



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis interdisciplinario de los procesos de
contaminación del agua subterránea en el noreste de
Yucatán

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Manejo Sustentable de Zonas Costeras

P R E S E N T A:

Alexis Cervantes Pichardo

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Flor Elisa del Rosario Árcega Cabrera



Sisal, Yucatán, México. 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno
Cervantes
Pichardo
Alexis
5951149605
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras
312232353
2. Datos del tutor
Dra.
Flor Elisa del Rosario
Árcega
Cabrera
3. Datos del sinodal 1
Dra.
María del Carmen Aurora
Carmona
Lara
4. Datos del sinodal 2
Dr.
Óscar Arnoldo
Escolero
Fuentes
5. Datos del sinodal 3
Dra.
María Cristina
Garza
Lagler
6. Datos del sinodal 4
Dra.
Elsa
Noreña
Barroso
7. Datos del trabajo escrito
Análisis interdisciplinario de los procesos de contaminación del agua subterránea en el noreste de Yucatán.
77 pp.
2019

“El hombre no puede descubrir nuevos océanos a menos que tenga el valor de perder
de vista la costa.”

André Gide, Premio Nobel de Literatura en 1947 (1869 – 1951).

"La actitud del hombre contemporáneo se asemeja a la de aquellos tripulantes de un navío que, cansados de la angostura e incomodidad de sus camarotes, decidieran utilizar las cuernas de la nave para ampliar aquéllos y amueblarlos suntuosamente. Es incontestable que, mediante esta actitud, sus particulares condiciones de vida mejorarán, pero, ¿por cuánto tiempo? ¿Cuántas horas tardaría este buque en irse a pique – arrastrando a culpables e inocentes- una vez que esos tripulantes irresponsables hubieran destruido la arquitectura general de la nave para refinar sus propios compartimientos?"

*Aparte del discurso de D. Miguel Delibes, con motivo de su ingreso en la Real Academia Española el
25 de mayo de 1975.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México: Pilar de nuestra Nación, casa del pensamiento crítico y centro de la formación con sentido humano.

Al laboratorio de Ciencias Ambientales Costeras de la Unidad de Química – Sisal por abrirme las puertas para desarrollar mi trabajo de titulación.

Al Núcleo Interdisciplinario de Derecho, Sociedad y Ambiente del Instituto de Investigaciones Jurídicas, por permitirme integrarme a su grupo de trabajo durante en mi estancia en la Ciudad de México.

A la Dra. Rosa María Leal Bautista (Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán), al Dr. Pedro Robledo Ardila (Instituto Geológico y Minero de España) y al Dr. Iñaki Vadillo Pérez (Universidad de Málaga) por el apoyo en el tratamiento y análisis de muestras derivadas de este trabajo.

A mi Comité Tutoral, por la revisión de este trabajo y la emisión de sus correcciones.

A Elizabeth Lamas Cosío e Ismael Ocegüera Vargas, por su asistencia y supervisión dentro del laboratorio y en campo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) de la UNAM que me permitió desarrollar este trabajo, otorgándome una beca, bajo el proyecto con número de registro PE200518.

Agradecimientos especiales al Dr. Víctor Amaury Simental Franco, por su disposición a apoyarme de manera independiente en el desarrollo del análisis jurídico de este trabajo.

Gracias.

Agradecimientos personales

A la vida, por demostrarme que todos merecemos la oportunidad de redimirnos siempre y cuando tengamos el valor para cambiar y la voluntad para ofrecer cada día la mejor versión de uno mismo.

A mi familia: Elizabeth Pichardo Ramírez, Ernesto Cervantes Flores y Ernesto Cervantes Pichardo, por todo el amor y los sacrificios hechos a lo largo de mi vida. Una mención en este apartado me queda muy corta para expresarles mi cariño y gratitud.

A Juan Carlos Pichardo Ramírez, quien siempre le ha tenido fe a mis esfuerzos y que me ha brindado su apoyo incondicional en los aspectos académicos y económicos a lo largo de mi formación como profesionista y como persona.

A la Dra. Flor Árcega Cabrera, a quien le debo el alto honor de haber sido su pupilo. Gracias por su confianza y por enseñarme a no perder el sentido crítico de la realidad y a dar lo mejor de mí mismo en todo momento.

A la Dra. Carmen Carmona Lara, por las oportunidades que me ha brindado y por acompañarme en esta transición profesional. Gracias por inspirar a los estudiantes de las llamadas “ciencias duras” a involucrarse en la defensa de nuestros recursos naturales desde la trinchera jurídica.

Al Dr. Óscar Escolero Fuentes, quien me brindó la oportunidad de entrar como oyente a su clase de posgrado y por asesorarme de manera incondicional en todo momento.

A Adrián Rodríguez, Azeneth Salmerón, Brenda Garzón, Emmanuel Rodríguez, Hiram Zayola, Iván García, José Juan Parga, Karen Ríos, Melissa Sandoval, Pamela Sánchez, Nayeli Abarca y Valery Ávila, quienes me honran con su amistad y a quienes agradezco por las aventuras, las risas, los altibajos y el aprendizaje durante los tres años en los que Sisal fue mi hogar.

A Ana Laura Acuña, Carlos Maldonado, Dante López, Jaime Casarrubias y Saraí Rodríguez, por su amistad, apoyo incondicional y por el cálido recibimiento en el equipo de trabajo.

Finalmente, pero no menos importante, a la Dra. María Leticia Arena, al M. en C. Armando Carmona, a la M. en C. Yajaira García, a la Dra. Ma. Cristina Garza, a la Dra. Maite Mascaró, a la Dra. Cecilia Robles, al M. en Est. Reg. Leobardo Terpán y a la Dra. Laura Elena Vidal, por su inspiradora labor como docentes de la Facultad de Ciencias y por exhortarme siempre a esforzarme y a salir de mi zona de confort.

A todos ustedes: Gracias totales.

Resumen

El papel del agua subterránea en el funcionamiento de los ecosistemas y en el sustento de las sociedades y de sus actividades económicas le confiere una importancia relevante para el desarrollo de la vida misma. Sin embargo, en los últimos tiempos se ha hecho evidente que este recurso ha sido negativamente modificado por los crecientes procesos de contaminación, desatando una serie de problemas ambientales que repercuten en el bienestar de los ecosistemas y en el de los seres humanos.

El desarrollo de este trabajo tiene como objetivo analizar los procesos de contaminación en el noreste de Yucatán, ya que se trata de una zona muy poco estudiada pese a las relevantes condiciones socioeconómicas e hidrogeológicas presentes en ella. Este trabajo, parte de un esfuerzo interdisciplinario que busca integrar el contexto hidrogeoquímico, con los factores socioeconómicos involucrados en los procesos de contaminación en el área de estudio y del marco normativo relacionado con la prevención y control de contaminación del agua subterránea con el fin de comprender el deterioro del recurso hídrico.

Para el análisis hidrogeoquímico se llevó a cabo una campaña de muestreo en septiembre de 2016, en un polígono comprendido entre los municipios de Calotmul, Espita, Panabá, Sucilá y Tizimín. Se establecieron 13 estaciones de muestreo, en dolinas que localmente son conocidas como cenotes y en una aguada. *In situ*, se determinaron parámetros físicoquímicos y se recolectaron muestras de agua de la superficie para llevar a cabo los análisis de iones mayores, presentes en el agua, así como, de los contaminantes a considerar para este trabajo de investigación: arsénico, nitrato y coliformes fecales.

De la investigación *in situ*, de los análisis de laboratorio realizados y de la búsqueda de los parámetros oficiales, se pudo corroborar que no existen instrumentos normativos que regulen las descargas de arsénico, nitrato y coliformes fecales al agua subterránea, por lo que surge la necesidad de formular una Norma Oficial Mexicana que defina los límites máximos permisibles de los contaminantes arsénico, nitrato y coliformes fecales en el acuífero de la Península de Yucatán. En este trabajo se pudo determinar, que en temporada de lluvias los patrones de contaminación tienen un componente puntual y suelen manifestarse de diferente

manera, según los esquemas de uso de suelo y las características de las zonas de muestreo, este hecho podría verse modificado en temporada de estiaje.

Las labores de gabinete consistieron en recabar información oficial y contar con los elementos necesarios para analizar los factores socioeconómicos del área de estudio que contribuyen a los procesos de contaminación del agua subterránea y al detrimento de su calidad, a través de indicadores demográficos, de servicios públicos y de uso de suelo. Por otro lado, se consultó la legislación, las sentencias jurisprudenciales y el marco institucional que se relacionan con el control y prevención de la contaminación de las aguas del subsuelo.

Para la integración de los contextos hidrogeoquímico, socioeconómico y normativo, se identificó la necesidad de reconocer de manera explícita a las aguas del subsuelo como bienes de la Nación con la finalidad de que desde el punto de vista institucional permita integrarlo a una política de seguridad nacional.

El presente trabajo establece las bases para que el estado de Yucatán, desde una perspectiva sistémica, tenga un marco normativo e institucional acorde a sus contextos hidrogeoquímico y socioeconómico con el fin de contar con un marco regulatorio, para su condición de acuífero en el que se establezcan mecanismos de gestión adecuados para asegurar la participación de los usuarios y de los interesados en general.

A su vez, resulta necesario que se expida una Ley General de Aguas Nacionales que sea clara en cuanto a la manera en que se gestionan los acuíferos y a la naturaleza de las regiones hidrológico-administrativas, que para el caso de Yucatán es considerarla administrativamente como una sola unidad, ya que su hidrogeología es la de un acuífero.

Tabla de contenido

Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del área de estudio.....	4
1.3 Planteamiento del problema: La vulnerabilidad del acuífero ante los procesos de contaminación.....	8
1.4 Antecedentes y justificación.....	9
1.5 Pregunta de investigación	10
1.6 Objetivo general.....	10
1.7 Objetivos particulares.....	11
1.8 Hipótesis.....	11
1.9 Delimitación del área de estudio.....	11
1.10 Metodología general	12
Capítulo II: Análisis hidrogeoquímico en el noreste de Yucatán: Descripción del sistema natural	14
2.1 Generalidades	14
2.1.1 Isótopos de hidrógeno (H) y oxígeno (O)	14
2.1.2 Composición química natural del agua subterránea.....	16
2.2 Metodología	17
2.2.1 Isótopos estables del agua: $\delta^{18}\text{O}$ y δD	17
2.2.2 Iones mayores del agua.....	18
2.3 Resultados	19
2.3.1. Isótopos estables del agua: $\delta^{18}\text{O}$ y δD	19
2.3.2 Control de calidad de las muestras	20
2.3.3 Hidroquímica del agua subterránea en el área de estudio: Diagrama de Piper	22
2.3.4 Evolución hidrogeoquímica en el área de estudio: diagrama de Mifflin	24

Capítulo III: Aspectos generales del contexto socioeconómico que contribuyen a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio.....	30
3.1 Generalidades	30
3.1.1 <i>Arsénico (As)</i>	32
3.1.2 <i>Coliformes fecales (E. coli)</i>	33
3.1.3 <i>Nitrato (NO₃⁻)</i>	33
3.2 Metodología.	34
3.2.1 <i>Análisis de los aspectos antropogénicos que desencadenan los procesos de contaminación en el área de estudio</i>	34
3.2.2 <i>Determinación de la concentración de contaminantes en el agua subterránea del área de estudio ...</i>	34
3.3 Resultados	35
3.3.1 <i>Aspectos socioeconómicos que contribuyen a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio</i>	35
3.3.2 <i>Procesos de contaminación en el agua subterránea</i>	40

Capítulo IV: Análisis del marco normativo de la regulación aplicable a la prevención y control de la contaminación del agua subterránea	46
4.1 Introducción	46
4.2 Metodología	47
4.3 Resultados	48
4.3.1 <i>El artículo 27 constitucional y el agua subterránea</i>	48
4.3.3 <i>Modelo y competencias en materia de prevención y control de la contaminación del agua subterránea: El papel de la CONAGUA</i>	50
4.3.4 <i>Instrumentos relacionados a la prevención y el control de la contaminación del agua subterránea</i>	53
4.3.5 <i>La legislación de Yucatán ante los procesos de contaminación del agua subterránea</i>	56
4.3.6 <i>Las aguas residuales, sus propietarios y los municipios en el contexto de la contaminación del agua subterránea en Yucatán</i>	58
4.3.7 <i>La participación ciudadana y los problemas de contaminación del agua subterránea</i>	59
4.3.8 <i>El cumplimiento del DHAS como asunto de seguridad nacional</i>	61

Capítulo V: Integración y conclusiones	63
5.1. Integración y conclusiones.....	63
5.2. Propuestas derivadas del trabajo de investigación.....	64
5.3. Alcances del trabajo de investigación y oportunidades de investigación.....	66
Referencias	68
Bibliografía y mesografía	68
Legislación y sentencias jurisprudenciales.....	75
Recursos empleados para la elaboración del material cartográfico	76

Índice de figuras

<i>Figura 1. Sistemas de flujo de agua subterránea propuestos por Tóth (1963). Fuente: USGS (2016b) con modificación propia.</i>	2
<i>Figura 2. Conexión e interacción del agua subterránea con otros ecosistemas. Fuente: Halifax (2017) con modificación propia</i>	3
<i>Figura 3. Clasificación geológica de la Península de Yucatán. Fuente: García- Gil & Graniel-Castro (2010).</i>	5
<i>Figura 4. Flujos de agua subterránea del acuífero de la Península de Yucatán. Fuente: Bauer-Gottwein et al. (2011) con modificación propia.</i>	7
<i>Figura 5. Área de estudio y estaciones de muestreo para la caracterización hidrogeoquímica y evaluación de la calidad del agua.</i>	12
<i>Figura 6. Esquema metodológico integral para el análisis interdisciplinario de los procesos de contaminación en el área de estudio.</i>	13
<i>Figura 7. Valores de las firmas isotópicas del agua contrastados con la línea meteórica mundial (LMM).</i>	19
<i>Figura 8. Enriquecimiento isotópico del $\delta^{18}\text{O}$ en el área de estudio.</i>	20
<i>Figura 9. Diagrama de Piper con facies hidroquímicas y tipos de agua de las muestras de agua.</i>	22
<i>Figura 10. Representación espacial del diagrama de Piper en el área de estudio.</i>	23
<i>Figura 11. Gráfico del análisis clúster de las muestras de agua.</i>	25
<i>Figura 12. Diagrama de Mifflin de las muestras de agua del área de estudio clasificadas conforme al análisis clúster.</i>	26
<i>Figura 13. Evolución hidrogeoquímica en el área de estudio.</i>	27
<i>Figura 14. Gráfico del análisis de componentes principales.</i>	29
<i>Figura 15. Porcentaje de los tipos de cultivos en el área de estudio para el 2016. Fuente (SIAP, 2017b).</i>	36
<i>Figura 16. Porcentaje de los tipos de cultivos en el área de estudio para el 2016. Fuente (SIAP, 2017b).</i>	37
<i>Figura 17. Volúmenes de producción de ganado bovino en el área de estudio por municipio. Fuente (SIAP, 2017a)</i>	37
<i>Figura 18. Mapa de uso de suelo y vegetación en los municipios del área de estudio.</i>	38
<i>Figura 19. Concentración de nitrato (mg L^{-1}) en el agua subterránea del área de estudio.</i>	41
<i>Figura 20. Concentración de <i>E. coli</i> (NMP 100mL^{-1}) en el agua subterránea del área de estudio.</i>	42
<i>Figura 21. Gráfico del MRL para \log_{10} <i>E. coli</i> (NMP 100mL^{-1}) \sim NO_3^- (mg L^{-1}).</i>	43
<i>Figura 22. Normalidad de los residuales del MRL para \log_{10} <i>E. coli</i> (NMP 100mL^{-1}) \sim NO_3^- (mg L^{-1}).</i>	44
<i>Figura 23. Complejidad espacial administrativa del agua subterránea en el área de estudio.</i>	53

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Isótopos estables del agua. Fuente: Clark (2015)</i>	15
<i>Tabla 2. Composición isotópica del agua subterránea de las estaciones de muestreo.</i>	19
<i>Tabla 3. Balance iónico de las muestras de agua.</i>	21
<i>Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua.</i>	25
<i>Tabla 5. Resultados para la construcción del diagrama de Mifflin conforme al análisis clúster.</i>	26
<i>Tabla 6. Resultados del análisis de componentes principales (ACP) para el área de estudio.</i>	28
<i>Tabla 7. Cálculo de las correlaciones entre las variables y los componentes principales.</i>	28
<i>Tabla 8. Habitantes al 2015 en el área de estudio por municipio. Fuente (INEGI, 2017).</i>	36
<i>Tabla 9. Marginación y pobreza en el área de estudio por municipio.</i>	39
<i>Tabla 10. Disponibilidad porcentual de drenaje en las viviendas particulares en el área de estudio por municipio.</i>	39
<i>Tabla 11. Uso de suelo y concentraciones de los contaminantes analizados en el agua subterránea del área de estudio.</i>	40
<i>Tabla 12. Resumen del MRL para \log_{10} E. coli (NMP 100mL⁻¹) ~ NO₃⁻ (mg L⁻¹).</i>	43
<i>Tabla 13. Normas Oficiales Mexicanas que establecen LMP de contaminantes en el agua.</i>	54

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
As	Arsénico
Ca ⁺²	Ion calcio
CCF	Código Civil Federal
CDESC	Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales
CF	Coliformes fecales
Cl ⁻	Ion cloro
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas
CPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, también referida como Carta Magna.
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno
DHAS	Derecho humano al agua y saneamiento
DQO	Demanda química de oxígeno
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i> (indicador de coliformes fecales)
HCO ₃ ⁻	Ion carbonato
JAPAY	Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán
K ⁺	Ion potasio
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LFD	Ley Federal de Derechos
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente
LPMAEY	Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán
LSN	Ley de Seguridad Nacional
meq L ⁻¹	Miliequivalentes por litro
mg L ⁻¹	Miligramos por litro
Mg ⁺²	Ion magnesio
Na ⁺	Ion sodio
NMP / 100 mL	Número más probable
NO ₃	Nitrato
NOM	Norma Oficial Mexicana

OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
RH	Región Hidrológica
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
RLPAMEY	Reglamento de la Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán
SCJN	Suprema Corte de Justicia de la Nación
SDT	Sólidos disueltos totales
SEDUMA	Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
SO ₄ ⁻²	Ion sulfato
VSMOW	“Vienna Standard Mean Ocean Water”

Estructura de la tesis

Dado el carácter interdisciplinario de este trabajo de investigación, la información generada en éste se dispone de la siguiente manera:

- Capítulo I: Introducción.
- Capítulo II: Análisis del contexto hidrogeoquímico en el noreste del estado de Yucatán: Descripción del sistema natural.
- Capítulo III: Aspectos generales del contexto socioeconómico que contribuyen a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio.
- Capítulo IV: Análisis normativo de la regulación aplicable a la prevención y control de la contaminación del agua subterránea.
- Capítulo V: Integración y conclusiones.

En el primer capítulo se parte de un marco general que muestra la importancia de las aguas subterráneas, de los factores que contribuyen al detrimento de su calidad y de las consecuencias de su contaminación. Además, se describe el planteamiento del problema así como el objetivo, hipótesis, delimitación del área de estudio y del esquema general de la metodología seguida.

En el segundo capítulo se plantea una introducción particular sobre los análisis hidrogeoquímicos y su utilidad para los estudios de contaminación. También se dispone la metodología seguida para los análisis de este capítulo aunado a sus resultados y discusión, así como la descripción y determinación de los contaminantes que fueron considerados para este trabajo de investigación (As, *Escherichia coli* y NO_3^-).

En el tercer capítulo se describen las características socioeconómicas, demográficas, de servicios y de usos de suelo en el área de estudio que contribuyen a los procesos de contaminación y detrimento de la calidad del agua subterránea con la finalidad de determinar los aspectos que deben regularse para prevenir y controlar la contaminación del agua subterránea en el área de estudio.

En el cuarto capítulo se plantea una breve introducción sobre la relación del agua con los derechos humanos, así como la metodología seguida para el análisis normativo sustentando en la sistematización de la legislación y marco jurisprudencial relacionado con las nociones actuales marco jurídico del control y prevención de la contaminación de las aguas del subsuelo en el país.

En el quinto capítulo se integran los resultados obtenidos en los capítulos II, III y IV para plantear un escenario integral y la formulación de propuestas de manejo. Además se discuten los alcances y oportunidades de este trabajo de investigación así como de su impacto para la prevención y el control de la contaminación del agua subterránea.

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

En términos generales, el agua subterránea es definida como, aquella que ocupa las oquedades existentes dentro de un sustrato geológico. Ésta se encuentra contenida en acuíferos, definidos como formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir volúmenes de agua y que están constituidos por gravas y arenas sin consolidar, rocas sedimentarias permeables, rocas cristalinas y volcánicas fracturadas, entre otras (Todd, 2005; USGS, 2016a).

El agua subterránea es un fluido en el subsuelo que solamente puede ser observado en algunos puntos intermitentes, en manantiales o a través de algunas oquedades en el terreno. Su estudio revoluciona a partir del estudio de J. Tóth (1963) en donde se diferencian tres tipos de flujos en los acuíferos: locales, intermedios y regionales.

En este trabajo, Tóth (1963) establece que los flujos locales difieren de los otros órdenes porque los primeros se encuentran separados por límites subverticales, mientras los otros se encuentran separados por límites subhorizontales (Fig. 1). Además, en su trabajo asevera que el movimiento del agua subterránea se comporta de manera lenta o simplemente es casi nulo en áreas planas y extendidas. Con esta base teórica, se rompe con conceptos obsoletos de la hidrogeología en donde se concebían a los acuíferos como almacenes de agua inmóvil que subyacen debajo de la tierra.

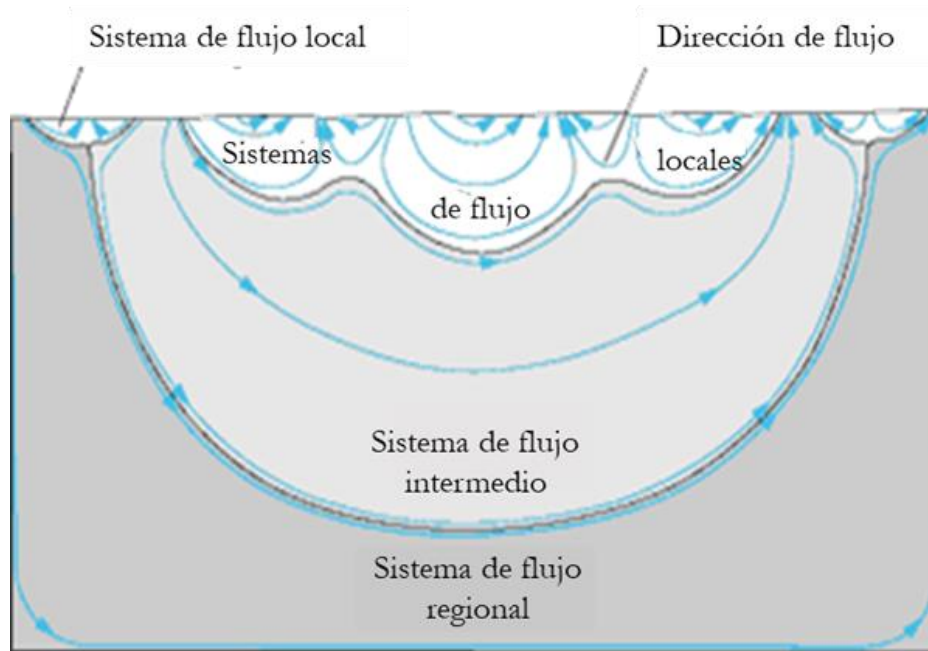


Figura 1. Sistemas de flujo de agua subterránea propuestos por Tóth (1963). Fuente: USGS (2016b) con modificación propia.

Este recurso subterráneo constituye el 1.69% del agua que se encuentra en el planeta, y debido a su relativa buena calidad y a su disponibilidad en zonas en donde el acceso al agua dulce superficial es limitado o nulo, se ha convertido en un recurso atractivo para satisfacer las necesidades de la humanidad y para sustentar el desarrollo de diversas actividades económicas; que a nivel global se estima que el 50% de estas aguas es destinado para consumo humano, el 20% para las actividades de irrigación y el 40% para la industria autoabastecida (Zestker & Everett, 2004).

En los ecosistemas, su relevancia radica en que ésta no se mantiene estática en el subsuelo, sino que el agua subterránea se encuentra hidrológicamente conectada con otros cuerpos de aguas superficiales como ríos, lagos, humedales costeros y con el medio marino (Fig. 2). En estos ecosistemas, el agua subterránea cumple un rol fundamental para la exportación de agua, en el mantenimiento de la temperatura y salinidad, en la regulación de la carga de sedimentos y contribuyendo al desarrollo de la biota (Winter et al., 1998; Eamus & Froend, 2006; Geoscience Australia, 2013).



Figura 2. Conexión e interacción del agua subterránea con otros ecosistemas. Fuente: Halifax (2017) con modificación propia

Pese a su importancia, las naciones, en su búsqueda de alcanzar un elevado desarrollo geopolítico y económico, han fomentado diversos factores que cada día empeoran el suministro y renovación de este recurso, siendo la contaminación y el detrimento de su calidad uno de los grandes problemas a nivel mundial que presentan las aguas subterráneas (Agudelo, 2005; Adelana, 2014).

Los problemas de contaminación del agua subterránea se han hecho sumamente evidentes en diversos trabajos de investigación alrededor del mundo. Especialmente, los acuíferos kársticos que, dadas sus características de alta porosidad y permeabilidad de la roca y al movimiento del agua a través de sus redes de conductos, se convierten en elementos del territorio que les confiere un considerable grado de vulnerabilidad a la contaminación (Polemio et al., 2009; Árcega-Cabrera, 2014; Derrien et al., 2015).

En resumen, el agua subterránea resulta ser un recurso sumamente importante para las civilizaciones humanas, tanto por el uso directo que le dan para subsistir, así como por el papel que juega en los ecosistemas. Además, es necesario hacer hincapié en que ésta resulta ser la única fuente de agua potable para los humanos en ciertas zonas en donde no existen cuerpos

de agua superficial. Los actuales paradigmas de desarrollo han puesto en jaque a este recurso a nivel global a través de la contaminación de los acuíferos, especialmente de aquellos kársticos.

1.2 Descripción del área de estudio

La Península de Yucatán (PY) es una plataforma extensa de rocas calizas de 125,000 km² que abarca en su totalidad a los estados de Yucatán, Quintana Roo y, en gran parte, al estado de Campeche; así como pequeñas porciones de Guatemala y Belice (Weidie, 1985; Escolero et al., 2005; Paull et al., 2014).

En el estado de Yucatán, se distinguen tres tipos de climas: el cálido subhúmedo que se presenta en el 85.5% del territorio, y el seco y semiseco, los cuales representan el 14.5% restantes. La temperatura máxima promedio ronda alrededor de los 36° C y la mínima de 16° C. La temperatura media anual es de 26° C y se estima que la precipitación media estatal es de 1,100 mm al año (Secretaría de Economía, 2018).

Se reconocen tres temporalidades a lo largo del año en el estado de Yucatán: la temporada de estiaje que toma lugar los meses de marzo a mayo, en ésta la temperatura supera la precipitación, la temporada de lluvias de junio a octubre, y la temporada de “nortes”, caracterizadas por vientos polares del noreste cargados de humedad que se presenta durante los meses de noviembre a febrero (Herrera-Silveira, 1994).

Particularmente, el subsuelo del estado de Yucatán es descrito por García-Gil y Graniel-Castro (2010) como una secuencia de sedimentos calcáreos provenientes del medio marino, cuyo origen se remonta al Terciario Reciente. Además, mencionan que el Cuaternario emerge hacia las zonas costeras y se caracteriza por depósitos calcáreos expuestos después de una ligera emersión de la península (Fig. 3).

Además, mencionan que en el estado se presenta una pobre presencia del suelo en la superficie, alcanzando 20 cm de profundidad y que se compone en gran medida de calizas extremadamente duras, cementando granos y fragmentos de conchas cerca de la superficie que son el resultado de la solución y precipitación de carbonato de calcio de la roca.

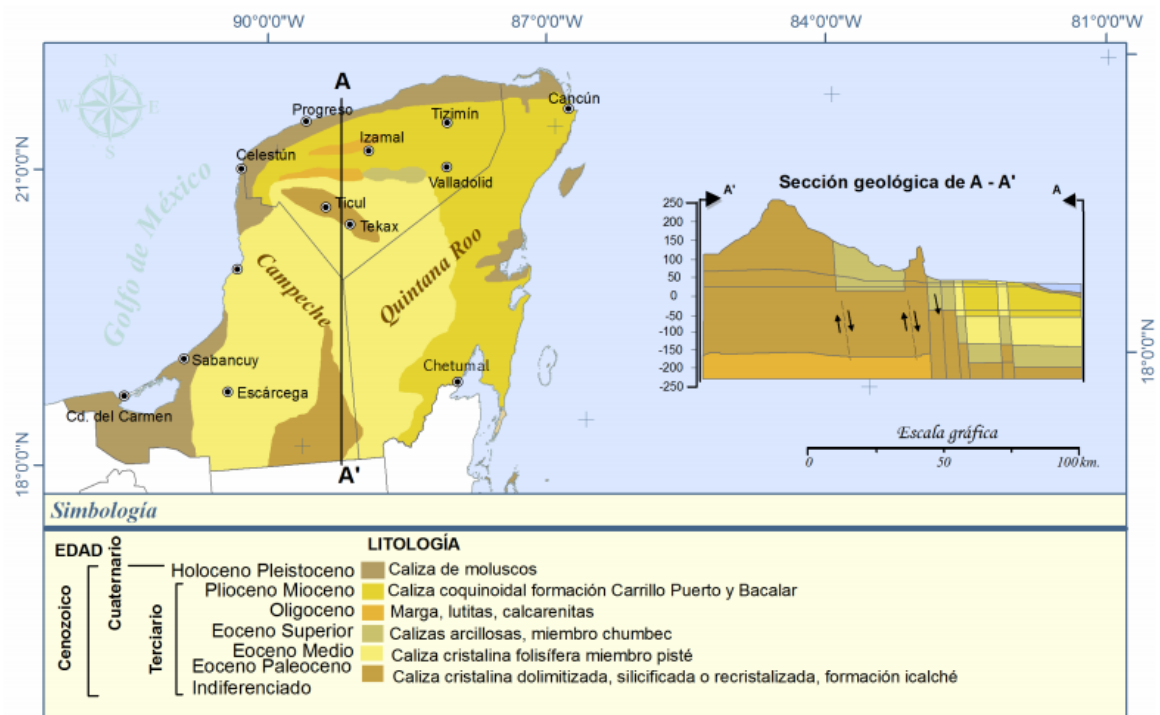


Figura 3. Clasificación geológica de la Península de Yucatán. Fuente: García- Gil & Graniel-Castro (2010).

En los trabajos de Butterlin y Bonet (1960) y de Bonet y Butterlin (1962) se asevera que en los primeros 220 m de profundidad (considerando la superficie del terreno), el subsuelo se compone de estratos casi horizontales de calizas masivas, de buena permeabilidad y recristalizadas. A partir de los 220 m hacia abajo, el subsuelo se caracteriza por constituirse de capas impermeables de calizas y margas con extensiones de cientos de metros.

La ausencia de margas y arcillas del Terciario Superior sobre la caliza deriva a que el agua proveniente de las precipitaciones se infiltre de manera rápida, y que a su paso de origen a un relieve kárstico por la disolución de la roca. Las zonas de gran permeabilidad se encuentran a lo largo de las fallas posiblemente producidas en el Eoceno por los movimientos de la placa del Caribe atribuidos por la relajación de la corteza y/o por la carga de la cuenca resultado del

impacto de un meteorito. Se reconoce a la sierrita de Ticul como una de las fallas más prominentes, aunque sus orígenes sean difíciles de adjudicar a algún evento tectónico (Perry et al., 2003; García Gil & Graniel-Castro, 2010).

Estas condiciones de karsticidad han configurado un acuífero kárstico, freático, sumamente permeable, heterogéneo y transfronterizo que se extiende en una superficie de 1 650,000 km² en México, Guatemala y Belice. La disolución de la caliza ha permitido a la formación de cuevas y cavernas subterráneas que permiten el movimiento del agua a través de estas redes de conductos (Fig. 4) (Bauer-Gotwein et al., 2011).

Bauer-Gottwein y colaboradores (2011) distinguen tres categorías para las rutas preferenciales del agua en el acuífero en Yucatán:

- 1) Las zonas de fracturas a escala regional: éstas se caracterizan por sus diferencias en el grado de fracturación. Dentro de esta categoría se encuentra el Anillo de Cenotes, la línea de la falla de la Sierrita de Ticul, la fractura de Holbox, la zona del bloque del Río Hondo y la zona de falla de La Libertad.
- 2) Conductos largos de disolución: referidos a los sistemas de cavernas.
- 3) Fracturas de pequeña escala: sus orígenes están ligados a procesos de erosión, actividad sísmica y por la disolución de las rocas carbonatadas (en especial por lluvias) que crean áreas de interconductos en la región y suelen intensificar la conductividad hidráulica a decímetros en muestras de roca carbonatadas.

En el trabajo citado, se desarrolla un modelo para determinar los flujos del agua en el acuífero. Sin embargo, uno de los grandes problemas es que las tres categorías de los flujos de agua no quedan plasmadas espacialmente. Para fines prácticos y en términos generales, se entiende que en Yucatán el movimiento del agua subterránea inicia con las precipitaciones infiltradas en el sur del estado, que posteriormente se dispersan hacia el noroeste, norte, y noreste de Yucatán descargando en los esteros y lagunas costeras de Celestún, Dzilam de Bravo y San Felipe (Graniel-Castro, 2010).

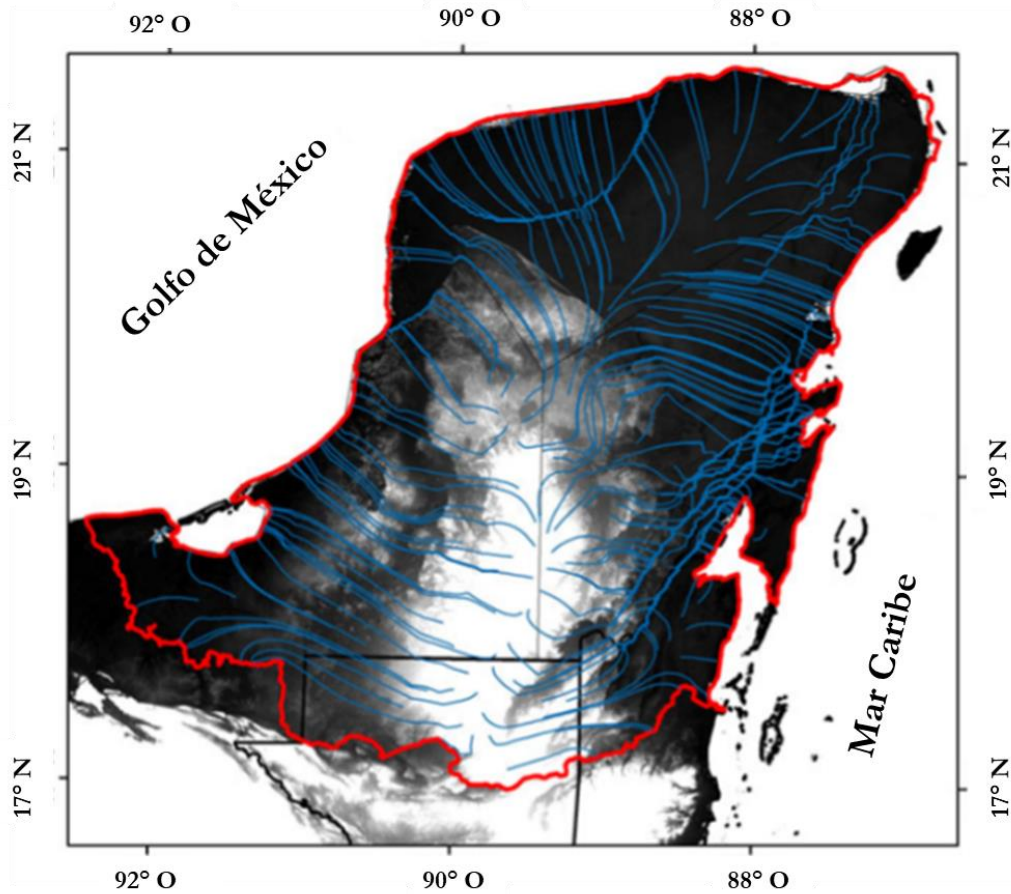


Figura 4. Flujos de agua subterránea del acuífero de la Península de Yucatán. Fuente: Bauer-Gottwein et al. (2011) con modificación propia.

Se estima el acuífero de la PY tiene un espesor de 150 m cuyo lente de agua dulce crece tierra adentro por la cuña de agua salina que subyace sobre éste. Además posee una conductividad hidráulica de 10 cm s^{-1} que supone un movimiento veloz de los flujos del agua dentro de las redes de conductos. Pese a este hecho, el estado carece de elevaciones prominentes, salvo la sierrita de Ticul con 210 msnm y en algunos lugares cercanos a la costa, dando como resultado que el gradiente hidráulico tome valores de entre $7 \text{ a } 10 \text{ mm km}^{-1}$ que implica una baja energía potencial para que el agua forme un flujo horizontal; es decir, pese al rápido movimiento del agua, la tasa de recambio se caracteriza por ser un proceso lento, que puede acelerarse en temporada de lluvias; condiciones que le confieren vulnerabilidad al acuífero ante los problemas de contaminación (Nava-Galindo, 2015).

1.3 Planteamiento del problema: La vulnerabilidad del acuífero ante los procesos de contaminación.

En lo que respecta al agua, Yucatán resulta ser un estado sumamente privilegiado ya que, a diferencia de los estados del norte de nuestro país, en Yucatán precipitan anualmente alrededor de 992 mm. En la Península de Yucatán dominan patrones de circulación atmosférica característicos de las zonas tropicales en el límite con las zonas áridas. Las características físicas de la región no permiten el ascenso orográfico de las nubes que descargan lluvia, sino que éstas tienen un componente convectivo, lo que significa que se generan directamente de la transferencia de calor de la tierra a la masa de aire (Orellana-Lanza et al., 2009).

Además, la falta de elevaciones topográficas que delimiten un parteaguas y las condiciones de karsticidad han configurado un terreno carente de escurrimientos superficiales en donde domina una red de conductos y cavernas subterráneas por las que el agua transita, aunado a una serie de elementos de la disolución de las rocas como las dolinas (o cenotes, nombre que reciben localmente) y que forman parte de la identidad del estado (Graniel-Castro, 2010).

Sin embargo, sus mismos atributos hidrogeológicos le han conferido al estado una gran vulnerabilidad ante los problemas de contaminación del agua dado a la rápida infiltración de los contaminantes en el suelo y a su movilización dentro del acuífero, documentando en diversos estudios la presencia de metales pesados, materia fecal, nitrato y agroquímicos en el agua subterránea del estado (Pacheco-Ávila & Cabrera-Sansores., 2003; Escolero et al., 2005; Árcega-Cabrera et al., 2014).

Las condiciones geológicas del estado de Yucatán convierten lejana a la posibilidad de contar con un sistema de drenaje por los costos de su construcción. Por lo cual, conforme a la legislación estatal, las descargas de aguas residuales domésticas deben ser vertidas a fosas sépticas u otro sistema que garantice su tratamiento.

Batllori-Sampedro (2016) cita que un estudio levantado por DAICOS SA de CV en el estado de Yucatán en donde se determina que solamente el 40% de las viviendas registradas disponen sus aguas residuales en fosas sépticas. Sin embargo, de este porcentaje el 60% de las viviendas nunca ha efectuado un trabajo de limpieza o mantenimiento de las fosas sépticas. Además, datos de la CONAGUA aseveran que en el 2015 Yucatán contaba con 26 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de tratamiento de 416 l s-1 y con un caudal tratado de 184 l s-1, empero la cobertura de tratamiento era del 4.5%. Además el estado no cuenta con plantas potabilizadoras y junto con San Luis Potosí y Chiapas es uno de los estados con las coberturas de desinfección de agua más bajas del país, que para el estado de Yucatán se tiene un porcentaje del 87.5% (CONAGUA, 2016a).

Por otro lado, Cubas y colaboradores (2017) aseveran que la gestión del agua subterránea en México se sustenta en paradigmas científicos obsoletos; hecho que ha desencadenado una serie de problemáticas en el país, entre ellos la alteración de los ecosistemas y severos impactos en la salud pública. En este sentido, la esfera jurídica necesita ser analizada en conjunto con investigaciones técnico - científicas para establecer pautas normativas que regulen los procesos de contaminación de este recurso.

1.4 Antecedentes y justificación

Los estudios hidrogeológicos y de la calidad del agua en el estado de Yucatán se encuentran y focalizan en su mayoría en la zona metropolitana de Mérida, en el noroeste del estado y/o en el Anillo de Cenotes. Entre estos, destacan los trabajos de Pacheco-Ávila y Cabrera-Sansores (2004), Árcega-Cabrera et al. (2014), Kantún-Manzano et al. (2018), entre otros.

Si bien es cierto que es importante que se sigan desarrollando estudios de esta naturaleza en las zonas mencionadas, cabe destacar que estos trabajos se encuentran sumamente polarizados en los sitios de interés geológico y/o ecológico (noroeste del estado, en donde se localiza la laguna de Celestún) o por la importancia socioeconómica (zona metropolitana de Mérida), por lo que resulta necesario que se genere información sobre el resto de las zonas en Yucatán, tal como el caso de la zona noreste del estado, en donde el

desarrollo de las actividades agropecuarias ha tomado fuerza durante los últimos años y que presenta un alto grado de karstificación (Aguilar et al., 2016).

Desde la perspectiva jurídica es necesario mencionar que son pocos los trabajos que se han realizado en cuanto al marco jurídico de las aguas subterráneas, entre ellos los de Carrillo-Rivera & Domínguez (2007) y la propuesta de Ley de Agua Subterránea elaborada por un grupo transdisciplinario de investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México expertos en el área de las ciencias hidrogeológicas, geográficas y jurídicas (Carmona-Lara et al., 2017). Todos estos trabajos de investigación tienden a centrarse en la normativa federal. Sin embargo, hasta el momento no ha habido esfuerzos por conjugar los análisis jurídicos federales con las legislaciones locales y sobre todo, han carecido de aplicaciones prácticas que permitan evidenciar las deficiencias del marco normativo.

Más aún, resulta fundamental conocer los elementos normativos que regulan la gestión del agua subterránea así como las especificaciones para la conservación de su calidad, ya que el agua subterránea tiene un vínculo sumamente estrechos con algunos derechos humanos que consagra la Carta Magna.

1.5 Pregunta de investigación

¿Cuáles son las condiciones de la calidad del agua y cuáles son los factores que contribuyen a los procesos de contaminación del agua subterránea en el área de estudio?

1.6 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consiste en determinar la calidad del agua subterránea en el noreste de Yucatán y analizar el proceso de contaminación de la zona, a través de la integración del contexto hidrogeoquímico, socioeconómico y normativo con el fin de elaborar propuestas de manejo así como de cumplimiento y modificación de la norma.

1.7 Objetivos particulares

Los objetivos particulares son:

- Identificar el nivel de contaminación por Arsénico, nitratos y coliformes fecales en agua subterránea de la zona noroeste de Yucatán.
- Describir el comportamiento del agua subterránea del área de estudio a través del análisis de isótopos del agua y de los iones mayores disueltos.
- Abordar el contexto socioeconómico, demográfico, de servicios y de uso de suelo en el área de estudio para establecer los factores que contribuyen al deterioro de la calidad del agua.
- Evaluar los procesos contaminación del agua subterránea en el área de estudio, integrando el contexto jurídico e hidrogeoquímico.
- Hacer un análisis integral de la hidrogeoquímica, marco jurídico, y de los procesos de contaminación.
- Sistematizar la normativa (i.e. legislación y jurisprudencia) implicada en la prevención y el control de las aguas del subsuelo para identificar deficiencias y áreas de oportunidad.

1.8 Hipótesis

La integración del conocimiento hidrogeoquímico, socioeconómico y normativo brindará una perspectiva amplia y profunda que permitirá establecer esquemas de gestión, prevención y control de la contaminación del agua subterránea y del detrimento de su calidad en el área de estudio.

1.9 Delimitación del área de estudio

El área de estudio a considerar en este trabajo (Fig. 5) está constituida por un polígono comprendido por los municipios de Calotmul, Espita, Panabá, Sucilá y Tizimín. En éste se establecen 13 estaciones de muestreo para el desarrollo de los análisis químicos.

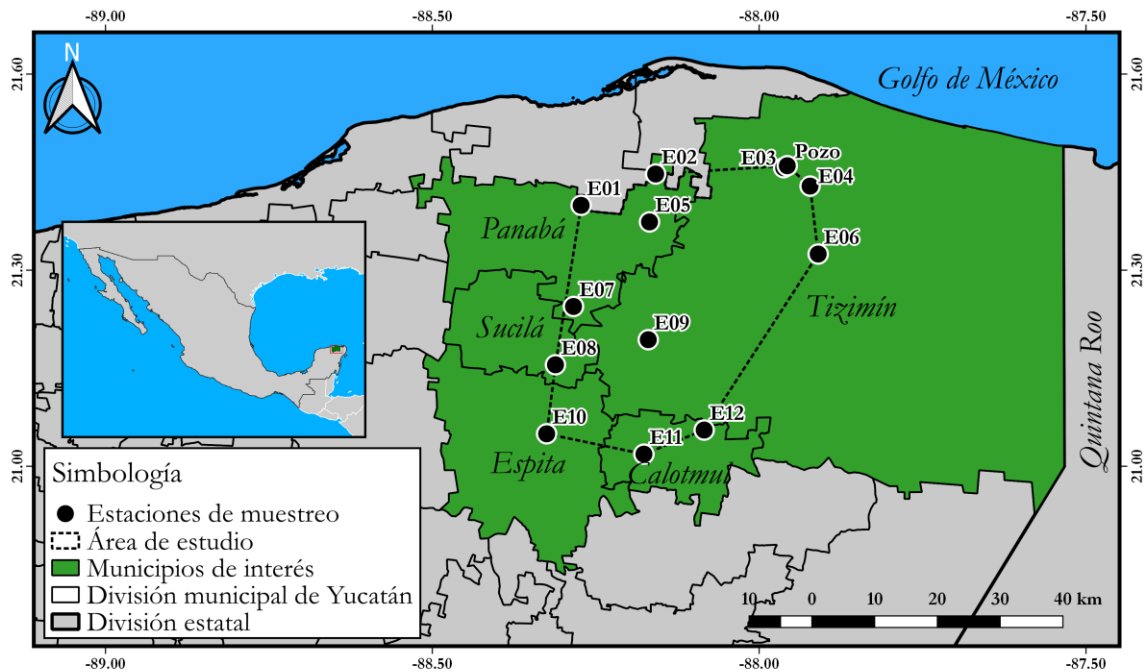


Figura 5. Mapa del área de estudio y estaciones de muestreo para la caracterización hidrogeoquímica y análisis de la calidad del agua. Escala (1: 500,000). (EPSG: 4326 - WGS 84).

Recursos cartográficos empleados para su elaboración:

INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
 INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Figura 5. Área de estudio y estaciones de muestreo para la caracterización hidrogeoquímica y evaluación de la calidad del agua.

1.10 Metodología general

En este trabajo se partió de un esquema integral para entender los procesos de contaminación del agua subterránea en el área de estudio (Fig. 6). Éste consistió en el análisis de los instrumentos legislativos y jurisprudenciales relacionados con la prevención y control de la contaminación del agua subterránea, así como de la determinación de contaminantes, caracterización del contexto hidrogeoquímico del área de estudio y de sus aspectos socioeconómicos.

En septiembre de 2016 se llevó a cabo una campaña de muestreo para la recolección de muestras de agua en el área de estudio. Se seleccionaron 13 estaciones de muestreo (Fig. 5), con base en 1) acceso libre y seguro, 2) representatividad espacial en el polígono previamente delimitado y 3) disponibilidad de recursos. En estos sitios se registraron las coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo con un GPS Map 76CS x con una precisión de ± 5 m de diámetro. *In situ* se tomaron los parámetros fisicoquímicos del agua (i.e. temperatura, pH,

oxígeno disuelto-OD, salinidad, conductividad y sólidos disueltos totales-SDT) utilizando un equipo multiparamétrico YSI Professional Plus. Una vez, recopilada esta información en la bitácora de campo, se procedió a recolectar un litro de agua superficial (c.a. 0.5 m de profundidad) por cada estación con una botella de Van Dorn, por medio del uso de una canoa y de manera manual. El agua recolectada fue almacenada en botellas de polipropileno; para la determinación de As, éstas fueron previamente lavadas con ácido nítrico (HNO_3) y enjuagadas con agua desionizada con el fin de evitar el intercambio de iones y la precipitación de hidroxilos. Las muestras fueron almacenadas en hieleras a baja temperatura y protegidas con parafilm entre la botella y su tapa para evitar el fraccionamiento isotópico durante su traslado al laboratorio.

Las metodologías empleadas para llevar el análisis hidrogeoquímico de las muestras de agua y determinación de contaminantes son desarrolladas de manera particular en el capítulo III y IV.

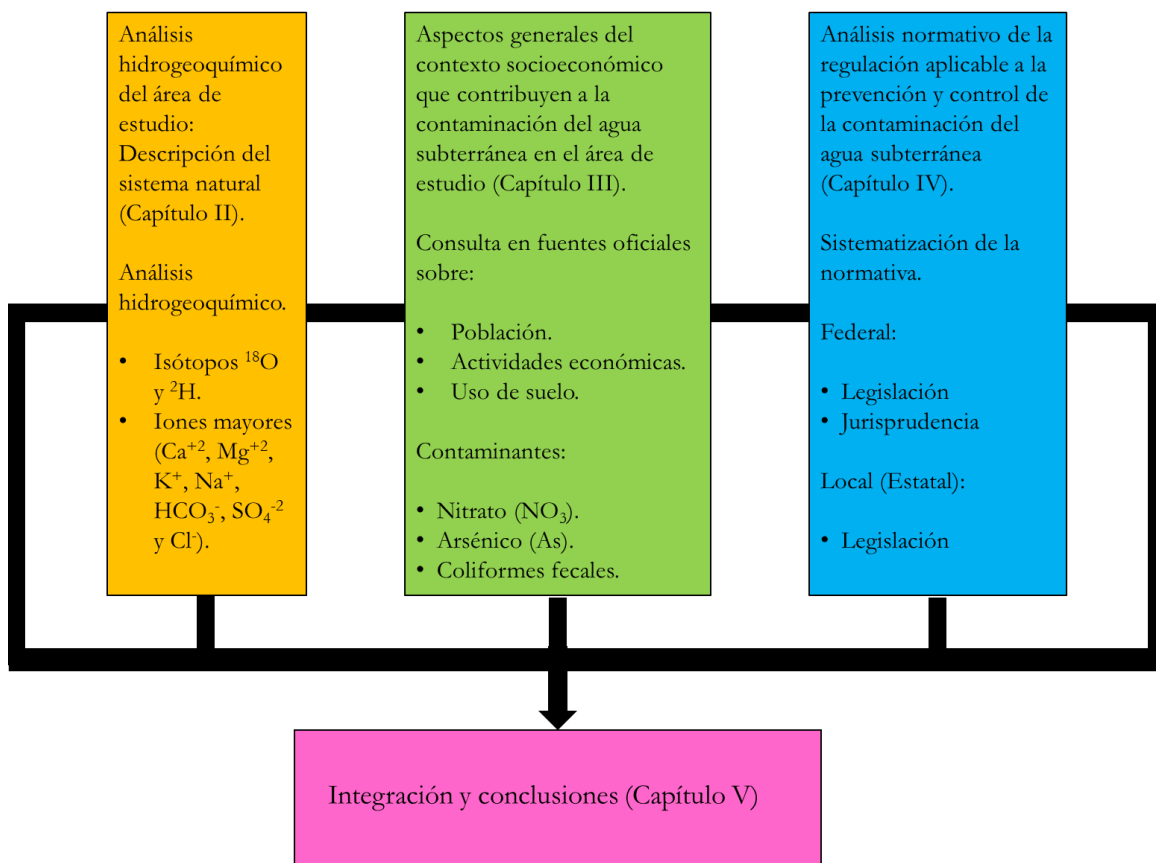


Figura 6. Esquema metodológico integral para el análisis interdisciplinario de los procesos de contaminación en el área de estudio.

Capítulo II: Análisis hidrogeoquímico en el noreste de Yucatán: Descripción del sistema natural

2.1 Generalidades

La mayor parte de los estudios hidrogeológicos se sustentan tradicionalmente en la información obtenida a través de perforaciones, análisis de núcleos, de la predicción de los flujos preferenciales del agua basados en el conocimiento de la geología regional y del análisis de limitadas propiedades del agua. En este contexto, es necesario hacer hincapié en el hecho de que conforme el agua transita por el acuífero, ocurren interacciones químicas entre el agua y la roca que permiten identificar origen, mezclas y procesos, por lo que la hidrogeoquímica moderna y el uso de isótopos estables resultan ser herramientas atractivas para comprender el funcionamiento del agua subterránea (Mazor, 2004; Clark, 2015).

2.1.1 Isótopos de hidrógeno (H) y oxígeno (O)

Los isótopos son definidos como variaciones de un elemento químico en particular, ya que difiere en el número de neutrones, y por consiguiente, en la masa atómica. Éstos pueden decaer de manera espontánea y liberar energía en el transcurso del proceso, o bien, pueden mantener su forma a lo largo del tiempo, distinguiéndose así los isótopos inestables de los estables (Lin et al., 2007).

Los isótopos del mismo elemento tienden a comportarse de la misma manera en las reacciones químicas. Empero, las variaciones en su masa atómica les confiere características particulares que permiten ser analizadas a la luz de distintas disciplinas, como en la hidrogeoquímica. En este sentido, se reconocen dos isótopos estables para el hidrógeno y tres para el oxígeno (Tabla 1).

El agua se compone por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, pero en la naturaleza presenta distintas firmas en sus moléculas, es decir, diferencias entre la proporción de los isótopos provenientes de una muestra contrastada con un estándar.

Dentro del contexto de este trabajo de investigación, la composición isotópica del agua subterránea se expresa en comparación con la del agua de mar, por ello la composición del agua subterránea, determinada a través de la espectrometría de masas se expresa en desviaciones por miles (‰) de una muestra de agua de mar que ha sido convencionalmente aceptada y es utilizada alrededor del mundo. Ésta recibe el nombre de SMOW, cuyas siglas traducidas al español hacen referencia a la Media Estándar del Agua de Mar (Clark, 2015).

Tabla 1. Isótopos estables del agua. Fuente: Clark (2015).

Elemento	Isótopo estable	Características
Hidrógeno (H)	¹ H	Hidrógeno común (1 protón).
	² H	Deuterio (También se expresa como D. 1 protón + 1 neutrón).
Oxígeno (O)	¹⁶ O	Oxígeno común (8 protones + 8 neutrones)
	¹⁷ O	Oxígeno pesado y sumamente raro (8 protones + 9 neutrones)
	¹⁸ O	Oxígeno pesado (8 protones + 10 neutrones)

Las desviaciones para el cálculo de las firmas isotópicas del $\delta D\text{‰}$ y el $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ se obtienen por medio de las siguientes fórmulas:

$$\delta D\text{‰} = \frac{(D/H)_{\text{muestra}} - (D/H)_{\text{SMOW}}}{(D/H)_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = \frac{(\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{muestra}} - (\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(\delta^{18}\text{O}/\delta^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \times 1000$$

Las obtenciones de las firmas isotópicas a través de estas fórmulas cobran relevancia para los análisis hidrogeoquímicos debido a que es posible asociar los valores obtenidos al ciclo hidrológico. Su explicación se debe a que durante las fases del ciclo hidrológico, la composición del agua se sujeta a un proceso conocido como fraccionamiento isotópico. En este proceso los isótopos más ligeros son los primeros que se evaporarán, permitiendo así que el agua se enriquezca de los isótopos más pesados. En los procesos de precipitación, son los

isótopos más pesados los que caen primero, empobreciendo al agua de lluvia en cuanto a su composición.

En este tenor cabe destacar el trabajo de Craig (1961), en donde se observó que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y de δD en el agua precipitada que aún no se ha evaporado están linealmente relacionadas bajo la recta: $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. Esta ecuación conocida como la línea meteórica mundial (LMM) se basa en datos isotópicos de precipitación a lo largo del mundo y tiene una $R^2 > 0.95$. Este alto coeficiente de correlación hace evidente el hecho de que los isótopos estables de hidrógeno y oxígeno del agua mantienen una estrecha relación, lo que facilita que la proporción y fraccionamiento isotópico de estos elementos sean analizados de manera conjunta.

2.1.2 Composición química natural del agua subterránea

El agua subterránea contiene químicos que pueden presentarse en alta concentración o en forma de traza. En gran parte de las aguas meteóricas, los iones mayores incluyen los alcalinotérreos Ca^{2+} y Mg^{2+} , y los metales alcalinos Na^+ y K^+ . Estos cuatro elementos son los principales cationes que conforman los minerales formadores de rocas, incluyendo los feldespatos y los carbonatos. El HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- constituyen los aniones mayores en el agua subterránea y brindan información sobre los procesos de intemperización en las rocas y sobre la influencia del medio marino. De manera natural, estas siete especies geoquímicas componen el 95% de los iones disueltos en el agua. Éstos resultan de la intemperización de los minerales y de los procesos de mezcla en el agua. A su vez, existen otros iones cuya contribución resulta ínfima y tienen una menor importancia, tales como algunas especies menores, nutrientes y gases (Mazor, 2004; Clark, 2015).

La relevancia de la composición química natural del agua para los estudios hidrogeoquímicos radica en que la composición del agua subterránea se encuentra determinada por diversos factores, tales como la mineralogía de las rocas, por la proximidad a las zonas costeras o a algún sitio de recarga, o por el tiempo que ha estado en el acuífero y se han mantenido remotos de los procesos atmosféricos. Este hecho resalta la importancia que éstos brindan para el entendimiento de la dinámica interna del agua subterránea.

Una de las aplicaciones de los iones es su uso para analizar la evolución química del agua subterránea. Mifflin (1968) describe la evolución hidrogeoquímica en un sistema de rocas carbonatadas de Nevada a través de los análisis del sodio, potasio cloro y sulfato bajo la premisa de que existe un aumento en la concentración de estos iones conforme el agua circula dentro de la roca, lo que implica que el agua ha estado en mayor contacto con los minerales.

Si bien los yesos, anhidritas y halitas tienen una mayor solubilidad que otros minerales carbonatados, las pocas cantidades que poseen las calcitas y dolomitas solamente permiten la liberación gradual de la disolución de estos iones. Sin embargo, en el mismo trabajo de Mifflin se postula que sin importar la fuente exacta de estos iones, los sistemas carbonatados siempre presentan el mismo patrón de disolución.

2.2 Metodología

Las muestras de agua se recolectaron en el 2016 en las estaciones de muestreo previamente señaladas en la figura 5. Los análisis de los iones presentes en el agua y de los isótopos de ^2H y ^{18}O se llevaron a cabo en el Departamento de Hidrogeología de la Universidad de Málaga.

2.2.1 Isótopos estables del agua: $\delta^{18}\text{O}$ y δD

Las muestras de agua se filtraron a través de un filtro de membrana de $0.2\ \mu\text{m}$ y se eliminó la presencia del CO_3 y CO_2 con ácido ortofosfórico al 100%. Una vez realizado este paso, se colocaron en un baño ultrasónico por cinco minutos. Terminado el baño, se inyectaron 0.3 mL de la muestra por un tubo exentaine al cual se le desplazó el aire con una mezcla de He + 1 % CO_2 y se colocaron sobre un plato a 25°C por 2 días y 7 horas.

Para determinar las firmas isotópicas del agua subterránea del área de estudio, tanto para el δD y el $\delta^{18}\text{O}$, se empleó un espectómetro de masas MAT 253 con un analizador elemental por termoionización y con automuestreador GC PAL. En el caso del ^{18}O , se utilizó como equipo auxiliar un dispositivo de Gas Bench de flujo continuo sustentado en el procedimiento de Epstein & Mayeda (1953). Los resultados arrojados por el análisis de espectroscopía se normalizaron bajo los criterios VSMOW y se utilizó una muestra de valor

conocido como estándar interno (W38888 laboratorio de referencia 921201 del USGS) para estimar la exactitud y precisión de las muestras.

Una vez obtenidas dichas firmas, se representaron a través de un gráfico de dispersión de puntos, en donde son contrastados con la LMM y en donde se obtiene la recta que proyectan las firmas isotópicas de las muestras.

2.2.2 Iones mayores del agua

Los cationes mayores se determinaron conforme al método de la EPA 200.7 “Determination of metals and trace elements in water wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry”, para lo cual se utilizó un espectrómetro con un patrón interno de Itrio (1 ppm). Los estándares de calibración se prepararon a partir de soluciones Inorganic Ventures de 1000 ppm.

Los aniones en las muestras de agua fueron determinados conforme al método 300.1 de la EPA “Determination of inorganic anions in drinking water by ion chromatography”. Dicho análisis se llevó a cabo a través del uso de un HPLC-IC con supresor ASRS-Ultra 300 4-mm, columna Ion Pac AS 14^a y detector electroquímico ED50. Como fase móvil se empleó una solución 80 mM Na₂CO₃ / 1.0 mM NaHCO₃.

Las curvas de calibración se prepararon con estándares de Inorganic Ventures IF-FAS-1A. Mientras la muestra de control de laboratorio se preparó a partir del Seven Anion Standard de Dionex.

Cabe destacar que de todos los cationes y aniones obtenidos a través de este análisis solo se consideraron el Ca⁺², Mg⁺², Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄⁻² y Cl⁻ para la caracterización hidrogeoquímica y el NO₃⁻ para el análisis de los procesos de contaminación. El análisis del nitrato se presenta en el capítulo III.

2.3 Resultados

2.3.1. Isótopos estables del agua: $\delta^{18}\text{O}$ y δD

Los valores obtenidos para el análisis de los isótopos del agua procedente del área de estudio (Tabla 2) se representaron a través de una gráfica de dispersión de puntos (Fig. 7) que esquematiza la relación entre los valores del $\delta^{18}\text{O}$ y del δD , contrastados a su vez con la línea meteórica mundial. Se ajusta una recta conforme a la configuración de los puntos obtenidos y se obtiene una pendiente con un valor de 4.766 y una R^2 de 0.994.

Tabla 2. Composición isotópica del agua subterránea de las estaciones de muestreo.

Estación	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
E01	-3.7171	-21.0580
E02	0.8156	-0.7494
E03	4.8512	21.1961
E04	-1.6043	-8.8552
E05	-2.4259	-14.7218
E06	-1.7274	-10.7264
E07	-3.7965	-21.0261
E08	-3.0925	-16.6977
E09	-2.3269	-12.9194
E10	-3.8394	-20.9629
E11	-2.7028	-14.2766
E12	-3.2368	-18.1859
Pozo	-3.3000	-18.2500

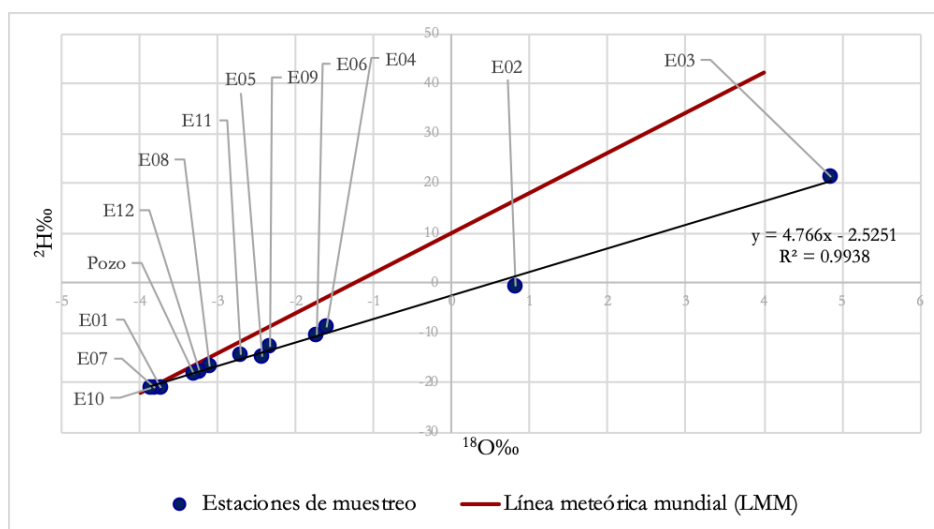


Figura 7. Valores de las firmas isotópicas del agua contrastados con la línea meteórica mundial (LMM).

Al poner esta información en un contexto espacial, se puede observar este enriquecimiento de isótopos ocurre en dirección suroeste – noreste (Fig. 8), indicando procesos de evaporación con excepción de la estación “Pozo”, que mantiene una estrecha similitud con la línea meteórica mundial y por ende es agua que aún no ha sufrido una evaporación medible. Esto puede explicarse dado a que se trata de una noria con una tapa, factor que evita en gran medida los procesos de evaporación. Además, el enriquecimiento isotópico se incrementa conforme se reduce la elevación del terreno, lo que podría indicar que el nivel freático va en ascenso en la misma dirección. Esto es congruente con lo reportado por Perry et al. (2002) en donde señalan que la tabla de agua se encuentra a menor profundidad en la zona norte de Yucatán.

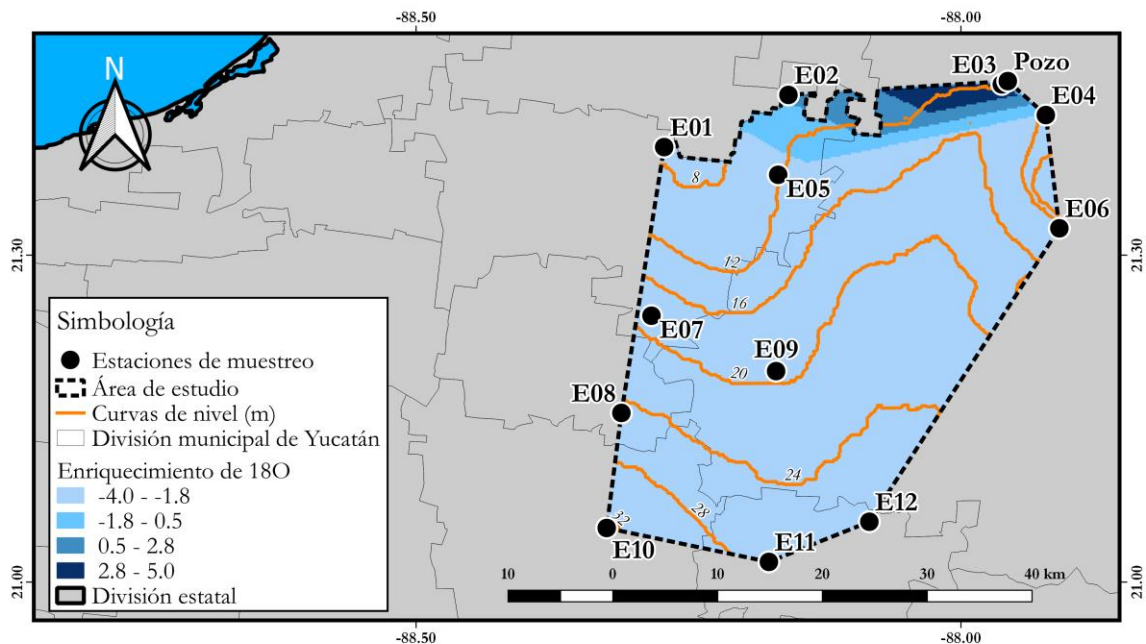


Figura 8. Enriquecimiento isotópico del $\delta^{18}O$ en el área de estudio. Escala (1: 300,000). (EPSG: 4326 - WGS 84).

Recursos cartográficos empleados para su elaboración:
 INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
 INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
 INEGI (2017). Carta topográfica. Tizimin. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
 INEGI (2017). Carta topográfica. Cancún. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
 INEGI (2017). Carta topográfica. Cozumel. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
 INEGI (2017). Carta topográfica. Mérida. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Figura 8. Enriquecimiento isotópico del $\delta^{18}O$ en el área de estudio.

2.3.2 Control de calidad de las muestras

El balance iónico ha sido empleado con la finalidad de determinar si los métodos analíticos de laboratorio resultan viables para el análisis de una investigación hidrogeoquímica. Éste parte de la idea de que el agua debe ser eléctricamente neutra por el equilibrio que existe entre los

cationes y aniones presentes en el líquido. Este balance se representa a manera de error y se calcula estimando la proporción entre la diferencia de los cationes y aniones totales sobre la suma de los cationes y aniones totales en la muestra, el cual es multiplicado por 100 para obtener el resultado en porcentaje. Los iones deben ser expresados en meq L⁻¹ y el cálculo del error se explica por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Balance iónico (\%)} = \frac{|\Sigma \text{ Cationes} - |\Sigma \text{ Aniones}||}{\Sigma \text{ Cationes} + |\Sigma \text{ Aniones}|} \times 100$$

Si bien es cierto que de manera convencional se ha establecido un error menor al 5% para determinar la fiabilidad de una muestra, Nordstrom et al. (2008) determinan que valores inferiores al 10% resultan factibles para el análisis hidrogeoquímico.

Se obtuvo el balance iónico de las muestras de agua con base en los cationes (Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ y K⁺) y aniones (HCO₃⁻, SO₄⁻² y Cl⁻) obtenidos en los análisis químicos y se calculó el balance iónico de éstas. Dado a que ninguna de las muestras superó un error del 10% para el balance iónico y el valor más alto que se obtuvo a partir de este análisis fue de 9.34%, entonces se constata que el uso de la información de la iónica del agua resulta factible (Tabla 3).

Tabla 3. Balance iónico de las muestras de agua.

Estación	Cationes (meq L ⁻¹)					Aniones (meq L ⁻¹)				Balance iónico
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Suma	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Suma	
E01	5.98	4.93	8.11	0.18	19.20	7.68	0.88	8.94	17.49	4.64
E02	1.55	3.28	1.70	0.46	7.00	3.48	0.40	1.97	5.95	8.10
E03	1.66	9.43	21.30	0.63	33.03	5.87	0.73	22.10	28.97	6.55
E04	4.24	2.48	7.57	0.19	14.50	4.04	0.61	8.25	13.15	4.85
E05	5.23	4.76	8.46	0.22	18.70	6.41	0.77	9.51	16.87	5.14
E06	3.95	1.16	3.85	0.15	9.14	2.99	0.27	4.47	8.66	2.71
E07	6.91	4.47	7.98	0.13	19.53	8.02	0.69	8.78	17.95	4.22
E08	6.12	3.77	5.07	0.35	15.33	6.45	0.69	5.64	13.87	5.00
E09	3.87	5.27	8.94	0.14	18.25	5.11	0.82	10.02	16.22	5.88
E10	2.57	3.56	3.11	0.10	9.36	7.52	0.35	2.96	11.29	9.34
E11	3.77	1.03	2.37	0.40	7.58	3.18	0.42	2.71	6.98	4.13
E12	2.58	3.56	3.10	0.10	9.36	5.51	0.58	2.96	9.53	0.87
Pozo	7.86	6.19	19.07	0.25	33.41	8.25	2.28	20.04	31.29	3.28

2.3.3 Hidroquímica del agua subterránea en el área de estudio: Diagrama de Piper

Los diagramas de Piper son empleados en la hidrogeoquímica para diversas aplicaciones, entre ellas destaca el análisis de la evolución geoquímica del agua. Éstos gráficos se componen de dos triángulos equiláteros que representan los porcentajes de los cationes y aniones presentes en una muestra de agua; además, por encima de ellos se esquematiza un rombo que integra la información de la composición del agua (Pulido-Bosch, 2007).

La construcción del diagrama de Piper para las muestras de agua colectada se realizó a través de HatariChem: un programa en línea de acceso gratuito desarrollado por la consultoría peruana Gidahatari. Para esto se dispuso la información de los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- ; así como de los cationes Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^+ en el formato de trabajo del programa para su construcción.

Conforme a los resultados arrojados por el diagrama de Piper (Fig. 9) en el triángulo de los cationes se observa que el 77 % de las estaciones no presenta una dominancia particular en alguna facie hidroquímica, salvo por la estación E03 que presenta una facie sódica – potásica y las estaciones E02 y E12 que presentan una facie magnésica.

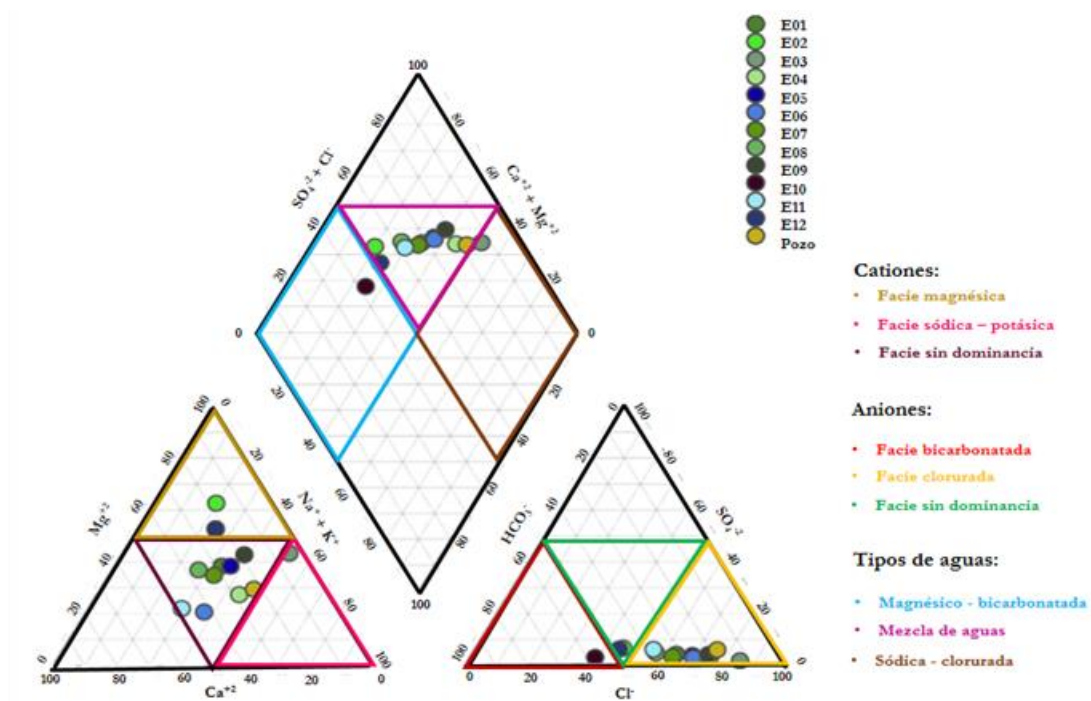


Figura 9. Diagrama de Piper con facies hidroquímicas y tipos de agua de las muestras de agua.

En cambio, en el triángulo de los aniones se observa que el 77% de las muestras presentan una dominancia en la facie clorurada, mientras que la estación E10 presenta una facie bicarbonatada y las estaciones E02 y E12 no presentan dominancia en alguna facie hidroquímica.

En la conjugación de los cationes y aniones que se refleja en el rombo del diagrama se puede constatar la presencia de dos tipos de agua: la magnésica – bicarbonatada reportada para la estación E10 y la sódica – clorurada para la estación E03. El resto de las muestras se concentra en un triángulo que sugiere una posible mezcla de estos dos tipos de agua, proceso que podría explicarse debido a que la recolección de muestras tomó lugar durante la temporada de lluvias en el área de estudio.

Con la finalidad de aterrizar a un contexto espacial el comportamiento de la iónica del agua, se enumeraron de manera ascendente a las estaciones presentes en el rombo del Diagrama de Piper, para posteriormente plasmar en un mapa los resultados obtenidos en este análisis. El resultado (Fig. 10) se puede observar una tendencia espacial similar a la reportada en la Figura 8. Este hecho podría ser indicio de que el flujo del agua subterránea ocurre en dirección suroeste – noreste.

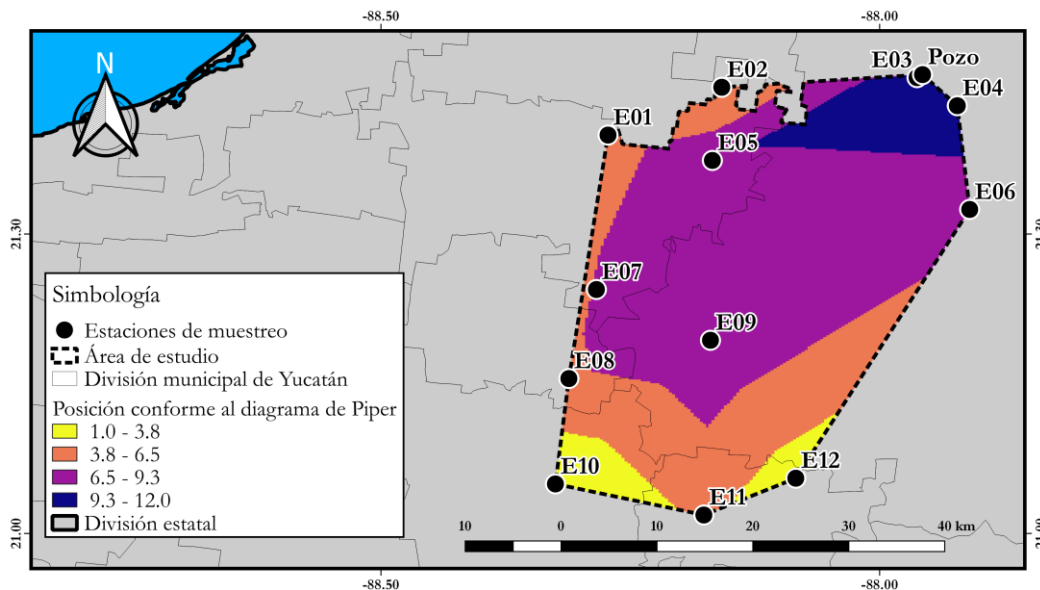


Figura 10. Representación espacial del Diagrama de Piper en el área de estudio. Escala (1: 300,000). (EPSG: 4326 - WGS 84).

Recursos cartográficos empleados para su elaboración:
 INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
 INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Figura 10. Representación espacial del diagrama de Piper en el área de estudio.

2.3.4 Evolución hidrogeoquímica en el área de estudio: diagrama de Mifflin

La evolución hidrogeoquímica se entiende como el proceso mediante el cual el agua subterránea entra en contacto con el material geológico del acuífero, dando como resultado un incremento en la concentración de los iones disueltos en el agua conforme a su trayectoria e interacción con las rocas. En este sentido, se entiende que la evolución hidrogeoquímica es temprana cuando la concentración de iones disueltos en el agua es baja debido al poco tiempo de interacción con las rocas. Para la evolución hidrogeoquímica avanzada ocurre lo opuesto, pues ya que el mayor tiempo de contacto con el material geológico da como resultado una mayor concentración de iones disueltos.

Para este trabajo se siguió la lógica del trabajo de Mifflin (1963), para lo cual se sumaron las concentraciones en meq L⁻¹ de los cationes sodio y potasio así como para los aniones cloro y sulfato de las muestras del agua de estudio. Con dicha información, se construyó una gráfica de dispersión de puntos en escala logarítmica en donde la suma de los aniones se dispuso en el eje de las ordenadas y la de los cationes en el de las abscisas.

Cabe mencionar que el trabajo de Mifflin consistió en delimitar los sistemas de flujo de agua subterránea en Nevada, en donde los iones mencionados en el párrafo anterior sirvieron para interpretar la evolución hidrogeoquímica en el sistema, para posteriormente utilizar al tritio como el indicador para definir los tipos de sistemas de flujo.

Dado a que en este trabajo no se llevaron a cabo los análisis para el tritio presente en las muestras de agua y, considerando que solo se está estudiando un área considerablemente pequeña para las proporciones del acuífero de la PY, se propuso realizar un método de estadística multivariada (análisis clúster de tipo jerárquico aglomerativo por el método de Ward) con la finalidad de comprender la evolución hidrogeoquímica en el área de estudio.

Para éste se tomaron en cuenta la composición isotópica de las muestras de agua (Tabla 2), la composición de cationes y aniones (Tabla 3) –omitiendo la suma de éstos- y los parámetros fisicoquímicos reportados en campo (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua.

Estación	O ₂ (mg L ⁻¹)	T (°C)	SDT	S (ppt)	C (Ω)	pH	Eh
E01	0.87	27	1027	1	2001	7.5	95.7
E02	2.29	31.7	357.5	0.4	817	8.57	75.7
E03	3.17	34.4	1774.5	1.7	3944	9.02	61.2
E04	0.38	28.2	812	0.8	1702	7.3	72.6
E05	1.5	29.3	995	1	2097	8.12	91.2
E06	0.55	28.5	520	0.5	854	7.75	95
E07	1.43	27.2	1014	1	1976	7.14	108.6
E08	1.26	27.4	799.5	0.8	1578	7.65	92.4
E09	2.84	28.8	982	0.9	2005	8.11	100.9
E10	1.56	26.6	618	0.6	1193	7.18	94.4
E11	1.87	27.7	422.5	0.4	843	7.46	89.1
E12	1.18	26.2	553	0.5	1059	7.6	78.7
Pozo	1.06	27.6	1833	1.8	3675	6.97	77.2

En el clúster obtenido (Fig. 11) se logran diferenciar tres grupos que fácilmente pueden ser identificados en el diagrama de Mifflin (Fig. 12). Debido a este hecho se propuso clasificar a los grupos encontrados según su evolución hidrogeoquímica en el área de estudio: temprana, intermedia y avanzada. Se observó que los grupos establecidos por el clúster arrojaron intervalos diferenciados para los valores de las sumas de los cationes y de los aniones empleados para el análisis (Tabla 5).

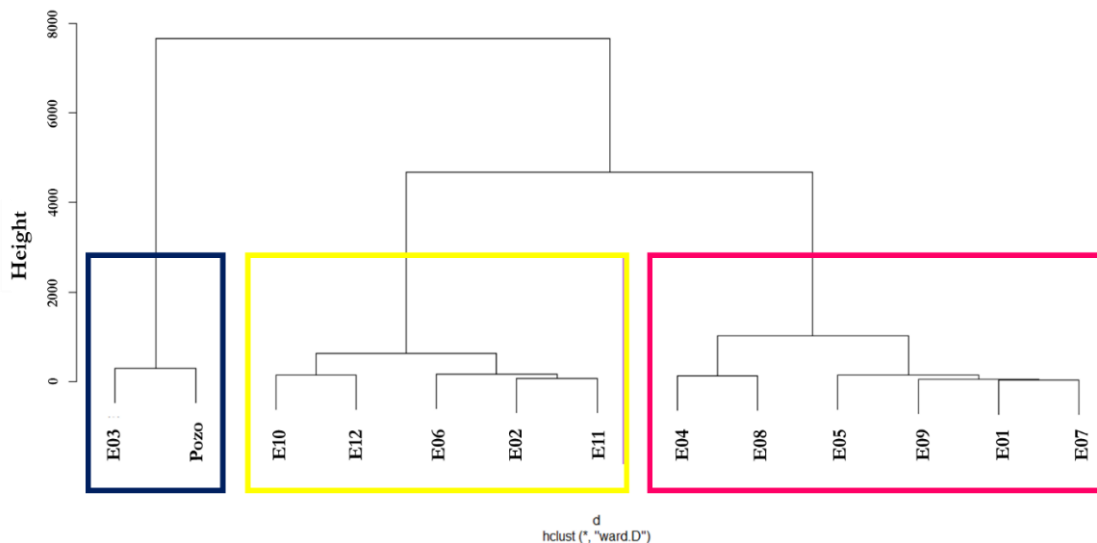


Figura 11. Gráfico del análisis clúster de las muestras de agua.

Tabla 5. Resultados para la construcción del diagrama de Mifflin conforme al análisis clúster.

Estación	Tipo de evolución hidrogeoquímica	Na ⁺ + K ⁺ (meq L ⁻¹)	SO ₄ ⁻² + Cl ⁻ (meq L ⁻¹)
E02	Temprana	2.163	2.376
E11		2.765	3.134
E10		3.208	3.301
E12		3.204	3.541
E06		4.007	4.735
E08	Intermedia	5.413	6.333
E04		7.753	8.855
E07		8.111	9.469
E01		8.290	9.814
E05		8.679	10.280
E09		9.087	10.840
Pozo	Avanzada	19.318	22.322
E03		21.928	22.838

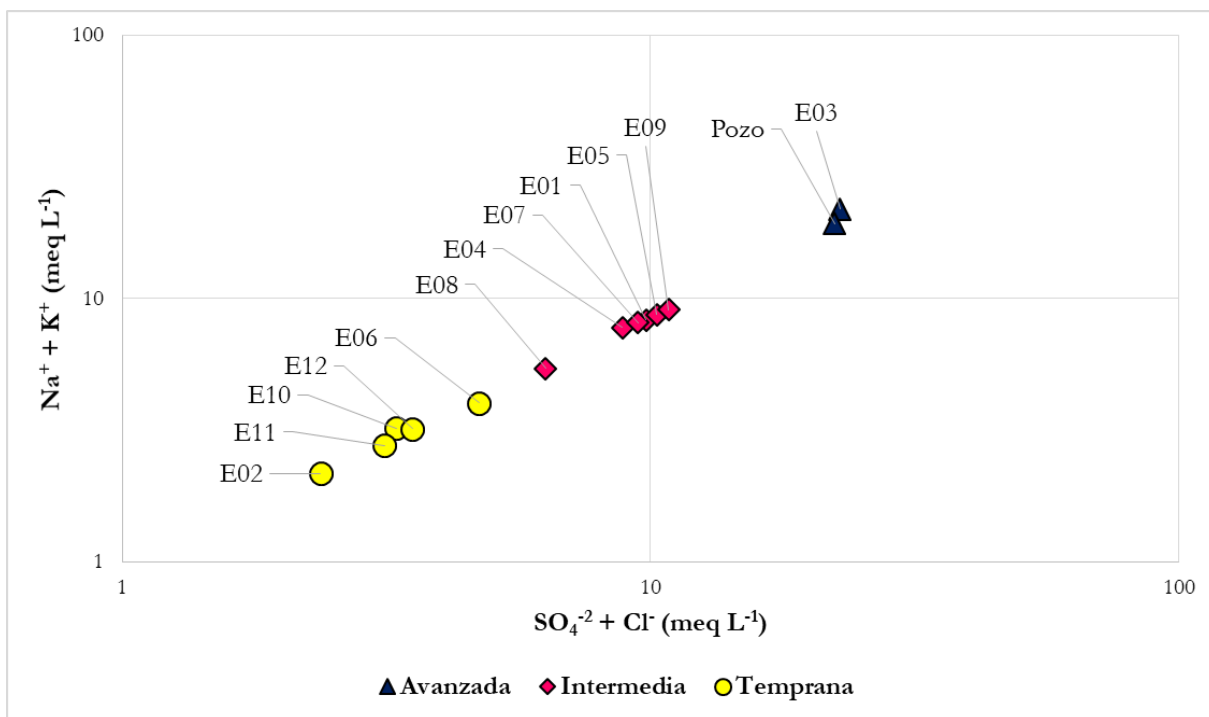


Figura 12. Diagrama de Mifflin de las muestras de agua del área de estudio clasificadas conforme al análisis clúster.

En un contexto espacial (Fig. 13), se observa nuevamente un patrón suroeste – noreste tal como se reportó para el enriquecimiento de iones y de isótopos del agua; que en resumidas cuentas, implica que el transcurso del agua sea en la misma dirección, resultado que concuerda con el trabajo de Bauer et al. (2011).

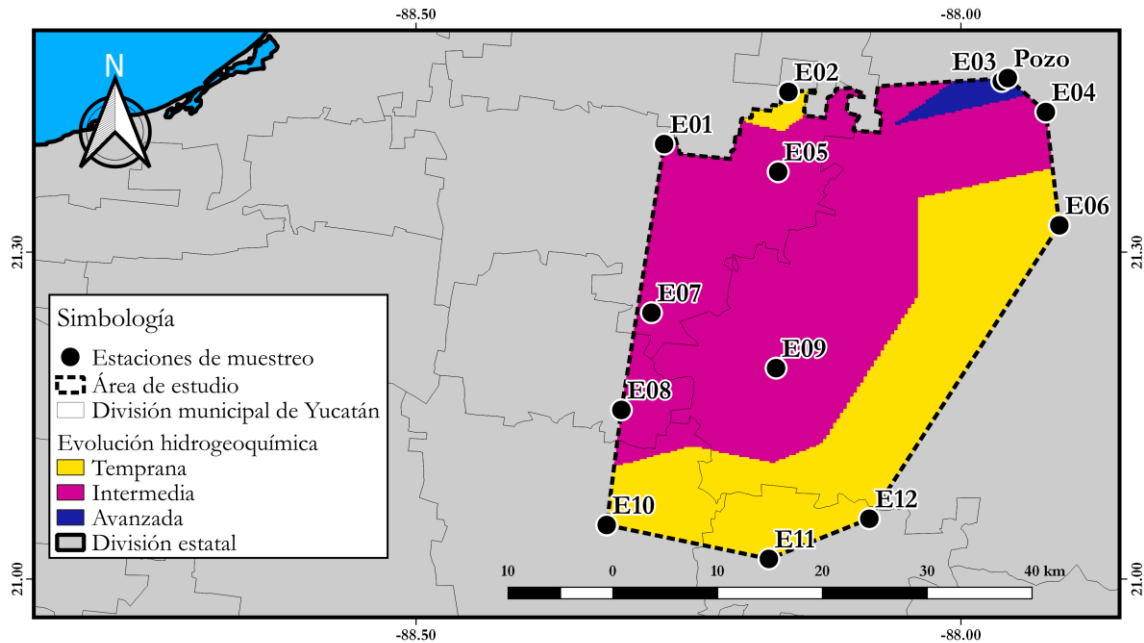


Figura 13. Evolución hidrogeoquímica en el área de estudio. Escala (1:300,000). (EPSG: 4326 - WGS 84).

Recursos cartográficos empleados para su elaboración:
 INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.
 INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Figura 13. Evolución hidrogeoquímica en el área de estudio.

Sin embargo, conforme a los resultados obtenidos, tanto en las figuras 10, 12 y 13 se destaca el hecho de que las estaciones E02 y E06 presentaron un bajo enriquecimiento de iones, y conforme al diagrama de Mifflin y el análisis multivariado, fueron clasificadas como un sitios de evolución hidrogeoquímica temprana pese a que se ubiquen al norte del área de estudio. Ante estos resultados, se plantea que el área de estudio debe ampliar su extensión, especialmente al suroeste. De estos resultados derivan dos hipótesis, ya que podría haber aportes de agua de otras zonas, o bien, podrían tratarse de flujos diferenciados.

Con la finalidad de brindarle mayor profundidad al análisis de la evolución hidrogeoquímica en el área de estudio, se llevó a cabo un análisis de componentes principales por matriz de correlación en donde se utilizaron los datos de los iones que no son requeridos

para construir el diagrama de Mifflin (i.e. Ca^{+2} , Mg^{+2} y HCO_3^-) para enriquecer el análisis y hacerlo más robusto.

Con los datos empleados, es posible explicar el 93% de la varianza observada con los dos primeros componentes (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados del análisis de componentes principales (ACP) para el área de estudio.

Componente principal (CP)	Desviación estándar	Proporción de la varianza	Proporción acumulada
CP 1	1.3521	0.6094	0.6094
CP 2	0.9804	0.3204	0.9298
CP 3	0.45896	0.07021	1.00000

El análisis del peso de las variables dentro de los componentes principales muestra que para el CP 1, el carbonato resultó ser la variable con mayor peso; mientras que para el CP 2 fue el magnesio y el calcio (Tabla 7).

Tabla 7. Cálculo de las correlaciones entre las variables y los componentes principales.

Variable	CP 1	CP 2
Ca^{+2}	-0.6942249	0.681758318*
Mg^{+2}	-0.6738070	-0.704587602*
HCO_3^-	-0.9445384*	0.001548385

Como resultado final del ACP (Fig. 14) se puede observar que la estación E02 mantiene una correlación inversa con el calcio, mientras que la estación E06 mantiene una correlación inversa con el magnesio; cabe mencionar que ambas estaciones se correlacionan inversamente con el carbonato. Este hecho deriva la hipótesis de que en comparación con las otras estaciones, la roca podría presentar un menor grado de intemperización, lo que podría explicar el por qué éstas presentan una evolución hidrogeoquímica temprana pese a que se encuentren muy cercanas a aquellas de evolución intermedia.

Por otro lado, es necesario considerar que el polígono en donde se centró este estudio, en realidad es una porción mínima del acuífero de la PY, por lo que se piensa que si el polígono se extendiera hacia el suroeste, probablemente estas diferencias se verían minimizadas

o se encontraría que el agua que está llegando a particulares estaciones tiene una procedencia diferente.

Además, destaca la estación E03 una aguada que, conforme al análisis realizado en este trabajo, se clasifica como un sitio de evolución hidrogeoquímica avanzada. En relación al ACP, se observa que se correlaciona en gran medida con el magnesio.

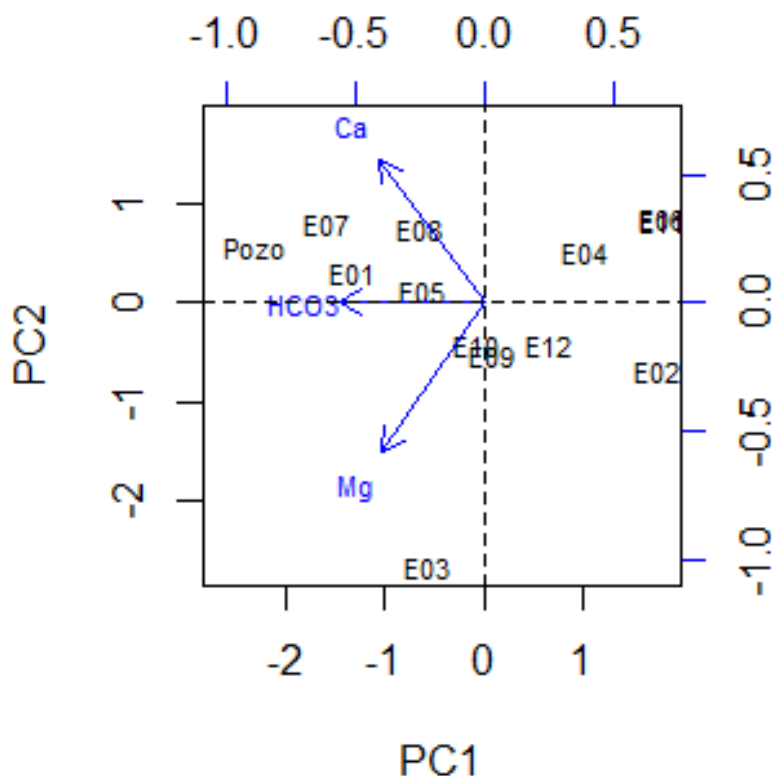


Figura 14. Gráfico del análisis de componentes principales.

En resumen, en la zona de estudio existen tendencias de evaporación y enriquecimiento de especies iónicas en dirección suroeste-noreste que concuerda con la evolución hidrogeoquímica, señalando un proceso de transporte y acumulación de iones en el mismo patrón espacial.

Por ende, conforme el sistema evoluciona en términos hidrogeoquímicos indicaría mayor vulnerabilidad a los procesos de contaminación derivada de la posible acumulación de los contaminantes. Contrariamente, en las zonas de menor evolución hidrogeoquímica se esperaría una mayor dispersión en menor tiempo

Capítulo III: Aspectos generales del contexto socioeconómico que contribuyen a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio.

3.1 Generalidades

Dos conceptos que han tomado relevancia para el desarrollo de estudios sobre el agua han sido la calidad y la contaminación. Si bien es cierto que en el mundo real estos dos mantienen una relación sumamente estrecha, se han tergiversado dentro del argot al grado de emplearlos como sinónimo, aun cuando estas dos nociones impliquen dos aspectos que deben ser diferenciados a la hora de abordar estudios ambientales.

Según la RAE, la palabra calidad proviene del latín *qualitas*, y se refiere a la *propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor*. En este entendido cabe aclarar que la ONU, cuando hace referencia al derecho humano al agua, no habla precisamente de “calidad”, sino que el agua debe ser saludable (i.e. que esté libre de microorganismos patógenos, peligros radiológicos y sustancias químicas que pongan en riesgo a la salud humana) (ONU, 2014).

Este precepto de las Naciones Unidas es retomado en el párrafo sexto del artículo 4° de la CPEUM, mismo que hace referencia al DHAS y -en donde se sustituye la palabra “saludable” por “salubre”. Pese a esto, el único acercamiento conceptual sobre la calidad del agua en la legislación mexicana se dispone en la fracción LV del artículo 3° de la Ley de Aguas Nacionales (LAN).

En ésta se menciona que un uso consuntivo es definido como *El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica...* Entendiéndose que la calidad del agua se tendría que determinar a partir de criterios establecidos para el desarrollo de la actividad en particular.

Por otro lado, la palabra contaminación tiene sus orígenes en el latín (*contaminatio, contaminationis*), que de acuerdo a la RAE la cual alude a la corrupción o suciedad que

adquiere algo por contacto con otra cosa, o por la mezcla de cosas que por fusión dan lugar a otra.

La Real Academia de la Lengua Española (RAE) define a la contaminación como la acción o efecto de contaminar. En este mismo sentido, una de las definiciones del verbo contaminar se entiende como alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos.

Por otro lado, el diccionario de Oxford define a este concepto como la presencia o introducción de una sustancia con efectos nocivos nociva o al medio ambiente (Oxford, s/f).

Retomando los conceptos planteados en el capítulo II, la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) define a la contaminación como *La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico y a contaminante como Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural* (LGEEPA, art. III).

Si bien estas aproximaciones resultan acertadas al resaltar cuestiones de alteración al sistema y los efectos adversos que pueden ocasionar, no está de más recordar que muchos de estos elementos o sustancias se presentan de manera natural en el medio, o bien, son parte de los procesos biogeoquímicos. Además, en el caso de la LGEEPA, resulta necesario hacer hincapié en los efectos en la salud humana además de los componentes bióticos y abióticos de los sistemas así como al componente microbiológico nocivo.

Los procesos de contaminación pueden clasificarse en dos tipos. El primero, denominado como contaminación puntual, se caracteriza por tratarse de fuentes discernibles, discretas y confinadas que pueden descargar contaminantes al medio ambiente; como podrían serlo las plantas industriales o de tratamiento. Por otro lado, el segundo tipo es denominado contaminación no puntual, y se diferencia de la contaminación puntual porque los contaminantes se derivan de fuentes difusas y es causada por la lixiviación de los contaminantes, o por la infiltración de agua de menor calidad.

Considerando las aseveraciones anteriores se propone al concepto de contaminación como un proceso antropogénico caracterizado por la alteración accidental, desconocida o

imprudencial que empeoren la calidad del agua ya sea por el ingreso de sustancias ajenas al sistema, o de las mismas que se presenten de manera natural y que superen su capacidad de carga. Los procesos de contaminación pueden contribuir al detrimento de la calidad del agua; dando a entender que esta última se refiere a las características químicas, radiológicas y microbiológicas que le confieren al agua la afinidad para un uso en específico.

3.1.1 Arsénico (As)

El arsénico (As) es un elemento clasificado como un metaloide dado a que posee propiedades de los metales y los no metales. Su peso atómico es de 74.92 una y se puede encontrar en tres estados de oxidación (3-, 3+, 5+) (Klassen, 2008).

Jaishkanar y colaboradores (2014) aseveran que el As constituye el vigésimo elemento más abundante en la Tierra y sus formas como la arsenita y arseniato son letales tanto para la salud humana como para otros seres vivos. Sus fuentes antropogénicas se derivan de las actividades industriales, agropecuarias, así como de un mal manejo de residuos sólidos y líquidos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) (2018) asevera que el arsénico inorgánico se comporta como un cancerígeno, y a corto plazo puede inducir vómitos, dolor abdominal y diarrea; síntomas a los que les siguen entumecimientos y sensaciones de picazón. A largo plazo, es posible desarrollar diabetes, enfermedades cardiovasculares, pigmentaciones en la piel, hiperqueratosis, cáncer de piel y, partos prematuros y mortalidad infantil.

Ravenscroft y colaboradores (2009) reportan que la contaminación por As en el agua subterránea ha alcanzado magnitudes globales, en donde existen numerosas regiones que han documentado este problema.

3.1.2 Coliformes fecales (*E. coli*)

Los coliformes totales son un grupo de bacterias Gram negativos con forma de barra que incluyen coliformes termotolerantes, bacterias de origen fecal y algunas otras aisladas de otras fuentes ambientales .(Batram & Pedley, 1996).

El término “coliformes fecales” ha sido utilizado en la microbiología del agua para referirse a organismos coliformes que crecen a 44 o 44.5 °C y fermentan lactosa para producir ácido y gas. Aunque muchos de estos organismos no provengan de materia fecal y se opte por llamarlos coliformes termotolerantes, su presencia siempre indica contaminación por materia fecal. De hecho, al menos el 95% de los organismos termotolerantes aislados del agua resultan ser bacterias de *Escherichia coli* que se albergan en los tractos intestinales de los organismos de sangre caliente. Sus fuentes antropogénicas se derivan de una mala gestión de las aguas residuales así como del desarrollo de actividades pecuarias (Batram & Pedley, 1996; Mellor et al. 2013).

A pesar de que algunas *E. coli* sean bacterias comensales inofensivas, existen cepas que resultan ser sumamente dañinas para el ser humano ocasionando diarrea hemorrágica, síndrome urémico hemolítico, meningitis neonatal y algunas infecciones renales (Ishii & Sadowsky, 2008).

3.1.3 Nitrato (NO_3^-)

El nitrato es un compuesto químico conformado por un átomo de nitrógeno y tres de oxígeno (NO_3). Es una de las formas más comunes del nitrógeno en el agua junto con el nitrito (NO_2) y amoníaco (NH_3). El nitrato suele derivar de fuentes naturales así como también de las actividades humanas. Entre las primeras, se encuentran la descomposición de la materia orgánica y el intemperismo de los minerales. Por otro lado, son consideradas fuentes antropogénicas de nitrato la lixiviación de estos compuestos por cultivos agrícolas, descargas de lagunas y tanques sépticos, deforestación y el uso inadecuado de fertilizantes nitrogenados (Bu et al., 2016).

Pacheco-Ávila y Cabrera-Sansores (2003) establecen que el nitrato se caracteriza por ser un contaminante soluble que no es adsorbido por los materiales del acuífero y que no logra

precipitar como un mineral, por lo cual suele transportarse por largas distancias, especialmente en sedimentos altamente permeables o rocas fracturadas.

La presencia del nitrato en el medio ambiente conduce a procesos de eutrofización, caracterizado por el incremento de cianobacterias tóxicas, consumo anormal de oxígeno, descomposición de la materia orgánica, alteración de parámetros fisicoquímicos y decrecimiento en la abundancia de especies. Por otro lado, se han identificado problemas de salud por nitrato en el medio acuoso. Un ejemplo es la metahematogloboanemia en niños mayores de seis meses, cáncer, malformaciones al nacer, entre otros (Scholten et al, 2005; OMS, 2011).

3.2 Metodología.

3.2.1 Análisis de los aspectos antropogénicos que desencadenan los procesos de contaminación en el área de estudio

Se consultaron fuentes oficiales para conocer aspectos socioeconómicos, de uso de suelo y de servicios públicos en los municipios del área de estudio para contar con indicadores que permitan analizar los factores antropogénicos que desencadenan los procesos de contaminación. Una vez establecidos, éstos se contrastan con los resultados obtenidos de la determinación de contaminantes en el área de estudio para determinar las posibles fuentes de contaminación.

3.2.2 Determinación de la concentración de contaminantes en el agua subterránea del área de estudio

En esta investigación se analizaron las concentraciones de arsénico, nitrato y coliformes fecales. Las muestras de agua fueron colectadas en septiembre de 2016 en las estaciones de muestreo determinadas para llevar a cabo el análisis hidrogeoquímico,

La metodología de la determinación del nitrato se encuentra dispuesta en el capítulo II, ya que se trata de uno de los aniones que arrojan los análisis hidrogeoquímicos empleados para esta investigación.

La determinación de coliformes fecales se llevó a cabo en el Centro de Investigaciones del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán conforme a las disposiciones de la

NOM-SSA1-1994 a través de la determinación del NMP. Este método se sustenta en que las bacterias coliformes incubadas a $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ fermentan lactosa durante un periodo de 24 a 48 horas, que deriva la producción de gases y ácidos que se manifiestan en las campanas de fermentación. La preparación de las soluciones y caldos nutritivos se realizó conforme a las disposiciones de esta Norma y el equipo fue esterilizado en un autoclave a una temperatura de 120°C y presión de 100 kPa.

En la etapa presuntiva, se inocularon volúmenes de 10 mL de muestra a cada tubo de ensayo, a los cuales se añadieron 20 mL de la solución lactosada. Posteriormente se colocaron en una incubadora a 35°C durante dos días. Al presentar todas las muestras presencia de gas, pasaron a la fase confirmativa.

En esta fase, se sembraron y cultivaron las muestras de la incubación en tres tubos con caldo lactosa bilis verde brillante y se incubó a 35°C durante 48 horas. Al finalizar el periodo se verifica la presencia de gases en la campana de fermentación.

La determinación de As, corrió a cargo del Instituto Geológico y Minero de España. Para esto las muestras de agua fueron agitadas manualmente durante un minuto. Una vez agitadas, se pesó y puso una membrana de nitrocelulosa por la que se filtró el agua. Al agua difundida de cada muestra se le agregaron 2 mL de HNO_3 concentrado para evitar que el As no se precipitara o fuera adsorbido por las paredes del recipiente. Una vez acidificadas, se analizó la concentración de As por medio de un espectrofotómetro de masas junto con la lectura de un blanco, que consistió en la lectura de una muestra de agua desionizada.

3.3 Resultados

3.3.1 Aspectos socioeconómicos que contribuyen a la contaminación del agua subterránea en el área de estudio.

En su conjunto, los municipios del área de estudio (Fig. 5) suman una población de 109,394 habitantes según datos censales del INEGI levantados en el 2015. Esta cifra representa el 5.22 % de la población a nivel estatal (Tabla 8) (INEGI, 2017).

Tabla 8. Habitantes al 2015 en el área de estudio por municipio. Fuente (INEGI, 2017).

Municipio	Número de habitantes
Calotmul	3,992
Espita	16,071
Panabá	7,792
Sucilá	3,918
Tizimín	77,621
Total	109,394

Cabe mencionar que en el área de estudio las actividades agropecuarias cobran una gran relevancia, ya que para el 2016 los municipios del área de estudio fueron responsables de la producción del 43.96% de las 5,707,260.60 toneladas de producción agrícola y el 53.57% de las 98,183.83 toneladas producidas de ganado bovino en el estado (SIAP, 2017a; SIAP, 2017b).

Con base en las estadísticas del Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP) la producción agrícola para el 2016 en el área de estudio constituyó un 96.22% de cultivos para forraje (i. e. sorgo, maíz para forraje y pasturas) y en un 3.78% de cultivos para consumo humano (e. g. aguacate, papaya, calabaza, etc.) (Fig. 15).

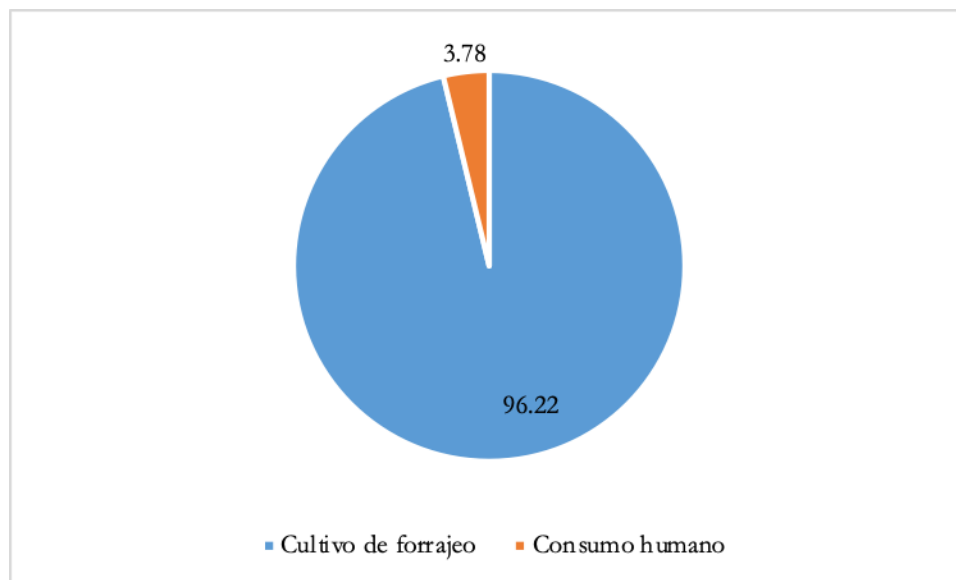


Figura 15. Porcentaje de los tipos de cultivos en el área de estudio para el 2016. Fuente (SIAP, 2017b).

En este tenor, el municipio de Tizimín es el que en el 2016 llevaba la cabeza con la producción de cultivos de forrajeo, seguido de Panabá, Sucilá, Calotmul y Espita. En el caso de los cultivos para consumo humano era liderado por Espita, seguido de Tizimín, Panabá, Calotmul y Espita (Fig. 16).

En términos pecuarios, Tizimín era el municipio del área de estudio con mayor producción de ganado bovino, seguido de Panabá, Sucilá, Espita y Calotmul (Fig. 17).

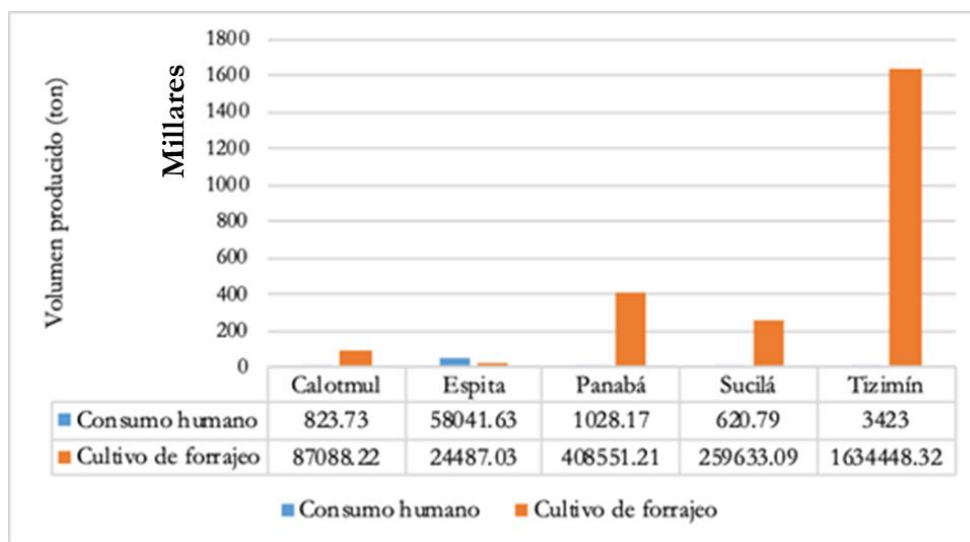


Figura 16. Porcentaje de los tipos de cultivos en el área de estudio para el 2016. Fuente (SIAP, 2017b).

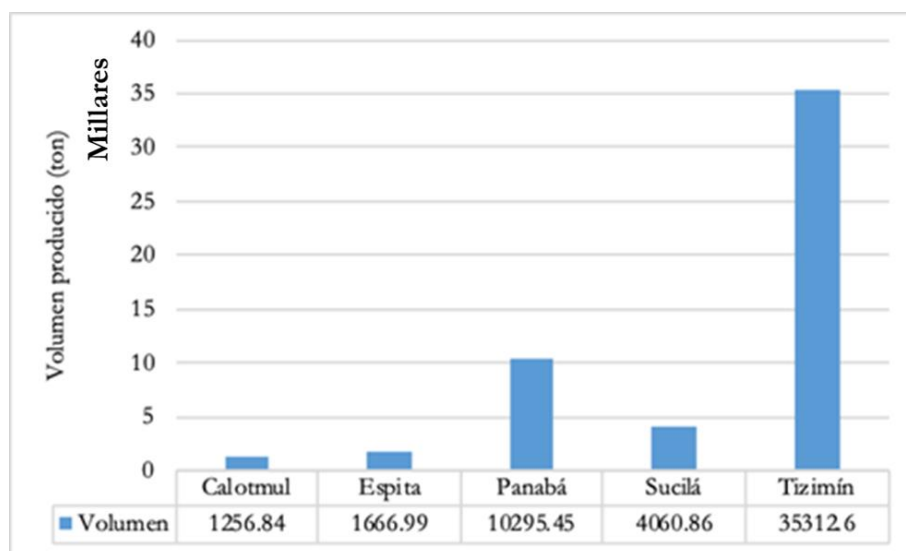


Figura 17. Volúmenes de producción de ganado bovino en el área de estudio por municipio. Fuente (SIAP, 2017a)

En el área de estudio destaca la cobertura territorial destinada para el cultivo de pastizal, que en total abarca el 54.17% del área comprendida en los cinco municipios, mientras que para la agricultura, el porcentaje de extensión es de 2.09%. Los asentamientos humanos ocupan el 0.43% de la zona y se distinguen algunos ecosistemas como la selva, manglares y dunas costeras para Tizimín (Fig. 18).

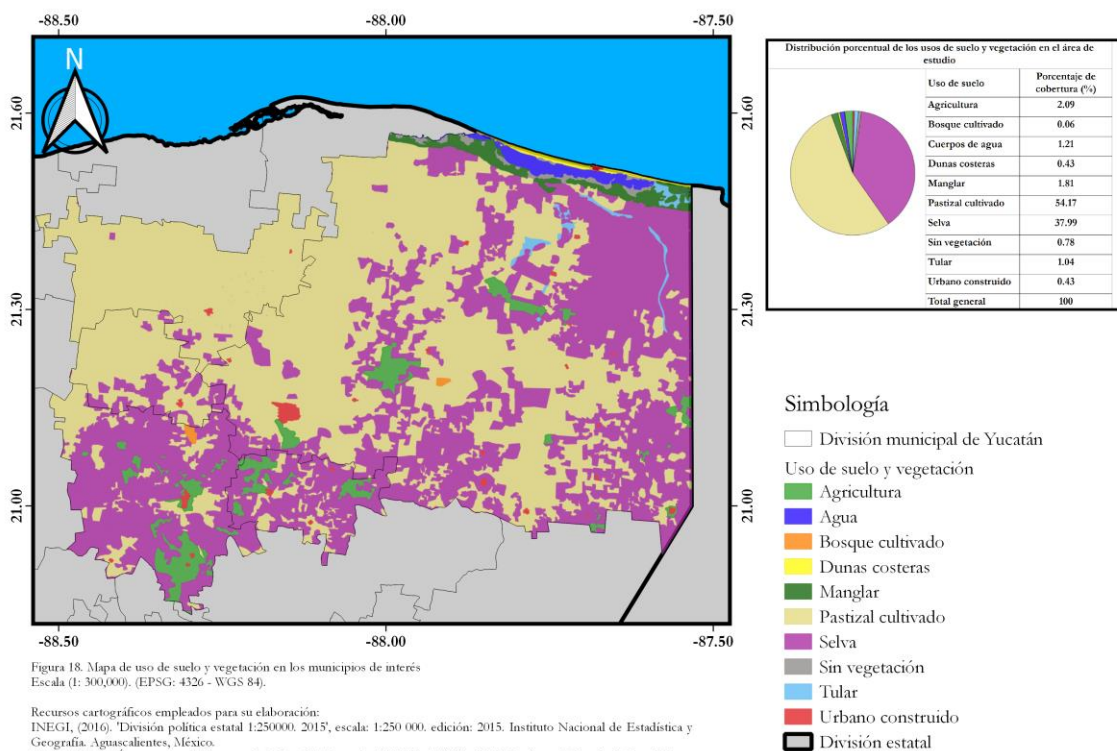


Figura 18. Mapa de uso de suelo y vegetación en los municipios de interés área de estudio.

La pobreza y marginación son aspectos importantes a considerar en este trabajo para el estudio de los procesos de la contaminación en el área de estudio, ya que representan las condiciones socioeconómicas que le conferirán vulnerabilidad al sistema ante los procesos de contaminación, tanto como detonadores de dichos procesos, o bien, como limitantes para su control o mitigación.

En general, los municipios que comprenden el área de estudio cuentan con un grado de marginación medio a excepción de Espita, el cual para el 2010 reportaba un grado de marginación alto. En cuanto a la pobreza, todos los municipios superan el 70% de la población que vive en esta condición (Tabla 9).

Tabla 9. Marginación y pobreza en el área de estudio por municipio.

Municipio	Grado de marginación	Población en situación de pobreza
Calotmul (SEDESOL, 2016a)	Medio	82.14 %
Espita (SEDESOL, 2016b)	Alto	80.63 %
Panabá (SEDESOL, 2016c)	Medio	79.34 %
Sucilá (SEDESOL, 2016d)	Medio	72.61 %
Tizimín (SEDESOL, 2016e)	Medio	70.23 %

Con relación a lo planteado anteriormente en el capítulo I sobre el problema del tratamiento de aguas residuales, se observa que el mecanismo más recurrido para la disposición de aguas residuales en los municipios del área de estudio consiste en emplear fosas sépticas o biodigestores. Además se destaca el mínimo porcentaje de viviendas que se encuentra conectado a la red pública de drenaje para los cinco municipios así como la presencia de vertimientos de aguas residuales a grietas (Tabla 10). Es necesario considerar que no existen plantas de tratamiento de aguas residuales en ninguno de los municipios del trabajo (INEGI, 2017).

Tabla 10. Disponibilidad porcentual de drenaje en las viviendas particulares en el área de estudio por municipio.

Fuente (INEGI, 2017).

Municipio	No dispone	Dispone			Sin especificar
		Red pública	Fosa séptica o biodigestor	Barranca o grieta	
Calotmul	11.40	0.15	88.15	0.30	0
Espita	31.57	0.34	67.28	0.68	0.12
Panabá	13.68	0.55	85.38	0.35	0.04
Sucilá	16.08	0.61	82.00	1.20	0.10
Tizimín	16.77	0.24	82.53	0.23	0.22
Promedio	17.90 ± 7.93	0.38 ± 0.20	81.07 ± 8.09	0.55 ± 0.40	0.10 ± 0.08

3.3.2. Procesos de contaminación en el agua subterránea

En el caso del As, se observa que los valores reportados en cada estación se encuentran por debajo del límite de detección del equipo utilizado (Tabla 11). La baja concentración de As puede explicarse porque la campaña de recolección de muestras se desarrolló durante la temporada de lluvias, donde el flujo del acuífero se incrementa significativamente promoviendo con esto un mayor transporte en una mayor área y por ende una dilución del elemento. Por lo tanto para los sitios estudiados y durante la época de lluvias el As no constituye un riesgo ambiental.

Tabla 11. Uso de suelo y concentraciones de los contaminantes analizados en el agua subterránea del área de estudio.

Estación	Uso de suelo	As (mg L ⁻¹)	Nitrato (mg L ⁻¹)	Coliformes fecales (NMP 100mL ⁻¹)
E01	Ganadero	< 0.02	24.45	228.2
E02	Asentamiento humano	< 0.02	5.25	27.2
E03	Ganadero	< 0.02	5.93	12.1
E04	Ganadero	< 0.02	13.32	81.3
E05	Ganadero	< 0.02	4.31	25.6
E06	Asentamiento humano	< 0.02	55.91	1011.2
E07	Ganadero	< 0.02	26.67	436.0
E08	Asentamiento humano	< 0.02	60.35	198.9
E09	Asentamiento humano	< 0.02	14.77	1011.2
E10	Sin actividad aparente	< 0.02	22.21	142.1
E11	Asentamiento humano	< 0.02	38.56	24.3
E12	Asentamiento humano	< 0.02	28.26	687.9
Pozo	Ganadero	< 0.02	40.64	56.3

Sin embargo, el nitrato tomó valores en un intervalo de 4.31 a 60.35 mg L⁻¹, siendo las estaciones E06 y E08 las que reportaron mayor concentración en el área de estudio, y que coinciden con la presencia de asentamientos humanos (Tabla 11) (Fig. 19). Cabe destacar que en un estudio dirigido por Pérez-Ceballos y Pacheco-Ávila (2004) los promedios de la concentración de nitrato en los pozos muestreados de los municipios de Panabá, Sucilá, Panabá y Tizimín, durante la temporada de estiaje, no reportaron concentraciones de nitrato

mayores a 30 mg L⁻¹. Esto probablemente indica que el nitrato presente en época de lluvias puede estar entrando por 1) la lixiviación de los contaminantes generada por las lluvias o por 2) mayor percolación de las ineficientes fosas sépticas. Sin embargo, para elucidar las actividades que aportan dicho nitrato se requiere llevar a cabo un estudio de isótopos de nitrógeno.

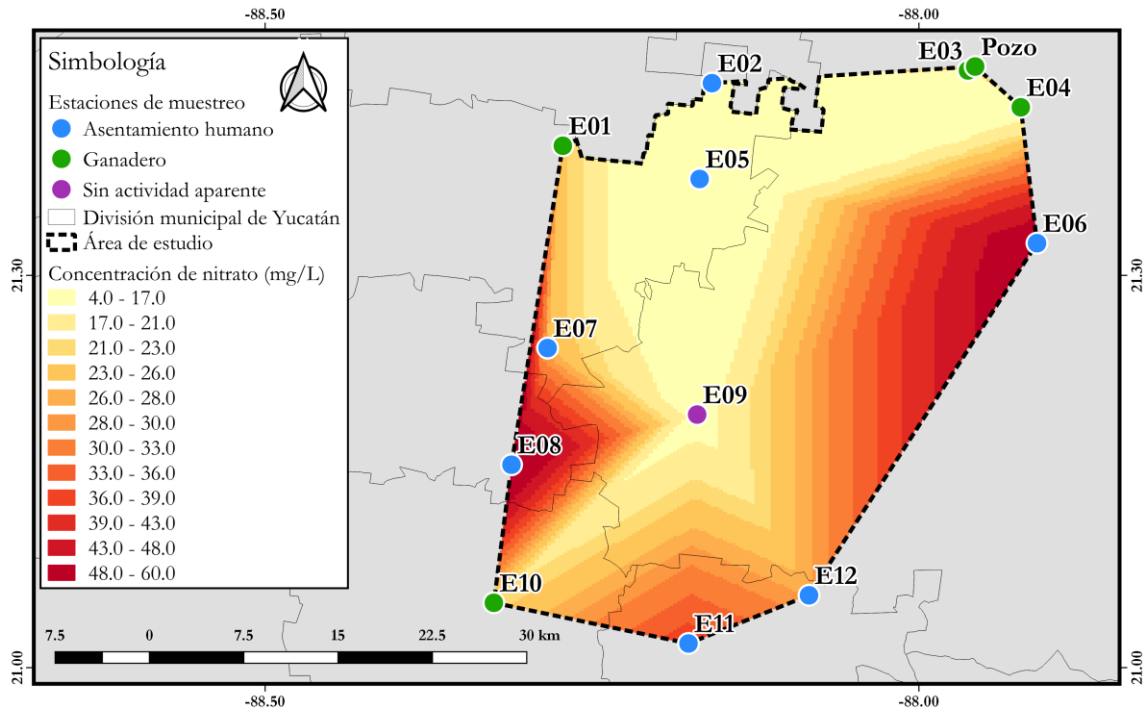


Figura 19. Concentración de nitrato (mg/L) en el agua subterránea del área de estudio. Escala (1: 250,000). (EPSG: 4326 - WGS 84). Recursos cartográficos empleados para su elaboración: INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Figura 19. Concentración de nitrato (mg L⁻¹) en el agua subterránea del área de estudio.

Por otro lado, las concentraciones de coliformes fecales tomaron valores en un intervalo de 12.1 a 1011.2 NMP/100mL⁻¹, siendo las estaciones E06 y E09 aquellas que reportaron los valores más altos (Tabla 11) (Fig. 20). Si se compara con el trabajo de Pacheco-Ávila et al. (2004), se puede decir que las estaciones E01, E06, E09 y E10 superan la concentración de su referente municipal; que para Panabá (i.e. E01), Espita (i.e. E10) y Tizimín (i.e. E06 y E09) fue de 11 a 100 NMP 100mL⁻¹.

Los resultados obtenidos ponen en evidencia la presencia de materia fecal en el agua subterránea de la zona; sin embargo, para determinar a los productores de dicha materia (humanos o animales de ganado) se requeriría llevar a cabo un análisis de esteroides fecales en la zona (Árcega-Cabrera et al., 2014).

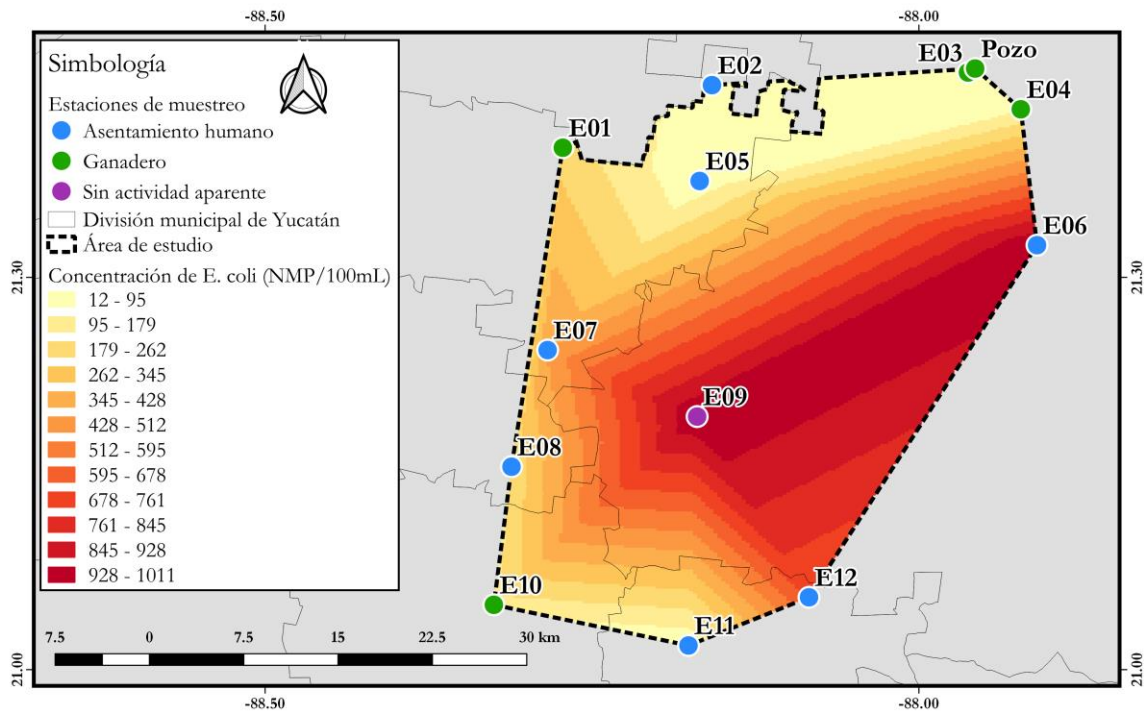


Figura 20. Concentración de E. coli (NMP 100mL-1) en el agua subterránea del área de estudio.

Se llevó a cabo un modelo de regresión lineal (MRL) para determinar si las concentraciones de nitrato de agua subterránea están relacionadas con las concentraciones de coliformes fecales, esto debido a que las estaciones de muestreo indicaban presencia de asentamientos humanos o de sitios ganaderos, las cuales representan fuentes de materia fecal. En éste, el nitrato fue considerado como la variable independiente y fue expresado en mg L^{-1} ; mientras que las coliformes fecales representaron la variable dependiente y sus concentraciones fueron transformadas a su logaritmo base 10 para cumplir con el supuesto de normalidad.

El modelo devolvió una recta cuya pendiente tuvo como valor 0.015447 y una ordenada al origen de 1.692813. El valor de probabilidad asociado al modelo fue de 0.1411 ($p > 0.05$) y un coeficiente correlación de Pearson cuya probabilidad asociada fue de 0.316 ($p > 0.05$) (Tabla 12) (Fig. 21). Resultados similares en donde la correlación entre estos contaminantes no es significativa se han reportado en los trabajos de Picone et al. (2003) y Rodríguez et al. (2012).

Tabla 12. Resumen del MRL para $\log_{10} E. coli$ (NMP 100mL⁻¹) ~ NO₃⁻ (mg L⁻¹).

Coefficiente	Estimado	Error estándar	Valor de t	Pr ($> t $)
Ordenada al origen	1.692813	0.307866	5.499	0.000187
Pendiente	0.015447	0.009742	1.586	0.141126

Error residual estándar: 0.6207 en 11 grados de libertad

R² múltiple: 0.186 **R² ajustada:** 0.1121

F – estadístico: 2.514 en 1 y 11 grados de libertad. **Valor de p :** 0.1411

Coefficiente de correlación de Pearson: 0.3019421 ($p=0.316$)

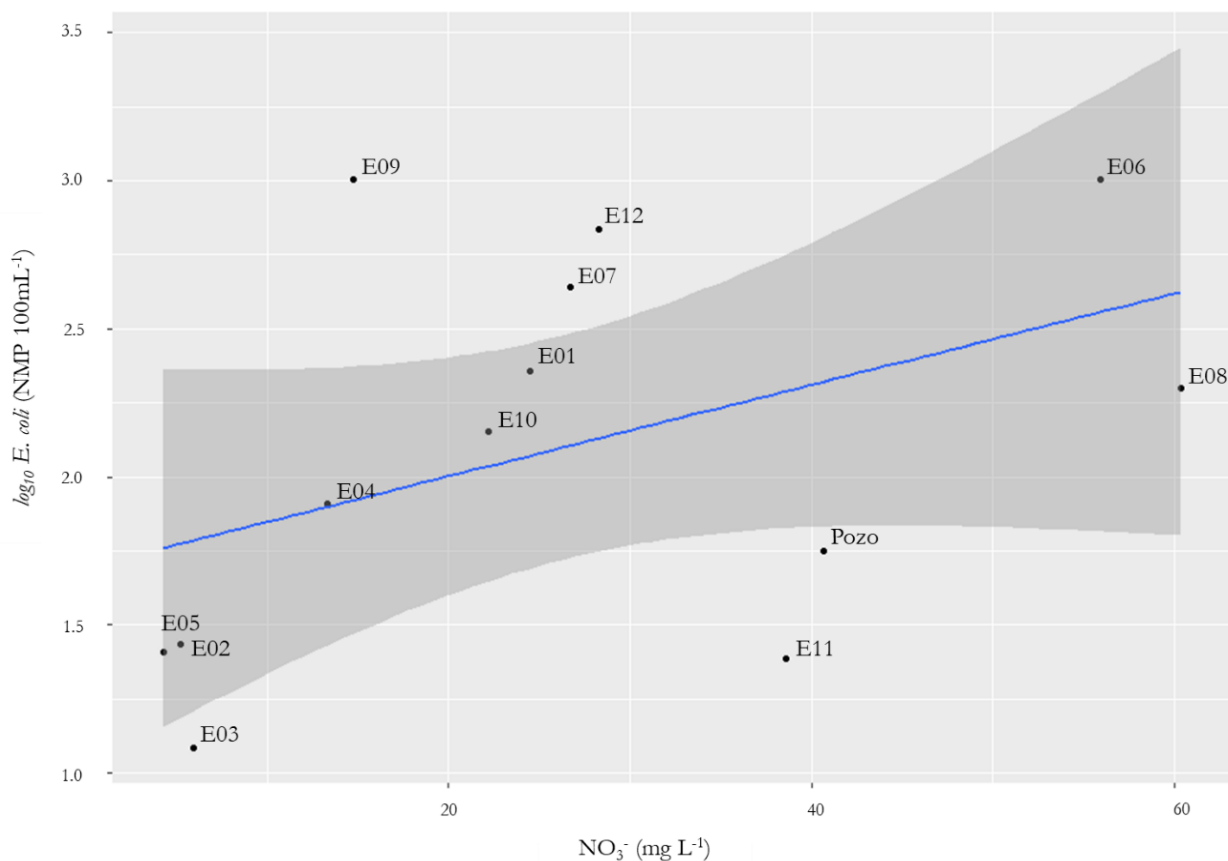


Figura 21. Gráfico del MRL para $\log_{10} E. coli$ (NMP 100mL⁻¹) ~ NO₃⁻ (mg L⁻¹).

La prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los residuales del modelo arrojó un valor de probabilidad igual a 0.8126 ($p > 0.05$), por lo que los residuales tienen una distribución normal (Fig. 22). Además, la prueba de Breusch – Pagan aplicada al modelo devolvió un valor de probabilidad de 0.8802 ($p > 0.05$), lo que significa que no hay evidencias para determinar que existe falta de homocedasticidad. Con estas bases, la hipótesis planteada en el MRL se sostiene.

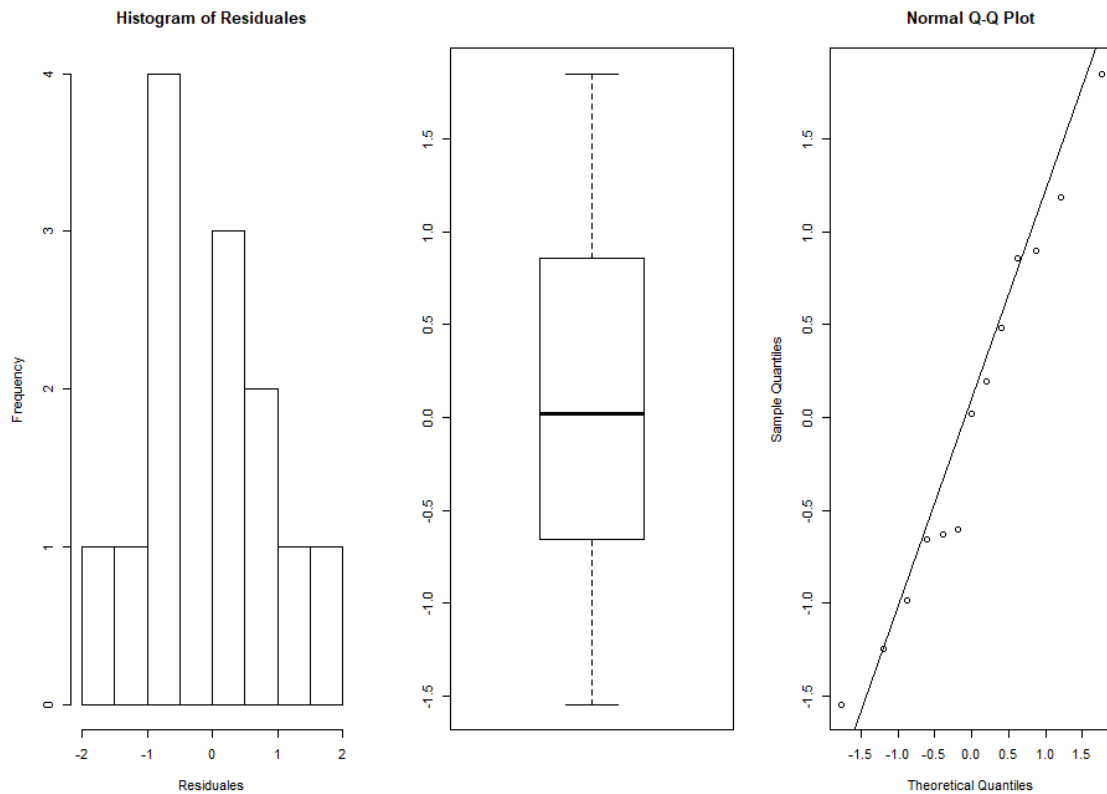


Figura 22. Normalidad de los residuales del MRL para $\log_{10} E. coli$ ($NMP\ 100mL^{-1}$) $\sim NO_3^-$ ($mg\ L^{-1}$).

Este hecho sugiere que la materia fecal no es la única fuente de nitrato y que es posible que se desarrollen procesos de contaminación difusa en el área de estudio; ya que existe una relación entre el cultivo de pastos y el desarrollo de actividades ganaderas. En la Fig. 20 hay estaciones que reportan altas concentraciones de coliformes mientras la concentración de nitrato es baja, y viceversa, que podría sugerir una posible diferenciación de fuentes de contaminación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente un análisis de isótopos de nitrógeno sería necesario. Los procesos de contaminación difusa en el área de estudio son de esperarse, ya que este trabajo se desarrolla en un acuífero kárstico y los flujos preferenciales

que distribuyen o acumulan los contaminantes en el medio van a depender del nivel de karsticidad y por ende la formación de poros o conductos en la zona (Ravelo-Cervantes, 2006).

Ante estos resultados, es necesario incrementar la densidad de puntos de muestreo y llevar análisis complementarios que permitan refinar la identificación de las fuentes de nitrato en el área de estudio, tal como el análisis del uso combinado del $\delta^{15}\text{N}$ y del $\delta^{18}\text{O}$ de la molécula del NO_3^- , empleado ya en diversos estudios (Kendall, 1998; Tredoux & Talma, 2006; Urresti-Estala et al., 2015). Además, se sugiere llevar a cabo estudios de geofísica que permitan identificar la existencia de cavernas o grutas para refinar el análisis del transporte hidrogeológico de contaminantes en el área de estudio (Ravelo-Cervantes, 2006).

Pese a las consideraciones anteriores, cabe mencionar que conforme a la información obtenida se puede aseverar que, a diferencia del As, la presencia de nitrato y coliformes fecales se vuelve más evidente por la dinámica del sistema y la naturaleza de sus fuentes. Es decir, las lluvias en el área de estudio propician las condiciones adecuadas para la lixiviación hacia el manto freático del nitrato derivado de los fertilizantes, y de éste y los coliformes provenientes de los residuos fecales del ganado. En esta misma lógica, debe considerarse que las descargas de aguas residuales por parte del uso público – doméstico y de la ausencia de procesos que aseguren su tratamiento, significa un aporte continuo de estos contaminantes al agua subterránea.

Con lo establecido en este capítulo, se propone que hasta que no se cuente con mayor información que permita realizar un análisis más detallado, se analicen los problemas de contaminación de manera local.

Capítulo IV: Análisis del marco normativo de la regulación aplicable a la prevención y control de la contaminación del agua subterránea

4.1 Introducción

El agua juega un papel fundamental en los ecosistemas, en las actividades productivas y en la vida del hombre. Resulta casi imposible pensar en algún proceso humano que directa o indirectamente no se encuentre vinculado a este recurso. Su importancia llevó a que en el año 2002 el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, en la Observación no. 15 emitida por este mismo comité, se haya reconocido que el derecho humano al agua es indispensable para una vida humana y digna. Este derecho es definido como el derecho de cada uno a disponer de agua suficiente, salubre, saludable, aceptable, físicamente accesible y asequible para su consumo (CDESC, 2003).

Además en el 2010, surge la Resolución 64/292, en donde la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoce de manera explícita el derecho humano al agua y al saneamiento (DHAS). En esta resolución se le insta a los Estados y organizaciones internacionales a que éstos destinen recursos financieros, y que propicien capacitación y transferencia de tecnología con la finalidad de que asistan a los países en vía de desarrollo para que éstos sean capaces de suministrar agua potable y contar con un saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

No es sino hasta en febrero del año 2012, en el que se reforma el artículo 4° de la CPEUM y el derecho humano al agua y el saneamiento queda plasmado en nuestra Carta Magna, en donde se establece que:

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (CPEUM, art. 4).

Dado a que este capítulo en particular se centra en la regulación de la contaminación de las aguas subterráneas es necesario ahondar en dos conceptos de este párrafo constitucional: “Salubre” y “saneamiento”. Por un lado, el término salubre hace referencia a que el agua para el uso doméstico y público debe estar libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que puedan poner en riesgo la salud humana. Por otro lado, el saneamiento es entendido como el acceso y uso de instalaciones que desalojen las aguas residuales, asegurando un entorno de vida limpio y saludable para todos (ONU, 2014; Simental-Franco, 2018).

Es de suma importancia que nuestra Carta Magna reconozca el DHAS, puesto a que éste no se trata de un derecho aislado, sino que por el carácter estratégico del agua también se vincula con otros derechos humanos también planteados en la Constitución, tales como el derecho a la no discriminación, a un medio ambiente sano, a la equidad de género, a la salud, a una vivienda digna y decorosa, entre otros.

Resulta necesario entonces, que ante los problemas de contaminación del agua, se lleve a cabo una revisión del marco jurídico mexicano (a nivel federal y a nivel local) para tener como punto de partida la manera en que los instrumentos normativos establecen pautas y medidas para su regulación.

4.2 Metodología

Para el desarrollo de este capítulo, se hizo un análisis sistemático de la legislación federal y local en materia de agua subterránea, así como jurisprudencial, para plantear las deficiencias y áreas de oportunidad de estos instrumentos normativos en el control y prevención de la contaminación del agua subterránea en el área de estudio. Una vez identificados, la información fue sistematizada en subcapítulos para facilitar los procesos de integración de este trabajo de investigación.

4.3 Resultados

4.3.1 El artículo 27 constitucional y el agua subterránea.

El artículo 27 de la CPEUM estipula que la propiedad de las tierras y aguas que se encuentren dentro de los límites del territorio nacional le corresponden originalmente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo así la propiedad privada. Pese a este principio, resulta necesario revisar lo dispuesto en el párrafo quinto de este artículo, el cual establece que:

Son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; la de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley. Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten las entidades federativas (CPEUM, art. 27).

Si se analiza a detalle lo establecido en este párrafo, se observa una lista limitativa de las aguas que son propiedad de la Nación en donde el agua subterránea (concebida como aguas del subsuelo en el texto constitucional) no se reconoce explícitamente como tal, sino que se estipula que éstas pueden ser libremente alumbradas y apropiadas por el dueño del terreno a salvedad de que el Ejecutivo Federal reglamente su uso, o bien, establezca una zona de veda. Si contrastamos este postulado con el artículo 838 del Código Civil Federal, el cual establece que “*No pertenecen al dueño del predio los minerales o substancias mencionadas en el párrafo cuarto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, ni las aguas que el párrafo quinto del mismo artículo dispone que sean de propiedad de la Nación.*”, el cual se replica en el artículo 664 del Código Civil de Yucatán, entonces es posible aseverar que, desde una perspectiva jurídica, el agua subterránea pasa a ser una parte integrante de los predios y que por consiguiente constituyen parte de la propiedad privada atendiendo al principio de accesión.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) es el instrumento jurídico que pone sobre la mesa las disposiciones para la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable, tanto de las aguas superficiales o del subsuelo (LAN, art. 1; LAN, art. 2). Si se conjugan las aseveraciones mencionadas, entonces se puede observar que las disposiciones sobre agua subterránea en la LAN no concuerdan con lo establecido en la CPEUM.

Por otro lado, resulta erróneo pensar que al agua subterránea se le pueda poner un límite determinado por un predio, ya que esta transita a lo largo de un sustrato geológico. El hecho de que la Constitución considere a este recurso como un bien accesorio a los predios no es compatible con la dinámica real de los acuíferos.

4.3.2. Agua subterránea y acuíferos desde la perspectiva legal.

En el artículo 3 de la LAN las aguas subterráneas se denominan como aguas del subsuelo, y en este instrumento se definen como *Aquellas aguas nacionales existentes debajo de la superficie terrestre*. Si se considera lo establecido en el párrafo V del artículo 27 de la CPEUM, existe una discrepancia entre lo que establece dicha ley y el texto constitucional.

Por otro lado, el artículo 3 de la LAN, define al acuífero como:

“Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo”.

Es así, como la CONAGUA ha determinado que en México existen un total de 653 acuíferos. Sin embargo, cabe decir que la delimitación de éstos no solamente carece del conocimiento derivado de los avances de la hidrogeología moderna, sino que además, fueron delimitados de manera convencional para facilitar su administración. Esto significa que, a pesar de utilizar información geológica, topográfica e hidrológica para delimitarlos; se empleó desacertadamente y de forma arbitraria el criterio geopolítico con el fin de coincidir los acuíferos con los límites estatales o municipales para simplificar la asignación de concesiones de agua subterránea.

4.3.3. Modelo y competencias en materia de prevención y control de la contaminación del agua subterránea: El papel de la CONAGUA.

En principio, la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que la responsabilidad de preservar y aprovechar el agua de manera sustentable junto con la protección de los ecosistemas acuáticos le corresponde al Estado y a los usuarios del agua, y que la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAT) realizará todas las acciones necesarias para controlar o evitar procesos de contaminación en las aguas nacionales (LGEEPA, art. 88).

Por otro lado, en el año 2006, la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN), a través del Semanario Judicial de la Federación y su Gaceta, establece como criterio jurisprudencial que la regulación del uso, aprovechamiento, extracción y descarga de las aguas del subsuelo es de competencia federal (Tesis P./J. 40/2006). En este sentido, la fracción I del artículo 9 de la LAN, faculta a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) –órgano desconcentrado de la SEMARNAT- para fungir como la autoridad en materia de cantidad y calidad de las aguas y su gestión a nivel nacional dentro del ámbito a la competencia federal.

Cabe destacar además, que la CONAGUA se organiza en dos modalidades. La primera es la nacional, y para el control y la prevención de la contaminación del agua subterránea tiene las siguientes funciones:

- Fungir como autoridad en materia de calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional.
- Formular la política hídrica del país y proponerla al Ejecutivo Federal a través de la Secretaría.
- Fomentar y apoyar los servicios públicos urbanos y rurales para alcantarillado, saneamiento, potabilización en el territorio nacional en coordinación con las entidades federativas y municipios.
- Integrar el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua, con la participación de los Organismos de Cuenca y en coordinación con las entidades federativas y con los Consejos de Cuenca.
- Proponer a la SEMARNAT las Normas Oficiales Mexicanas en materia hídrica.

La segunda modalidad corresponde al nivel Región Hidrológico-Administrativo, a través de los Organismos de Cuenca (OC). Su papel surge de la necesidad de descentralizar la gestión del agua en el país, y se caracterizan por ser unidades técnicas, administrativas y jurídicas, adscritas al titular de la CONAGUA y con carácter autónomo.

Las funciones de los OC en relación a la prevención y el control de la contaminación del agua subterránea son:

- Formular y proponer a la CONAGUA, la política hídrica regional, así como los programas por cuenca hidrológica o por acuífero.
- Preservar y controlar la calidad del agua y manejar las cuencas hidrológicas y RH que les correspondan.
- Integrar el Sistema Regional de Información sobre cantidad y calidad del agua en coordinación con las entidades federativas y Consejos de Cuenca.

Conforme a la LAN, la RHA, se define de acuerdo a criterios hidrológicos y puede estar integrada por una o varias regiones hidrológicas (RH). Éstas últimas se refieren a áreas conformadas en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, que tiene como fin agrupar y sistematizar información, así como el desarrollo de programas y acciones, etc., en relación con la ocurrencia del agua en calidad y cantidad; así como su explotación, aprovechamiento entre otros. Tanto en la RHA como en la RH, la cuenca hidrológica representa la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos.

La complejidad del modelo de gestión aumenta, considerando que la cuenca hidrológica se delimita a partir de un parteaguas o divisoria de las aguas conforme al artículo 3 de la LAN. Además, se estipula que la cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos constituyen las unidades de gestión de los recursos hídricos. Este rebuscamiento, implica que el agua superficial y el agua subterránea se regulen de manera separada; el primero por los conceptos de cuenca hidrológica y de RH, y el último por el concepto de acuífero, el cual no cuenta con referencia regional.

Contextualizando estas aseveraciones en el planteamiento de este trabajo, entonces se observa que la RHA XII “Península de Yucatán” existen cuatro acuíferos y cuatro RH. Si se analiza el trabajo de Bauer-Gottwein (2011) (Fig. 23) se observa que en éste la delimitación del acuífero abarcaría a la RHA XII, a gran parte de las RH presentes y a los acuíferos correspondientes. En este hilo lógico, resultaría factible que, una vez después de delimitar al acuífero de la Península de Yucatán bajo la teoría de Tóth (1963) y modificado las deficiencias en la normativa mexicana, éste pudiera ser considerado una RHA con una sola RH.

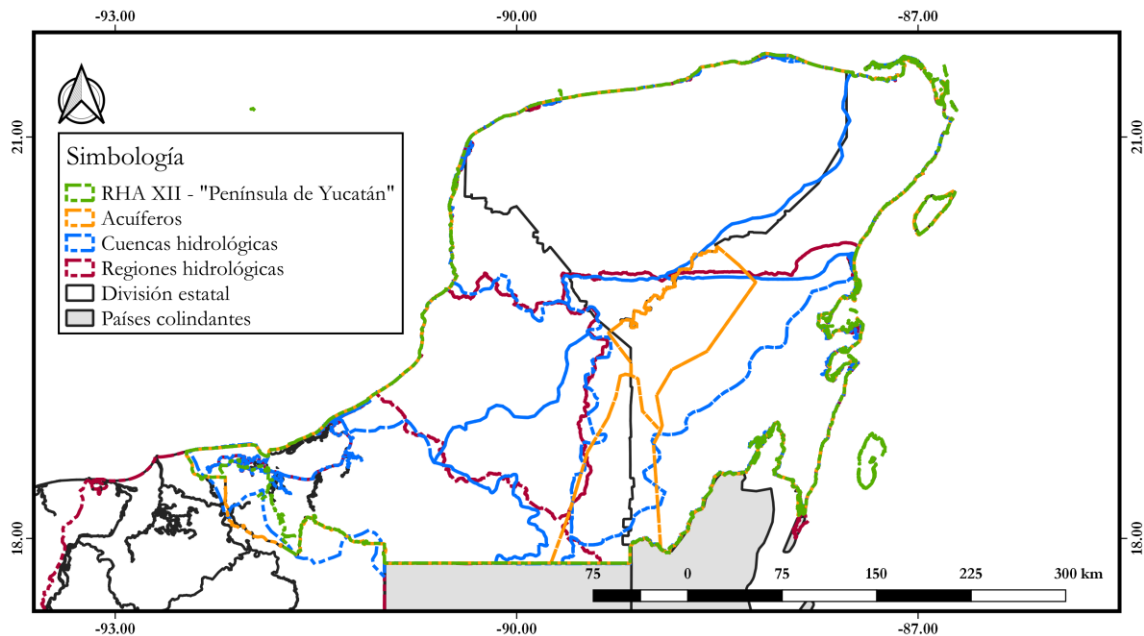


Figura 23. Complejidad espacial administrativa del agua subterránea en el área de estudio. Escala (1: 2,500,000). (EPSG: 4326 - WGS 84).

Recursos cartográficos empleados para su elaboración:
 CONAGUA (2007). 'Regiones Hidrológicas Administrativas (Organismos de Cuenca)'. México, D.F.
 CONAGUA – Subdirección General Técnica (2007) 'Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana'. México, D.F.
 CONAGUA (2008) 'Cuencas Hidrológicas' Escala 1:2500000. México.
 CONAGUA (2014) 'Condición de acuíferos 2014', escala 1:2500000, México, D. F.
 INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

Figura 23. Complejidad espacial administrativa del agua subterránea en el área de estudio.

4.3.4. Instrumentos relacionados a la prevención y el control de la contaminación del agua subterránea.

El artículo 88 BIS 1 de la LAN menciona que en aquellas localidades que no cuenten con sistemas de saneamiento, las personas físicas o morales que no generen metales pesados, cianuros, o tóxicos y su volumen de agua no exceda los 300 metros cúbicos mensuales y sean abastecidos por algún sistema de agua potable, podrán llevar a cabo sus descargas de aguas residuales con sujeción a las Normas Oficiales Mexicanas y con previo aviso por escrito a la Autoridad del Agua.

Se identificaron cinco Normas Oficiales Mexicanas (NOM) relacionadas con los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes presentes en el agua subterránea (Tabla 13). En principio y considerando el contexto del trabajo, se pensaría que la NOM-001-SEMARNAT-1996 sería la más adecuada para determinar el grado de contaminación del agua del subsuelo, ya que se documentó el impacto de las aguas residuales en los análisis de contaminantes. Sin embargo, está sujeta a limitaciones que impiden emplearla en este ámbito.

Tabla 13. Normas Oficiales Mexicanas que establecen LMP de contaminantes en el agua.

Norma Oficial Mexicana	Nombre	Breve descripción del objetivo y campo de aplicación
NOM-001-SEMARNAT-1996	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales	Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas.
NOM-002-SEMARNAT-2006	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.	Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reúso.
NOM-014-CONAGUA-2003	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada	Obras nuevas y existentes planeadas de recarga artificial que descarguen aguas tratadas y que incrementen el volumen de agua en los acuíferos.
NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Establece los límites máximos permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano. Aplica para los sistemas de abastecimiento privados y públicos y personas físicas o morales que la distribuyan.

En primera instancia cabe destacar que conforme a su campo de aplicación, este instrumento norma los LMP de contaminantes en aguas y bienes de propiedad nacional, por lo que si se considera el párrafo V del artículo 27 de la CPEUM, entonces su cumplimiento estaría fuera del alcance para los problemas de contaminación en el agua subterránea.

Además, esta NOM considera cuatro tipos de cuerpos receptores: ríos, embalses (ya sean naturales o artificiales), aguas costeras y suelo. Como se observa, los acuíferos no forman parte de estos cuerpos receptores precisamente por el régimen de propiedad del agua subterránea plasmado en la Constitución.

Se pensaría también, que un acuífero podría ser considerado como un embalse natural, ya que éste es definido en la NOM como un vaso de formación natural que es alimentado por uno o varios ríos, o agua subterránea o pluvial. El dilema en el empleo de este criterio, radica en que la definición de embalse para este caso es sumamente ambigua.

Esta aseveración se fundamenta porque la NOM-001-SEMARNAT-1996 se encuentra vinculada con el capítulo XIV de la Ley Federal de Derechos (LFD), que lleva por nombre “Derecho por Uso o Aprovechamiento de Bienes de Dominio Público de la Nación como Cuerpos Receptores de las Descargas de Aguas Residuales”.

Las definiciones plasmadas en el artículo 277 de la LFD logran diferenciar a los acuíferos de los embalses naturales, siendo los primeros los que mantienen una noción de conexión hidráulica, mientras que los embalses naturales se conciben como cuerpos de agua inertes, sin ninguna dinámica interna.

Finalmente, se destaca que en esta NOM tanto al arsénico como a los coliformes fecales se les establece un LMP; en el caso del nitrato, se sustituye el indicador por nitrógeno total. El problema identificado en relación al nitrógeno total y a los coliformes es la manera en la que son normados cuando el cuerpo receptor es el suelo.

Esto se debe a que para las descargas de nitrógeno total al suelo no es aplicable ningún LMP y para los coliformes fecales se establece que las descargas no deben superar los 2000 NMP 100mL⁻¹. Estas disposiciones surgen bajo la premisa de que el suelo actúa como un filtro que permite que las concentraciones de los contaminantes se vayan diezmando conforme van lixiviando hacia el manto freático.

Sin embargo, este criterio es sumamente cuestionable si se considera la naturaleza kárstica de la Península de Yucatán y sus suelos rocosos de poca profundidad. De este argumento deriva la necesidad de crear normas para cada acuífero que limiten las concentraciones de contaminantes en el agua subterránea y que éstas sean construidas a partir de las condiciones físicas que los caractericen.

Otra herramienta a destacar es el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), en donde se dispone la información relacionada al monitoreo de la calidad del agua en el territorio nacional. No obstante, el SINA tiene serias deficiencias que no permiten que éste sea un instrumento útil.

Principalmente, porque el SINA dispone información de manera separada. Es decir, para los acuíferos únicamente se reporta si hay salinización o intrusión salina y para las RHA solamente se emplean como indicadores la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), los coliformes fecales y los sólidos disueltos totales (SDT). El As no forma parte de sus indicadores pese a la relevancia que tiene su constante monitoreo para actuar ante alguna contingencia ambiental, o bien, para tomar precauciones y prevenir problemas de salud pública.

Si bien se cuentan con indicadores, resultan insuficientes para el análisis de los problemas de contaminación. Complementario a lo expuesto, cabe mencionar que los sitios de muestreo están desproporcionados espacialmente (i.e. cubren zonas muy específicas y hay falta de representatividad), que son actualizados con poca frecuencia, y que el acceso a su información es vía internet y se dispone en español, por lo que las personas que no estén en condiciones de consultarlo ya sea por su ingreso económico, su analfabetismo, o simplemente por hablar exclusivamente una lengua indígena, queden segregados.

4.3.5 La legislación de Yucatán ante los procesos de contaminación del agua subterránea

En la LAN, las atribuciones que tienen las entidades federativas en relación a la prevención y control de la contaminación no quedan del todo claras, ya que de manera explícita su papel queda limitado a los convenios de coordinación que se establecen entre la CONAGUA y sus Organismos de Cuenca. Esto se debe a que la LAN, aún no cuenta con el carácter de ley

general que permita delimitar competencias claras y precisas que deben tomar las entidades federativas en torno a la gestión del agua.

A pesar de las circunstancias evidenciadas, en la fracción I del artículo 14 BIS 6 de la LAN, la planificación hídrica estatal queda reconocida como un instrumento básico de la política hídrica nacional. En este sentido, la Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán (LPAMEY) establece en su artículo 109 que el Poder Ejecutivo de la entidad, por conducto de la autoridad competente, tiene la atribución de conocer y aplicar la política hídrica de acuerdo a las leyes nacionales y demás disposiciones aplicables. Sin embargo, es necesario destacar que la legislación yucateca no define aún los mecanismos para formular programas hídricos a nivel estatal, lo cual implica que la política hídrica referida en el artículo citado sea referida únicamente al Programa Hídrico Nacional y al Programa Hídrico de la RHA XII.

Sin embargo, es necesario recalcar que las condiciones geológicas del estado de Yucatán convierten lejanas las posibilidades de construir un sistema de drenaje por los costos implícitos. Es por esto que en el Reglamento de la LPAMEY (RLPAMEY) se dicta que las descargas de aguas residuales domésticas deben ser vertidas a fosas sépticas u otro sistema que garantice su tratamiento, que una vez tratadas, deben ser vertidas a campos de irrigación y absorción y que los Ayuntamientos tienen la obligación de reglamentar su construcción con el fin de abatir los problemas de contaminación (RLPAMEY, art. 195; RLPAMEY, art. 196; RLPAMEY, art. 199).

En este tenor, es necesario hacer mención de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán (JAPAY), que en su Ley Orgánica es definida como un organismo público descentralizado, dotado de capacidad y personalidad jurídica propia, que tiene por objeto la administración, operación, conservación ampliación y construcción de los sistemas de agua potable y alcantarillado en el Estado de Yucatán, en conformidad con el artículo 1.

La JAPAY, además, cuenta con un Consejo Directivo integrado por el gobernador del estado, un representante del municipio de Mérida y Telchac Puerto y tres representantes de los usuarios de estos servicios, nombrados por el Congreso del estado de Yucatán. El Consejo Directivo tiene como funciones operar y vigilar la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado en la entidad, aprobar proyectos de cobros por derechos de conexión y tarifas

para la prestación de servicios que preste la JAPAY, formular el presupuesto anual de ingresos y egresos, entre otros.

Por otro lado, en el artículo 10 de esta misma ley, se establece que los propietarios o poseedores de predios, negocios o establecimientos, hayen [*sic*] dentro de las redes de agua potable y alcantarillado deben solicitar ante la Junta la instalación del servicio de agua potable y descargas domiciliarias de alcantarillado, deberán solicitar a la Junta la instalación del servicio de agua potable y descargas domiciliarias de alcantarillado. Además, éste mismo estipula que estos servicios se llevarán a cabo únicamente por el personal autorizado de la Junta previo al pago del derecho de contrato.

Además cabe destacar que en el área de estudio, queda reconocido el organismo público descentralizado Sistema de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Sucilá, Yucatán, que tiene como fin construir, rehabilitar, ampliar, operar, administrar, conservar y mejorar el sistema de alcantarillado y de agua potable del municipio. Entre sus funciones destaca la atención de las denuncias y quejas de los usuarios con motivo de la prestación de los servicios y demás actividades en el municipio. Además, éste asiste a las sesiones del Consejo Directivo de la JAPAY, pero no tiene voto dentro de las sesiones.

El escenario planteado anteriormente nos conlleva a una situación en donde los organismos locales creados para la atención de quejas quedan excluidos de las tomas de decisiones que se tomen al respecto del tratamiento de las aguas residuales y de la prestación de servicio del agua potable, polarizando así los intereses de los municipios de Yucatán con mayor peso.

4.3.6. Las aguas residuales, sus propietarios y los municipios en el contexto de la contaminación del agua subterránea en Yucatán.

En el artículo 3° de la LAN, las aguas residuales son definidas como las *aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas*; y su régimen de propiedad se define bajo el mismo precepto constitucional del agua subterránea, ya que tampoco forma parte de la lista de las aguas de propiedad nacional y a que las disposiciones del CCF y del CC estatal apuntan a que éstas son de propiedad privada.

Dicho esto, se remite a lo expuesto en el párrafo quinto del artículo 4° de la CPEUM, en donde se establece que *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*

Sin embargo, la fracción III del artículo 115 especifica que los municipios están encargados de proveer como servicios públicos los servicios el drenaje, alcantarillado y el tratamiento y disposición de las aguas residuales. En el contexto del problema la normativa estatal dispone que las aguas residuales deben ser vertidas a sistemas que garanticen su tratamiento o a fosas sépticas.

En el capítulo III de este trabajo se identificó que las fosas sépticas son el mecanismo más recurrido para la disposición de las aguas residuales. Empero también se expuso la necesidad de que éstas recibieran un mantenimiento periódico para evitar su infiltración al acuífero. Además en el artículo IV se identificó la ausencia de NOMs que establecieran los LMP de contaminantes de las descargas de aguas residuales en el agua subterránea.

El motivo de esclarecer el marco del tratamiento de las aguas residuales en este capítulo, radica en que la ausencia de sistemas de drenaje por la naturaleza geológica del estado de Yucatán, a las condiciones de marginación y pobreza de los municipios del área de estudio, y que el DHAS debe ser asequible, pone en evidencia la necesidad de buscar mecanismos mediante los cuales el municipio tome acciones para intervenir en el tratamiento de las aguas residuales que se disponen en fosas sépticas, como por ejemplo a través de programas de financiamiento para incentivar el mantenimiento de las fosas sépticas.

4.3.7. La participación ciudadana y los problemas de contaminación del agua subterránea

Tal como se consagra en el texto constitucional, la participación ciudadana debe ser considerada para el cumplimiento del DHAS. Con este precepto, es necesario mencionar que en la LAN no existe ningún esquema de participación ciudadana, sino de usuarios del agua a través de los Consejos Consultivos de Agua, figuras con las que cuentan los Organismos de Cuenca que son integrados por representantes designados por algunas Secretarías de Estado y por representantes de las presidencias municipales que correspondan en conformidad con la

fracción VII del artículo 12 BIS 2 de la referida ley. Además es éste mismo se establece que se contará con un representante designado de entre los representantes de los usuarios ante él o los Consejos de Cuenca existentes en la RHA que corresponda.

Sin embargo, cabe aclarar que existe una gran diferencia en la manera en que se conforman los Consejos Consultivos, puesto a que los representantes de las Secretarías y presidencias municipales cuentan con voz y voto mientras la participación del representante de los usuarios, o del Consejo de Cuenca sólo cuenta con voz.

En cuanto a los Consejos de Cuenca, éstos son definidos en la fracción XV del artículo 3 de la LAN como Órganos colegiados de integración mixta, que serán instancia de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre "la Comisión", incluyendo el Organismo de Cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal o municipal, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrológica o región hidrológica. Éstos se integran según las disposiciones del artículo 13 BIS en donde destaca el hecho de que al menos el 50% debe estar integrado por representantes de usuarios del agua en diferentes usos y a organizaciones ciudadanas o no gubernamentales. Resulta relevante a su vez comentar que los Consejos de Cuenca, así como de los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) en los que se apoyan no tienen un papel de carácter vinculante, ya que las funciones que se les asignan dentro de la LAN son meramente enunciativas. Cabe resaltar además que ni en la LAN ni en su reglamento queda bien establecido la naturaleza de los COTAS, implicando una función difusa de este actor.

Pese a esto, tanto la existencia de los Consejos de Cuenca y los COTAS toman una gran relevancia en lo que respecta al problema de contaminación en el área de estudio, ya que significa que contamos con actores que pueden involucrarse en la formulación de estudios socioeconómicos y culturales, así como proveer el conocimiento técnico – científico que permitiría elaborar programas que busquen prevenir y controlar la contaminación del agua subterránea.

4.3.8. El cumplimiento del DHAS como asunto de seguridad nacional

La fracción I del artículo 14 BIS 5 de la LAN hace una precisión crucial en el contexto del trabajo, ya que reconoce al agua como un asunto de seguridad nacional. El referente conceptual sobre ésta última se encuentra en el artículo 3° de la Ley de Seguridad Nacional (LSN), y es definida como *un conjunto de acciones de manera inmediata destinadas a mantener la integridad, estabilidad y permanencia del Estado Mexicano*.

No es sorpresa que un recurso tan imprescindible, que cuyo derecho a su acceso y saneamiento haya sido plasmado en la CPEUM, adquiera un reconocimiento de esta magnitud en el marco normativo. Sin embargo, existen dos conceptos a considerar para que el agua tome forma de un asunto de seguridad nacional: el Estado y la Nación.

El Estado es definido por Acosta-Romero (1981) como la organización política soberana de una sociedad humana establecida en un territorio determinado, bajo un régimen jurídico, con independencia y autodeterminación, con órganos de gobierno y de administración que persiguen determinados fines mediante actividades concretas.

En relación a la prevención y control de la contaminación del agua y conforme a la Constitución, la figura del Estado toma lugar como el responsable de que la rectoría del desarrollo nacional sea sustentable, disposición plasmada en el artículo 25 de la Carta Magna; así como quien debe garantizar el DHAS, como se plantea en el párrafo VI del artículo 4°.

La necesidad de ahondar en estos dos asuntos radica en que, hasta el momento, entender al Estado como la figura responsable del cumplimiento del DHAS conlleva a una situación sumamente difusa, puesto a que en la legislación las tareas que implican el cumplimiento de este derecho se encuentran repartidas entre distintos actores gubernamentales y no definen a un actor institucional con las capacidad explícita de atender específicamente esta labor.

Por otro lado, la Nación es definida por, Moto-Salazar (2007) define a la Nación como una comunidad social unida por una serie de factores culturales, ideológicos y necesidades propias que puede diferenciarse de otros grupos humanos y que se perpetúa a lo largo del tiempo. En este sentido y en el contexto del trabajo, se entiende que la Nación se compone de la sociedad mexicana.

Este hilo debe ser contrastado con el párrafo V del artículo 27 de la CPEUM, pues conforme al análisis dispuesto en la sección 4.3.1 de este trabajo de investigación queda claro que el agua subterránea no es un bien de la Nación, sino que los dueños de los predios pueden alumbrarla a salvedad de las disposiciones del Ejecutivo Federal. Más allá de lo incoherente que es imponerle la delimitación de un predio al agua del subsuelo, resulta preocupante que este recurso pueda ser alumbrado sin importar la carga de contaminantes que presente, más aún sin un estándar normativo y de información relacionada a su calidad.

Ante este escenario, se necesita que el agua subterránea sea reconocida por la Constitución como un bien Nacional, es decir, de (y para) los mexicanos. La nacionalización de las aguas del subsuelo representaría un paso significativo para que la normativa comience a replantear el marco de gestión del agua subterránea así como de los mecanismos para prevenir y controlar su contaminación.

Capítulo V: Integración y conclusiones

5.1. Integración y conclusiones

El enfoque interdisciplinario de este trabajo de investigación mostró que la integración del contexto hidrogeoquímico, socioeconómico y de la aplicación de la normativa relacionada a la prevención y control de la contaminación, permitió profundizar en el entendimiento de los diversos actores involucrados en los procesos de contaminación en el área de estudio.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, en el agua subterránea del área de estudio se evidenciaron los procesos de evaporación en dirección suroeste - noroeste. El análisis de los isótopos del agua indicó que el origen del agua subterránea en la porción sur del área de estudio era pluvial.

Cabe precisar que, aunque en términos generales, se haya determinado que la evolución hidrogeoquímica en el área de estudio se propicie de igual manera en dirección suroeste – noreste; se derivó la hipótesis de que existieran patrones de evolución hidrogeoquímica que permitirían identificar flujos independientes, lo cual es común en zonas kársticas. Con esto en mente se destacó la necesidad de aumentar la extensión del área de estudio así como la densidad de puntos de muestreo.

Por otro lado, se expuso que los patrones de uso de suelo en el área de estudio, se encuentran vinculados a la contaminación del agua subterránea; ya que los asentamientos humanos y las actividades pecuarias se presentan como fuentes de nitrato y coliformes fecales para los sitios del estudio.

Sin embargo, se recalcó la necesidad de aumentar la densidad de puntos de muestreo y de incluir otros análisis químicos, hidrogeológicos y geofísicos que permitirán profundizar el análisis de los procesos de contaminación en el área de estudio.

En general, el análisis normativo evidenció la necesidad de replantear el marco legal en el que se sustenta la prevención y el control de la contaminación del agua subterránea; ya que estos no son aplicables, no responden al verdadero funcionamiento del agua subterránea o presentan lagunas jurídicas que representan obstáculos para asegurar el DHAS.

Por otro lado, la legislación analizada no establece de manera clara las diferencias entre la calidad del agua y la contaminación, aunado al hecho de que se carece de NOM's que determinen los LMP de contaminantes en el agua subterránea y que el SINA no provee información suficiente sobre su calidad.

Además, el modelo actual de gestión del agua ha llevado a que se gestionen por separado los acuíferos y las cuencas, promoviendo así que los primeros carezcan de referencia espacial regional y los esfuerzos de manejo se vean mermados.

Por otro lado, se observa que es el ámbito federal el cual determina en gran medida las acciones para prevenir y controlar la contaminación del agua subterránea, mientras que el papel del estado de Yucatán y de la ciudadanía queden limitados por la existencia de lagunas legales o de medidas que no permiten su participación de manera adecuada.

También se recalcó que si bien las condiciones geológicas del área de estudio no permiten la construcción de una red de drenaje, los municipios busquen alternativas para que intervengan proactivamente en la disposición y tratamiento de las aguas residuales.

Igualmente se demostró que el régimen de propiedad de las aguas subterráneas deriva a que los propietarios puedan alumbrar el agua subterránea dentro de sus predios, a salvedad de las disposiciones del Ejecutivo Federal, sin importar su calidad, lo que significa un riesgo a la salud para la población del área de estudio.

Finalmente, que el marco normativo relacionado con la prevención y control de la contaminación del agua subterránea no permite que se asegure el DHAS, en virtud de que no existe un cuerpo institucional que tenga explícitamente dicha función y a las lagunas y deficiencias en la legislación.

5.2. Propuestas derivadas del trabajo de investigación.

En este apartado se hace un resumen de las propuestas y acciones a desarrollar para ampliar el conocimiento relacionado a los procesos de contaminación así como para su atención, las cuales son:

- Se propone realizar nuevamente este estudio como un programa de monitoreo en la zona pero incrementando la extensión del área de estudio así como la densidad de estaciones de muestreo para que los procesos de contaminación sean analizados a mayor escala y con mayor representatividad.
- Se enfatiza la necesidad urgente de desarrollar estudios hidrogeológicos, químicos y geofísicos en el área de estudio para profundizar el conocimiento relacionado a la dinámica del agua subterránea y a su interacción con los contaminantes estudiados en este trabajo de investigación.
- Se propone implementar el uso de otros indicadores químicos para la determinar de manera específica el origen de las fuentes de contaminación por nitrato y coliformes fecales, tales como la proporción $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ y los esteroides fecales.
- Es necesario reformar el párrafo V del artículo 27 de la CPEUM en donde se nacionalicen las aguas del subsuelo con el fin de formular estrategias para asegurar la prevención y control de su contaminación como un asunto de seguridad nacional.
- Se propone dotar de la competencia necesaria a un cuerpo institucional de asegurar el cumplimiento del derecho humano al agua y al saneamiento con los mecanismos adecuados, con el fin de asegurar este derecho.
- Se sugiere modificar la delimitación oficial de los acuíferos en México considerando única y estrictamente la teoría de la hidrogeología moderna para que las acciones de prevención y control de la contaminación del agua subterránea cobre sentido en una realidad hidrogeológica.
- Es necesario expedir una Ley General de Aguas que ofrezca una verdadera descentralización de la gestión del agua, que disponga de manera específica el papel de las entidades federativas en torno a la gestión del agua.
- Se impone el reconocer a la Región Hidrológica Administrativa XII “Península de Yucatán” como un solo acuífero y de tipo kárstico, para que su planificación y programación atienda a su vulnerabilidad ante los procesos de contaminación y a la existencia de flujos preferenciales por donde transitan los contaminantes.

- Se enfatiza la necesidad de formular una Norma Oficial Mexicana que establezca los límites máximos permisibles de contaminantes en el acuífero de la Península de Yucatán atendiendo a sus condiciones hidrogeoquímicas, físicas y socioeconómicas.

- Se propone replantear la manera en la que el Sistema Nacional de Información del Agua dispone la información sobre la calidad del agua subterránea, estableciendo una periodicidad continua (de manera bimestral, como mínimo), homogeneizando y aumentando los sitios de monitoreo e incluyendo como indicador al nitrato, arsénico y otros contaminantes.

- Se sugiere desarrollar programas municipales que busquen, ya sea a través de subsidios o de otras alternativas infraestructurales, para que las viviendas del municipio dispongan de sus aguas residuales y se asegure su tratamiento.

- Es necesario buscar acuerdos entre los productores pecuarios y el municipio para la disposición y tratamiento de los residuos fecales del ganado bovino del área de estudio para prevenir la contaminación generada por dicha actividad.

5.3. Alcances del trabajo de investigación y oportunidades de investigación.

Como se hizo mención en el capítulo I, es importante recalcar que este trabajo constituye un primer esfuerzo por abordar de manera integral el análisis de los procesos de contaminación en el área de estudio. Sin embargo, es necesario precisar lo siguiente:

- La colecta de datos tomó lugar en septiembre de 2016, durante la temporada de lluvias. Dado a que la dinámica del agua subterránea se encuentra influenciada por los patrones climáticos, resulta imperante analizar los procesos de contaminación durante la temporada de estiaje de igual manera.

- Las muestras de agua fueron tomadas a menos de 0.5 m de profundidad del manto freático, por ello, para tener un mejor espectro de la situación del acuífero resulta necesario realizar muestreos en lo vertical.

- Cabe mencionar que el arsénico, el nitrato y los coliformes fecales son solamente algunos contaminantes que pueden ser analizados, por lo que es menester incluir

estudios sobre compuestos organoclorados, elementos potencialmente tóxicos, contaminantes emergentes, hidrocarburos, así como de otros microorganismos bacteriológicos y virológicos.

- En este mismo sentido, se recalca que en este trabajo no se consideró la contaminación por residuos sólidos. Es sumamente necesario que las futuras investigaciones consideren tomar en cuenta la presencia de rellenos sanitarios o de basureros clandestinos, así como el empleo de los indicadores pertinentes que permitan el entendimiento del problema.

- Finalmente, la naturaleza interdisciplinaria de este trabajo permite que se aborden otros temas que contribuyan al análisis de los procesos de contaminación así como para encontrar soluciones que busquen prevenirlos y controlarlos. De esta forma resulta menester desarrollar estudios económicos que aborden de manera más completa las condiciones del área.

- Considerando el párrafo anterior es fundamental realizar trabajos que retraten cuestiones sobre percepción de riesgo ante la contaminación para que se puedan llevar a cabo acciones concretas para evitar la contaminación del agua subterránea.

Referencias

Bibliografía y mesografía

- Acosta-Romero, M. (1981). *Teoría General del Derecho Administrativo*. México: Porrúa.
- Adelana, M. S. (2014). Introduction to hydrogeochemistry, environmental impacts, and management practices. En M. S. Adelana, & M. S. Adelana (Ed.), *Groundwater: Hydrogeochemistry, environmental impacts and management practices* (págs. 1-10). Nova Science Publishers.
- Agudelo C, R. M. (2005). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 23(1), 91-102.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., O., F., & Ihl, T. (2016). Density of karst depressions in Yucatan State, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2), 51-60.
- Árcega-Cabrera, F., Velázquez-Tavera, N., Fargher, L., Derrien, M., & Noreña-Barroso, E. (2014). Fecal sterols, seasonal variability, and probable sources along the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of contaminant hydrology*(168), 41-49.
- Australia Government. Geoscience Australia. (2013). Groundwater Dependent Ecosystems. Recuperado el 14 de abril de 2018, de <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/water/groundwater/understanding-groundwater-resources/groundwater-dependant-ecosystems>
- Bartram, J., & Pedley, S. (1996). Microbiological analyses. En OMS, *Water quality monitoring - A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. UNEP/WHO.
- Batllore-Sampedro, E. A. (2016). Condiciones actuales del agua subterránea en la Península de Yucatán. En M. Chávez-Guzmán (Ed.), *El manejo del agua a través del tiempo en la península de Yucatán* (págs. 201-227). México, México: Universidad Autónoma del Estado de Yucatán, Centro de Estudios Dr. Hideyo Noguchi, Unidad de Ciencias Sociales, Fundación Gonzalo Río Arronte IAP, Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.

- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507-524.
- Bonet, F., & Butterlin, J. (1962). Stratigraphy of northern part of the Yucatan Peninsula. Nueva Orleans: New Orleans Geological Society.
- Bu, H., Zhang, Y., Meng, W., & Song, X. (2016). Effects of land-use patterns on in-stream nitrogen in a highly polluted river basin in Northeast China. *Science of the Total Environment*, 553, 232-242.
- Butterlin, J., & Bonet, F. (1960). Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán. Ciudad de México: Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- Carmona-Lara, M. d. C. A., Carrillo-Rivera, J. J., Hatch-Kuri, G., Huizar-Álvarez, R., & Ortega-Guerrero, M. A. (2017). Ley del Agua Subterránea. Una propuesta. Ciudad de México: UNAM, IGg, IGI, CISAN, Centro de Geociencias, IIJ.
- Carrillo-Rivera, J., & Domínguez, J. (2007). El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. En A. Mayer (Ed.), *Congreso Internacional "Hacia la conmemoración del Bicentenario de la Independencia y el Centenario de la Revolución Mexicana. Retos y perspectivas"*. Ciudad de México: UNAM.
- CDESC. (2003). Observación general N° 15 (2002). El derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales) (págs. 1-19). Ginebra: Organización de las Naciones Unidas.
- Clark, I. (2015). Groundwater Geochemistry and Isotopes. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- CONAGUA. (2016). Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento. Edición 2016. México: CONAGUA .
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.
- Cubas, F., Llano, M., & de Rosenzweig, L. d. (7 de agosto de 2017). El misterio del agua subterránea. Obtenido de agua.org.mx: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/El-misterio-del-agua-subterranea-en-Mexico.pdf>

- Derrien, M., Árcega-Cabrera, F., Velázquez-Tavera, N., Kantún-Manzano, C., & Capella-Vizcaíno, S. (2015). Sources and distribution of organic matter along the Ring of Cenotes, Yucatan, Mexico: Sterol markers and statistical approaches. *Science of the Total Environment*, 511, 223-229.
- Eamus, D., & R., F. (2006). Groundwater-dependent ecosystems: the where, what and why of GDEs. *Australian Journal of Botany*, 54(2).
- Eastmond, A., & García de Fuentes, A. (2010). Impacto de los sistemas agropecuarios sobre la biodiversidad. En R. Durán, & M. Méndez (Edits.), *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (págs. 98-104). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Epstein, S., & Mayeda, T. (s.f.). Variation of O18 Content of Waters from Natural Sources. *Geochemica et Cos- mochimica Acta*, 213-224.
- Escolero, O. A., Marín, L. E., Steinich, B., & Pacheco, J. (2005). Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan example. *Landscape and Urban Planning*, 51(1), 53-62.
- García-Gil, G., & Graniel-Castro, E. (2010). Geología. En R. Durán, & M. Méndez (Edits.), *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (págs. 4-6). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Graniel-Castro, E. (2010). Hidrología. En R. Durán, & M. Méndez (Edits.), *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (págs. 12-13). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Halifax. (3 de agosto de 2017). Lake water monitoring & sampling program review. Obtenido de <https://www.halifax.ca/sites/default/files/documents/city-hall/standing-committees/170803essc1211pres.pdf>
- Herrera-Silveira, J. A. (1994). Correlaciones de parámetros hidrobiológicos de la Laguna de Celestún, Yucatán. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*.
- INEGI. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Yucatán 2017. México: INEGI.
- Ishii, S., & Sadowsky, M. J. (2008). Escherichia coli in the environment: Implications for water quality and human health. *Microbes and Environments*, 23(2), 101-108.

- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72.
- Kantún-Manzano, C., Árcega-Cabrera, F., Derriene, M., Barroso-Noreña, E., & Herrera-Silveira, J. A. (2018). Submerged groundwater discharges as source of fecal material in protected karstic coastal areas. *Geofluids*.
- Kendall, C. (1998). Tracing nitrogen sources and cycling in catchments. En C. Kendall, & J. J. McDonnell, *Isotope tracers in catchment hydrology* (págs. 519-576). Amsterdam: Elsevier Science.
- Klassen, C. D. (2008). *Casarett and Doull's Toxicology: the basic science of poisons*. Estados Unidos: McGraw Hill.
- Lin, H., Earle, J., & Downing, L. (2007). Isotopes. Recuperado el 4 de octubre de 2017, de Cornell Center for Materials Research: <http://www.ccmr.cornell.edu/wp-content/uploads/sites/2/2015/11/isotopes.pdf>
- Mazor, E. (2004). *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology* (Tercera ed.). Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- Mellor, J. E., Smith, J. A., Samie, A., & Dillingham, R. A. (2013). Coliform sources and mechanism for regrowth in household drinking water in Limpopo, South Africa. *Journal of Environmental Engineering*, 139(9), 1152-1161.
- Mifflin, M. D. (1968). *Delinication of Ground-Water Flow Systems in Nevada*. Nevada: Center for Water Resources Research.
- Moto-Salazar, E., & Moto, J. M. (2007). *Elementos de Derecho* (Quincuagésima ed.). México: Porrúa.
- Nava-Galindo, V. A. (2015). *Percepción, conocimiento local y descripción de la calidad del agua de cenotes de interés turístico y recreacional*. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ecología Humana. Mérida: CINVESTAV.

- Nordstrom, D. K., McCleskey, R. B., & Ball, J. W. (2008). Sulfur geochemistry of hydrothermal waters in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate waters. USGS Geological Survey, 191-207.
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Nitrate and nitrite in drinking water. WHO.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Arsenic. Recuperado el 2018, de World Health Organization: <http://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Organización de las Naciones Unidas. (2014). El derecho humano al agua. Recuperado el 2018, de ONU: http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
- Orellana-Lanza, R., Espadas-Manrique, C., Conde-Álvarez, C., & Gay-García, C. (2009). Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Recuperado el abril de 23 de 2017, de <http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/atlas-cam-bioclimatico/index.php>
- Oxford. (2018). English Living Oxford Dictionaries. Recuperado el 2018, de <https://en.oxforddictionaries.com/definition/pollution>
- Pacheco-Ávila, J. G., & Cabrera-Sansores, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47-54.
- Pacheco-Ávila, J., Sansores-Cabrera, A., & Pérez-Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(2), 165-179.
- Paull, C. K., Caress, D. W., Gwizada, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Lundsten, E., Anderson, K., & Sumner, E. J. (2014). Cretaceous-Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico. *Marine Geology*, 357(1), 392-400.
- Pérez-Ceballos, R., & Pacheco-Ávila, J. G. (2004). Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería Revista Académica*, 8(1), 33-42.
- Perry, E., Velázquez-Oliman, G., & Sockí, R. A. (2003). Hydrogeology of the Yucatan Peninsula. En S. Fedick, M. Allen, J. Jiménez-Osornio, & A. Gómez-Pompa (Edits.),

- The Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface* (págs. 115-138). Nueva York: Food Products Press.
- Picone, L. I., Andreoli, Y. E., Costa, J. L., Aparicio, V., Crespo, L., Nanninni, J., & Tambasio, W. (2003). Evaluación de nitratos y bacterias coliformes en pozos de la cuenca alta del arroyo pantanoso. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 99-110.
- Polemio, M., Casarano, D., & Limoni, P. P. (2009). Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Pulido-Bosch, A. (2007) Nociones de hidrogeología para ambientólogos. Universidad de Almería. 492 pp.
- Ravelo-Cervantes, J. I. (2006). Exploración geofísica del acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., & Richards, K. (2009). Arsenic pollution: A global synthesis. Wiley-Blackwell.
- Rodríguez, S., Gauna, L., Martínez, G., Acevedo, H., & Romero, C. (2012). Relación del nitrato sobre la contaminación bacteriana del agua. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 111-119.
- Scholten, M. C., Foekema, E. M., Dokkum, H. P., Kaag, N. H., & Jak, R. G. (2005). Eutrophication management and ecotoxicology. Springer.
- SEDESOL (2016a). Catálogo de localidades. Municipio de Calotmul. Recuperado el 25 de octubre de 2017 de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=31&mun=008>
- SEDESOL (2016b). Catálogo de localidades. Municipio de Espita. Recuperado el 25 de octubre de 2017 de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=31&mun=032>

- SEDESOL (2016c). Catálogo de localidades. Municipio de Panabá. Recuperado el 25 de octubre de 2017 de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=31&mun=057>
- SEDESOL (2016d). Catálogo de localidades. Municipio de Sucilá. Recuperado el 25 de octubre de 2017 de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=31&mun=070>
- SEDESOL (2016e). Catálogo de localidades. Municipio de Tizimín. Recuperado el 25 de octubre de 2017 de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=31&mun=096>
- Secretaría de Economía. (2018). Información Económica y Estatal. Yucatán. Recuperado el 30 de diciembre de 2018, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/305343/yucatan_2018_02.pdf
- SIAP. (2017a). Estadística de la Producción Pecuaria de 2016. Recuperado el 29 de diciembre de 2017, de <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- SIAP. (2017b). Estadísticas de la Producción Agrícola de 2016. Recuperado el 29 de diciembre de 2017, de Datos abiertos: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Simental-Franco, V. A. (30 de noviembre de 2018). El derecho humano al agua. *Coloquio: Regulación de costas y aguas subterráneas: Temas pendientes en la legislación mexicana*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Todd, D. K. (2005). Groundwater Hydrology (Tercera ed.). (L. W. Mays, Ed.) Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. .
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795-4812.

- Tredoux, T., & Talma, A. S. (2006). Nitrate pollution of groundwater in southern Africa. En Y. Xu, & B. Usher, *Groundwater pollution in Africa* (págs. 15-36). Países Bajos: Taylor & Francis, UNEP.
- Urresti-Estala, B., Vadillo-Pérez, I., Jiménez-Gavilán, P., Soler, A., Sánchez-García, D., & Carrasco-Cantos, F. (2015). Application of stable isotopes ($\delta^{34}\text{S-SO}_4$, $\delta^{18}\text{O-SO}_4$, $\delta^{15}\text{N-NO}_3$, $\delta^{18}\text{O-NO}_3$) to determine natural background and contamination sources in the Guadalhorce River Basin (southern Spain). *Science of the Total Environment*, 46-57.
- USGS. (2016a). Groundwater. What is groundwater? Recuperado el 5 de junio de 2017, de The USGS Water Science School: <https://water.usgs.gov/edu/earthgw.html>
- USGS. (2016b). Concepts of groundwater, water table and flow systems. Recuperado el 2 de abril de 2017, de <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/htdocs/boxa.htm>
- Weidie, A. E. (1985). Part I: Geology of Yucatan Peninsula. En W. C. Ward, A. E. Weidie, W. Back, & A. P. Andrews, *Geology and hydrogeology of the Yucatan and quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula* (págs. 1-19). Nueva Orleans: New Orleans Geological Society.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). Ground water and surface water. A single resource. U. S. Geological Survey Circular 1139. Denver: U. S. Government Printing Office.
- Zektser, I. S., & Everet, L. G. (2004). Groundwater resources of the world and thier use. Saint-Denis: UNESCO.

Legislación y sentencias jurisprudenciales

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917, México

Código Civil Federal, 1928, México.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988, México.

Ley Federal de Derechos, 1981, México.

Ley de Aguas Nacionales, 1992, México.

Ley de Seguridad Nacional, 2005, México

Ley Orgánica de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán, 1982, México.

Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán, 2010, México.

Reglamento de la Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán, 2011, México.

Tesis P./J. 40/2006, Semanario Judicial de la Nación y su Gaceta, Novena Época, t. XXIII, marzo de 2006, p. 1483.

Recursos empleados para la elaboración del material cartográfico

CONAGUA (2007). 'Regiones Hidrológicas Administrativas (Organismos de Cuenca)'. México, D.F.

CONAGUA – Subdirección General Técnica (2007) 'Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana'. México, D.F.

CONAGUA (2008) 'Cuencas Hidrológicas' Escala 1:2500000. México.

CONAGUA (2014) 'Condición de acuíferos 2014', escala 1:2500000, México, D. F.

INEGI, (2016). 'División política estatal 1:250000. 2015', escala: 1:250 000. edición: 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.. Obtenido de Cartografía geoestadística urbana y rural amanzanada. Cierre de la Encuesta Intercensal 2015. Aguascalientes, México.

INEGI (2016). 'Áreas geoestadísticas municipales, 2016', escala: 1:250000. Edición: 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

INEGI. (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1: 2500000.

INEGI (2017). Carta topográfica. Tizimín. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2017). Carta topográfica. Cancún. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2017). Carta topográfica. Cozumel. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI (2017). Carta topográfica. Mérida. Escala: 1: 250000. Edición 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.