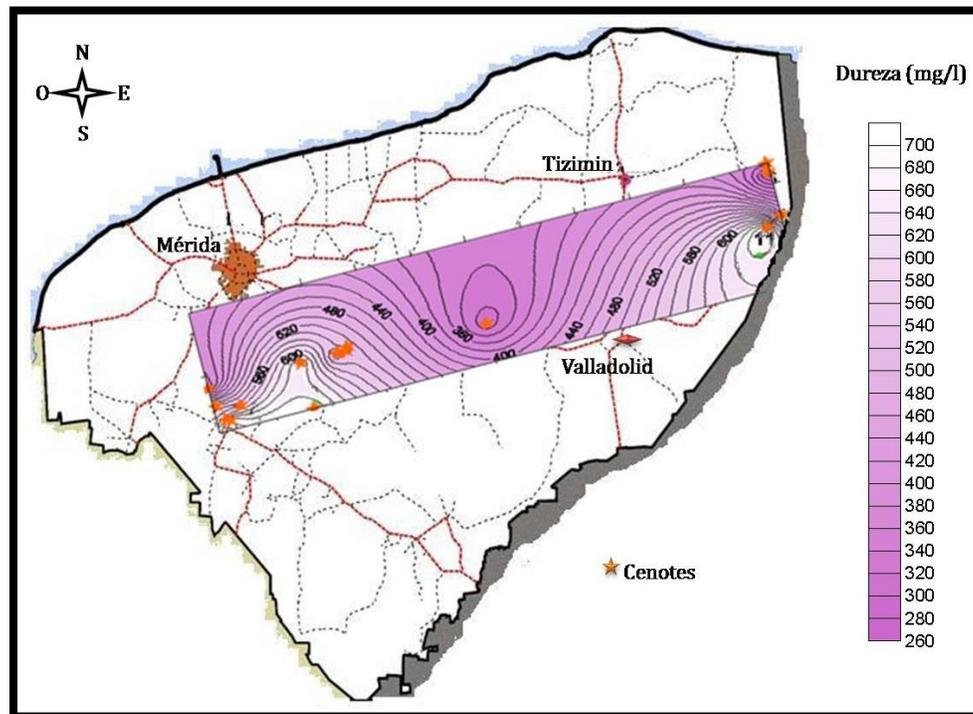


Figura 5.11. Distribución de la dureza en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.

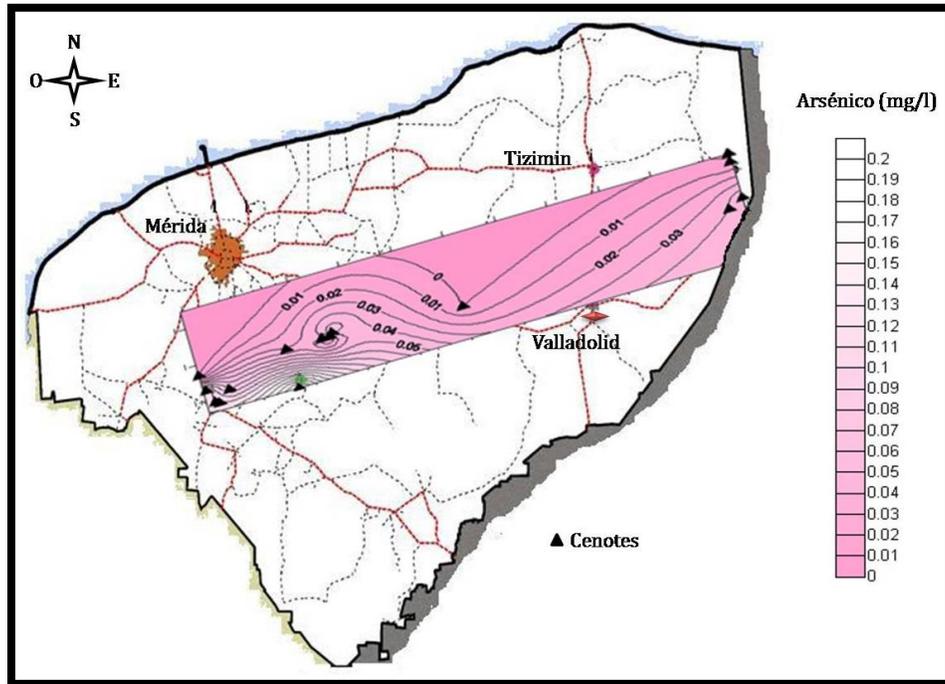


Figura 5.12. Distribución de arsénico en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.

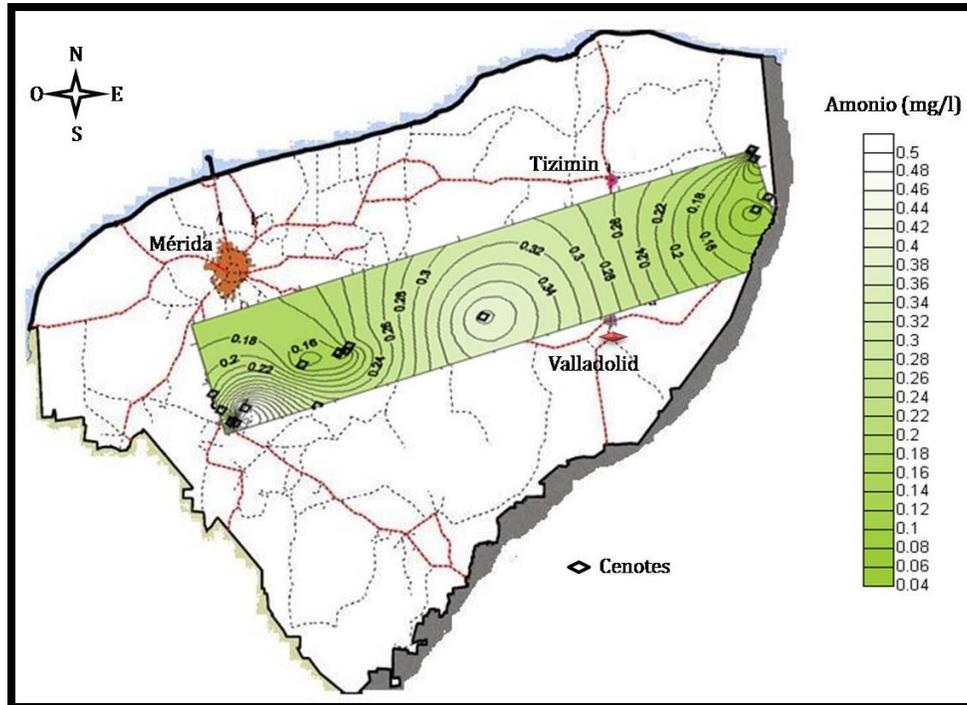


Figura 5.13. Distribución de amonio en el transecto correspondiente a los cenotes muestreados.

CONCLUSIONES



Cenote Yaal Utzil, Abala, Yucatán, México.



Conclusiones

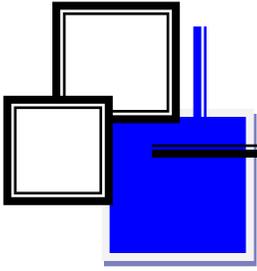
El análisis mineralógico de las rocas de los cenotes mediante difracción de rayos X, permitió establecer que se encuentran constituidos por calcita y dolomita. La composición química obtenida por ICP es consistente con la mineralogía, sin embargo, la presencia de As_2O_3 y PbO en bajas concentraciones podrían constituir un riesgo ante la probable disolución de las rocas, incorporando As^{3+} y Pb^{2+} al acuífero del Estado de Yucatán.

La evaluación de las características hidroquímicas del grupo de cenotes del Estado de Yucatán, permitió establecer que el agua presenta una naturaleza atmosférica-litotrófica con un dominio de interacción agua-roca, cuya facie dominante es $Ca-HCO_3$, siendo la disolución de minerales como calcita, aragonita, dolomita, halita y caolinita quienes aportarían los principales constituyentes químicos al acuífero.

De acuerdo a las características fisicoquímicas del agua, se considera que su aplicación para propósitos de irrigación es adecuada para cultivos salino-tolerantes y salino-semitolerantes, en virtud de que el drenaje de la región es apropiado para ello, sin embargo, las evaluaciones periódicas son necesarias debido a que el proceso de salinización del acuífero podría limitar las actividades agrícolas en el largo plazo.

Respecto a la calidad del agua para consumo humano, se considera que los valores de conductividad eléctrica, dureza y sólidos totales disueltos, así como la presencia de arsénico, aluminio, amonio y fosfatos en cantidades traza, limitan su uso para este propósito, haciéndose necesaria su purificación y/o tratamiento.

Debido a la naturaleza y vulnerabilidad del acuífero kárstico del Estado de Yucatán se recomienda la evaluación periódica de la calidad del agua bajo una perspectiva integral, no solo para su conservación, sino también para establecer las estrategias de remediación o tratamiento que favorezcan el uso sustentable de este valioso recurso.



REFERENCIAS



Cenote Montecristo 1, Tizimin Yucatán, México.





- Aguilar Duarte, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, C. (2013). Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 16(2), 243-263.
- Alonso-Zarza, A.M., Muñoz Barco, P., Martínez Flores, E. (2015). *Monumento Natural Cueva de Castañar: Un laboratorio natural*. Consejería de Medio Ambiente y Rural, Políticas Agrarias y Territorio.
- Andreu, J. M., Calaforra, J. M., Cañaveras, J. C., Cuezva, S., Durán, J. J., Garay, P.,... Sánchez-Moral, S. (2016). Karst: Un concepto muy diverso. *Enseñanzas de las ciencias de la Tierra*, 24(1), 6-20.
- APHA, American Public Health Association. (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Ed. Washington DC: APHA, AWWA, WEF, 1-45.
- Archie, G.E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 36: 278-298.
- Batllori, E. (2016). Condiciones actuales del agua subterránea en la Península de Yucatán. En: M. Chávez (Ed.), *El manejo del agua a través del tiempo en la península de Yucatán* (201-224). Yucatán, México. CCPY, UADY, FUNDACION GONZALO RIO ARRONTE IAP.
- Bauer-Gottwein, P., N. Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). The Yucatán Península karst aquifer, México. *Hydrogeol. J.*, 19 (3), 507-524. DOI: 10.1007/s10040-010-0699-5
- Bautista, F y Palacio, G. (2011). Península de Yucatán. En P. Krasilnikov, F. J. Jiménez Nava, T. Reyna Trujillo, & N. E. García (Eds.), *Geografía de los suelos de México* (355-406). México D.F., México: Facultad de ciencias.
- Bautista, F., Palma-López, D., & Huchin-Malta, W. (2005). Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.), *Caracterización y manejo de los suelos de la península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales* (105-122). México: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bautista Zuñiga, F. (2011). Suelos. En: R. Durán y M. Méndez (Eds). *Biodiversidad y*



- Desarrollo Humano en Yucatán* (14-16). Mérida, México. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E. & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la Península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 14 (83), 32-35.
- Bernal, J. P. y Uruchurtu, G. (2011). Revelaciones de una cueva. *¿Cómo ves? Revista de divulgación de la ciencia de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, No. 155.
- Bitácora ambiental del programa de ordenamiento ecológico territorial de Yucatán (POETY). (2007). Recuperado el 15 de abril de 2018 en <http://www.bitacoraordenamiento.yucatan.gob.mx/documentos/detalles.php?IdArchivo=1583>
- Chebotarev I.I. (1955) Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta* 8, 22-48, 137-170, 198-212.
- Collazo Caraballo, M., P., & Montaña Xavier, J. (2012). Manual de agua subterránea. Montevideo, Uruguay: *Ministerio de ganadería agricultura y pesca dirección general de desarrollo rural*, 978-9974.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2002). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Península de Yucatán, Estado de Yucatán.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2017). Estadísticas del agua en México. Edición 2017. México: Comisión Nacional del Agua.
- Crespo, I. O., & Rodríguez, M. G. (2010). Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *M+ A, revista electrónica de medioambiente*, (9), 15-35.
- Departamento General de Irrigación. (2016). Recuperado el 23 de Abril de 2018 en http://aquabook.agua.gob.ar/407_0
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (1996). Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Secretaría de Salud. Recuperado el 7 de



marzo de 2018
en <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Secretaría de Salud. Recuperado el 10 de febrero de 2019 en http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=31/12/1969

DOF, Diario oficial de la Federación. (2013). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Península de Yucatán, clave 3105, estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Recuperado el 27 de marzo de 2018 en http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312870&fecha=04/09/2013&print=true

Doneen, L. D. (1962). The influence of crop and soil on percolating water. *In Proc 1961 Biennial conference on Groundwater Recharge*, 156-163.

Drever, J. I. (2002). The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments. 3rd Ed. Prentice-Hall, 24-26.

Dunham, R. J. (1962). Clasificación de las rocas de carbonatos de acuerdo a la textura de deposición. *Asociación americana de geólogos de petróleo*, 108-121.

Duran Juárez, J. M. & Torres Rodríguez A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media. *Espiral*, 12 (36), 129-162.

EPA, U. (1993). Wellhead protection: a guide for small communities. *Office of Research and Development Office of Water, Washington (EPA/625/R-93/002)*.

Fernández, R., Baquero, J. C., Lorca, D., y Verdejo, J. (2003). Acuíferos kársticos costeros, introducción a su conocimiento. *Memoria de TIAC*, (3), 3-30.

Fleury, S. (2009). Chapter 1. Karst Processes, Landforms and Issues. *In Land Use Policy and Practice on Karst Terrains: Living on limestone*. Springer Science & Business Media. DOI 10.1007/978-1-4020-9670-9 1, C _.

Flores Guido, J. S., Durán García, R. y Ortíz Díaz, J. J. (2010). Comunidades vegetales



- terrestres. En: R. Durán y M. Méndez (Eds). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (125-129). Mérida, México. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, 576.
- Foster, S. S., Lawrence, A., & Morris, B. (2001). *Las aguas subterráneas en el desarrollo urbano: evaluación de las necesidades de gestión y formulación de estrategias* (390). Banco Mundial Washington, D.C.
- Garcial Gil, G., & Graniel Castro, E. (2010). Geología. En: R. Durán y M. Méndez (Eds). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (4-6). Mérida, México. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962), 1088-1090.
- Gobierno del Estado de Yucatán. (2018). Recuperado el 10 de febrero de 2018 en <http://www.yucatan.gob.mx/estado/>
- Graniel, C. E., Morris, L. B., & Carrillo-Rivera, J. J. (1999). Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico. *Environmental Geology*, 37(4), 303-312.
- Heise, L. (2013). *Dynamics of the coastal karst aquifer in Northern Yucatán península* (tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- INEGI. (2002). Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán. Recuperado el 25 de abril de 2018 en http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/70282524165.pdf
- INEGI. (2012). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Perspectiva estadística Yucatán*, 98.
- INEGI. (2016). Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán, 17-21.



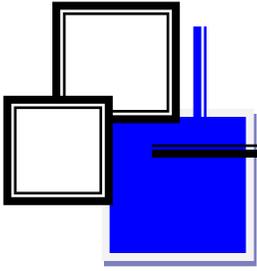
- Langford, J.I., & Louer, D. (1996). Powder Diffraction. *Rep. Prog. Phys.*, 59, 131-234.
- Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. 1st Ed. Prentice-Hall, 193-247.
- Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2014). Hydrogeochemistry and quality assessment of shallow groundwater in the southern part of the Yellow River alluvian plain (Zhongwei Section), Northwest China. *Eart. Sci. Res. J.* 18 (1), 27-38.
- Lloyd, J. W., & Heathcote, J. A. (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction*. 1st Ed. Clarendon, 294.
- Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., & Escolero, O. A. (2000). Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, México. *Geofísica Internacional*, 39 (4), 359-365.
- Marín, L. E., Pacheco, J., & Escolero, O. (2003). Groundwater as a socio-economic constraint: the Yucatan Peninsula, Mexico example. *RMZ -Materials and Geoenvironment*, 50 (1), 217-219.
- Marschoff, C. M. (2012). La contaminación del agua subterránea. *Petrotecnia*, 66-69.
- MATCH! (2011). Phase identification from Powder Diffraction, V 1.11e. Crystal Impact.
- Mifflin, M. (1988). Region 5, Great Basin in Back, W., Rosenshein, J.S and Seaber, P.R. Hydrogeology, Geological Society of America, 69-77.
- Munsell. (2009). *Geological Rock-color Chart: With Genuine Munsell Color Chips*. Munsell color.
- Pacheco A., J., & Cabrera S., A. (1997). Groundwater Contamination by Nitrates in the Yucatán Peninsula, México. *Hydrogeology J.*, 5(2), 47-53.
- Parkhurst, D.L., & Appelo, C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC (ver. 2): A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water Resources Investigation Report, 99, 4259, 312.



- Pendás Fernández, F. (1993). *Acuíferos costeros e intrusión marina*. Universidad de Oviedo. Recuperado el 18 de octubre de 2018 en <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro34/pdf/lib34/14.pdf>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. *Am. Geophys. Unios Trans*; Vol. 25, 914-123.
- Richards L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline alkali soils. *Agriculture*, Vol. 160. Handbook 60. *Washington DC: US Department of Agriculture*.
- Ruiz-Silva, J., Rivadeneyra J., Pacheco A., Sosa-Escalante, J. & Morales-Arjona, J. (2007). Caracterización de los cenotes y Grutas del Estado de Yucatán, México. *Secretaría de Ecología. Gobierno del estado de Yucatán*. 215.
- Sadzawka, R.A. (2006). Métodos de análisis de aguas para riego. (Serie Actas INIA No. 37). Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Sánchez-San Roman, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Createspace Independent Pub., 414.
- Sander, H.J. (1967). Classification of carbonate rocks of marine origin. *Bull. AAPG* 51: 325-336.
- SDS, Secretaría de Desarrollo Sustentable. (s.f). Los cenotes. Recuperado el 12 de julio de 2018 en <http://www.sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/introduccion.php>
- SEDUMA, Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. (2018). Flora. Gobierno del Estado de Yucatán. Recuperado el 10 de agosto de 2018 en <http://www.yucatan.gob.mx/?p=flora>
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental*. México. 2013. Recuperado el 2 de noviembre de 2018 en https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional. (2019). Recuperado el 8 de abril de 2019 en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>



- Steinich, B., & Marín, L. E. (1996). Hydrogeological Investigations in Northwestern Yucatan, México, Using Resistivity Surveys. *Groundwater*, 34(4), 640–646.
- U.S.G.S, United States Geological Survey (s.f.) What is Karst?. Recuperado el 15 de Mayo de 2018 en <https://water.usgs.gov/ogw/karst/pages/whatiskarst>
- USSL. (1954). Classification of irrigation waters. US Department of Agriculture, Circular 969. Washington.
- Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Troche-Souza, C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J. A.,...Ressl, R. (2017). Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, 128.
- Van Wirdum, G. (1980). Description of water-quality changes in a hydrological cycle for the purpose of nature conservation. In J.C. Hooghart (Ed.). *Water quality in groundwater-flow systems*. (Reports and notes 5, 118-143). The Hague, The Netherlands: Commission for Hydrological Research TNO.
- Weiner, E. R. (2013). Applications of environmental aquatic chemistry: a practical guide. 3rd Ed. CRS Press, 74-94.
- Welcher, F.J. (Ed.). (1995). Standard methods of chemical analysis. 6th Ed. Vol. 2, Part B. New York: Krieger Publishing Company, 161-170.
- WHO, World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality. 4th Ed. WHO Press, 307-442.
- Wilcox, L.V. (1948). The quality of water for irrigation use. US Dept. of Agriculture, Tech. Bull., 962, Washington, D.C., 1-40.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2018). The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions for water. Paris, UNESCO.



GLOSARIO





GLOSARIO

Significado de los nombres de los cenotes. Fuente: Erick Sosa Rodríguez.

No.	Nombre del cenote	Significado
1	Xpakay	Nombre de un ave de la región
2	Papakal	Mancha de lodo
3	Subinteh	Lugar de acacias
4	Bebelchen	Camino de pozo
5	Huolpoch	Víbora cantil
6	Chulul	Madera en el agua
7	Hoka	Huevo de abeja
8	Aymil	Nombre de un ave de la región
9	Yoha	Encima del agua
10	Yaal Utzil	Buen hijo
11	Saac-ha	Agua blanca (cristalina)
12	Choj-Ha	Agua que gotea
13	Sambula	Agua con arena a los costados
14	Yokdzonot	Encima del cenote
15	Manuel Carrera	Nombre propio
16	Montecristo 1	Nombre propio
17	Montecristo 2	Nombre propio

Nombres comunes de árboles característicos en Yucatán (SEDUMA, 2018).

Nombre en maya.	K'axixkooch
Familia	Cecropiaceae.
Nombre Científico	Cecropia obtusifolia Bertol.
Nombre común en español	Guarumo
Breve descripción de la especie	árbol perennifolio, de 20 a 25 m de altura; copa en forma de sombrilla, verde oscuras y brillantes, tronco cilíndrico, hueco en el centro; corteza lisa,gris clara.



Nombre en maya.	Y axché
Familia	Bombacaceae
Nombre Científico	Ceiba pentandra (L.) Gaertn.
Nombre común en español	Ceiba, pochote.
Breve descripción de la especie	Árbol de los más grandes en la América tropical, caducifolio, de 20 a 40 m (hasta de 70 m) de altura, copa redondeada o plana, tronco cilíndrico sólido y grueso.

Nombre en maya.	Chaká
Familia	Burseraceae
Nombre Científico	Bursera simaruba (L) Sarg.
Nombre común en español	Palo mulato
Breve descripción de la especie	Árbol de hasta 15 mts de altura, con el tronco recto, escamoso y muy ramificado en la copa; las flores son pequeñas de color crema-verdoso muy aromática.